



La rétro-conception de composants mécaniques par une approche "concevoir pour fabriquer"

Salam Ali

► To cite this version:

Salam Ali. La rétro-conception de composants mécaniques par une approche "concevoir pour fabriquer". Génie mécanique [physics.class-ph]. Université de Technologie de Troyes, 2015. Français. NNT : 2015TROY0018 . tel-03359624

HAL Id: tel-03359624

<https://theses.hal.science/tel-03359624>

Submitted on 30 Sep 2021

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

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

Thèse
de doctorat
de l'UTT

Salam ALI

La rétro-conception de composants mécaniques par une approche « concevoir pour fabriquer »

Spécialité :
Systèmes Mécaniques et Matériaux

2015TROY0018

Année 2015

THESE

pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR de l'UNIVERSITE
DE TECHNOLOGIE DE TROYES
Spécialité : SYSTEMES MECANQUES ET MATERIAUX**

présentée et soutenue par

Salam ALI

le 1^{er} juillet 2015

**La Rétro-conception de composants mécaniques
par une approche « concevoir pour fabriquer »**

JURY

M. B. EYNARD	ENSEIGNANT CHERCHEUR - HDR UTC	Président
M. P.-A. ADRAGNA	MAITRE DE CONFERENCES	Directeur de thèse
M. N. ANWER	MAITRE DE CONFERENCES	Examinateur
M. A. DURUPT	MAITRE DE CONFERENCES	Directeur de thèse
M. L. MATHIEU	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur
M. J.-P. PERNOT	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur

Personnalité invitée

M. H. ROWSON	INGENIEUR DE RECHERCHE
--------------	------------------------

Table des matières

Introduction générale	13
 I LA RETRO-CONCEPTION DANS UN CONTEXTE DE FABRICATION	 17
Introduction Partie 1	19
 1 Contexte et problématique	 21
1.1 Le contexte de l'étude	21
1.2 Les raisons industrielles de la rétro-conception	22
1.3 La veille technologique des logiciels du marché	26
1.4 Problématique de la thèse	30
1.5 Les hypothèses et la proposition d'une méthodologie	31
 2 État de l'art : La Rétro-Conception pour la fabrication	 35
2.1 État de l'art : les techniques de segmentation	36
2.1.1 La technique basée sur la régionalisation ou clusters de points	36
2.1.2 La technique par limite de frontières	39
2.1.3 Les techniques hybrides	41
2.1.4 Conclusion sur les techniques de segmentation	42
2.2 État de l'art : les méthodologies de la rétro-conception	45
2.2.1 Les systèmes basés sur la connaissance ou Knowledge based	45
2.2.2 Définition et rappel sur le concept d'entité	51

2.2.3	Les systèmes d'extraction d'entités ou Feature based	53
2.2.4	Conclusion sur les méthodologies de rétro-conception	57
2.3	État de l'art : la "conception pour la fabrication" dans un contexte de rétro-conception	59
2.3.1	Le choix des procédés et des matériaux	60
2.3.2	Analyse de fabricabilité au cours de la conception	65
2.3.3	Conclusion sur la « RC » vers les concepts de la « conception pour la fabrication »	69
2.4	État de l'art : De la rétro-conception pour la fabrication vers la mise en correspondance des formes « Shape Matching »	70
2.4.1	Les méthodes basées sur les graphes	72
2.4.2	Conclusion sur les méthodes de mise en correspondance	77
Conclusion Partie 1		81
 II REFM - REVERSE ENGINEERING FOR MANUFACTURING		 83
Introduction Partie 2		85
 3 Principe général de la méthode		 87
3.1	Démarche de la méthode REFM	87
3.2	Présentation détaillée des activités (IDEF0)	93
3.2.1	Phase de capitalisation	94
3.2.2	Phase de réutilisation	97
 4 Phase de capitalisation		 105
4.1	Processus global	105
4.2	La segmentation	107
4.2.1	La segmentation automatique, par accroissement de régions	107
4.2.2	La segmentation manuelle	107

4.2.3	La segmentation hybride	108
4.2.4	Formalisation de la technique de segmentation d'un nuage de points- A1 IDEF0	109
4.3	L'acquisition des connaissances de fabrication	110
4.3.1	Formalisation de la technique d'acquisition des connaissances de fabrication- A2 IDEF0	111
4.3.2	A21 : Acquérir les connaissances de la pièce et des procédés	112
4.3.3	A22 Générer le modèle CAO « fabrication »	129
5	Phase de réutilisation	137
5.1	Processus global	138
5.2	Récupérer les pièces similaires de la base de données	139
5.3	La génération d'un graphe d'adjacence	141
5.4	Mise en correspondance entre les graphes	142
5.5	Ajuster la gamme de la pièce en base	146
	Conclusion Partie 2	155
III	APPLICATION DE LA METHODE REFM SUR DES CAS INDUSTRIELS	159
	Introduction Partie 3	161
6	Support de frein	163
6.1	La phase de capitalisation	163
6.1.1	Segmenter le nuage de points	164
6.1.2	Sélectionner le brut et le matériau	164
6.1.3	Graphe de précédence des surfaces	165
6.1.4	Sélectionner les opérations d'usinage	166
6.1.5	Le graphe de précédence des opérations d'usinage et les phases	167
6.2	La phase de réutilisation	169

7 Boitier de différentiel	175
7.1 La phase de capitalisation	175
7.1.1 Segmenter le nuage de points	176
7.1.2 Sélectionner le brut et le matériau	176
7.1.3 Graphe de précédence des surfaces	176
7.1.4 Sélectionner les opérations d'usinage	177
7.1.5 Le graphe de précédence des opérations d'usinage et les phases	178
7.2 La phase de réutilisation	179
Conclusion Partie 3	185
Conclusion générale	191
Perspectives	193
Bibliographie	197
Résumé	207
Abstract	209

Table des figures

1.1	Cycle de vie d'un produit, positionnement de la RC.	22
1.2	Exemple de rétro-conception de l'imprimerie Voirin (Bernard <i>et al.</i> , 2007) : (a) une photo de l'imprimerie Voirin et (2) la maquette CAO de l'imprimerie Voirin.	23
1.3	Exemple de rétro-conception d'un bouchon de Delahaye (Nartz <i>et al.</i> , 2002).	23
1.4	La RC d'une matrice de dressage, le prototypage en bois modifié à gauche, le modèle CAO paramétré à droite.	24
1.5	La rétro-conception d'une barre de stabilisatrice (Durupt, 2010).	24
1.6	La rétro-conception d'une pompe de direction assistée (Urbanic <i>et al.</i> , 2008).	25
1.7	La RC d'une aube de turbine usée (Bagci, 2009).	25
1.8	Exemple de rétro-conception avec Geomagic TM	27
1.9	Exemple de rétro-conception avec CATIA TM	28
1.10	Exemple d'une pièce industrielle retro-conçue avec 3DReshaper TM	29
1.11	Exemple de regroupement de deux modèles en régions (Attene <i>et al.</i> , 2006). .	30
1.12	Le processus général de la méthode REFM.	33
2.1	Positionnement de l'état de l'art par rapport à la méthodologie REFM. . . .	36
2.2	Segmentation en deux sous maillages (Xiao <i>et al.</i> , 2011).	38
2.3	Deux niveaux de subdivisions de la structure octree (Wang & Tseng, 2004). .	38
2.4	Image filtrée par le filtre de Canny (Canny, 1986).	39
2.5	L'algorithme LDA basé sur les lignes du scan (Patane & Spagnuolo, 2002). .	40
2.6	Positionnement des techniques de segmentation pour REFM.	43
2.7	Positionnement des méthodologies de rétro-conception pour REFM.	46

2.8	Boite de vitesses à rétro-concevoir (VPERI, 2003).	47
2.9	Le processus de rétro-conception dans VPERI (VPERI, 2003).	48
2.10	le processus général de la méthodologie KBRE (Durupt, 2010).	49
2.11	Un nouveau cas de croisillon à retro-concevoir (Durupt, 2010).	50
2.12	Les AP de STEP utilisant des entités d'usinage (Scra, 2006).	53
2.13	Des exemples d'entités d'usinage (Scra, 2006).	54
2.14	L'interface du système REFAB (Thompson <i>et al.</i> , 1999).	54
2.15	La reconnaissance d'entités de tôlerie (Sunil & Pande, 2008).	56
2.16	Procédure de la rétro-conception (Bénière <i>et al.</i> , 2013).	57
2.17	Reconstruction d'une pièce mécanique (Wang <i>et al.</i> , 2012).	58
2.18	Exemple des pièces reconstituées par la méthode de (Wang <i>et al.</i> , 2012).	58
2.19	Positionnement de la conception de fabrication par rapport à REFM.	59
2.20	Définition schématique de la conception pour la fabrication (DFM) (van Vliet <i>et al.</i> , 1999).	60
2.21	Le classement des procédés de fabrication (Ashby <i>et al.</i> , 2013).	63
2.22	Sélection des procédés et des matériaux (Ashby <i>et al.</i> , 2004).	64
2.23	Graphe de sélection des matériaux en tenant compte du module d'Young et de la densité (Ashby <i>et al.</i> , 2013).	66
2.24	Graphe de sélection des matériaux en tenant compte de la ténacité à la rupture et de la limite d'élasticité (Ashby <i>et al.</i> , 2013).	66
2.25	Système de conception sous contraintes (Feng & Kusiak, 1995).	67
2.26	Architecture de la coquille de fabrication (Zhao & Shah, 2005).	68
2.27	Positionnement de la mise en correspondance par rapport à REFM.	70
2.28	Méthodes de mise en correspondance des formes (Tangelder & Veltkamp, 2008).	71
2.29	Définition du graphe de Reeb (Tierny <i>et al.</i> , 2006).	75
2.30	Exemple de mise en correspondance. Seuls les nœuds mis en correspondance sont montrés (Sundar <i>et al.</i> , 2003).	77
2.31	Conclusion, positionnement de l'état de l'art par rapport à la méthodologie REFM.	79

3.1	Le processus général de la phase de capitalisation.	88
3.2	Exemple d'un graphe de précédence des surfaces.	89
3.3	Méthodologie d'élaboration de la stratégie d'usinage.	90
3.4	Le processus général de la phase de réutilisation.	91
3.5	Graphe d'adjacence d'un pion de centrage.	92
3.6	Liens en base entre graphe de précédence et graphe d'adjacence.	92
3.7	Mise en correspondance des graphes d'adjacence.	93
3.8	Association partielle ou complète du graphe de précédence sur le cas d'étude à rétro-concevoir.	93
3.9	Génération de la gamme de fabrication du cas d'étude à rétro-concevoir. . .	94
3.10	L'activité principale A0-IDEF0 de la phase de capitalisation : Définir des gammes de fabrication.	95
3.11	La décomposition de A0-IDEF0 du processus global de la phase de capitalisation.	96
3.12	L'activité principale A0-IDEF0 de la phase de ré-utilisation : Définir des gammes de fabrication.	98
3.13	La décomposition de A0-IDEF0 du processus global de la phase de ré-utilisation.	100
3.14	Les cas d'études pour illustrer la phase de capitalisation : (a) Pion de centrage et (b) Chapeau de réducteur.	103
3.15	Les cas d'études pour illustrer la phase de réutilisation : (a) Pion de cen- trage (nuage de points STL, généré à partir d'une CAO) et (b) Chapeau de réducteur (nuage de points STL, généré à partir d'une CAO).	103
4.1	Le processus général de la phase de capitalisation.	106
4.2	L'algorithme de la segmentation automatique.	108
4.3	La décomposition de A0-IDEF0 du processus global de la phase de capitalisation.	109
4.4	Pion de centrage segmenté.	110
4.5	Chapeau de réducteur segmenté.	110
4.6	La décomposition de A2-IDEF0 : Acquérir les connaissances de fabrication. .	112
4.7	La décomposition de A21-IDEF0 : Acquérir les connaissances de la pièce et des procédés.	114
4.8	Le classement des procédés de fabrication (Ashby <i>et al.</i> , 2013).	116

4.9	Brut proposé par REFM pour le pion de centrage.	116
4.10	Brut proposé par REFM pour le chapeau de réducteur.	117
4.11	Exemple d'une dépendance entre deux surfaces représentée sous forme de graphe.	117
4.12	L'algorithme de libération de contraintes.	120
4.13	Exemples (a) d'un graphe de tolérance et (b) d'un graphe de précédence du pion de centrage.	121
4.14	Exemples (a) d'un graphe de tolérance et (b) d'un graphe de précédence du chapeau de réducteur.	122
4.15	Groupement des deux surfaces C1 et P2 dans un groupe nommé HF.	123
4.16	Groupement des deux surfaces C3 et P2 du chapeau de réducteur dans un groupe nommé HF.	123
4.17	Groupement des surfaces P3 et P6i du chapeau de réducteur dans un groupe nommé GF.	124
4.18	Groupement des deux surfaces C1 et P4 du chapeau de réducteur dans un groupe nommé IF.	124
4.19	Groupement des deux surfaces C4i et P11i du chapeau de réducteur dans un groupe nommé JF.	125
4.20	Graphe de précédence des opérations du pion de centrage.	126
4.21	Graphe de précédence des opérations du chapeau de réducteur.	126
4.22	Les différents types de posage (Paris, 1995).	127
4.23	Arborescence de fabrication, cas du pion de centrage.	128
4.24	Arborescence de fabrication, cas du chapeau de réducteur.	129
4.25	Gammes de fabrication (a) du pion de centrage et (b) du chapeau de réducteur.	130
4.26	la modélisation par entités peaux et squelettes (Durupt, 2010).	132
4.27	Identification d'une entité du chapeau de réducteur.	132
4.28	Entités d'usinage dans le chapeau de réducteur.	133
4.29	Gamme de fabrication du pion de centrage.	134
4.30	Gamme de fabrication du chapeau de réducteur.	134
5.1	Le processus général de la phase de réutilisation.	139

5.2	Pièce requête : pion de centrage.	139
5.3	Pièce requête : chapeau de réducteur.	140
5.4	Pièces associées à la famille « pion de centrage ».	140
5.5	Les graphes d'adjacence (a) de la pièce requête et (b) la pièce candidate du pion de centrage.	142
5.6	Les graphes d'adjacence (a) de la pièce requête et (b) la pièce candidate du chapeau de réducteur.	143
5.7	L'algorithme de mise en correspondance.	144
5.8	Meilleures combinaisons avec les scores.	146
5.9	Meilleure combinaison avec les scores.	146
5.10	Liens entre les graphes d'adjacences de la pièce requête et de la pièce candidate.	147
5.11	Première étape de la génération du graphe de précédence du pion de centrage.	148
5.12	La génération du graphe de précédence de la pièce pion de centrage.	149
5.13	(a) Graphe de précédence des surfaces et (b) graphe de précédence des opérations du pion de centrage.	150
5.14	Gamme de fabrication du pion de centrage.	151
5.15	(a) Graphe de précédence des surfaces et (b) graphe de précédence des opérations du chapeau de réducteur.	152
5.16	Gamme de fabrication du chapeau de réducteur.	153
5.17	Le processus global de REFM.	155
5.18	Diagramme de classes UML de la méthode REFM.	158
6.1	Support de frein : pièce physique, nuage de points et une mise en plan.	163
6.2	Nuage de points segmenté du support de frein.	164
6.3	Choix du matériau et du brut via le support de frein.	165
6.4	Graphe de précédence des surfaces du support de frein.	166
6.5	Les opérations d'usinage du support de frein.	167
6.6	Graphe de précédence des opérations et les phases.	168
6.7	Gamme de fabrication du support de frein.	169
6.8	support de frein à rétro-concevoir.	170

6.9	Récupérer les pièces similaires de la base de données.	170
6.10	Graphes d'adjacence de la pièce requête et la pièce en base.	171
6.11	Les meilleures combinaisons avec les scores.	172
6.12	Gamme de fabrication du support de frein.	173
7.1	Boitier de différentiel : pièce physique, nuage de points et une mise en plan. .	175
7.2	Nuage de points segmenté du boitier de différentiel.	176
7.3	Choix du matériau et du brut via le boitier de différentiel.	177
7.4	Graphe de précédence des surfaces du boitier de différentiel.	178
7.5	Les opérations d'usinage du boitier de différentiel.	179
7.6	Graphe de précédence des opérations et les phases.	180
7.7	Gamme de fabrication du boitier de différentiel.	181
7.8	Récupérer les pièces similaires de la base de données.	182
7.9	Graphes d'adjacence de la pièce requête et la pièce en base.	182
7.10	Les meilleures combinaisons avec les scores.	183
7.11	Gamme de fabrication du boitier de différentiel.	183
7.12	Schéma récapitulatif de la méthodologie REFM.	192

Introduction générale

Ce mémoire propose une méthode de rétro-conception (RC) de composants mécaniques dans un contexte de fabrication. Nous considérons, en effet, que la finalité majeure de la RC est la re-fabrication d'un produit, d'une pièce ou d'un composant. Or, le processus de rétro-conception, dans la littérature, permet d'abord de retrouver un modèle CAO pauvrement paramétré, les modifications sont difficilement réalisables. C'est seulement à partir de ce modèle CAO et l'utilisation de logiciel FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) qu'une gamme de fabrication est générée. Le modèle CAO initial étant un corps « non modifiable », aucunes actions de modifications ou de corrections ne peuvent être établies facilement. Par répercussion, la gamme de fabrication est très difficilement modifiable voire réalisable. De longues étapes manuelles de reconstructions géométriques et paramétriques sont nécessaires pour obtenir, en premier lieu, l'arborescence CAO dite « métier ». Cette arborescence modifiable permet par la suite d'établir la gamme FAO adaptée à des nouveaux procédés et processus de fabrication. De plus, il apparait également que la RC pour la fabrication est une activité récurrente ou routinière. En effet, de nombreuses pièces sans supports CAO sont encore produites à partir de prototypes ou d'anciens lots de production. Le cluster d'entreprises NOGENTECH (<http://www.cluster-nogentech.com>), de la région de Nogent (France) regroupant environ 50 entreprises des métiers de la Forge, de l'usinage des métaux, de la mise en forme des matières plastiques etc., a manifesté son intérêt à cette thématique de thèse, permettant de justifier l'aspect routinier de la RC.

Les résultats de recherche et de veilles technologiques ne permettent pas de réétudier une pièce d'un point de vue fabrication tout en considérant l'aspect récurrent.

Ce manuscrit élaborera une méthode de RC des pièces mécaniques qui intégrera directement les données fabrication. Elle est nommée REFM « Reverse Engineering For Manufacturing » et permet la RC des pièces en vue de les re-fabriquer. Une gamme de fabrication incluant les informations de type opérations d'usinage, posages, phases...est obtenue. Le niveau de détail de cette gamme s'apparente à un Avant Projet d'étude de fabrication. Une fois cette gamme générée, elle sera stockée afin d'être réutilisée sur des cas similaires.

La finalité de la méthode REFM est de réduire les temps d'analyse de fabrication tout en fiabilisant la stratégie d'usinage sortante.

L'intégration des contraintes métier dans le processus de RC fait naturellement penser aux concepts de Design For Manufacturing (DFM) et Knowledge Base Engineering (KBE). Les travaux de la littérature sur le DFM et KBE sont utiles pour aider à l'analyse de la fabrication de la pièce à rétro-concevoir. Néanmoins, la réutilisation de stratégies d'usinage afin de supporter le contexte récurrent fait naturellement penser aux travaux sur le « Shape Matching ». En effet, des travaux sur les descripteurs topologiques sont utiles pour « reconnaître » après numérisation de la pièce, la nature de cette dernière et ainsi appliquer la stratégie d'usinage similaire. Cette thèse propose donc, d'un point de vue scientifique, à trouver une zone de convergence entre deux domaines de recherche : la reconnaissance de formes (Shape Matching) et les méthodologies de gestion d'informations techniques (DFM et KBE).

Donc, nous visons dans cette thèse à proposer une nouvelle approche de RC dans un contexte d'usinage, et à développer un démonstrateur de rétro-conception qui permet de gérer les aspects récurrents de la rétro-conception en sauvant de nouveaux cas d'études et en réutilisant les anciens cas d'études connus.

L'ensemble de la proposition faite regroupe une méthode d'analyse de la fabrication, une méthode de capitalisation qui permet de réutiliser des gammes, une méthode d'appariement de la pièce à rétro-concevoir avec les pièces sauvées et une méthode de mise en correspondance des formes pour lier la stratégie d'usinage à la géométrie.

Les concepts de cette thèse ont été appuyés par des exemples industriels et implémentés dans un démonstrateur nommé « *REFM system* ». Ce démonstrateur n'est pas totalement fonctionnel mais permet d'évaluer la faisabilité et la crédibilité de la méthode présentée. Ce mémoire de thèse sera composé de trois parties :

Partie 1 : La rétro-conception dans un contexte de fabrication.

Le but de cette partie est de poser le cadre de l'étude, d'établir les raisons industrielles de la RC, d'exposer la problématique de la thèse et de proposer la démarche idéale de REFM. Nous établirons aussi un état de l'art sur les travaux existants du processus de rétro-conception et sur les différents concepts utilisés.

Partie 2 : REFM : Reverse Engineering For Manufacturing.

La partie 2 de ce mémoire présente le cœur du travail de recherche. Nous présentons dans cette partie, la démarche REFM (Reverse Engineering For Manufacturing). La méthode sera justifiée et illustrée par des cas d'études académiques.

Partie 3 : Application de la méthode REFM sur des cas industriels.

La partie 3 illustrera, par le biais d'un démonstrateur, la faisabilité et la validité de « *REFM system* » à travers deux cas industriels.

Nous finirons ce mémoire par la conclusion générale qui reprend les principaux résultats de cette recherche ainsi que les perspectives de ce travail.

Première partie

LA RETRO-CONCEPTION DANS UN CONTEXTE DE FABRICATION

Introduction Partie 1

La première partie de ce manuscrit pose le cadre d'étude de cette thèse et fait la synthèse de l'état de l'art sur les différents travaux de la bibliographie. Nous verrons que l'activité de rétro-conception peut être supportée par une approche DFM/KBE (Design For Manufacturing ; Knowledge Based Engineering) et par une méthode de mise en correspondance pour réutiliser une stratégie d'usinage pour la re-fabrication d'une pièce similaire.

Cette partie est décomposée en deux chapitres :

- **Contexte et problématique** : le contexte de l'étude, les domaines industriels concernés, les logiciels existants et les hypothèses délimitant le cadre d'étude seront énumérés.
- **Etat de l'art, La Rétro-Conception pour la fabrication** : les travaux de reconnaissance géométrique supports d'une activité de rétro-conception seront analysés. Ensuite, des études bibliographiques des méthodes de rétro-conception, de DFM/KBE et des méthodes de mise en correspondance des formes, seront exposées.

Chapitre 1

Contexte et problématique

Introduction Chapitre 1

Ce premier chapitre permettra de définir le contexte de cette thèse. Il sera organisé selon les sections suivantes :

- Le contexte de l'étude : la rétro-conception sera définie.
- Les raisons industrielles de la rétro-conception : les domaines de rétro-conception seront décrits dans cette section.
- La veille technologique des logiciels du marché : nous exposerons une veille technologique des logiciels de rétro-conception.
- Problématique de la thèse : nous exposerons la problématique et les objectifs de cette thèse.
- Les hypothèses et la proposition de la méthode : les hypothèses qui délimitent ce travail seront définies. Et le processus général de la méthode REFM sera exposé.

1.1 Le contexte de l'étude

La rétro-conception (RC) ou la rétro-ingénierie (en anglais : reverse engineering), est une activité qui peut être utilisée dans plusieurs domaines tels que l'ingénierie mécanique, électrique, informatique, médicale et bien d'autres (Xia, 2014). L'objet principal de la RC est l'analyse d'un produit existant (qui peut être un logiciel, une pièce mécanique, etc.) afin de produire une copie ou une version améliorée de celui-ci (Bernard *et al.*, 2010), (Gameros *et al.*, 2015). En ingénierie mécanique, la RC est l'activité qui consiste à réaliser des fichiers CAO (Conception Assistée par Ordinateur) à partir de l'objet physique. Plus précisément, la RC est le concept fondamental de la fabrication d'une pièce en se basant sur son modèle

original ou physique sans l'utilisation d'un dessin technique (Abella *et al.*, 1994).

Dans le domaine de la conception mécanique, la RC fait partie d'un processus global débutant par la digitalisation de la pièce d'étude, ce qui aboutit à la génération d'un nuage de points ou STL (STereoLithography). Les domaines d'application de la RC peuvent être très divers. En effet, la RC concerne le prototypage virtuel, la métrologie, la muséologie, la sauvegarde du patrimoine industriel ou des besoins industriels. Ces domaines font appel à la RC pour des raisons industrielles différentes. Ces raisons seront détaillées dans la section 1.2 de ce chapitre.

1.2 Les raisons industrielles de la rétro-conception

La rétro-conception peut concerner des objets aussi grand que l'avion jusqu'aux plus petits comme la puce électronique (Torrance & James, 2009). La RC est présente à de nombreuses étapes du cycle de vie d'un produit (figure 1.1). Cette généralisation s'explique par l'amélioration des techniques de numérisation (ROMERTM) et des performances de calculs de reconnaissances géométriques (Várady *et al.*, 2007). Au cours des années, plusieurs raisons industrielles concrètes peuvent être recensées. Nous citons les raisons les plus importantes :

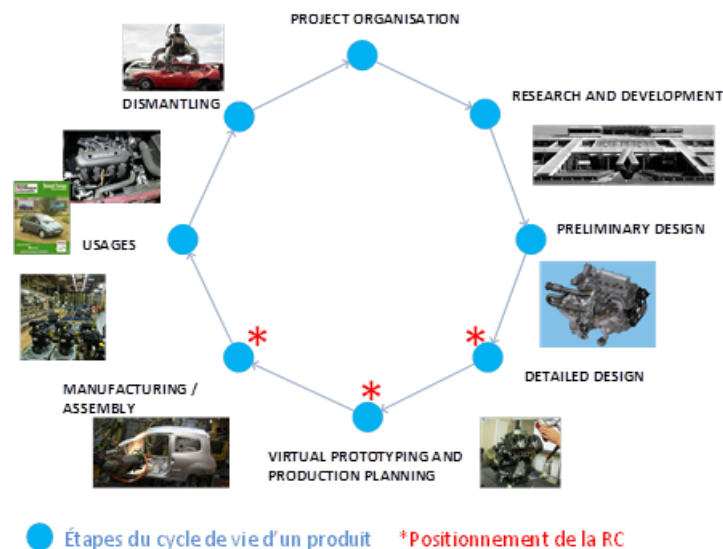


FIGURE 1.1: Cycle de vie d'un produit, positionnement de la RC.

- La conception originale n'est pas supportée par une documentation suffisante ou adéquate. Ce cas concerne la muséologie et la sauvegarde du patrimoine industriel où il n'y a aucune information sur la structure du produit, c'est-à-dire il n'y a pas de plan, pas de schéma, seule, la pièce physique est disponible. Dans ce contexte, la

figure 1.2 montre un exemple de rétro-conception de l'imprimerie de Voirin (Bernard *et al.*, 2007).

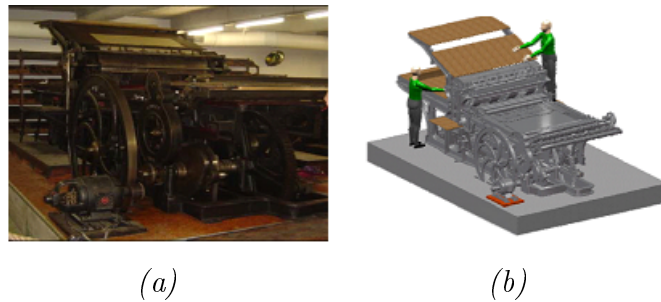


FIGURE 1.2: *Exemple de rétro-conception de l'imprimerie Voirin (Bernard et al., 2007) : (a) une photo de l'imprimerie Voirin et (2) la maquette CAO de l'imprimerie Voirin.*

- Le fabricant original n'existe plus ou ne fabrique plus le produit, mais il y a une nécessité de fabriquer le produit. C'est le cas des pièces à longue durée de vie dans les domaines du transport et militaire. La rétro-conception a dans ce cas pour finalité d'améliorer la fabrication de pièces obsolètes pour fabriquer des pièces de rechange. Ces pièces de rechange doivent donc être conçues et fabriquées avec les techniques d'aujourd'hui dans le but d'améliorer leurs performances et leur durée de vie totale. On peut citer dans ce contexte la rétro-conception d'un bouchon de radiateur d'eau de Delahaye 135 (Nartz *et al.*, 2002). Il y a besoin, dans ce cas, de remplacer l'ancien bouchon par un modèle usiné. Le modèle réel est assez rare puisque la production de Delahaye 135 n'a duré que deux années dans cette version à calandre concave : de 1935 à 1937). La figure 1.3 illustre l'ancienne pièce, le nuage de points et la pièce usinée.



FIGURE 1.3: *Exemple de rétro-conception d'un bouchon de Delahaye (Nartz et al., 2002).*

- La pièce a évolué et ne correspond plus à la conception originale et la documentation (une mise en plan par exemple) n'a pas été mise à jour. Ce cas concerne aussi les pièces à longue durée de vie mais plus précisément les pièces qui ont subi des modifications au cours temps. En effet, dans le but de réparer une pièce faite en

nombre limité, il n'est pas évident de trouver une pièce de rechange car des opérations de soudures et de re-taillage etc. peuvent avoir été effectuées. Ces modifications n'ont pas été appliquées aux mises en plan. En exemple, ci-dessous, une matrice de dressage fournie par le cluster NOGENTECH et la société ESTAMFOR, le prototypage en bois de la matrice est la seule donnée disponible. Un modèle CAO paramétrique, c'est-à-dire avec une arborescence complète, a dû être réalisé pour permettre une re-conception et donc une fabrication adaptée à une autre morphologie de presse.

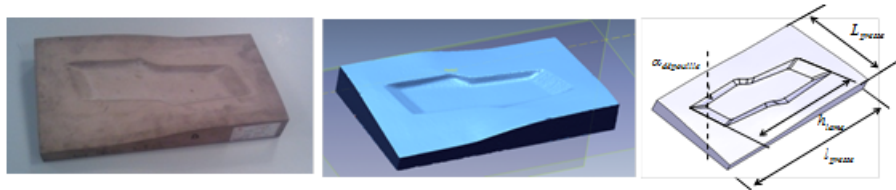


FIGURE 1.4: La RC d'une matrice de dressage, le prototypage en bois modifié à gauche, le modèle CAO paramétré à droite.

- Le modèle original CAO n'est pas suffisant pour soutenir des modifications. C'est le cas des pièces où pour des raisons de propriétés industrielles, certaines informations n'ont pas été fournies au sous-traitant de production. Dans ce cas, une rétro-conception a lieu afin d'effectuer quelques modifications pour en assurer la bonne conformité vis-à-vis de la production. On peut citer dans ce contexte la rétro-conception d'une barre stabilisatrice d'une voiture (Durupt, 2010). Les raisons d'établir la rétro-conception dans ce projet est que le constructeur automobile ne fournit qu'un modèle surfacique figé sur lequel le prestataire de la barre doit effectuer des calculs éléments finis, rétro-concevoir la barre et renvoyer au client un modèle CAO corrigé et correctement paramétré. La figure 1.5 montre le nuage de points et le modèle CAO de la barre.

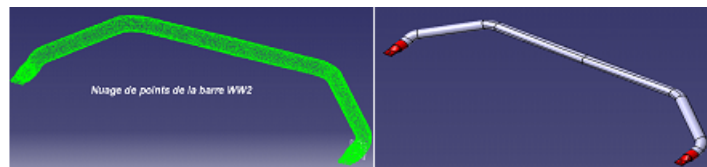


FIGURE 1.5: La rétro-conception d'une barre de stabilisatrice (Durupt, 2010).

- Amélioration de la performance ou les fonctionnalités de produit. Ce contexte concerne les pièces qui ont été mal conçues et qui doivent être mises à jour pour assurer des bonnes fonctionnalités. On peut citer par exemple la rétro-conception d'une pompe de direction assistée qui est considérablement endommagée à cause

d'un défaut de conception (Urbanic *et al.*, 2008). Les rayons de congés trop importants ont introduit des concentrations de contraintes mécaniques. Toutes les fissures et les dommages sont initiés à partir du congé, par conséquent, la conception initiale doit être mise à jour. La figure 1.6 montre la pompe à rétro-concevoir et le modèle CAO.

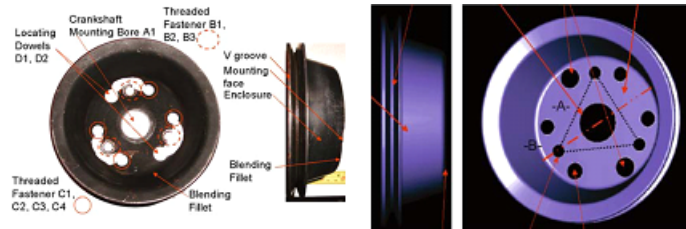


FIGURE 1.6: La rétro-conception d'une pompe de direction assistée (Urbanic *et al.*, 2008).

- Actualisation des matériaux désuets ou des processus de fabrication désuets. Ce cas concerne les pièces anciennes. Le but de la rétro-conception dans ce contexte est de re-fabriquer une pièce avec des matériaux et des procédés d'aujourd'hui. On peut citer par exemple le cas du projet VPERI (VPERI, 2003) où le besoin de la RC était d'actualiser le produit au niveau de ses procédés.
- Composants usés ou cassés pour lesquels il n'y a aucune source d'approvisionnement. Ce contexte concerne les pièces plus ou moins anciennes qui ont subi un changement dans leurs géométries dû à des usures ou cassures. En plus, les données sources de ces pièces n'existent plus. On peut citer par exemple la RC d'une aube de turbine usée (Bagci, 2009). La figure 1.7 montre la turbine endommagée et son modèle CAO obtenu par RC.
- Analyse des fonctionnalités du produit des concurrents. La rétro-conception peut être aussi appliquée dans le but d'analyser et d'acquérir les connaissances de fabrication, de fonctionnalités et autres d'une pièce d'un concurrent. Bien qu'évidente, cette raison est en fait souvent en marge des raisons principales. Les industriels ne l'évoquent que très rarement.

On remarque que les besoins de la rétro-conception sont larges et variés et concernent des composants anciens comme plus modernes. Il est évident que les exemples cités ci-dessus ne dressent pas une synthèse exhaustive des raisons industrielles. Elles sont en réalité non quantifiables et leur origine est très diverse. Comme évoqué précédemment dans l'introduction de ce manuscrit, cette thèse est labélisée par le cluster d'entreprise NOGENTECH (<http://www.cluster-nogentech.com>), de la région Nogent (France) regroupant environ 50

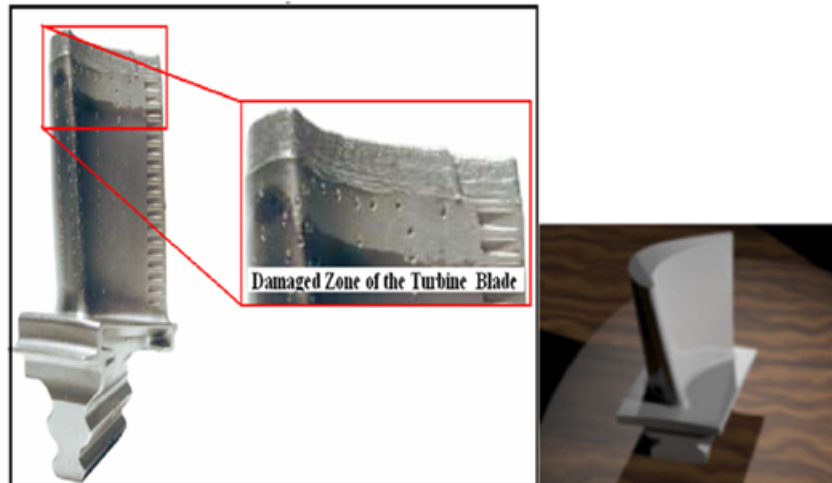


FIGURE 1.7: La RC d'une aube de turbine usée (Bagci, 2009).

entreprises des métiers de la Forge, de l'usinage des métaux, de la mise en forme des matières plastiques etc. Les problématiques de RC rencontrées par ce cluster sont souvent récurrentes.

Par conséquent, la RC n'est pas une activité exceptionnelle et peut être réalisée de façon routinière.

Aujourd'hui, de nombreux logiciels existent sur le marché pour répondre au contexte industriel et pour supporter l'activité de RC. Ces logiciels permettent d'obtenir un modèle CAO qui est généralement gelé. La section suivante établit une veille technologique sur les logiciels du marché.

1.3 La veille technologique des logiciels du marché

Dans le marché, de nombreux logiciels qui permettent la rétro-conception existent. On cite dans cette section quelques-uns. Pour plus de détails, une comparaison entre des logiciels de la rétro-conception est fait dans (Minetola *et al.*, 2015).

- GeomagicTM : Ce logiciel est parmi les logiciels ayant des fonctions les plus puissantes pour la rétro-conception (Lin & He, 2015). Dans Geomagic studio, il est possible de modifier le nuage de points, le maillage et les surfaces construites dans une même application. Il est aussi possible d'extraire des surfaces orientées et de créer des surfaces CAO. Une reconnaissance automatique du type de surface (plan, cylindre, cône, sphère) et des surfaces à bases de contours (extrusions et révolutions) peut être faite. Des opérations d'extrusion, de révolution, et d'enlèvement de matière, utilisant comme esquisse les contours détectés, peuvent être exécutées. Des pièces complexes

telles que des aubes de turbines peuvent être modélisées en volumique. En effet, les contours d'esquisse sont automatiquement extraits et l'utilisateur peut ensuite redessiner une nouvelle esquisse par-dessus et générer les fonctions extrusion, balayage etc.

Il existe encore Geomagic Design X anciennement nommé RapidformTM. Il est conçu pour la rétro-conception surfacique et solide. Un nouveau module a été ajouté sur la version 2014 : la modélisation rapide. Ce module accélère la création d'une entité par la détection automatique et la création des extrusions, des filets, des révolutions, des balayages, etc. Il permet de combiner le traitement des maillages issus de scan et les fonctionnalités de modélisation 3D solide paramétrique, de sorte à créer des modèles solides modifiables. La figure 1.8 montre un exemple de rétro-conception avec Geomagic.

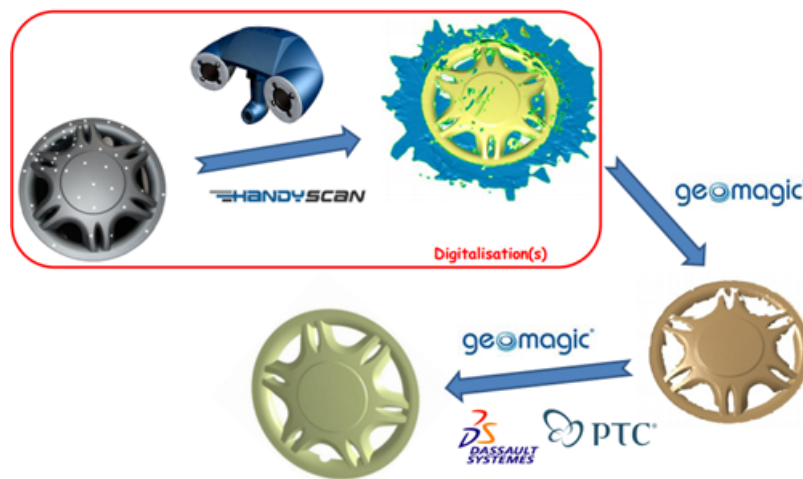


FIGURE 1.8: Exemple de rétro-conception avec GeomagicTM

- CATIATM : CATIA est l'acronyme de Conception Assistée Tridimensionnelle Inter-Active. Le logiciel est conçu par Dassault Systèmes et est un logiciel de CAO 3D volumique et surfacique qui bénéficie d'une très large utilisation. Ce logiciel possède des modules dédiés à la rétro-conception comme « Digitized Shape Editor » DSE et « Quick Surface Reconstruction » QSR (Xia, 2014).

DSE est utilisé dans les premières phases du cycle de rétro-conception. Dans ce module, on peut importer des diverses formes de données numériques (maillages, nuages de points, etc.). DSE permet d'appliquer des opérations diverses sur ces données numérisées comme le traitement des nuages de points en supprimant les points parasites ou en conservant uniquement les zones souhaitées. Après le traitement, DSE permet de créer un maillage sur le nuage de points. Une fois le maillage effectué et traité, DSE permet de reconstruire des entités géométriques (courbes) pour passer à la phase de

création de surfaces. Le modèle résultant de ce module est principalement composé de surfaces formant par la suite un modèle CAO solide figé. La figure 1.9 montre un exemple de rétro-conception avec CATIA.

QSR est un module de CATIA permettant la reconstruction semi-automatique ou automatique des surfaces à partir de nuage de points. Les différentes fonctions de ce module permettent de créer automatiquement :

- des courbes frontières par reconnaissance de la géométrie digitalisée.
- des surfaces par reconnaissance des formes canoniques (plan, sphère, cylindre, cône) présentes dans le nuage.
- des surfaces de formes quelconques par remplissage respectant les critères souhaités par rapport au nuage de points et les conditions de tangence et courbure spécifiées. Le nombre de frontières n'est pas limité et l'utilisateur maîtrise à tout moment les paramètres de définition utilisés.

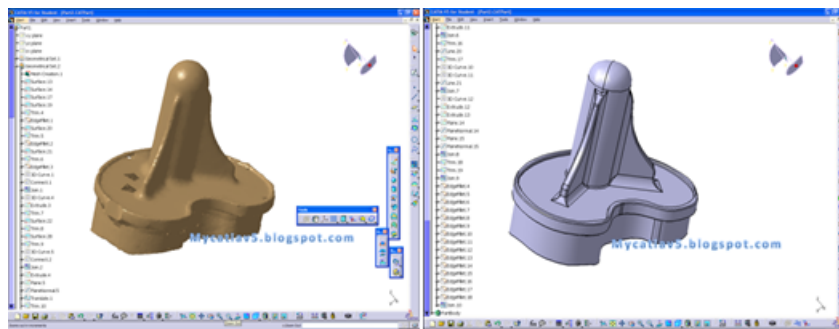


FIGURE 1.9: Exemple de rétro-conception avec CATIATM

- 3DReshaperTM de Romer Hexagon Metrology est une solution de reconstruction de surfaces 3D développée par Technnodigit. Cette solution est directement interfacée avec un bras de mesure transportable ROMERTM. Elle permet la digitalisation, la récupération et le traitement de nuage de points (coloration automatique des nuages à l'import, nettoyage et réduction du bruit de mesure), le maillage (maillage 2D, 3D, bouchage de trou, lissage selon courbures et réorganisation), la modélisation, la rétro-conception, la reconstruction de surface, le contrôle 3D et l'inspection (alignement de la mesure avec le théorique, comparaison couleur et édition de rapport d'inspection). 3DReshaper propose de faire de la préparation pour la reconstruction surfacique telle que l'extraction de formes géométriques (plan, cylindre), l'extraction de lignes caractéristiques et les calculs des sections. La figure 1.10 montre un exemple d'une pièce industrielle rétro-conçue avec 3DReshaper.
- La société Nikon MetrologyTM fournit plusieurs modules logiciels : Focus Scan, Focus inspection, Focus automation, Focus handheld. Le module Focus scan sert à préciser

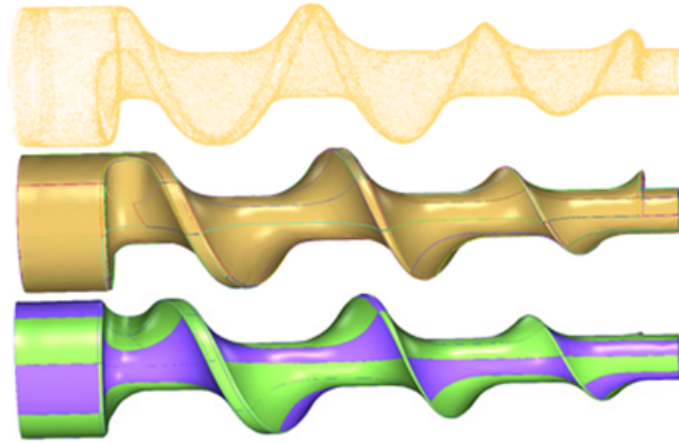


FIGURE 1.10: Exemple d'une pièce industrielle retro-conçue avec 3DReshaperTM

la trajectoire du scanner, en ligne comme hors ligne. En ligne, les déplacements du scanner sur MMT sont gérés et les données acquises sont prétraitées en nuage de points bruts. Hors ligne, Focus scan permet à l'utilisateur de créer, modifier et tester les programmes pièces reposant sur des modèles CAO en laissant la MMT effectuer exhaustivement les mesures. Le module Focus inspection est la référence pour l'inspection par nuage de points. Il réalise l'acquisition des nuages de points, la comparaison avec la CAO et l'inspection des entités géométriques. A travers son interface utilisateur intuitive, tout le processus d'inspection peut être automatisé. Focus inspection se base sur les informations des entités nominales du modèle CAO. Il peut donc extraire automatiquement les entités correspondantes à partir du nuage de points et comparer les deux.

- Efpisoft est un logiciel qui permet de fournir une interface graphique interactive pour l'inspection et la segmentation des maillages surfaciques 3D (Attene *et al.*, 2006). Après le chargement d'un maillage, un algorithme hiérarchique de segmentation de maillage peut être lancé. D'une manière générale, cet algorithme vise à regrouper les faces du maillage de sorte que les regroupements peuvent être effectivement rapprochés par l'une des primitives d'ajustement utilisées. Le regroupement est hiérarchique et se déroule d'une manière ascendante, ce qui signifie que d'abord, chaque face du maillage représente un regroupement. A chaque itération, toutes les paires de groupes adjacents sont considérées. Pour chacune des paires, l'algorithme calcule les paramètres de la primitive géométrique qui se rapproche le mieux aux faces de deux regroupements. L'itération se poursuit jusqu'à avoir un regroupement qui représente la pièce totale. Les groupes sont représentés par différentes couleurs (figure 1.11).

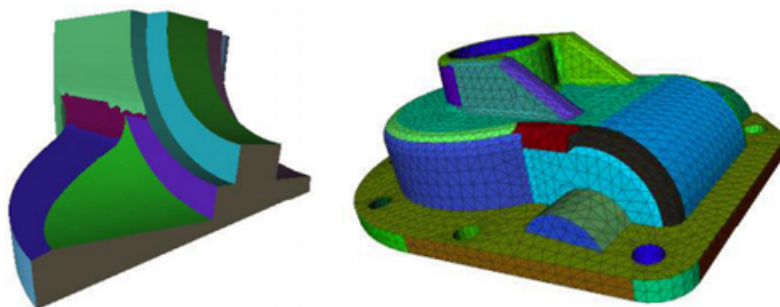


FIGURE 1.11: Exemple de regroupement de deux modèles en régions (Attene et al., 2006).

Il existe aussi, dans la littérature, un logiciel de FAO qui permet d'obtenir à partir du maillage d'une pièce, sa gamme de fabrication. Ce logiciel « TopSolid » permet de créer des parcours d'outils pour les machines-outils à commande numérique à partir d'un fichier STL (Beudaert, 2013). Cependant, la décomposition en opérations d'usinages et la reconstruction géométrique ne semblent pas être intégrées au modelleur.

Tous les logiciels, énoncés ci-dessus, offrent, à partir d'un nuage de points, des possibilités de rétro-conception afin de permettre l'obtention d'un modèle CAO. Ce dernier est généralement gelé. De la même façon, ces logiciels ne prennent pas en compte les aspects récurrents dans le processus de rétro-conception. Nous rappelons que l'objectif de cette thèse est d'obtenir un modèle « CAO fabrication » qui est une reconstruction géométrique d'une pièce avec une arborescence décomposée en matériau, brute, posages, phases et opérations. En plus, l'objectif de cette thèse est de prendre en compte l'aspect récurrent.

1.4 Problématique de la thèse

Dans cette thèse, nous considérons que la RC consiste à retrouver les concepts, les lois physiques, les comportements, la méthode de fabrication et autres qui constituent et régissent le produit d'étude. D'une manière générale, les travaux de RC se concentrent essentiellement sur le composant mécanique à partir d'un nuage de points 3D. Le processus de RC, dans la littérature et veille technologique, a pour but de retrouver un modèle CAO paramétré au sens fonctionnel. Cependant, la RC se limite à définir un modèle CAO pauvrement paramétré, les modifications sont difficilement réalisables. Puis, à partir de ce modèle CAO, le nouveau fabricant définit par l'utilisation de logiciel FAO (Fabrication Assistée par ordinateur) une gamme de fabrication. Le modèle CAO initial étant un corps « non modifiable » aucunes actions de modifications ou de corrections ne peuvent être établies. Par répercussion, la gamme de fabrication est obtenue difficilement car de longues étapes de reconstruction géométriques

sont nécessaires en amont.

En plus, la RC n'est pas seulement un processus exceptionnel, mais aussi un processus récurrent pour les entreprises (Durupt. *et al.*, 2014). Cela signifie que les entreprises peuvent retro-concevoir des pièces similaires avec des topologies similaires. L'intérêt nouveau serait de minimiser le temps de RC en évitant les étapes redondantes.

Les questions suivantes viennent à se poser :

Puisqu'il existe des méthodologies pour la conception de produit et des méthodologies pour la RC d'un point de vue fonctionnel (Durupt, 2010), existe-t-il des méthodes ou des outils dédiés à la RC permettant de rétro-concevoir en incluant les informations sur la fabrication ? En d'autres termes :

Existe-t-il des méthodes qui permettent d'obtenir des modèles « CAO fabrication » incluant les différentes étapes de la gamme de fabrication (niveaux, opérations d'usinage, posages, etc.) tout en supportant le contexte récurrent ?

Cette thèse apporte des réponses à ces deux questions et la section 1.5 de ce chapitre énumère les hypothèses de départ pour cette proposition et explique brièvement la méthodologie de RC présentée dans ce travail.

1.5 Les hypothèses et la proposition d'une méthodologie

Avant de proposer la méthodologie de RC, nous citons les hypothèses qui seront prises en compte dans la démarche :

Hypothèse 1 : Nous considérons que le nuage de points qui constitue une partie de l'entrée de la méthode proposée dans cette thèse, a déjà subi les opérations de traitement, de fusion et de nettoyage. En effet, il existe aujourd'hui des techniques et des logiciels d'acquisition performants qui permettent de réaliser ces opérations efficacement dès la numérisation (Panchetti & Pernot, 2010).

Dans le cadre de cette thèse, nous définissons un nuage de points comme un modèle réel numérisé qui résulte d'un processus de digitalisation qui peut être issu : d'une numérisation par laser ou palpé sur MMT (Machine à Mesure Tridimensionnelle) ou bras de mesure portable (ROMERTM, FAROTM) etc. En d'autres termes, le nuage de points peut être issu de toutes les techniques de digitalisation d'un objet physique qui fournissent un nuage de points complet de l'objet considéré (Gibson, 2002).

Il faut noter ici que nous considérons, dans cette thèse, le nuage de points et le maillage

dans la même définition. En fait, tous les algorithmes de cette thèse fonctionnent sur les nœuds d'un maillage (issu d'un scan) et aussi sur une distribution aléatoire de scan.

Hypothèse 2 : La deuxième hypothèse concerne le niveau des connaissances sur la pièce à retro-concevoir. Selon les principaux cas industriels développés dans la section 1.2 de ce chapitre, nous supposons que les données d'entrée de la méthode proposée dans cette thèse peuvent être :

- Le nuage de points et la pièce réelle.
- Le nuage de points et une mise en plan qui n'est pas mise à jour (une mise en plan n'est pas mise à jour veut dire que la pièce a subi des modifications de formes y compris fonctionnelles et que cela n'a pas été reportée sur le dessin de définition).
- Le nuage de points et des photos de la pièce. Les photos ne sont pas traitées informatiquement dans la méthode. En effet, les photos sont considérées comme des données servant à l'analyse et non pour des traitements de reconnaissances de forme.
- Seul le nuage de points est disponible et au moins un cas d'application est connu ; c.-à-d. l'utilisateur connaît au moins une fonctionnalité et l'environnement (les pièces de liaisons) du cas d'étude.

Hypothèse 3 : Nous considérons que le processus de RC proposé dans cette thèse permet de re-fabriquer une copie paramétrée, au sens fabrication du terme, de la pièce réelle. A la fin de cette méthode, un APEF (Avant Projet d'étude de fabrication) peut être créé.

Hypothèse 4 : En quatrième hypothèse, nous considérons que toute gamme créée sera stockée dans une base de données appelée REFM avec toutes les informations acquises lors de la RC.

Hypothèse 5 : En cinquième hypothèse, nous considérons que la méthode présentée dans ce travail de thèse concerne l'usinage :

- Des pièces usinées dans un bloc (forme de base polyédrique) ou issues des bruts de forge ou de fonderie.
- Des moules des pièces de fonderie.
- Des matrices des pièces de forge.

Proposition d'une méthode : Cette thèse propose la méthode REFM (Reverse Engineering For Manufacturing) qui permet de définir une nouvelle démarche de RC d'une pièce mécanique, appuyée par un démonstrateur fonctionnel. Elle permet de supporter le processus exceptionnel et le processus récurrent de la RC en intégrant les contraintes de fabrication. La sortie de cette méthode est un modèle 3D paramétré incluant une arborescence basée entité. Cette arborescence sera organisée selon les intentions d'usinage.

Pour résumer, le but de cette thèse est de fournir une gamme de fabrication d'une pièce physique dans un contexte récurrent (la gamme de fabrication résultante comportera les mêmes informations qu'un APEF (Avant Projet D'études de Fabrication)). Donc, la méthode est divisée en deux grandes phases : phase de capitalisation et phase de réutilisation (figure 1.12).

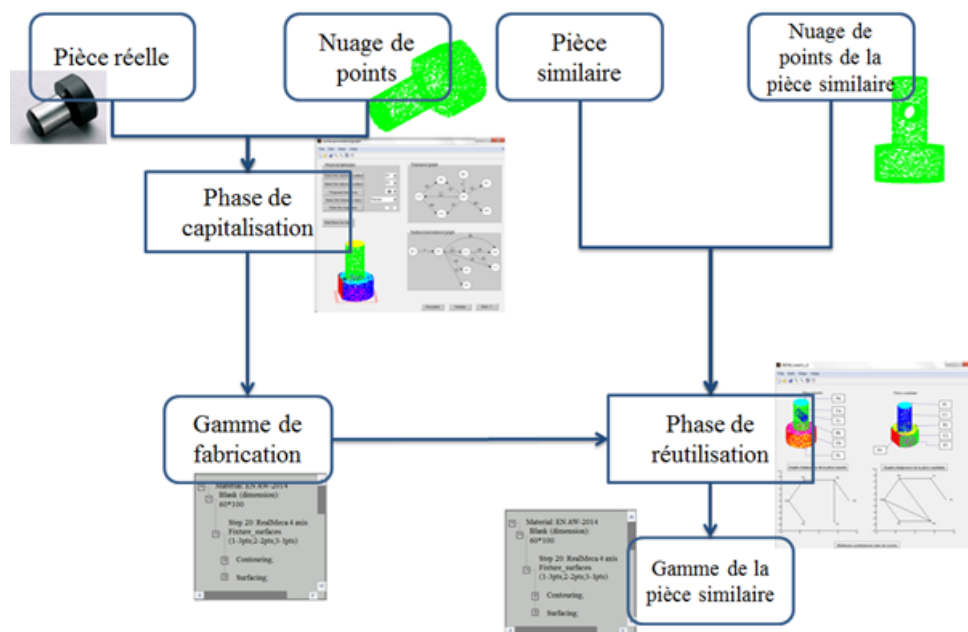


FIGURE 1.12: Le processus général de la méthode REFM.

La phase de capitalisation se réalise dans le tout premier cas d'étude de RC. Cette phase combine les approches géométriques (la segmentation) et des méthodologies d'acquisition des connaissances de fabrication. Le point novateur de cette phase est de développer l'étape « Acquisition des connaissances de fabrication ». Cette étape a pour but d'aider l'utilisateur à analyser la pièce, à émettre des suppositions, à sauver les hypothèses en fournissant toutes ses connaissances de fabrication. En sortie de cette phase, une gamme de fabrication est générée en respectant les dépendances fonctionnelles entre les surfaces et en optimisant la séquence d'usinage.

Une fois la gamme générée, elle est conservée et stockée dans une base de données en vue d'être réutilisée ultérieurement.

La phase de réutilisation permet d'identifier une gamme de fabrication à partir d'une pièce de la même famille et ainsi d'éviter les étapes redondantes de la phase de capitalisation. Dans le but de choisir une gamme de fabrication convenable, une méthode de mise en correspondance basée sur la similarité topologique entre les pièces mécaniques, permet à l'utilisateur de gagner du temps au moment de la RC.

Les concepts de cette thèse ont été appuyés par des exemples industriels et implémentés dans un démonstrateur nommé « *REFM system* ». Ce démonstrateur permet d'évaluer la faisabilité et la crédibilité de la méthode présentée.

Conclusion Chapitre 1

Dans ce chapitre nous avons défini le contexte de la thèse avec sa problématique.

Pour synthèse, la problématique de recherche de cette thèse est la suivante :

Existe-t-il des méthodes qui permettent d'obtenir des modèles « CAO fabrication » incluant les différentes étapes de la gamme de fabrication (niveaux, opérations d'usinage, posages etc.) tout en supportant le contexte récurrent ?

En s'appuyant sur le contexte et la problématique de cette thèse, un état de l'art sur les méthodologies de RC à travers quelques grands projets et sur les méthodologies de la mise en correspondance des formes sera établi dans le chapitre 2. La synthèse de cet état de l'art permettra de révéler les concepts, méthodologies et techniques de la bibliographie à utiliser ou à adapter pour la méthode REFM.

Chapitre 2

État de l'art : La Rétro-Conception pour la fabrication

Introduction Chapitre 2

Dans ce chapitre, nous allons synthétiser les différentes techniques et méthodologies de RC qui se trouvent dans la bibliographie et qui seront utiles pour développer la méthodologie REFM. Ce chapitre sera organisé selon les sections suivantes :

- Un état de l'art sur les techniques de segmentation : En analogie avec l'approche proposée dans cette thèse (figure 2.1), les techniques de segmentation pourront être intéressantes à prendre en compte afin de correctement partitionner le nuage de points.
- Un état de l'art sur les méthodologies de RC : Dans cette section, nous exposerons les méthodologies de RC citées dans la bibliographie et qui sont intéressantes à considérer pour la méthodologie REFM dans la phase de capitalisation (figure 2.1) afin d'acquérir les informations de nature diverses sur le produit.
- Un état de l'art sur la conception pour la fabrication DFM (Design For Manufacturing) pour la RC : Ces travaux sont intéressants à considérer pour la méthodologie REFM dans la phase de capitalisation (figure 2.1) afin d'intégrer les contraintes de fabrication dans le processus de rétro-conception.
- Un état de l'art sur les méthodes de mise en correspondance des formes : La méthodologie REFM est basée sur des techniques de mise en correspondance (Shape Matching) pour apparier une pièce scannée avec une pièce en base dont la stratégie d'usinage a été initialement capitalisée (figure 2.1).

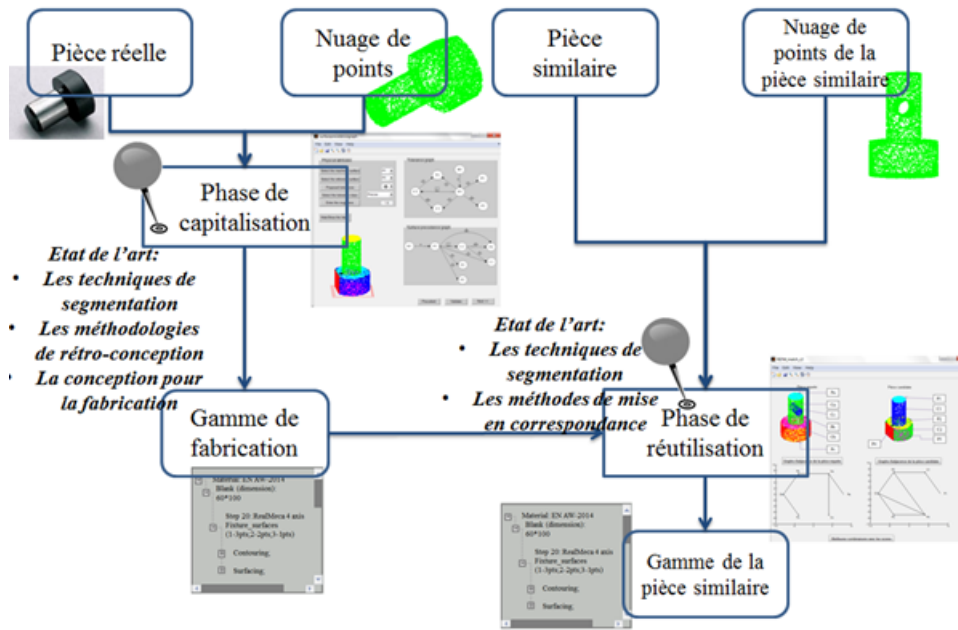


FIGURE 2.1: Positionnement de l'état de l'art par rapport à la méthodologie REFM.

2.1 État de l'art : les techniques de segmentation

En rétro-conception, la segmentation permet d'isoler des ensembles de points ou pixel correspondant à des parties de l'objet numérisé (par scan ou photogrammétrie) (Fuchs, 2006). Plus précisément, la segmentation est le processus qui consiste à séparer le nuage de points d'un objet en n nuages de points représentant les n surfaces qui composent cet objet. De façon générale, le nuage de points est partitionné en zones qui correspondent à :

- Des éléments canoniques de type plan, sphère, cylindre, plan etc.
- Des éléments ou carreaux délimités par des arêtes vives.

Plusieurs techniques de segmentation dédiées à la rétro-conception ont été distinguées dans la littérature. Nous citons ainsi les techniques les plus répandues.

2.1.1 La technique basée sur la régionalisation ou clusters de points

Cette technique a pour principe d'extraire une région d'une image ou d'un nuage de points à l'aide d'un critère de similarité jusqu'à atteindre le critère d'arrêt. Une région peut être un point du nuage, un triangle, un sommet, un ensemble de points ou de pixels ou de triangles.

Les méthodes basées sur la région peuvent être divisées en deux catégories :

- Méthodes d'accroissement de région.

- Méthodes de découpage de région.

2.1.1.1 Méthodes d'accroissement de région

L'accroissement de région est une méthode dite « bottom-up » : le processus de segmentation débute à partir d'une région échantillon (qui représente un ensemble de points de départs), celle-ci va croître pas à pas en ajoutant les points voisins s'ils satisfont à un critère. En fait, la décision d'intégrer à la région un point repose seulement sur un critère d'homogénéité imposé à la zone en croissance. Nous pouvons citer des techniques d'algorithmes élémentaires telles que les approximations par un plan en utilisant la méthode des moindres carrés et les approximations par surfaces biquadratiques. Elles sont utilisées pour leur simplicité de mise en équation et pour la résolution de problèmes de minimisation.

Nous pouvons citer le travail de (Besl & Jain, 1988). Dans ce travail, le processus de segmentation se déroule en deux étapes principales : la première étape est consacrée à isoler le germe alors que la deuxième sert à faire croître le germe sur la base de critères prédéfinis jusqu'à l'absorption du germe global.

Plus récemment, on peut citer les travaux de (Xiao *et al.*, 2011) qui ont été spécifiées aux maillages. La méthode est décomposée en deux étapes :

- La première étape consiste à séparer des points du maillage de forte densité de points de celles de faible densité. Xiao *et al.* ont défini une méthode dont le but est d'extraire des zones des triangles réguliers (zones de sommets denses) ou des triangles allongés ou de grande aire (zones à faible densité de sommets). Une croissance de région basée sur cette méthode permet d'obtenir deux groupes de sous-maillages. On peut remarquer sur la figure 2.2 que le maillage effectué est composé de deux sous-maillages (vert : faible densité, rouge : maillage dense).
- La deuxième étape consiste à effectuer pour chacun des sous-maillages, une seconde segmentation en fonction de son type. La courbure moyenne est utilisée pour segmenter les sous-maillages denses. Tandis que la valeur de courbure gaussienne est utilisée dans le cas des sous-maillages à faible densité pour reconnaître des plans, des cylindres ou des cônes.

On peut citer les travaux de (Zhao, 2010) et (Zhao *et al.*, 2013) qui proposent une nouvelle méthode de reconnaissance et de segmentation des formes discrètes. Cette méthode permet la reconnaissance du type de surface locale d'un sommet et ses caractéristiques par l'intermédiaire de deux descripteurs de surfaces : l'indice de forme et l'intensité de courbure. Les sommets sont ensuite groupés en fonction de leurs surfaces locales. Les résultats de la

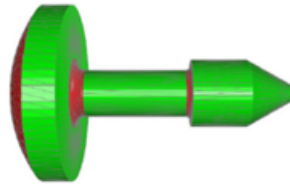


FIGURE 2.2: *Segmentation en deux sous maillages (Xiao et al., 2011).*

segmentation sont ensuite produits à partir d'un algorithme de connexité par région. Cet algorithme est divisé en deux étapes : l'accroissement de région connecté qui est effectuée pour générer le résultat initial de segmentation, et le raffinement de région qui vise à réduire les régions sur-segmentées et à améliorer le résultat de segmentation.

2.1.1.2 Méthodes par division-fusion de région

Les méthodes de segmentation par division-fusion s'effectuent en éclatant puis regroupant les régions. Chaque région considérée sera vérifiée avec une hypothèse d'homogénéité. Si l'hypothèse n'est pas vérifiée, la région sera divisée en deux sous-ensembles complémentaires. Il est donc possible, par le fait de la géométrie de la division, de séparer une région homogène en plusieurs éléments. Lorsque toutes les régions respectent le critère de division, un critère d'homogénéité sera vérifié entre les régions adjacentes. Si ce critère est vérifié, les régions seront fusionnées (Gallaudet & Simpson, 1991).

Dans ce contexte, on peut citer les travaux de (Wang & Tseng, 2004) qui ont proposé un algorithme de segmentation basé sur la division-fusion de région pour segmenter les données. Le nuage de points est subdivisé itérativement selon la structure octree dans l'optique d'extraire des surfaces planes comme illustré à la figure 2.3. Pour cela, au cours de la subdivision, à chaque niveau la coplanarité des points d'une cellule est testée. Si le test est positif, la subdivision s'arrête. Si non, celle-ci continue jusqu'à ce que tous les cubes contiennent des points coplanaires ou soient vides.

2.1.2 La technique par limite de frontières

Cette technique est divisée en deux étapes principales : la détection des bords qui définissent les frontières des différentes régions, suivie par le regroupement des points à l'intérieur des limites définissant la région segmentée.

Il existe plusieurs techniques que nous pouvons regrouper en deux catégories principales.

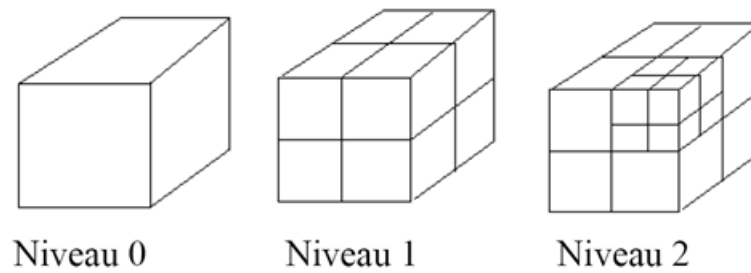


FIGURE 2.3: Deux niveaux de subdivisions de la structure octree (Wang & Tseng, 2004).

- La technique « Edge-based ».
- Le calcul des caractéristiques locales.

2.1.2.1 La technique « Edge-based »

Le principe de cette technique est de localiser les points qui ont un changement rapide d'intensité. Elle consiste à détecter les points singuliers dans des sections parallèles du nuage de points (Meyer, 2002), (Meyer & Marin, 2004). Elle est divisée en deux étapes : la première consiste à détecter les bords qui définissent les frontières de différentes régions, suivi par le regroupement des points à l'intérieur des frontières donnant la segmentation finale. Cette technique présente le gros avantage de ramener le problème 3D en une solution 2D plus simple. Afin d'illustrer le principe de cette technique, nous avons recensé quelques travaux : les travaux de (Canny, 1986) sont basés sur une phase de pré-filtrage, qui vise à réduire le bruit d'une image, suivi par la localisation de l'arête. La deuxième phase, représentée par la détection des lignes et des courbes, extrait des courbes (par exemple des lignes, des cercles, des ellipses) à partir de la sortie d'un algorithme de détection de frontières. La figure 2.4 montre un exemple d'une image filtrée par le filtre de Canny.

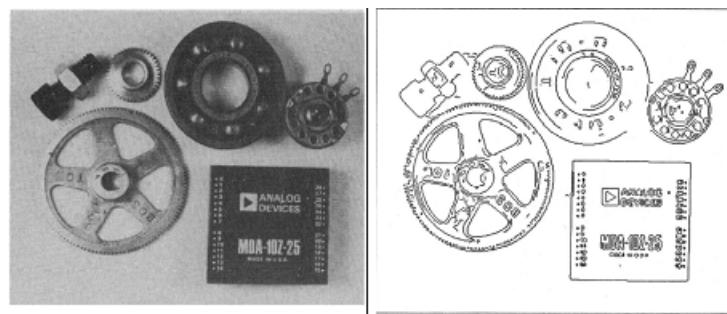


FIGURE 2.4: Image filtrée par le filtre de Canny (Canny, 1986).

Les travaux de (Patane & Spagnuolo, 2002) ont proposé une approche « Edge-based »

basée sur la représentation multi-résolution et l'analyse des données de numérisation. Dans cette approche, basée sur une séquence de mises à jour locales, le nuage de points est organisé selon une hiérarchie multi-résolution. Le domaine d'application de cette approche est défini par les lignes du scan pour lesquelles les auteurs supposent que le nuage de points est distribué par des sections planes (figure 2.5). Cette approche se caractérise par trois phases :

- La modélisation des données multi-résolution : cette phase vise à organiser les données de points en une structure hiérarchique en distinguant entre les détails locaux et globaux.
- Une phase de classification : en utilisant le modèle précédent, cette phase permet d'attribuer à chaque sommet une valeur qui représente son degré d'importance dans la description de la forme liée du point de vue de la géométrie et d'échelle. Pour cela, leurs travaux utilisent un algorithme qui évalue le poids d'échelle des sommets et les formes de lignes similaires entre elles.
- La phase de détection et de segmentation : une vue 3D de l'ensemble de données est considérée. Durant cette phase, une détection des lignes transversales des « tranches » est faite. Pour cela, les lignes caractéristiques sont détectées en utilisant les points caractéristiques définis par les études des phases précédentes. Un algorithme de segmentation final permet de regrouper les tranches similaires.

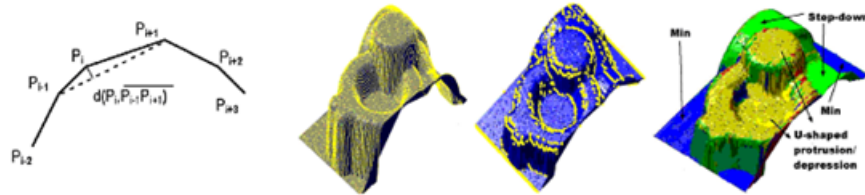


FIGURE 2.5: L'algorithme LDA basé sur les lignes du scan (Patane & Spagnuolo, 2002).

2.1.2.2 Le calcul des caractéristiques locales

Cette technique permet d'effectuer le calcul des caractéristiques locales en tout point du nuage de points. Ce calcul n'est autre que l'utilisation de la seconde forme quadratique fondamentale dont le but est d'effectuer une étude efficace des propriétés géométriques d'une surface régulière (Krasnov *et al.*, 1993). La forme quadratique est utilisée essentiellement pour introduire des caractéristiques géométriques importantes qui permettent de mesurer le degré de la nature de la dérivation d'une surface par rapport au plan tangent. La courbure de Gauss est utilisée pour la classification des points d'une surface régulière.

On peut citer les travaux de (Yang & Lee, 1999) qui permettent de déterminer les points d'arêtes en isolant les points pour lesquels la courbure dépasse un seuil. Après identification d'un point d'arête, un algorithme de chaînage est utilisé pour former l'arête complète totalement fermée. La procédure peut être résumée de la façon suivante : l'algorithme recherche tout d'abord les points marqués « point d'arêtes » sur l'objet, puis lie les points jusqu'à un point arête suivant. Ce processus se répète jusqu'à ce que tous les points d'arêtes soient liés par une courbe fermée.

Ces méthodes ci-dessus nécessitent que la densité de points soit relativement grande et que le bruit soit très limité (Meyer, 2002). Pour pallier ces contraintes, d'autres études ont été effectuées (Huang & Menq, 2001).

2.1.3 Les techniques hybrides

Les approches de segmentation hybrides combinent à la fois les approches basées sur l'accroissement de région et la limite de frontières. La méthode proposée par (Yokoya & Levine, 1989) permet de trouver le signe de Gauss et d'en extraire en parallèle deux types d'arêtes tels que des 'sauts' et des 'toits'. Par la suite, les segments résultants sont fusionnés.

Nous pouvons encore citer les travaux de (Lavoué, 2005) qui, après avoir classifié les sommets des triangles par rapport à leur courbure principale (K_{min} et K_{max}) et classifié ces derniers en cluster (région primitive), détermine les régions spatiales correspondantes. Le processus est le suivant : pour chaque triangle dont la courbure est complètement définie (triangle germe), une nouvelle région est créée, labellisée puis étendue. Ce processus recommence pour chaque triangle non labellisé.

(Mizoguchi *et al.*, 2007) appliquent une estimation de la courbure pour la détection d'arêtes vives et une croissance de régions non itérative pour déterminer les germes. Ainsi, par ce principe quelques surfaces d'assemblage, c'est-à-dire des surfaces résultantes d'opérations de modeleurs CAO peuvent être détectées. L'extrusion linéaire de surfaces ou les surfaces de révolution sont reconnues. La croissance de régions est initialisée à partir de germes issus d'une classification des courbures principales. Chaque sommet du maillage est associé à un label de type : plan, cylindre, sphère, cône, tore. A chaque type de surface est affecté un seuil qui correspond au nombre de sommets que pourra accepter la région germe. Une région germe est ensuite créée en considérant un ensemble de sommets connectés avec le même label.

La segmentation peut être aussi utilisée dans d'autres contextes. Par exemple, elle peut servir à segmenter une structure marine complexe dans le but de la rétro-concevoir (Yoon

et al., 2015). Elle peut être aussi destinée à modéliser une structure industrielle (Xiao *et al.*, 2013).

2.1.4 Conclusion sur les techniques de segmentation

Dans cet état de l'art, nous avons cité les techniques les plus utilisées. La table 2.1 dresse un résumé de ces techniques et des grandeurs utilisées par ces techniques.

On peut constater que la segmentation ne peut pas être suffisante dans le processus de rétro-conception. Elle n'est qu'une première étape de reconnaissance pour l'utilisateur et sert de référence géométrique pour une construction manuelle. Or la rétro-conception ne se résume pas uniquement à l'utilisation des techniques de segmentation. C. à. d. elle ne doit pas se limiter à considérer les aspects géométriques de la pièce d'étude pour retro-concevoir.

En analogie avec la méthodologie REFM (figure 2.6), toutes ces techniques de segmentation permettraient de participer à la phase de capitalisation. La segmentation du nuage de points offrira un premier référencement géométrique et donc une première reconnaissance de la géométrie de la pièce.

La phase de capitalisation ne se base pas seulement sur la segmentation. Une autre étape plus importante doit consolider l'approche : l'acquisition des connaissances de fabrication (le terme connaissances peut être apparenté aux termes information techniques ou d'expertises en fabrication). A ce titre, la bibliographie contient des références connues proposant une démarche ou des outils divers afin de supporter les ingénieurs dans leurs activités de rétro-conception. Dans la section suivante, nous dressons un état de l'art des travaux portant sur des grandes problématiques de rétro-conception dédiées à un métier ou un domaine d'expertise.

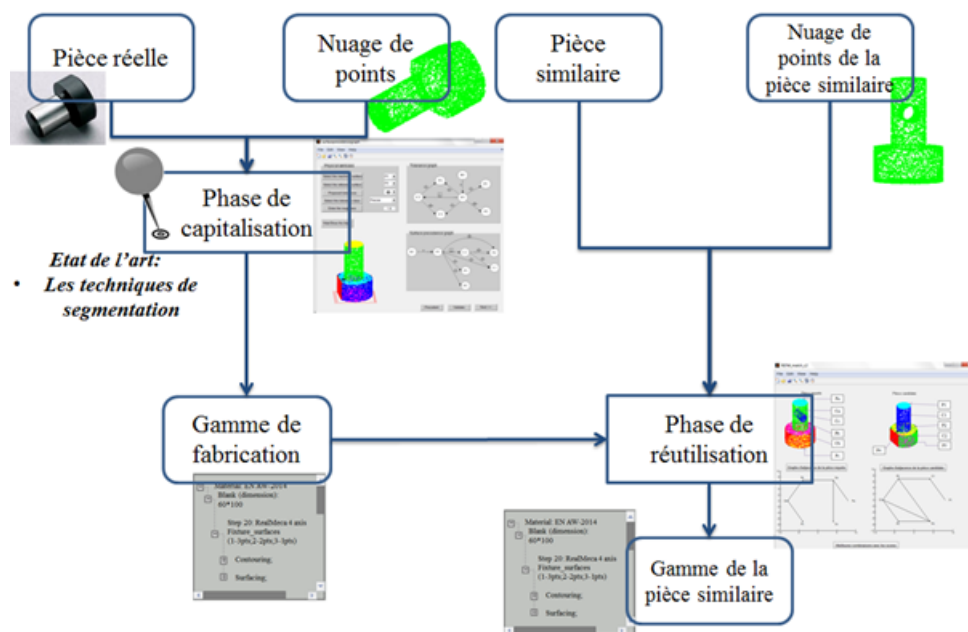


FIGURE 2.6: Positionnement des techniques de segmentation pour REFM.

TABLE 2.1: Table de synthèse des techniques de segmentation.

Les techniques de segmentation	Principe	Outils	Analyses
Régionalisation des points	Accroissement de régions	Elle permet de faire croître une région en ajoutant des points voisins jusqu'à l'absorption complète de région	Le rayon R d'une région sphérique est incrémenté jusqu'à absorption de la région globale
	Découpage de régions	Elle permet de faire éclater un nuage de points en sous-ensembles en vérifiant des hypothèses d'homogénéité	Découpage en régions non fidèle au nuage de points original
Limites de frontières	Edge-based	Elle permet de localiser les points qui ont un changement rapide d'intensité	Organiser les données de points, puis attribuer à chaque sommet une valeur qui représente son degré d'importance, enfin détection des lignes transversales des tranches
	Calcul des caractéristiques locales	Elle permet d'effectuer le calcul des caractéristiques locales en tout point du nuage de points	La courbure de Gauss est utilisée pour la classification des points d'une surface rugueuse
Hybride		Elle combine la technique basée sur la région et celle basée sur la limite de frontières	Trouver le signe de Gauss et en extraire deux types d'arêtes. Puis fusionner les segments résultants

Très dépendante de la qualité du nuage

Très dépendante de la qualité du nuage

Utile pour réaliser la copie parfaite

2.2 État de l'art : les méthodologies de la rétro-conception

Il existe dans la littérature des travaux qui permettent de générer des gammes d'usinage d'une façon automatique comme le groupe GAMA (Bourdet & Villeneuve, 1990), et les projets Usiquick (Harik, 2007) et Angel (Danjou *et al.*, 2015). Par exemple, le groupe GAMA a créé un système expert qui permet de générer des trajectoires d'outils et des gammes d'usinage d'une façon automatique. Il a considéré que la conception d'une gamme d'usinage est une opération qui consiste à proposer une suite d'étapes nécessaires pour passer de la pièce brute à la pièce finie. Cette opération doit tenir compte de plusieurs paramètres tels que : la définition de la pièce à obtenir, la technique d'obtention de la pièce brute, le contexte de production, les moyens de production... Néanmoins on constate que ces méthodologies interprètent des modèles CAO et fonctionnent à partir des données déjà construites comme des mises en plan, des codes ISO... Or dans cette recherche nous cherchons à capitaliser à partir des données de bas niveaux comme un nuage de points et des mises en plan partielles. Toute la démarche de recherche de stratégie d'usinage est dans notre cas à construire et à supposer à partir d'un nuage de points. Pour cela, une étape d'acquisition des connaissances d'une pièce est nécessaire afin de rétro-concevoir à partir de données de bas de niveaux. Ces connaissances sont considérées via les progiciels cités dans le chapitre 1, comme la délimitation des frontières et leur transcription sous la forme d'une esquisse. Cette esquisse peut être redessinée par l'utilisateur ainsi, les dimensions peuvent être redéfinies. Donc, c'est l'utilisateur qui contrôle la géométrie reconnue. Dans la bibliographie, il existe des travaux qui se basent sur la connaissance pour la rétro-conception et d'autres qui permettent d'extraire les entités de fabrication pour contribuer au processus de rétro-conception. Au travers des sections suivantes, nous dressons les méthodologies, outils et autres traitant de la rétro-conception.

Le recensement de ces méthodes servira de base de références pour la réalisation de l'étape d'acquisition des connaissances de fabrication de la méthodologie REFM (figure 2.7).

Dans les sous-sections suivantes, nous ferons la synthèse de tous les travaux rencontrés dans la bibliographie.

2.2.1 Les systèmes basés sur la connaissance ou Knowledge based

Les méthodes à base de connaissances permettent de reproduire des pièces complexes ; cependant, elles permettent de capturer qu'un très bas niveau de sémantique métier c.à.d. géométrique. Or un modèle CAO n'est pas seulement un modèle géométrique. La géométrie

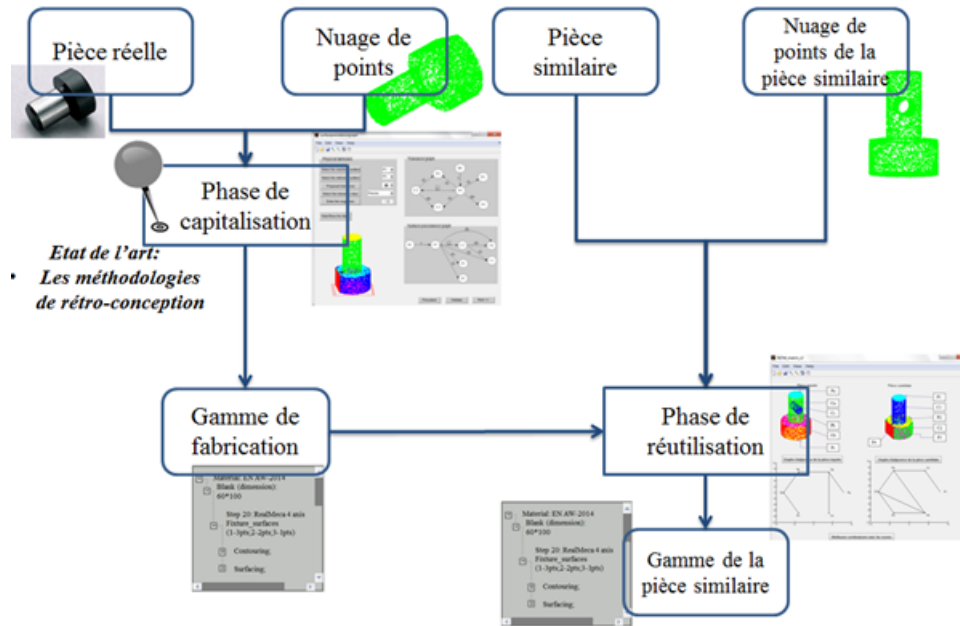


FIGURE 2.7: Positionnement des méthodologies de rétro-conception pour REFM.

d'une pièce réelle est une conséquence des nombreux choix issus du cycle de vie de cette pièce. Alors, l'analyse de ce cycle de vie pourrait expliquer certains aspects géométriques de la pièce. En outre, dans la conception, les aspects fabrications et fonctionnels sont souvent rattachés à des formes géométriques. Donc, aujourd'hui il est nécessaire d'intégrer dans un processus de rétro-conception ces connaissances à la géométrie. Il existe déjà des travaux qui traitent l'importance de la gestion des connaissances pour la rétro-conception.

Nous pouvons citer dans un premier temps les travaux de (Mohaghegh *et al.*, 2007). Ces travaux sont applicables sur un cas d'étude d'une aube de turbine. Ils proposent un processus de rétro-conception qui utilise les informations de différentes sources : la voie traditionnelle qui consiste à mesurer la pièce, et la révision des aspects géométriques et fonctionnels. Ces travaux suggèrent de détecter manuellement les entités spécifiques liées aux procédés de fabrication, aux exigences fonctionnelles et d'autres considérations avant l'utilisation de la segmentation. Par exemple, le moule d'une pièce possède des surfaces dépouillées de manière à faciliter le démoulage. L'angle de dépouille de la pièce moulée est une information géométrique. Par contre, dans cette recherche, l'analyse des connaissances n'était pas le cœur de la méthode, le concept a été plus basé sur la reconnaissance des entités qui est une approche géométrique.

Nous pouvons également citer les travaux de (Fisher, 2004) qui représentent une technique basée sur la connaissance pour améliorer et résoudre les problèmes de rétro-conception. Ces travaux permettent de trouver les paramètres de forme et de position même avec un

nuage de points bruités, en combinant les approches géométriques de rétro-conception avec les informations techniques d'un expert. Par exemple, l'utilisateur suppose que deux surfaces sont potentiellement parallèles, et l'ordinateur peut l'aider à vérifier la relation en calculant la probabilité qu'elles soient parallèles ou non.

Il existe également les travaux de (Germain, 2002) où le principal objectif était d'exploiter dans le processus de rétro-conception, les connaissances qui sont liées à l'intention de conception, à la fonctionnalité et au processus de fabrication de la pièce à retro-concevoir. Dans ces travaux, un exemple d'une poche délimitée par deux plans inférieur et supérieur est étudié. Les méthodes précédentes ont soit ajusté les deux plans individuellement soit utilisé un plan comme base pour l'entité. Cela conduit à des problèmes dans le calcul de la hauteur de la poche. La connaissance de fabrication et de conception favorise l'idée que les plans supérieur et inférieur doivent être ajustés en même temps avec des normales équivalentes. Cela se traduit par des plans parallèles.

Les travaux les plus connus et qui se basent sur la connaissance dans le processus de rétro-conception sont les travaux effectués par l'université d'Hampton, d'Utah, d'Arizona et le SCRA/Northrop-Grumman. En effet, le projet VPERI (VPERI, 2003) pour Virtual parts Engineering Research Initiative a été fondé par le bureau de recherche de l'armée américaine dont l'objectif est de construire des méthodologies, des outils et des technologies pour maintenir en fonctionnement des systèmes déjà conçus. En fait, il existe des matériels assez chers qui ne peuvent pas être remplacés assez facilement. Pour cela l'idée était de prolonger la maintenance de ces matériels en remplaçant les pièces défectueuses par des pièces de rechange. Cependant, les fabricants d'origine ne sont plus en mesure de fournir ces pièces.



FIGURE 2.8: Boîte de vitesses à rétro-concevoir (VPERI, 2003).

Ce projet a été testé sur le cas d'étude d'une boîte de vitesse (figure 2.8). Ce projet VPERI a établi un processus de rétro-conception dont l'entrée provient de trois ressources (ces ressources visent à acquérir des informations de natures diverses sur la pièce) :

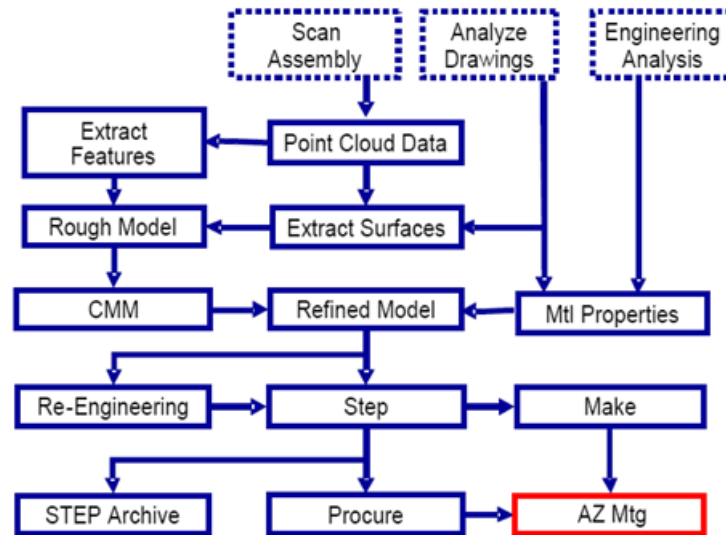


FIGURE 2.9: Le processus de rétro-conception dans VPERI (VPERI, 2003).

- La première ressource est l’assemblage scanné « scan assembly » numérisé par des technologies lasers ou d’autres techniques applicables.
- La deuxième ressource est l’analyse de dessins techniques « analyze drawings » qui permet de fournir des indications pour l’extraction des surfaces et des informations sur les contraintes entre les entités.
- La troisième ressource est une analyse collaborative « engineering analysis » qui permet d’établir des méthodologies d’analyse dont le but est de déterminer le procédé de fabrication et le matériau. Cette ressource est matérialisée par une plateforme collaborative de type modelleur CAO où les deux précédentes ressources peuvent être annotées collégialement par des ingénieurs.

Le processus de rétro-conception est illustré à la figure 2.9. L’assemblage scanné fournit un nuage de points qui à son tour alimente à la fois les modules d’extraction d’entités et d’extraction de surfaces pour produire un modèle peau. Ce modèle est utilisé pour piloter une machine à mesure tridimensionnelle (MMT) qui permet de raffiner la mesure des entités extraites.

Ce modèle est raffiné au niveau topologique car il est constitué d’entités précises. Comme déjà mentionné, ce modèle peut-être alimenté par deux autres ressources : l’analyse de dessins techniques et l’analyse collaborative, ce qui permet de fournir des spécificités sur le matériau et des spécifications fonctionnelles. A partir de ce modèle, l’archivage dans un modèle STEP est réalisable et ceci permet la re-conception, c’est-à-dire, qu’il permet de prendre en considération un nouveau processus de fabrication.

Cependant, dans VPERI, on remarque que l’ajout des connaissances reste une zone

d'ombre : peu d'informations sont disponibles sur le paramétrage des entités ainsi que sur leurs ajustements dans le nuage de points.

Plus récemment, on peut citer les travaux de (Durupt, 2010) qui ont proposé une méthode à base de connaissances nommée KBRE : Knowledge Based Reverse Engineering. Cette méthode consiste, à partir d'une pièce donnée et du nuage de points issu de sa numérisation, à générer un modèle CAO de cette pièce incluant la vue fonctionnelle. Elle est décomposée en deux étapes représentées à la figure 2.10 :

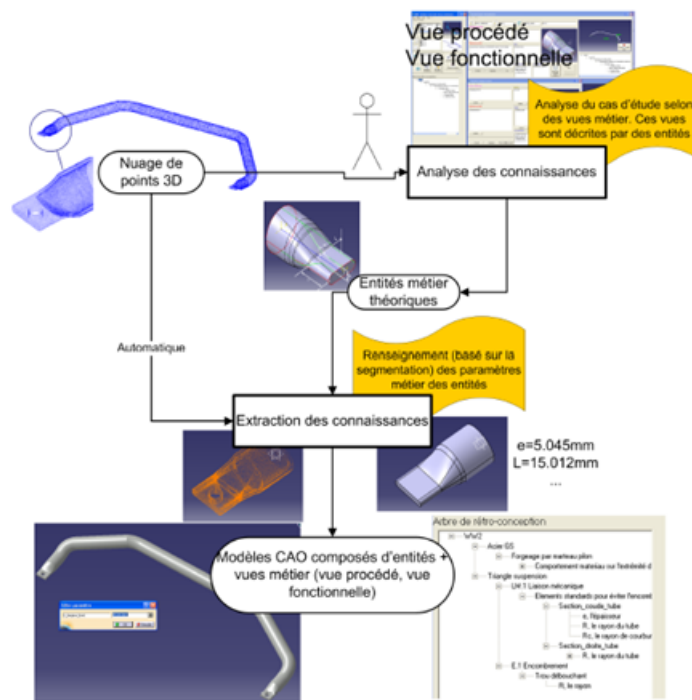


FIGURE 2.10: le processus général de la méthodologie KBRE (Durupt, 2010).

- Analyse des connaissances : Elle a pour but de renseigner la base de données KBRE de cas d'études. Elle permet de faire l'analyse sur le composant, d'émettre des suppositions, de sauver des hypothèses et de définir l'entité métier théorique. Cette phase d'analyse se réalise complètement dans le tout premier cas d'étude de rétro-conception.

Une fois l'analyse faite, KBRE sauvegarde les entités métier connues pour un cas d'étude de même nature déjà renseigné dans la base. Par conséquent, une liste d'entités connues sera directement proposée à l'extraction. Si toutes les entités sont définies, il ne restera qu'à exécuter l'extraction.

L'intérêt majeur de KBRE réside dans le fait que les connaissances représentées par les entités soient sauvées en fonction du cas d'étude déjà connu. Par exemple, à la figure 2.11, si un nouveau cas de croisillon de cardan à retro-concevoir se présente,

KBRE proposera directement les entités suivantes à l'extraction :

- « Corps principal », la forme telle qu'elle, peut être gardée et directement ajustée.
- « Pivot arbre », peut être également directement extrait.

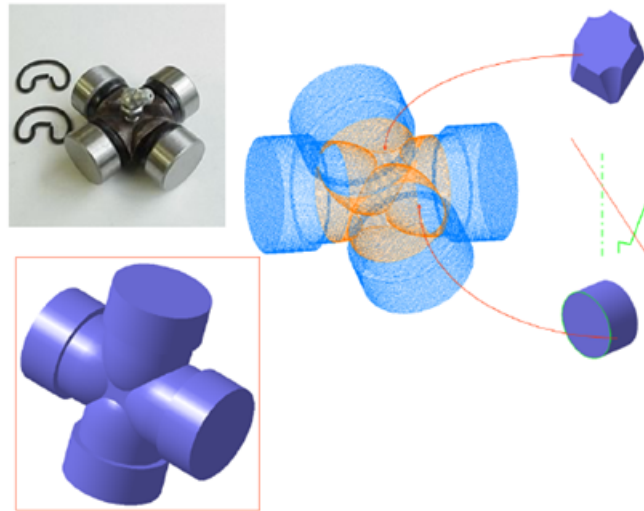


FIGURE 2.11: Un nouveau cas de croisillon à retro-concevoir (Durupt, 2010).

- Extraction des connaissances : Elle a pour but de construire un modèle CAO associé à des connaissances. Les connaissances sont matérialisées par le paramétrage métier des entités. Cette étape combine les aspects géométriques, tels que la segmentation, avec les aspects métier. La partie innovante de cette étape est de faire la connexion entre ce qui est identifiable sur le nuage de points et un paramètre métier pilotant la géométrie. KBRE se limite à réaliser cette connexion au niveau entité. L'extraction des paramètres, présentée dans cette partie fait l'hypothèse que la procédure de connexion entre géométrie et métier est séquentielle. En effet, l'utilisateur, par l'intermédiaire des relations entre paramètres définit les paramètres métier identifiables dans le nuage de points. De plus, la construction du modèle CAO par entités, permet de s'assurer que le modèle sera portable et modifiable. La re-conception et un nouveau paramétrage pourront s'effectuer.

Cependant, KBRE répond bien à une problématique industrielle dont la finalité est de permettre la re-conception au sens fonctionnel du composant. Toutefois, dans le cas d'une problématique industrielle où la finalité de la rétro-conception est de re-fabriquer le cas d'étude, cette méthode n'est plus adaptée car elle fournit une CAO métier orientée « fonctionnelle » paramétrée. Tout le processus de la gamme de fabrication reste à définir.

Dans le même cadre d'étude, on peut citer le projet ANR PHENIX (Product History based reverse Engineering : towards an Integrated eXpert approach) (Durupt *et al.*, 2013).

Ce projet a proposé une méthodologie de rétro-conception afin de construire un modèle CAO avec un réel sens métier (modèle incluant les fonctions, les paramètres et les relations). Cette méthodologie a combiné les approches de reconnaissances géométriques classiques (segmentation et reconnaissance d'entités) avec les approches sur les systèmes d'informations techniques. Elle a proposé un outil logiciel de rétro-conception qui était intégré à un PLM (Product Life Cycle Managment) afin de gérer la multi expertise et la multi connaissance extraites.

De la même façon, on peut citer le projet ANR METIS (ModElisation Tridimensionnelle de maquettes numériques par l'Intégration de données géométriques et de connaissances hétérogènes) (Ouamer-Ali *et al.*, 2014), (METIS, 2012). Ce projet considère que la RC d'un grand ensemble mécanique complexe ne peut pas se limiter seulement sur les informations géométriques. Il vise à intégrer l'ensemble des informations (nuage de points, photos, documentations techniques textuelles, etc.) disponibles sur l'ensemble mécanique étudié afin de les traiter et d'en extraire une maquette numérique, en s'appuyant sur une base de connaissances. L'un des enjeux clés de la démarche repose sur les concepts de signature et d'identification, qui doivent fournir les moyens de lier les données hétérogènes avec les connaissances afin de les exploiter pour reconstruire un modèle adapté à l'exploitation souhaitée.

Dans ces méthodologies, l'utilisateur interagit avec le système, cependant, la modélisation solide reste très manuelle. L'avantage est que ces méthodes apportent une première démarche de rétro-conception. Cependant, qu'en est-il de la définition et de l'ajustement des entités ? Et de quelles natures sont-elles ?

Pour tenter d'apporter une réponse à ces questions, nous explorons les méthodologies basées sur l'extraction et ajustement d'entités dans un nuage de points.

2.2.2 Définition et rappel sur le concept d'entité

Avant d'explorer les systèmes d'extraction d'entités, nous allons définir le concept d'entité exhaustivement.

Une entité peut être définie ici comme (Shah, 1991), (Shah & Mäntylä, 1995) :

- Un constituant physique d'une pièce qui représente les formes et les attributs technologiques associés aux opérations et outils de fabrication.
- Un groupement des éléments géométriques et topologiques qui nécessite un référencement.
- Les entités sont des éléments utilisés dans la génération, l'analyse et l'évaluation de la conception.

- L'entité représente une classification des caractéristiques d'objets qui ont une signification dans un domaine.

Toutefois, il existe un nombre quasi illimité de types d'entités. De nombreuses références les ont définies et classées comme (Xue *et al.*, 1996), (Harik, 2007) : Par exemple, une entité d'usinage est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour laquelle un processus d'usinage est connu ; ce processus est quasi indépendant des processus d'usinage etc. (Bourdet & Villeneuve, 1990). (Harik, 2007) :

- Entité de conception fonctionnelle : ensemble d'entités relatives à des fonctions spécifiées par le cahier des charges d'un produit. Elles doivent contenir l'intention de conception et les paramètres non géométriques relatifs à la fonction et aux performances attendues.
- Entité topologique : elle exprime les relations topologiques entre et dans les entités (Jong *et al.*, 1992).
- Entité de peau : elle subdivise les différentes surfaces des pièces en fonctionnalités. Qu'elles soient cinématiques, esthétiques, ou sécuritaires (Belloy, 1994), les entités de peaux permettent d'exprimer un certain nombre de contraintes sur certaines surfaces spécifiques.
- Entité de tolérance : les entités de tolérances fixent les écarts admissibles sur la forme définie, les dimensions et le positionnement.
- Entité d'usinage : une entité d'usinage est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour laquelle un processus d'usinage est connu ; ce processus est quasi indépendant des processus d'usinage etc. (Bourdet & Villeneuve, 1990)

La norme STEP peut être utilisée pour la représentation d'entités normalisées (Remy *et al.*, 2008). En effet, de nombreux AP (Application Protocol) utilisent des entités. A titre d'exemple, la norme STEP utilise des entités d'usinage (Machining Feature) définies comme : ***is the combination feature and semantics. Therefore is the geometric information about a well defined shape, and the manufacturing semantics that aid in associating manufacturing volume removal process (Scra, 2006)***

Comme sur la figure 2.12, les AP224 (Mechanical Product Definition for Process Planning Using Machining Features), AP223 (Exchange of design and manufacturing product information for cast parts), AP219 (Manage dimensional inspection of solid parts or assemblies, AP238 (Application interpreted model for computerized numerical controllers) et AP240 (Numerical Control Process Plan) utilisent des entités d'usinage. La figure 2.13 montre des exemples, sur une pièce d'étude, d'entités d'usinage. Un autre exemple, l'AP223 utilise des entités de moulage (casting feature) dont la liste est disponible à la table 2.3. Selon la vue

"procédé", toutes ces entités pourraient être prises en compte pour leur matérialisation géométrique. Néanmoins, la norme STEP n'offre pas d'entités fonctionnelles. Par conséquent, des formes personnalisables doivent être suggérées à l'utilisateur dans le cas où des entités plus spécifiques métier apparaissent.

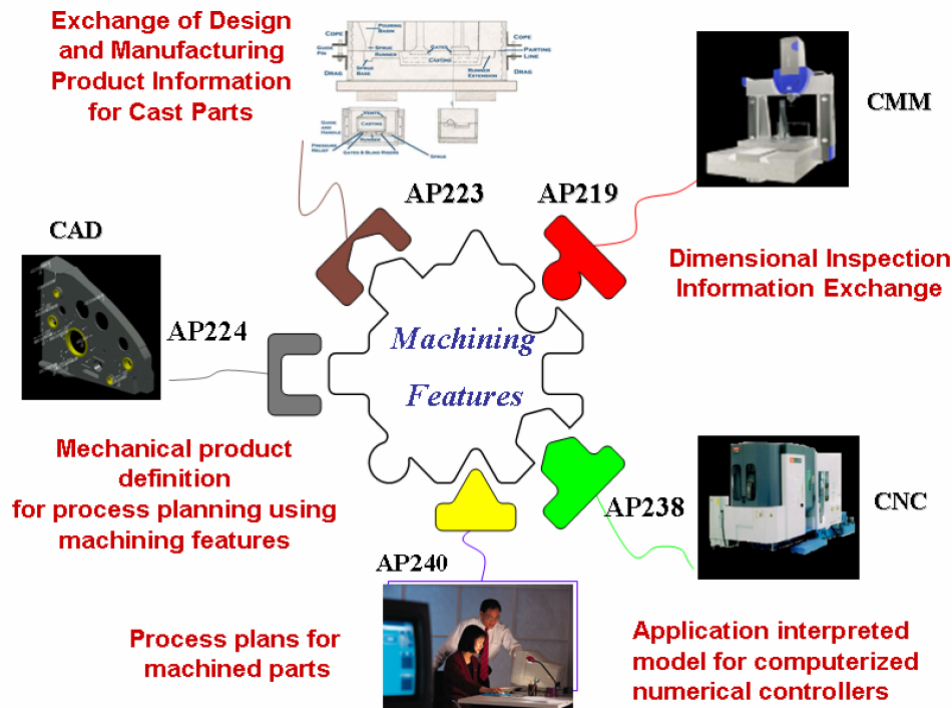


FIGURE 2.12: Les AP de STEP utilisant des entités d'usinage (Scra, 2006).

2.2.3 Les systèmes d'extraction d'entités ou Feature based

Les systèmes d'extraction des entités sont adaptés à la fabrication des pièces mécaniques dans le contexte de la rétro-conception (Kumar *et al.*, 2013). Il existe assez peu de méthodologies qui établissent une reconnaissance d'entités à partir du nuage de points ou de maillage. Dans la plupart des méthodologies proposées, l'extraction de ces entités fait appel à des fonctions ou relations géométriques pures. La reconstruction par entités est très avantageuse car elle permet une modélisation solide qui dans le cas de la rétro-conception améliore la qualité du modèle CAO et ouvre de possibilités de re-conception. En plus, l'extraction des entités aide l'utilisateur dans son processus de prise de décision. En effet, plus le modèle CAO obtenu est paramétrable, plus l'utilisateur pourra aisément déterminer quels processus, quels outils sont à utiliser pour la re-fabrication de la pièce.

Dans cette section, nous nous attacherons à proposer une vue globale des travaux portant sur la reconnaissance d'entités à partir de fichiers de bas niveaux tels que le nuage

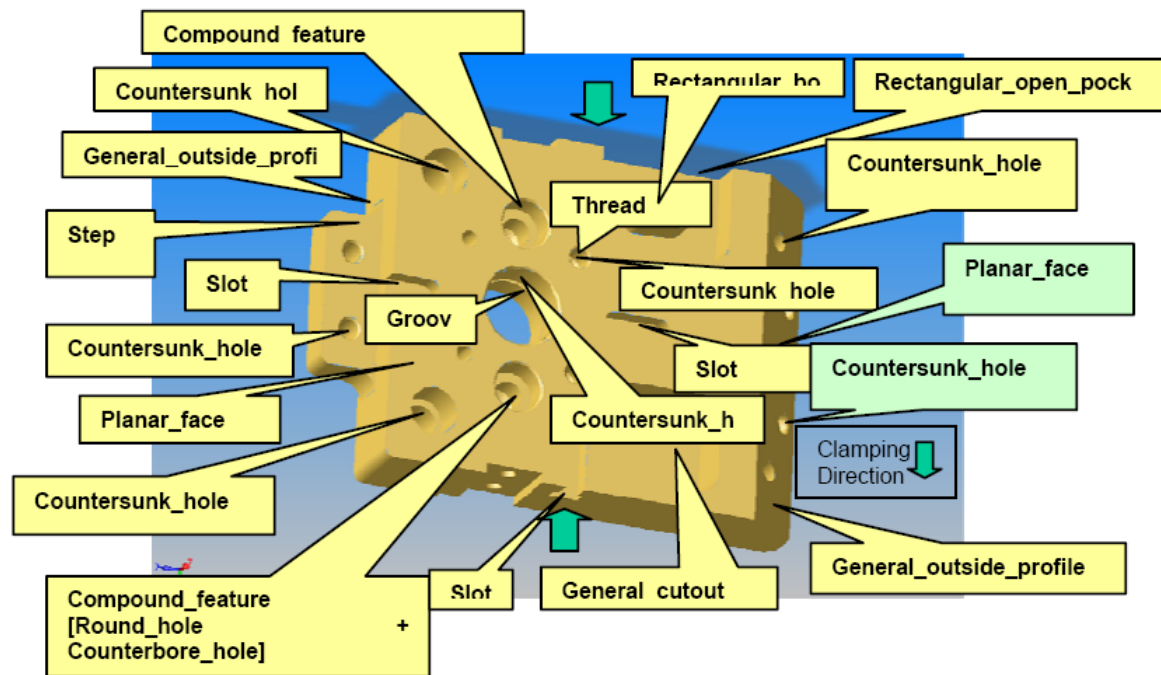


FIGURE 2.13: Des exemples d'entités d'usinage (Scra, 2006).

de points, le maillage surfacique ou volumique.

Nous pouvons citer dans un premier temps les travaux de (Thompson *et al.*, 1999) qui suggèrent un prototype d'un système de rétro-conception qui utilise des entités de fabrication comme primitives géométriques des pièces mécaniques. REFAB (Reverse Engineering Feature Based) est une approche basée entités. Cette approche permet de retro-concevoir des modèles avec une grande précision, même lorsque les données originales du capteur 3D comportent des erreurs importantes.

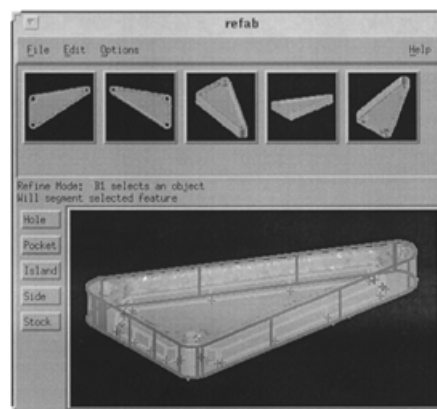


FIGURE 2.14: L'interface du système REFAB (Thompson et al., 1999).

Le système REFAB est interactif, il se base sur l'information géométrique en prenant

TABLE 2.2: *Entités de moulage STEP AP223 (Scra, 2006).*

Mold locks	Chill area	Boss
Core	Basin	Core Print
Contact	Loose piece	Drafted Surface
Vent	Parting surface	Pad
Chaplet	Rounded corner	Chill
Cope	Slot	Drag
Step	Ear/Lug	Runner
Fillet	Ingate	Filter/strainer
Feeder	Finish/Machining allowance	Sprue
Hole	Pocket	Riser
Gating sytem	Ejector system	

en compte les connaissances sur le procédé de fabrication. Ce qui permet à l'utilisateur d'intervenir dans le processus de rétro-conception : le nuage de points est présenté à l'utilisateur, puis l'utilisateur sélectionne dans une liste prédéfinie une entité qui peut se trouver dans le nuage de points, il spécifie l'emplacement approximatif de l'entité dans le nuage de points, et puis le système ajuste l'entité spécifiée en utilisant une méthode des moindres carrés. Un exemple d'interface de REFAB est illustré à la figure 2.14. Donc REFAB, basé sur des entités géométriques simples, permet de créer un modèle CAO d'une pièce en spécifiant le nombre d'entités de fabrication et leurs placements dans le nuage de points. Les entités telles que des trous, des poches, des bossages et des rainures etc. sont positionnées et ajustées.

Etant donné que seules les entités simples sont utilisées dans REFAB, cette méthode est incapable de manipuler des entités complexes. En plus, même si ce système permet de placer quelques entités de fabrication, leurs ajustements avec le reste de la géométrie est problématique. Les jointures entre les entités ne sont pas clairement délimitées.

Nous pouvons également citer les travaux de (Sunil & Pande, 2008). Ces travaux ont mis en œuvre un système de reconnaissance automatique des entités à partir des surfaces de forme libre dans les pièces de tôlerie. Les propriétés géométriques, telles que des courbures moyennes et Gaussiennes, sont utilisées pour segmenter le modèle STL (généré à partir du nuage de points) en régions significatives. Après le découpage du modèle en différentes régions, celles-ci sont regroupées pour identifier des entités spécifiques. Une entité sur une

surface de forme libre est définie simplement comme un ensemble de régions significatives connectées ayant une géométrie et topologie particulières.

Chaque entité est détectée à l'aide de règles appliquées sur les régions. Par exemple, pour détecter des plans, les normales sont comparées afin de vérifier qu'elles ne sont pas colinéaires. Alors que pour détecter des cylindres, l'image Gaussienne est utilisée. Un autre exemple, l'entité « trou de type extrudé » est détectée si le trou est entouré par une région de type « selle » et d'une diversion entre les normales. Une interface d'illustration est donnée à la figure 2.15.

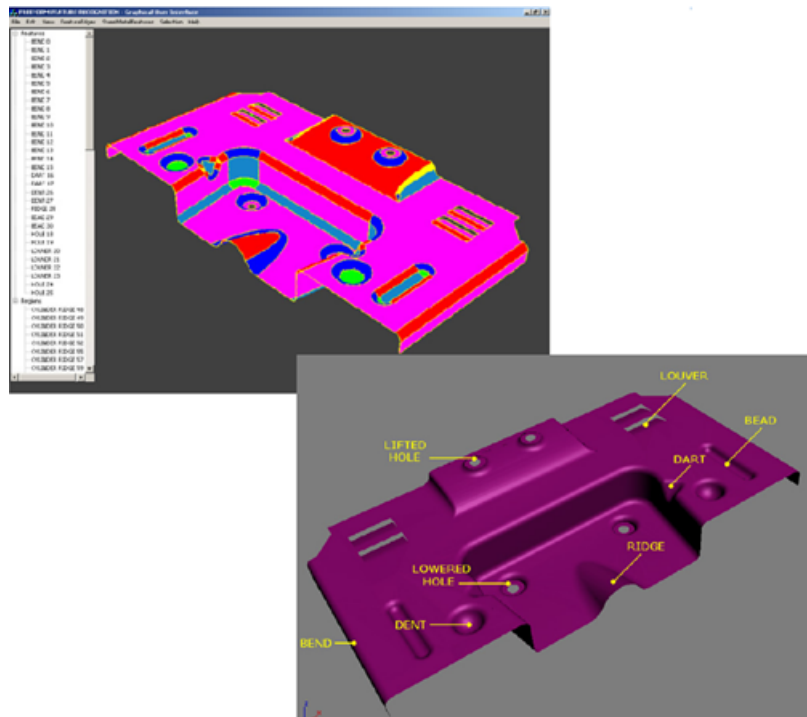


FIGURE 2.15: La reconnaissance d'entités de tôlerie (Sunil & Pande, 2008).

Cependant, ce système a été réalisé sur des modèles CAO sauvé en format STL. Les fichiers de traitements sont sans bruits de mesures. À l'heure actuelle, un approfondissement des algorithmes de reconnaissance d'arêtes et de régions reste à définir.

Plus récemment, les travaux de (Bénrière *et al.*, 2013) sont divisés en trois étapes, illustrés à la figure 2.16 :

- Extraction des primitives géométriques : cette étape consiste à extraire et calculer les surfaces (plans, cylindres, sphères et cônes) à partir d'un maillage 3D. Dans cette étape, la courbure est utilisée pour caractériser la forme autour de chaque sommet. Ensuite, les sommets appartenant à une entité sont alors détectés et regroupés. Enfin les paramètres des surfaces sont calculés pour chaque zone de points.

- Reconstruction de la topologie du modèle B-Rep : cette étape consiste à extraire les relations des voisinages entre les surfaces. Les contours de chaque surface sont alors calculés à partir des intersections entre primitives adjacentes.
- Ajustement de surfaces paramétriques sur les zones non converties : cette étape consiste à définir une zone de maillage du modèle B-Rep non défini par l'étape précédente. Elle se base sur l'utilisation des surfaces paramétriques afin de définir ces zones.

Cependant, cette méthode permet d'extraire des surfaces à partir d'un maillage 3D seulement.

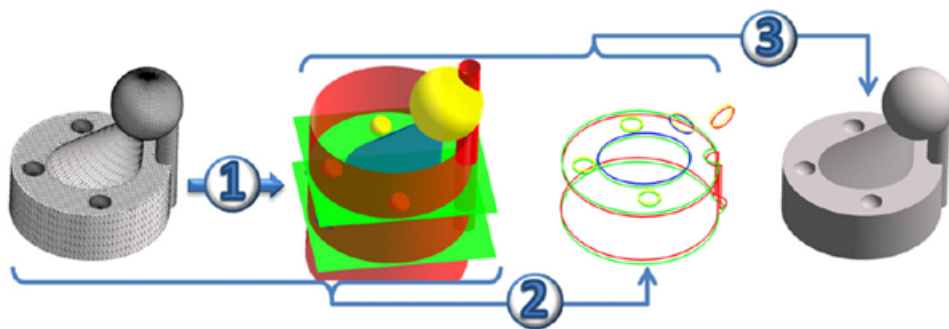


FIGURE 2.16: Procédure de la rétro-conception (Bénière et al., 2013).

De plus, on peut citer les travaux de (Wang *et al.*, 2012) où ils ont proposé une méthode pour la reconstruction des modèles 3D. La méthode permet de reconstruire un modèle géométrique à partir du maillage de l'objet (figures 2.17, 2.18). Elle est composée de quatre étapes principales :

- Tout d'abord, le maillage d'entrée doit être traité pour éliminer le bruit.
- Deuxièmement, le maillage est segmenté afin d'obtenir des entités géométriques individuelles.
- Ensuite, deux méthodes sont intégrées : méthode basée sur les entités solides et méthode basée sur les entités surfaces, afin de reconstruire les entités primitives à partir des entités géométriques segmentées dans l'étape précédente.
- Finalement, les opérations de modélisation comme les opérations de coupe de surfaces, sont effectuées pour assembler les entités primitives afin d'obtenir le modèle final.

On peut constater que les méthodes de rétro-conception basées sur l'extraction des entités, se basent sur la géométrie et reconstruisent des modèles CAO avec des entités non ajustées entre elles.

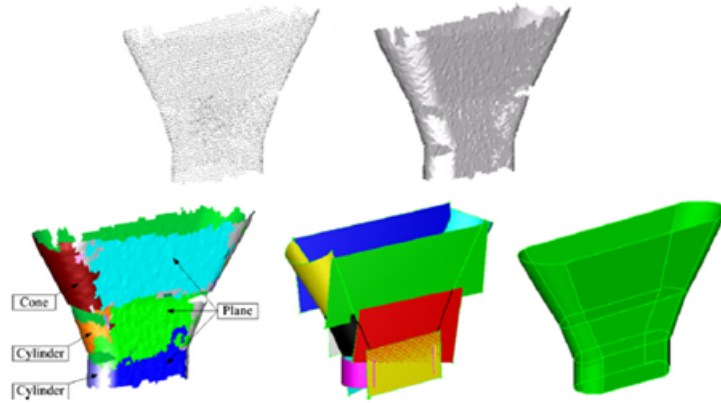


FIGURE 2.17: *Reconstruction d'une pièce mécanique (Wang et al., 2012).*

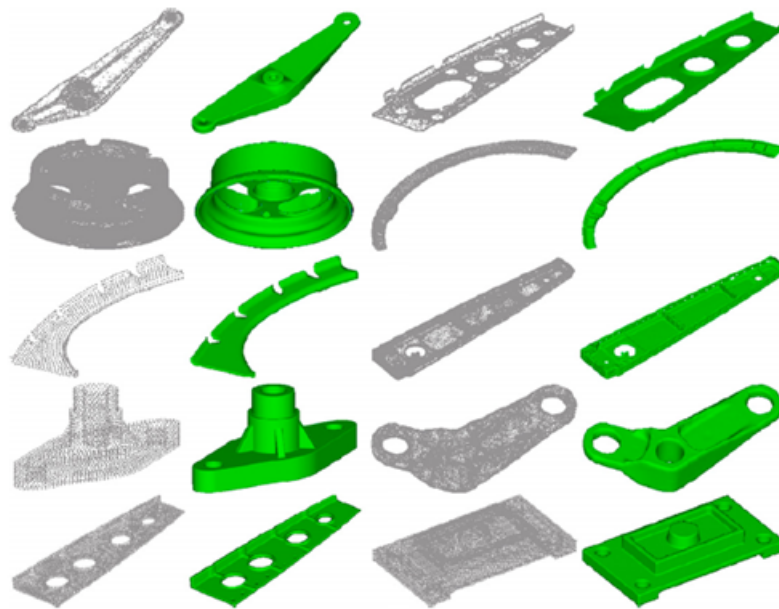


FIGURE 2.18: *Exemple des pièces reconstituées par la méthode de (Wang et al., 2012).*

2.2.4 Conclusion sur les méthodologies de rétro-conception

Nous pouvons remarquer d'après l'état de l'art ci-dessus que peu de méthodologies ont pris en compte les aspects ou les contraintes de fabrication dans le processus de rétro-conception. Or un processus de rétro-conception sera réalisé avec succès si les contraintes de fabrication sont prises en considération tout au long de la démarche. La méthodologie REFM souhaite combler ce manque. Pour cela, nous émettons l'hypothèse que le processus de RC puisse être supportée par des méthodologies KBE (Durupt *et al.*, 2013) (cf. section 2.2) et DFM (Design For Manufacturing) afin d'intégrer le plus tôt possible les contraintes de fabrication dans le processus de RC.

2.3 État de l'art : la "conception pour la fabrication" dans un contexte de rétro-conception

Nous pouvons remarquer, à la suite de l'état de l'art précédent, que la RC a besoin d'une méthodologie afin de gérer les connaissances de fabrication au cours du processus de RC et de guider l'utilisateur. L'intérêt d'une telle méthodologie serait de permettre l'élaboration d'une CAO orientée fabrication incluant les différentes étapes d'un Avant projet D'étude de Fabrication. A notre sens, les concepts DFM (Design For Manufacturing) serviront de base de référence pour la réalisation de l'étape d'acquisition des connaissances de la méthodologie REFM (figure 2.19).

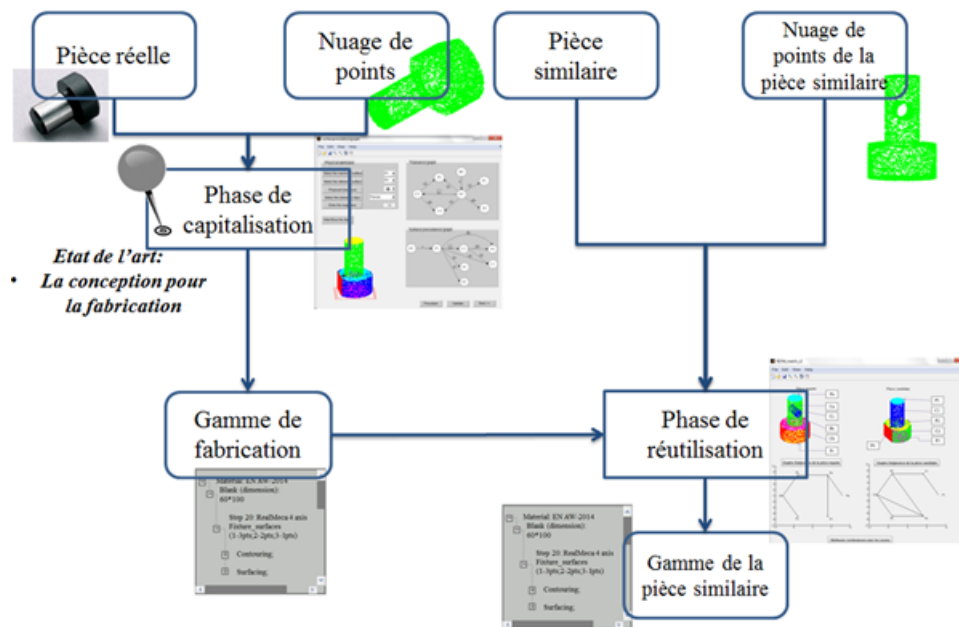


FIGURE 2.19: Positionnement de la conception de fabrication par rapport à REFM.

Dans les sous-sections suivantes, nous ferons la synthèse des travaux de la littérature portant sur le DFM.

La conception pour la fabrication ou Design For Manufacturing (DFM) est une pratique de la conception de produits en tenant compte de la fabrication. L'activité DFM permet d'optimiser la fabrication, la qualité, la fiabilité, le coût et le temps de production d'un produit (Zhao & Shah, 2005), (Saidi *et al.*, 2015). La mise en œuvre de l'approche DFM nécessite la collaboration de la conception et de la fabrication au sein d'une industrie. En d'autres termes, DFM concerne un concepteur qui a la charge d'affiner, d'un point de vue fabrication, la définition d'une pièce mécanique (Tollenaere, 1998).

En analogie avec certaines étapes de cycle de vie du produit, nous avancerons que des

solutions de types DFM (Design For Manufacturing) pourront être adaptées au contexte de la rétro-conception. En effet, l'approche DFM peut être décomposée en plusieurs activités telles que : le choix des procédés, le choix des matériaux et l'évaluation de la fabricabilité ou manufacturabilité des produits (figure 2.20).

- Le choix des procédés et des matériaux est une activité très importante de la conception pour la fabrication. Les procédés doivent être choisis durant le processus de conception afin d'optimiser ce dernier (Corbett *et al.*, 1991). C'est un des éléments de base de l'étude du DFM présentée sur la figure 2.20.
- L'évaluation de la manufacturabilité est l'activité qui permet au concepteur de faire l'analyse et l'évaluation d'un produit avec les exigences requises d'un point de vue fabrication et avec un minimum de coût et de temps. Pour cela, il est nécessaire de décomposer le produit en sous éléments (par exemple en surfaces, tolérances, etc.) liés aux données de fabrication.

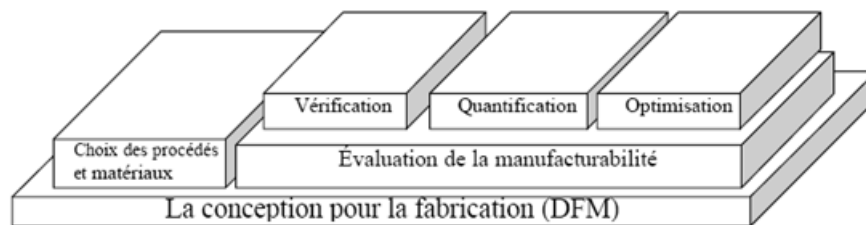


FIGURE 2.20: Définition schématique de la conception pour la fabrication (DFM) (van Vliet *et al.*, 1999).

2.3.1 Le choix des procédés et des matériaux

Une des activités les plus importantes de la conception pour la fabrication est le choix des procédés de fabrication (figure 2.20). En effet, le choix du procédé le plus convenable au bon moment c.à.d. le plus tôt possible dans la phase de la conception, améliore la fabrication en assurant la qualité et la fiabilité.

Parmi les travaux essentiels de la littérature, il est intéressant de citer ceux de (Boothroyd *et al.*, 2010). L'approche proposée permet de sélectionner des couples Procédé / Matériau. Cette sélection est basée sur la capacité des procédés à réaliser des exigences géométriques et à respecter les attributs des matériaux. Les matériaux et les procédés incapables de réaliser certains détails d'attributs de la pièce étudiée sont éliminés. La table 2.2 montre un exemple de données permettant la sélection des procédés. Pour une pièce, une gamme de procédés est à sélectionner car la majorité des pièces est réalisée non pas par un seul procédé mais par une gamme de procédés pour répondre à toutes les contraintes de la pièce d'étude.

TABLE 2.3: Procédés et leurs capacités à réaliser des attributs donnés (Boothroyd et al., 2010).

Process	Part size	Tolerances	Surface finish	Shapes produced competitively
Sand casting	Weight: 0.2 lb-450 ton Min wall: 0.125 in.	General: ± 0.02 (1 in.), ± 0.1 (24 in.) For dimensions across parting line add ± 0.03 (50 in. ²), ± 0.04 (200 in. ²)	500-1000 micro-inches	Large parts with walls and internal passages of complex geometry requiring good vibration damping characteristics
Investment casting	Weight: 1 oz-110 lb Major dimension: to 50 in. Min wall: 0.025 (ferrous), 0.060 (nonferrous)	General: ± 0.002 (1 in.), ± 0.004 (6 in.)	63-25 micro-inches	Small intricate parts requiring good finish, good dimensional control, and high strength
Die casting	Min wall (in.): 0.025 (Zn), 0.05 (Al, Mg) Min hole dia. (in.): 0.04 (Zn), 0.08 (Mg), 0.1 (Al) Max weight (lb): 35 (Zn), 20 (Al), 10 (Mg)	General: ± 0.002 (1 in.), ± 0.005 (6 in.) (Zinc) ± 0.003 (1 in.), ± 0.006 (6 in.) (Alum, Mg) Add ± 0.004 across parting line or moving core	32-85 micro-inches	Similar to injection molding
Injection molding (thermoplastics)	Envelope: 0.01 in. ³ -80 ft ³ Wall: 0.03-0.250 in.	General: ± 0.003 (1 in.), ± 0.008 (6 in.) Hole dia: ± 0.001 , ± 0.002 Flatness: ± 0.002 in./in. Increase tol. 5% for ea. ad. mold cavity Increase tolerance ± 0.004 for dimensions across parting line	8-25 micro-inches	Small to medium sized parts with intricate details and good surface finish
Structural foam molding	Weight: 25-50 lb Wall: 0.09-2.0 in.	Approximately that of injection molding	Poor: paint generally required	Large, somewhat intricate parts, requiring high stiffness and/or thermal or acoustical insulating properties

Cette approche a donné lieu à un module informatique nommé DFMA (Design For Manufacturing and Assembly) comprenant l'outil DFM qui a pour but d'estimer le coût de la fabrication et de choisir les couples Procédé / Matériau.

On peut citer les travaux de (Gupta *et al.*, 2003) où le choix des procédés et des matériaux sont basés sur trois étapes :

- Créer les couples matériaux/procédés en tenant compte des exigences économiques et géométriques. Dans cette étape, les matériaux qui répondent aux exigences doivent être sélectionnés. Puis pour chacun des matériaux sélectionnés, il faut chercher dans la base de données des procédés compatibles avec le matériau et répondant également aux exigences. Le résultat est un ensemble de couples Matériau/Procédé compatibles et répondant aux exigences.
- Déterminer les gammes admissibles par l'ajout de procédés secondaires et tertiaires dans les différentes combinaisons de matériaux et procédés primaires en construisant les gammes de procédés pour le brut de fabrication et les différentes modifications d'entités géométriques.
- Choisir les gammes de matériaux et de procédés. Dans cette étape, le concepteur peut analyser les différentes gammes dominantes. La comparaison sera basée sur l'estima-

tion du coût fournie par le logiciel SEER-DFM (www.galorath.com). Le concepteur aura le choix définitif.

Dans la bibliographie, nous pouvons citer, plus récemment, les travaux de (Ashby *et al.*, 2013) avec le module informatique CES EduPack. Le choix des procédés est réalisé en considérant simultanément plusieurs paramètres tels que :

- Le matériau utilisé
- La géométrie
- Les fonctions à réaliser
- Les caractéristiques (attributs) des procédés (taille, rugosité, forme possibles).

D'après ces travaux, la meilleure solution de conception ne peut être déterminée que si et seulement si les décisions du choix du matériau, de la géométrie et des procédés sont considérées simultanément (Skander, 2006).

Au début du processus de la sélection du procédé de fabrication, le concepteur peut ne pas être capable de prendre des décisions sur la géométrie de la conception. Ces facteurs de géométrie peuvent, à leur tour, influencer la sélection de procédés de fabrication (Kerbrat, 2009). Dans le cas où le concepteur n'a pas une idée sur certains des facteurs indiqués ci-dessous, il peut se baser sur d'autres facteurs géométriques disponibles sur la pièce.

Les facteurs géométriques qui influencent la sélection des procédés de fabrication sont :

- **La forme et la complexité de la pièce** : la complexité est définie ici comme la présence des entités telles que les contre-dépouilles, les trous, les filets, etc. La présence de l'un ou de tous ces éléments peut entraîner une difficulté dans la fabrication et peut entraîner des opérations supplémentaires pendant la fabrication.
- **La dimension maximale et l'épaisseur de la paroi de la pièce** : la dimension maximale et l'épaisseur de la paroi sont deux facteurs qui influencent le choix des procédés de fabrication du candidat. L'épaisseur de la paroi demandée impose des restrictions sur le processus de mise en forme qui peut être utilisé pour obtenir la forme de la pièce.

La taille maximale (longueur, largeur, hauteur) qui peut être traitée par un processus/ machine est limitée. Ces limitations peuvent, à leur tour, imposer des limitations sur la taille des pièces qui peuvent être traitées par le processus.

- **Tolérance et finition** : les procédés de fabrication ont une limitation sur la tolérance et l'état de surface que l'on peut obtenir. Ainsi une certaine tolérance, sur une dimension, doit être autorisée afin de le rendre fabricable. Ce type de tolérance est appelé tolérance dimensionnelle. De même, une certaine tolérance doit être autorisée

sur la forme souhaitée de la pièce. C'est qu'on appelle la tolérance géométrique. Plus la tolérance est serrée, plus la fabrication de la pièce est difficile, et vice versa.

La forme finale d'un composant ou d'une pièce est, le plus souvent, atteint en utilisant plus d'un procédé de fabrication. Ashby suggère de classer ces procédés selon le schéma présenté à la figure 2.21 :

- **Procédés primaires** : présentés par le premier niveau sur la figure. Ils représentent la création de forme telle que la fonderie, le moulage, le forgeage, etc.
- **Procédés secondaires** : représentés par le deuxième niveau de la figure. Ils sont spécifiques à la modification de forme comme les procédés d'usinage, de découpage, de meulage, etc. ; et à l'amélioration des propriétés de la surface telle que le traitement thermique.
- **Le troisième niveau** de la figure concerne les procédés dits assemblage comme le soudage, le rivetage, etc. ; et puis les procédés de traitements de surfaces de l'assemblage telle que le polissage et la mise en peinture.

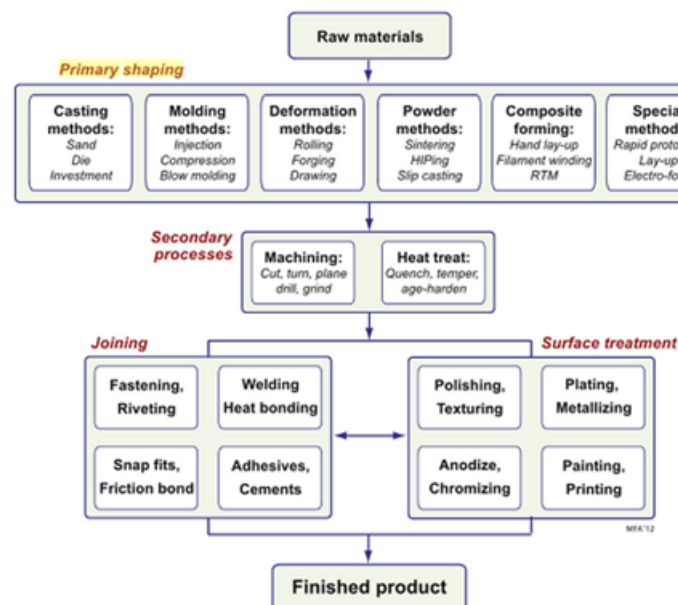


FIGURE 2.21: Le classement des procédés de fabrication (Ashby et al., 2013).

La méthode utilisée par Ashby, afin de sélectionner les procédés, consiste à proposer tous les procédés possibles et à écarter ceux qui ne sont pas cohérents spécialement avec la géométrie et potentiellement avec le matériau défini. Une phase de classement est essentiellement effectuée à partir des critères de coût. Le choix final des procédés est effectué par rapport au critère de coût, à l'expertise de l'utilisateur, ainsi qu'à la disponibilité des ressources de l'entreprise. On peut synthétiser qu'Ashby considère dans son approche que le choix du procédé et du matériau sont intimement liés (figure 2.22).

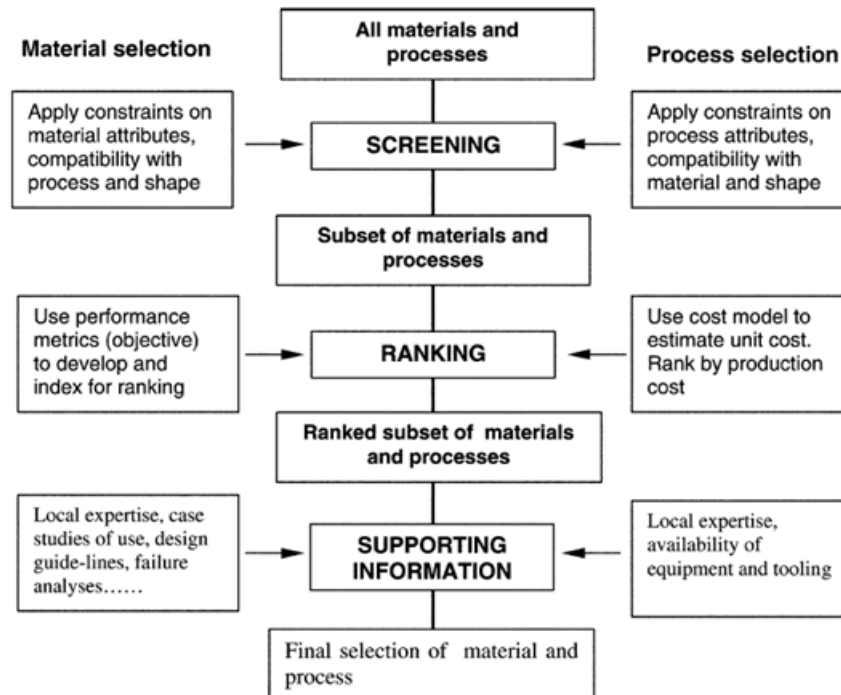


FIGURE 2.22: Sélection des procédés et des matériaux (Ashby et al., 2004).

Pour choisir le matériau convenable, il faut se baser sur les propriétés des matériaux qui sont associées à certaines exigences de contraintes que le matériau doit satisfaire pour être applicable à la conception. Ces exigences de contraintes, appelées les exigences de contraintes non négociables par Ashby, doivent être remplies indépendamment de la solution de la conception. En d'autres termes, quel que soit le domaine de la solution, le matériau utilisé dans la conception doit satisfaire à ces exigences, et donc posséder les propriétés des matériaux associées. Ces exigences découlent des contraintes fonctionnelles, des contraintes environnementales, des contraintes de fabrication, et d'autres. Ces contraintes sont converties en propriétés des matériaux qui sont utilisées pour sélectionner les matériaux correspondant. Cette sélection permet au concepteur d'identifier un sous-ensemble de matériaux qui satisfont aux exigences des contraintes et, simultanément, d'éliminer les matériaux qui ne peuvent pas accomplir le travail parce que l'un ou plusieurs de leurs propriétés se situent en dehors des limites des exigences des contraintes. L'avantage de cette méthode est qu'elle réduit l'attention du concepteur à un sous-ensemble de matériaux qui se rapportent à la conception, à condition que le concepteur ait correctement identifié les contraintes non négociables.

Etant donné que cette sélection est faite à partir de toute la gamme de matériaux disponibles, un choix initial d'un ou plusieurs groupes peut être fait à partir de familles prédéfinies de matériaux (par exemple de la céramique, du bois, des alliages d'aluminium, des aciers, etc.), à l'aide des graphes de matériaux comme ceux fournis par Ashby (figures

2.23 et 2.24). Ces graphes montrent la variation d'une propriété d'un matériau par rapport à un autre, pour différentes familles de matériaux.

En sélectionnant un graphe qui correspond à la propriété du matériau nécessaire, le concepteur peut rapidement mettre l'accent sur le contenu du graphe et sélectionne, les groupes de matériaux qui possèdent la propriété demandée et, par conséquent, satisfont aux exigences de contraintes. La figure 2.23 nous montre un graphe qui décrit la variation du module d'Young par rapport à la densité, alors que la figure 2.24 nous montre la variation de la ténacité à la rupture par rapport à la limite d'élasticité.

2.3.2 Analyse de fabricabilité au cours de la conception

Les approches citées ci-dessus sont focalisées sur le choix des procédés de fabrication et sur le choix des matériaux. L'approche DFM peut aussi considérer toutes les contraintes de fabrication que le concepteur devra prendre en compte dans le processus de conception (Blanch *et al.*, 2012).

En premier lieu, on peut citer les travaux de (Jaques *et al.*, 1991) où ils proposent une approche qui permet de prendre en compte dans le processus de conception, des contraintes d'usinage telles que les types de machines, les outils, la forme brute et le matériau de la pièce d'étude. Cette approche permet aussi de simuler la mise en position des pièces et leur usinage et de spécifier les tolérances dans la phase de conception. Le concepteur doit être dans ce processus un expert en usinage vu que la conception est restreinte à certaines formes géométriques fabricables.

On peut citer les travaux de Feng et Kusiak (Feng & Kusiak, 1995) où l'approche proposée est d'intégrer les contraintes de fabrication et notamment les contraintes d'usinage dans le processus de conception, grâce à des algorithmes de propagation de contraintes. L'approche contient deux bases de données : la première permet de stocker les contraintes comme par exemple la raideur du matériau, les températures de transition du matériau, etc. alors que la deuxième base permet de stocker les entités géométriques comme par exemple un axe, un engrenage, un cylindre, un parallélépipède, etc., qui permettent au moteur d'interférence de déterminer, dès qu'une forme est définie, si celle-ci est fabricable ou non (figure 2.25).

On peut encore citer les travaux de (Zhao & Shah, 2005) où ils présentent les étapes générales d'une analyse de fabricabilité pour tous les domaines de fabrication. Ces travaux permettent de traiter les problèmes liés à la fabrication au début de la phase de conception. Ils ont considéré que l'analyse de fabricabilité ne peut pas se faire en une seule étape, trois étapes générales sont classées dans le module d'évaluation : processus de pré-sélection,

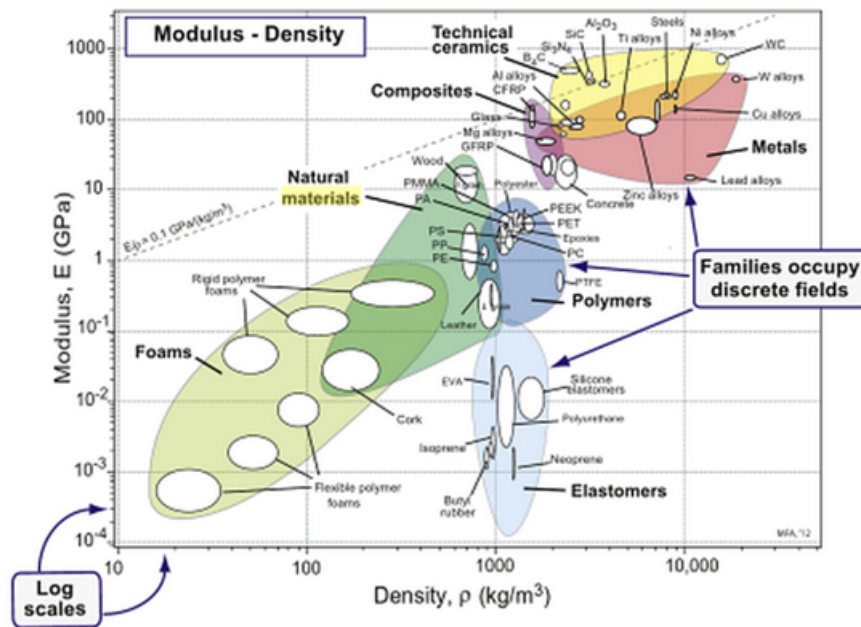


FIGURE 2.23: Graphe de sélection des matériaux en tenant compte du module d'Young et de la densité (Ashby et al., 2013).

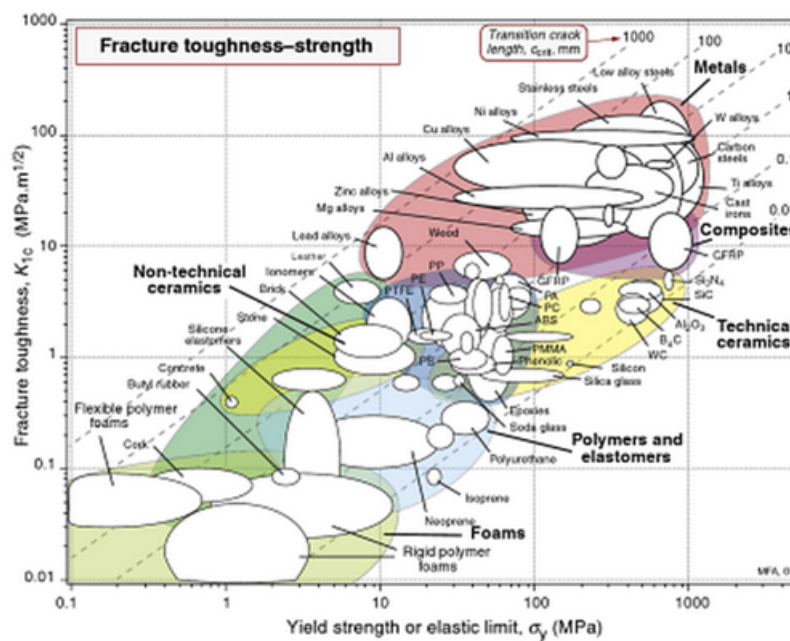


FIGURE 2.24: Graphe de sélection des matériaux en tenant compte de la ténacité à la rupture et de la limite d'élasticité (Ashby et al., 2013).

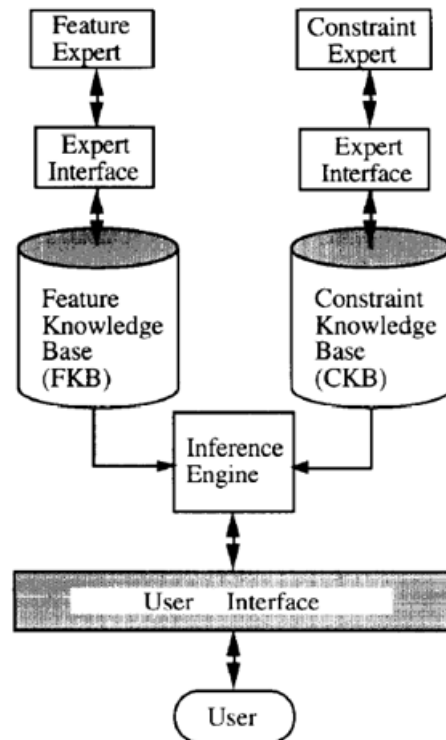


FIGURE 2.25: *Système de conception sous contraintes (Feng & Kusiak, 1995).*

l'analyse qualitative et l'analyse quantitative (figure 2.26). Ainsi, différents niveaux d'abstraction pour l'analyse de fabricabilité sont pris en compte. Les trois modules d'évaluation de la fabricabilité interagissent avec les données et les connaissances à différents niveaux :

- Le module processus de pré-sélection utilise des attributs de la pièce et de procédés de haut niveau. Dans ce module, les procédés de fabrication et la pièce sont modélisées en utilisant un ensemble d'attributs et aucune autre information détaillée n'a encore été impliquée. Le système évalue la fabricabilité de la pièce en unités binaires, pour déterminer s'il est possible de fabriquer la pièce par un procédé. Les attributs de la pièce sont examinés par des attributs d'un procédé pour voir si la pièce peut être créée ou non par un ensemble de procédés stockés dans la base de données.
- Le module d'analyse qualitative applique des règles heuristiques, basées sur les entités reconnues, le matériau de la pièce et sur les procédés de fabrication. La pièce est représentée au niveau de l'entité et la capacité de procédés de fabrication est modélisée principalement en utilisant les contraintes géométriques à ce niveau.
- Le module d'analyse quantitative comporte toutes les informations détaillées, y compris le coût et le temps de fabrication, les détails des opérations de fabrication. Cette analyse est effectuée en utilisant les caractéristiques de la pièce ainsi que du matériau, et les informations du procédé et des ressources.

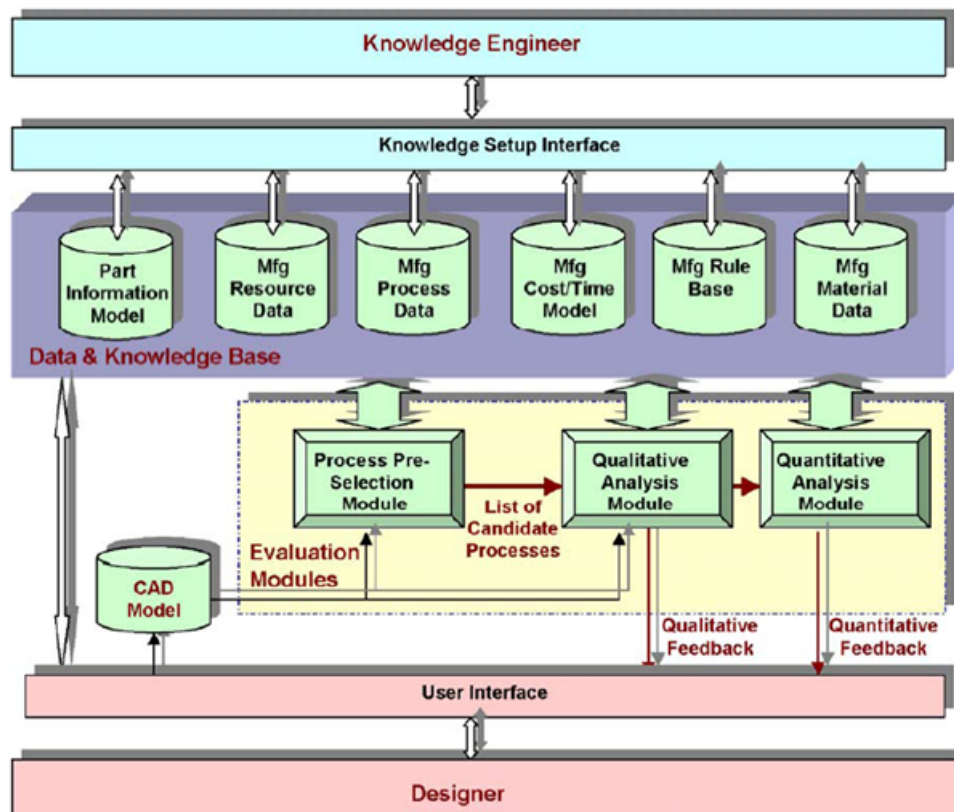


FIGURE 2.26: Architecture de la coquille de fabrication (Zhao & Shah, 2005).

Dans les travaux de (Skander, 2006), des entités de peau et squelette sont considérées dans la phase de conception afin d'intégrer les contraintes de fabrication. La méthode consiste premièrement à identifier les formes et les qualités de surface (attributs des peaux d'usage) ainsi que les topologies possibles du squelette que le concepteur propose. Ensuite, en se plaçant d'un point de vue fabrication, la méthode consiste à sélectionner les procédés de fabrication selon les formes et les qualités des surfaces. Finalement, l'intégration des contraintes de fabrication dans le processus de définition du produit, se fait progressivement dans une boucle appelée produit-procédés (Tomiya *et al.*, 2009). Cette intégration nécessite deux activités principales : la gestion de l'information et un support qui est le modèle produit de l'intégration.

- La gestion de l'information : les informations à gérer présentent en effet les ressources liées aux choix des procédés, qui sont utilisées pour construire l'approche d'intégration des contraintes de fabrication dans la définition du produit.
- Intégration produit-procédés : cette activité traite la modélisation du produit et le concept d'entité. Son rôle est de représenter le produit pour pouvoir gérer les données échangées durant le processus de définition du produit. Le choix de la modélisation par entités, particulièrement les entités peaux et squelettes est motivé par leur grande

modularité et extensibilité.

Nous pouvons encore citer les travaux de (Kumar *et al.*, 2006). Le but de ces travaux était de fournir un système d'évaluation de fabricabilité à base de connaissances pour des pièces embouties. La base de connaissances est constituée d'un ensemble de règles métier qui permettent de fournir des conseils de fabricabilité à l'utilisateur par rapport aux procédés de fabrication. Ces conseils doivent être utilisés par le concepteur au cours du processus de conception et de développement, afin de proposer directement une définition de pièce correcte par rapport aux contraintes de fabrication. Le concepteur peut aussi enrichir ou modifier la base selon les ressources de fabrication qu'il possède.

Plus récemment, les travaux de (Toussaint *et al.*, 2010) ont proposé une approche de conception intégrant les problématiques de fabrication dans le processus de développement de produits. Cette approche vise à capitaliser les connaissances détenues par une entreprise comme les connaissances produit-process, et de les mettre à disposition des concepteurs lors du processus de conception et de développement de produits.

On peut aussi citer les travaux de (Kerbrat *et al.*, 2011) qui ont permis de proposer une approche DFM pour les multi-procédés de fabrication. Cette approche consiste à combiner les techniques de fabrication additives et les techniques de fabrication par enlèvement de matière. Une méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides a été créée afin d'analyser la complexité de fabrication des outillages lors de leur conception, et de réduire la complexité de fabrication et par conséquent, diminuer les temps et coûts de réalisation à qualité égale.

2.3.3 Conclusion sur la « RC » vers les concepts de la « conception pour la fabrication »

Pour synthèse, tous les travaux énoncés ci-dessus sont efficaces pour analyser d'un point de vue métier une pièce d'étude. Les travaux portant sur l'adaptation de système KBE dédiés RC, permettant la création à partir de nuage de points de modèle 3D métiers, sont à considérer dans notre contexte de thèse car ils permettent d'obtenir un paramétrage facilitant la modification du modèle et donc sa réingénierie (Durupt. *et al.*, 2014). Il n'y a pas ou peu de travaux portant sur l'adaptation de concepts DFM au contexte de la RC. Or, les travaux de la littérature dédiés « conception de produit » pourront tout à fait être adaptés au contexte de RC. En effet, à partir de la pièce réelle et des différentes bases DFM (Ashby *et al.*, 2013), il est, d'un point de vue méthodologique, envisageable de créer une phase de RC dédiée à la capitalisation (figure 2.27) des données fabrication de la pièce d'étude.

Pour cela, nous allons adapter dans la méthodologie REFM les approches DFM et KBE. Elles permettront d'établir une gamme d'usinage incluant le choix des matériaux, des opérations d'usinage et des entités géométriques associées.

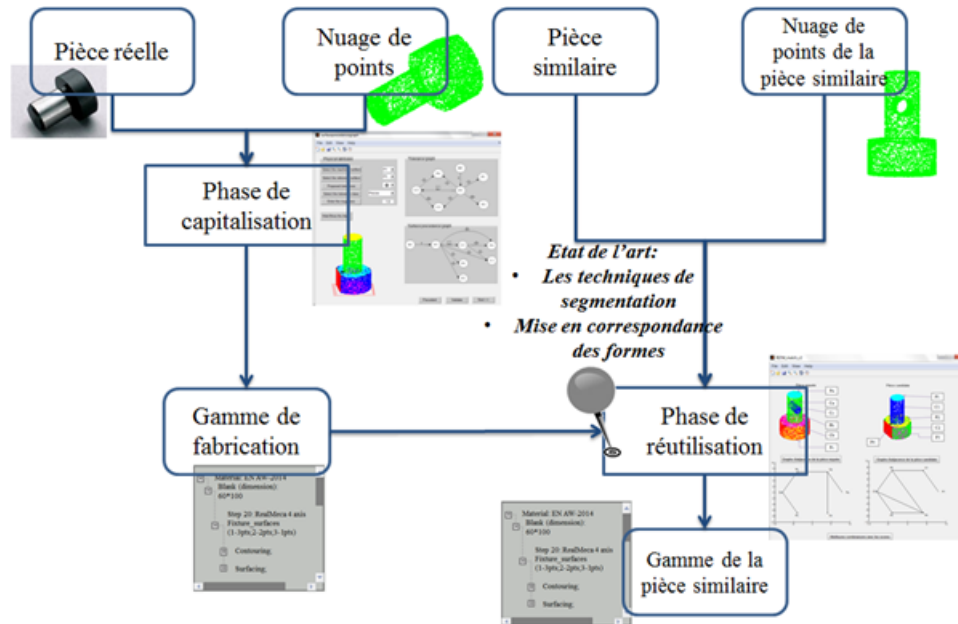


FIGURE 2.27: Positionnement de la mise en correspondance par rapport à REFM.

2.4 État de l'art : De la rétro-conception pour la fabrication vers la mise en correspondance des formes « Shape Matching »

Pour rappel, l'intérêt majeur de la méthodologie REFM est de pouvoir supporter le contexte routinier ou récurrent de la RC (cf. Chapitre 1, les raisons industrielles). Ce qui signifie que la phase de capitalisation, permettant de définir des gammes, puisse sauvegarder ces dernières, et que par la suite, elles puissent être adaptées à un nouveau cas d'étude similaire.

Pour cela, il est obligatoire d'apparier la pièce à rétro-concevoir avec la pièce en base la plus similaire, puis associer ou ajuster la gamme en base à la pièce d'étude.

Il existe dans la littérature des systèmes qui permettent d'utiliser des bases de gammes préalablement conçues comme les systèmes TGAO (Technologie de Groupe Assistée par Ordinateur) (Chang *et al.*, 1990). Ces systèmes permettent d'industrialiser de pièces qui se ressemblent en se basant sur la morphologie des pièces et la réutilisation des gammes établies

précédemment et donc de générer des gammes type pour des familles de pièces. Les systèmes TGAO sont ensuite évolués en faisant apparaître les systèmes CBR (Case-Based Reasoning) (Tiwari & Bhatnagar, 2001). En effet, Les systèmes CBR raisonnent sur le modèle CAO au lieu d'utiliser le code morphodimensionnel. Or dans notre cas, les données d'entrées sont des nuages de points et des mises en plan partielles. Du coup, notre cas se résume à un problème de mise en correspondance des formes.

La mise en correspondance entre deux formes est un problème qui se pose dans de nombreuses applications mécaniques. Un corollaire de ce problème étant de retrouver parmi un ensemble de formes, la forme la plus similaire à une autre. Citons par exemple :

- La recherche d'une pièce où il s'agit par exemple de trouver des pièces similaires à une pièce requête donnée.
- La classification où il s'agit de regrouper des pièces similaires dans une famille.

Dans la littérature, on remarque que les méthodes de mise en correspondance des formes sont divisées en trois catégories (figure 2.28) : les méthodes basées sur les entités, les méthodes basées sur les graphes, et les méthodes basées sur la géométrie (Tangelder & Veltkamp, 2008).

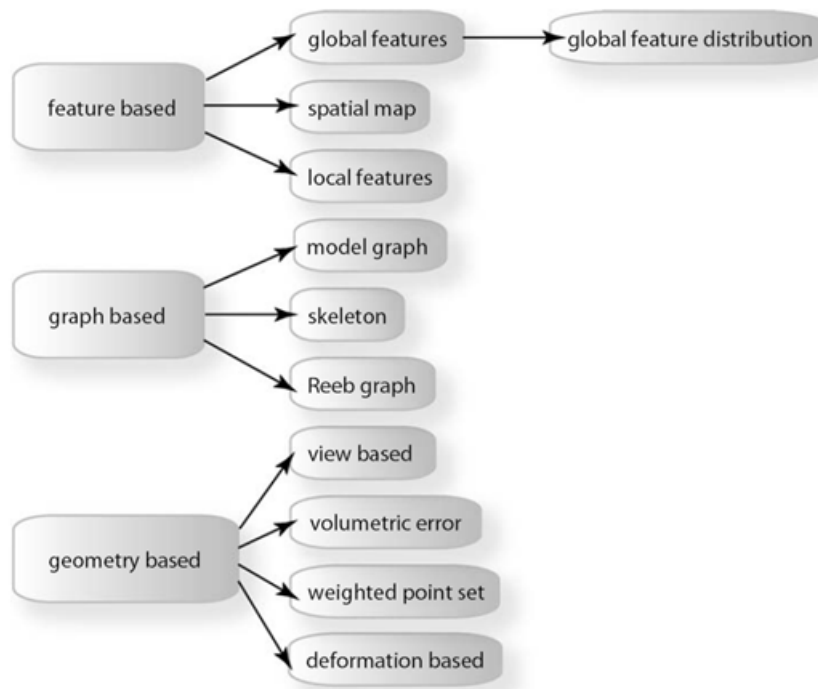


FIGURE 2.28: Méthodes de mise en correspondance des formes (Tangelder & Veltkamp, 2008).

Nous ne développerons pas dans cet état de l'art de façon exhaustive l'ensemble des techniques de mise en correspondance car la littérature contient un nombre conséquent de

travaux et d'approches robustes. Néanmoins, nous ferons une synthèse des méthodes basées sur les graphes car nous considérons que :

- Les méthodes par entités permettent une mise en correspondance locale. Les dépendances entre les entités ne sont généralement pas considérées dans ce processus. Or dans, notre contexte, il est préférable de réaliser une mise en correspondance globale pour identifier la pièce (par un critère de similarité global) puis une identification locale pour la caractérisation métier (identification des entités métiers).
- Les méthodes basées sur la géométrie (Bruneau *et al.*, 2013) sont quant à elles trop globales, elles permettront d'identifier la pièce mais pas d'apparier au niveau local les éléments de la gamme d'usinage.

Les méthodologies par graphes semblent être un compromis intéressant car elles permettent de considérer le niveau global et local simultanément. Nous illustrerons ceci dans les sections et sous-sections suivantes.

2.4.1 Les méthodes basées sur les graphes

Dans beaucoup d'applications, les formes dont il faut évaluer la similarité peuvent être décrites par des graphes. En effet, les méthodes de mise en correspondance basées sur les graphes tentent d'extraire un sens géométrique d'une forme 3D à l'aide d'un graphe qui montre comment les composantes de la forme sont reliées entre elles.

Les méthodes basées sur les graphes peuvent être divisées en trois grandes catégories selon le type du graphe utilisé : le graphe du modèle, le graphe de Reeb, et les squelettes.

2.4.1.1 Les méthodes basées sur le graphe du modèle

Les méthodes basées sur le graphe du modèle sont souvent applicables aux modèles CAO (Erdos *et al.*, 2014). Les méthodes de représentation de la modalisation solide les plus dominantes sont une représentation par frontières (Boundary representation B-rep). Un B-rep décrit un modèle en nœuds, arêtes et faces. Les faces d'un B-rep peuvent être représentées comme des surfaces à forme libre. Les nœuds d'un graphe représentent les composantes du modèle tandis que les arcs ou les arêtes décrivent les relations binaires entre ces différentes composantes. Notons que ces graphes sont généralement typés ou étiquetés afin de caractériser les différentes composantes du modèle et leurs relations.

Pour évaluer la similarité des formes décrites par des graphes, il s'agit alors de mettre en correspondance les nœuds des graphes de façon à retrouver le plus grand nombre de

caractéristiques communes aux graphes.

Dans ce contexte, on peut citer les travaux de (Cicirello & Regli, 2001) où ils ont proposé une méthode basée sur les graphes pour comparer la similarité de fabrication des pièces usinées. La méthode est décomposée en trois étapes :

- La première étape est la reconnaissance des entités d'usinage, ils ont choisi un système industriel (Feature-Based Machining Husk FB Mach) pour la reconnaissance des entités. FB Mach est une bibliothèque robuste d'entités d'usinage et d'algorithmes de reconnaissance d'entités. Il utilise trois approches différentes pour définir les entités : la reconnaissance automatique, la reconnaissance interactive, et la reconnaissance manuelle.
- La deuxième étape consiste à construire un graphe de dépendance des entités d'usinage. Ce graphe est défini comme une représentation des entités et des interdépendances entre les entités d'un modèle CAO. Les nœuds de ce graphe correspondent aux entités. Une arête entre deux nœuds correspond à une certaine dépendance spatiale entre les entités par exemple une intersection volumique entre les entités).
- La troisième étape consiste à calculer la taille du plus grand sous-graphe commun entre les graphes de dépendance correspondants. Pour cela, une méthode de mesure heuristique basée sur une recherche itérative a été développée. Pour affiner et réduire l'espace de recherche, l'algorithme utilise les connaissances présentes dans le modèle CAO. Par exemple, il ne considère que les appariements entre les types d'entités similaires (un trou est mis en correspondance avec un trou et non avec une poche). Des contraintes supplémentaires sur la taille, l'emplacement et l'orientation peuvent aussi être considérées.

Plus récemment, (Regli *et al.*, 2011) ont utilisé une variation sur un algorithme d'isomorphisme classique de sous-graphe pour évaluer la similarité des graphes d'adjacence des entités. Les entités sont les nœuds du graphe, et les arêtes indiquent l'adjacence des entités dans le modèle. Un algorithme itératif qui commence par une solution arbitraire a été utilisé dans la mise en œuvre de la technique d'isomorphisme de sous-graphe.

L'inconvénient de ces méthodes est que les entités peuvent ne pas être segmentées de la même façon dans les deux modèles qui doivent être appariés.

2.4.1.2 Les méthodes basées sur le graphe de Reeb

Un graphe de Reeb (Reeb, 1946) peut être vu comme la représentation squelette d'un objet de dimension arbitraire. Le principal avantage d'un graphe de Reeb est qu'il permet de

représenter simplement la topologie d'un objet (Tierny *et al.*, 2006) et (Berretti *et al.*, 2009).

La définition d'un graphe de Reeb, à la figure 2.29 est la suivante :

Soit f une fonction réelle définie sur une variété compacte V $f : V \rightarrow R$. le graphe de Reeb de f est l'espace quotient de f dans V , par la relation d'équivalence $(p1, f(p1)) \approx (p2, f(p2))$, vérifiée si et seulement si : $f(p1) = f(p2)$, $p1$ et $p2$ appartiennent à la même composante connexe de $f^{-1}(f(p1))$.

Ce graphe composé de nœuds représente les points critiques de f , autrement dit les points de la variété V où les dérivées partielles de f s'annulent.

Cependant, l'efficacité des graphes de Reeb est limitée lorsque les modèles deviennent géométriquement et détaillés, comme c'est le cas pour les pièces complexes d'usinage.

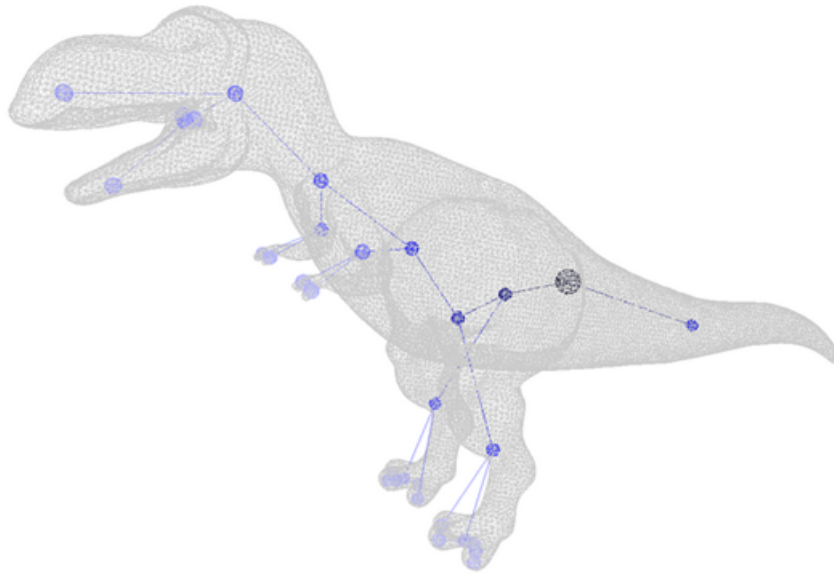


FIGURE 2.29: Définition du graphe de Reeb (Tierny et al., 2006).

Les méthodes basées sur le graphe de Reeb ont été introduites par (Hilaga *et al.*, 2001). Ils ont conçu une technique pour les modèles de « forme » en se basant sur l'identification de certaines régions du modèle. Ces régions sont représentées sous la forme d'une structure de graphe hiérarchique. Enfin, une technique de mise en correspondance entre les graphes est utilisée pour obtenir des valeurs de similarité pour les modèles comparés.

(Tung, 2005) ont proposé une méthode d'indexation d'objets 3D dans des bases de données. Ils ont supposé que la méthode de (Hilaga *et al.*, 2001) ne prend en compte que l'information topologique, ce qui est souvent insuffisant pour obtenir des appariements précis. L'approche de Tung et Schmitt repose sur une extension de l'appariement de graphes de Reeb multi résolution présentés par (Hilaga *et al.*, 2001). Il propose d'enrichir le graphe à l'aide d'attributs géométriques 3D et visuels 2D pour améliorer l'appariement et l'estimation de la similarité des modèles.

On peut conclure que les graphes de Reeb définis par une distance géodésique sont adaptés pour faire correspondre des objets de forme gauche, mais ils sont sensibles aux changements topologiques. En plus, ils ne peuvent pas être appliqués aux maillages, issus de numérisation, parce que les problèmes topologiques comme les trous dans le maillage perturbent les calculs de distances géodésiques (Herlem *et al.*, 2014).

2.4.1.3 Les méthodes basées sur les squelettes

Cette représentation de formes est utilisée dans plusieurs travaux basés sur les images et photographies.

Un squelette est une version fine d'une forme. Il est composé par un ensemble des lignes équidistantes aux contours de la forme et dont l'épaisseur est d'un pixel (Jouili, 2011).

Généralement, les nœuds du graphe du squelette sont calculés à partir de la classification des pixels du squelette en trois classes : points de jonctions, points de branches et points de terminaisons. Dans la majorité des travaux sur les graphes du squelette, ces ensembles de points sont définis comme suit :

- Un point de jonction dans un squelette est un point d'intersection entre au moins trois branches.
- Un point de branche est un point appartenant à une branche.
- Un point de terminaison est un point final d'une branche, qui n'est connecté à aucune autre branche.

Ainsi dans un graphe du squelette $G(V,E)$, les points de jonctions et les points de terminaisons forment l'ensemble V des nœuds du graphe G , et les ensembles de points de branches connectant les points de V forment les arêtes (i.e. E) du graphe.

On peut citer les travaux de (Sundar *et al.*, 2003) qui permettent d'utiliser les squelettes d'un modèle 3D pour capturer sa forme. Ils proposent le graphe squelette comme descripteur de forme pour coder les informations topologiques et géométriques du modèle. Ensuite, ils appliquent les techniques de mise en correspondance entre les graphes pour faire correspondre les graphes et les comparer. Pour calculer le squelette, ils voxelisent l'objet. A partir du modèle voxelisé, les points du squelette sont calculés en utilisant un algorithme de transformation basé sur la distance proposé par (Gagvani & Silver, 1999). Cette méthode réduit le volume en voxels par couches successives. Les voxels restants sont groupés et les points correspondants sont reliés en un graphe acyclique en appliquant l'algorithme de "l'arbre minimum couvrant". Enfin, pour chaque nœud du graphe est associé un ensemble d'entités géométriques et un identifiant de forme topologique. La figure 2.30 montre un exemple de mise en correspondance entre deux modèles 3D où seuls les nœuds mis en correspondance sont présentés.

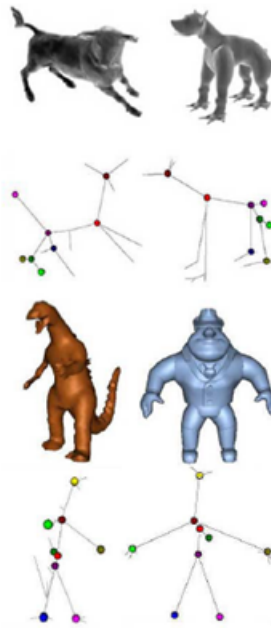


FIGURE 2.30: Exemple de mise en correspondance. Seuls les nœuds mis en correspondance sont montrés (Sundar et al., 2003).

2.4.2 Conclusion sur les méthodes de mise en correspondance

On peut constater d'après l'état de l'art ci-dessus que les méthodes basées sur le graphe du modèle sont plus pertinentes pour l'appariement des modèles CAO. Alors que les méthodes basées sur le graphe de Reeb et sur les squelettes sont plus applicables pour l'appariement des modèles de formes naturelles comme les humains et les animaux.

Donc, les méthodologies basées sur le graphe du modèle pour appairer deux pièces mécaniques sont plus appropriées à notre contexte de thèse. En effet, nous pouvons déduire comme solution d'appariement le concept suivant :

L'usinage des surfaces d'une pièce se réalise suivant un ordre souvent induit par la cotation fonctionnelle. Cet ordonnancement peut être traduit par **un graphe dit de pré-cédence** où les nœuds sont les surfaces à usiner et où les arêtes sont les dépendances entre les surfaces. Transposé à un nuage de points, et à partir de la segmentation, il est possible de construire un graphe d'adjacence ou de connectivité où les nœuds sont les régions et où les arêtes représentent les connexions. Le rapprochement de ces deux graphes afin d'appliquer une stratégie d'usinage sur un nuage de points fera notamment l'objet d'une proposition dans la partie 2 de cette thèse.

Conclusion Chapitre 2

Ce chapitre nous a permis d'énumérer les concepts, méthodologies et techniques de la bibliographie qui sont utiles pour l'approche REFM. Comme illustré à la figure 2.31, les techniques de segmentation, les méthodologies de rétro-conception à base de KBE et DFM seront utilisées dans la phase de capitalisation, afin de générer l'Avant Projet d'Etude de Fabrication (APEF) d'une pièce à retro-concevoir.

En effet :

- Les techniques de segmentation seront utiles dans le cas où la capitalisation peut uniquement se faire sur le nuage de points de la pièce réelle. La segmentation par groupement de régions sera appropriée pour référencer les surfaces (ou les portions) de la pièce et ainsi construire le graphe de précédence à mettre en base.
- Les méthodologies de RC à base de KBE seront utiles pour établir les entités d'usinage. Les systèmes KBE permettant d'obtenir des entités métier (Thompson *et al.*, 1999), (Durupt *et al.*, 2013), (Durupt. *et al.*, 2014) permettront de lier les paramètres de fabrication à la géométrie. Les entités Peaux et Squelettes (Roucoules, 2007) sont réutilisées dans cette thèse.
- La conception pour la fabrication (DFM) sera utile pour aider à l'élaboration de la gamme d'usinage. Les démarches méthodologiques décrites pas à pas dans (Ashby *et al.*, 2013) pourront être réutilisées pour composer la gamme sous la forme d'une arborescence.

La méthodologie REFM, dans la phase de capitalisation, aura pour finalité l'élaboration d'une gamme représentée sous la forme d'une arborescence et d'entités d'usinage. D'un point de vue technologique, cette gamme sera représentée sous la forme d'un graphe de précédence pour permettre une réutilisation.

Les méthodes de mise en correspondance seront donc utilisées dans la phase de réutilisation à côté des trois thématiques ci-dessus afin d'accélérer le processus de rétro-conception en évitant des étapes redondantes. Les techniques de segmentation seront donc utilisées pour générer un graphe d'adjacence. Tout l'enjeu de cette phase sera de mettre en correspondance un graphe d'adjacence avec un graphe de précédence se trouvant en base.

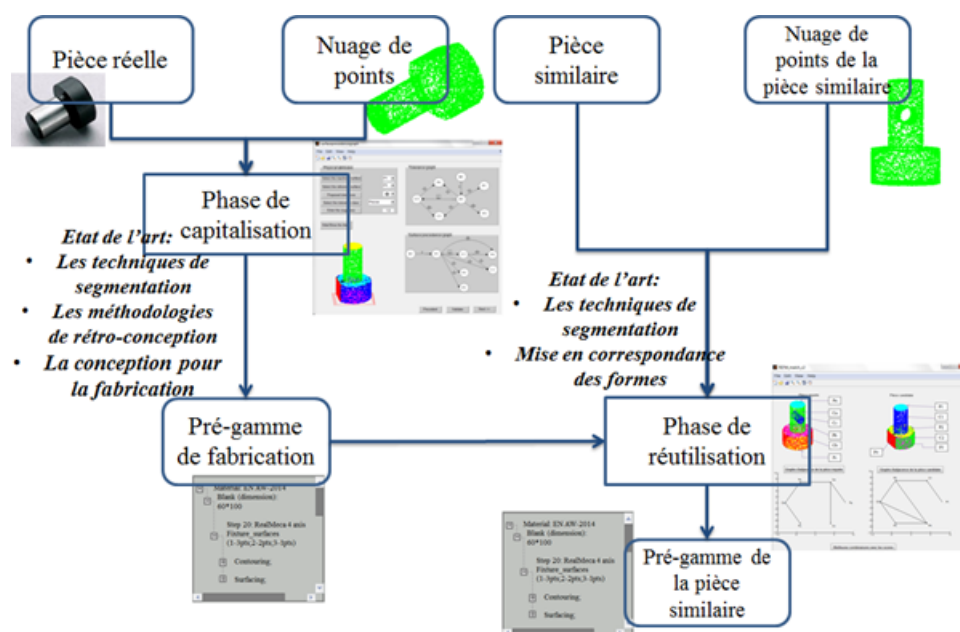


FIGURE 2.31: Conclusion, positionnement de l'état de l'art par rapport à la méthodologie REFM.

Conclusion Partie 1

Dans cette première partie de ce manuscrit, nous avons justifié la demande et le besoin d'une méthodologie de rétro-conception qui permette :

- De proposer un processus structuré de rétro-conception dans un contexte de fabrication et dans des cas de pièces où les informations de types CAO sont manquantes.
- De transcrire les connaissances de fabrication dans le processus de rétro-conception en se basant sur les concepts KBE et DFM. En effet, un processus de rétro-conception sera réalisé avec succès si les contraintes de fabrication sont prises en considération le plus tôt possible dans la démarche de rétro-conception.
- De fournir un modèle APEF avec une arborescence pensée d'un point de vue usinage.
- De gérer les aspects récurrents de la rétro-conception en sauvant de nouveaux cas d'étude et en ré-utilisant les anciens cas d'étude connus. La ré-utilisation des anciennes pièces se base dans cette thèse sur les méthodes de mise en correspondance entre deux graphes.

La partie suivante va donc proposer une méthodologie de rétro-conception basée sur les approches géométriques pour segmenter un cas d'étude, sur la conception pour la fabrication pour analyser les connaissances de fabrication au cours de la rétro-conception, et sur les méthodes de mise en correspondance pour supporter les aspects récurrents. Par conséquent, REFM pour Reverse Engineering For Manufacturing est la méthodologie présentée dans ce travail de thèse.

Deuxième partie

**REFM - REVERSE ENGINEERING
FOR MANUFACTURING**

Introduction Partie 2

La partie précédente a posé le cadre d'étude de cette thèse et a établi un état de l'art sur les différents travaux de la bibliographie. Cette deuxième partie va proposer une méthodologie de RC par une approche « concevoir pour fabriquer » : elle se nomme REFM (Reverse Engineering For Manufacturing).

Cette partie est décomposée en trois chapitres :

- Principe général de la méthode : dans ce chapitre, la démarche globale de la méthode sera explicitée. Deux phases principales seront exposées : la phase de capitalisation en vue de générer une gamme de fabrication d'une nouvelle pièce à retro-concevoir, et, la phase de ré-utilisation en vue de ré-utiliser une gamme stockée dans la base de données REFM afin de re-fabriquer une pièce similaire.
- Phase de capitalisation : dans ce chapitre, nous allons expliquer d'une manière plus exhaustive le concept de la phase de capitalisation.
- Phase de ré-utilisation : dans ce chapitre, nous allons expliquer d'une manière plus exhaustive le concept de la phase de ré-utilisation.

La méthode REFM sera illustrée par deux cas d'études simples tels que le pion de centrage et le chapeau de réducteur.

Chapitre 3

Principe général de la méthode

Introduction Chapitre 3

Dans ce chapitre, nous allons expliciter la démarche globale de la méthode REFM (Reverse Engineering For Manufacturing). Il sera organisé selon les sections suivantes :

- Démarche de la méthode REFM : le processus global sera expliqué dans cette section.
- Présentation détaillée des activités (IDEF0) : Toutes les étapes principales de la méthode REFM seront explicitées et justifiées.

3.1 Démarche de la méthode REFM

A partir du chapitre précédent, nous avons pu établir que la RC dans un contexte de fabrication ne peut pas être obtenue sans une démarche structurée comprenant les éléments méthodologiques suivants :

- DFM : pour intégrer, suivant une démarche séquentielle, les informations sur le matériau et les éléments du procédé de fabrication.
- KBE : pour élaborer un modèle CAO suivant une vue « fabrication », c'est-à-dire incluant une gamme de fabrication FAO.
- « Shape Matching » : pour réutiliser des gammes sur des cas similaires.

La méthode REFM est composée principalement de deux phases :

Phase de capitalisation (figure 3.1) : Elle propose, suivant une démarche structurée, de faire l'analyse du cas d'étude. Les connaissances de fabrication seront révélées. Ces connaissances seront organisées sous la forme d'une arborescence et matérialisées par des entités d'usinage. Cette arborescence sera la gamme de fabrication. le niveau de détail de

cette gamme s'apparente à un APEF (Avant Projet d'étude de fabrication). Cette gamme pourra être sauvegardée afin d'être réutilisée sur d'autres cas similaires.

Une entité peut être définie ici comme (Shah, 1991), (Shah & Mäntylä, 1995) :

- Un constituant physique d'une pièce qui représente les formes et les attributs technologiques associés aux opérations et outils de fabrication.
- Un groupement des éléments géométriques et topologiques qui nécessite un référencement.
- Les entités sont des éléments utilisés dans la génération, l'analyse et l'évaluation de la conception.
- L'entité représente une classification des caractéristiques d'objets qui ont une signification dans un domaine.

Toutefois, il existe un nombre quasi illimité de types d'entités. De nombreuses références les ont définies et classées comme (Xue *et al.*, 1996), (Harik, 2007) : Par exemple, une entité d'usinage est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour laquelle un processus d'usinage est connu ; ce processus est quasi indépendant des processus d'usinage etc. (Bourdet & Villeneuve, 1990).

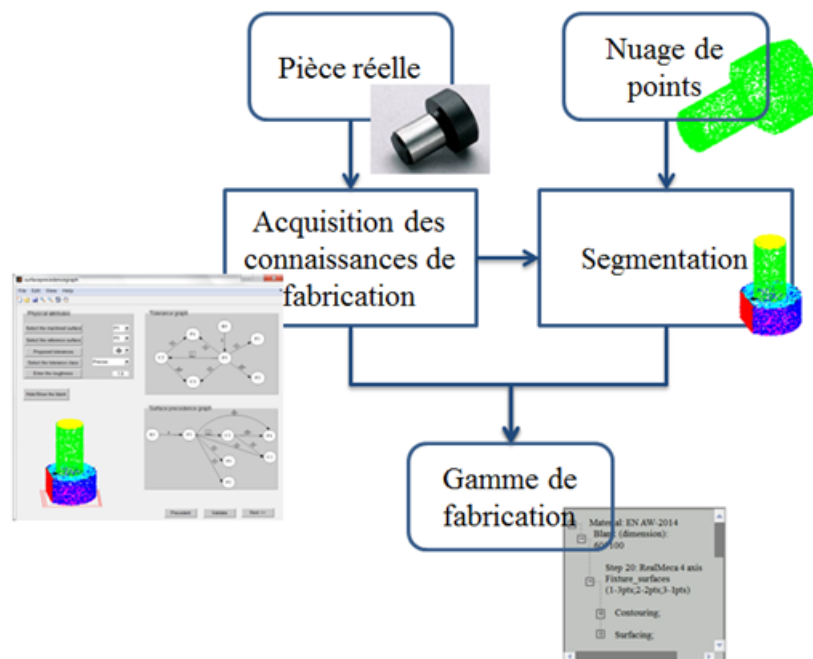


FIGURE 3.1: Le processus général de la phase de capitalisation.

Les approches géométriques (segmentation) et des méthodologies d'acquisition de connaissances de fabrication (KBE, DFM) seront combinées dans cette phase. En effet, le matériau et le brut seront choisis en se basant sur la base CES d'Ashby (DFM). Un graphe de précedence des surfaces sera généré afin de capturer les connaissances de fabrication de

la pièce, de recenser et repérer les surfaces usinées et les surfaces brutes concernées, et de représenter les dépendances entre ces surfaces. En d'autres termes, un graphe de précédence des surfaces est un graphe de liaison ou d'antériorité de surfaces où les exigences dimensionnelles et géométriques sont représentées. Ces exigences sont issues des connaissances de l'utilisateur et de règles de fabrication.

La figure 3.2 montre un exemple d'un graphe de précédence des surfaces d'une pièce (pion de centrage).

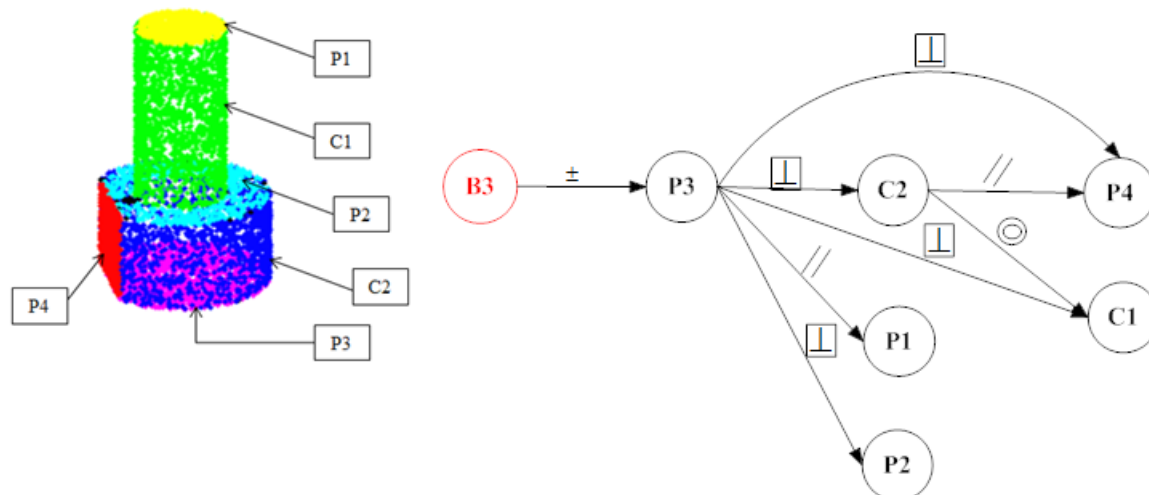


FIGURE 3.2: Exemple d'un graphe de précédence des surfaces.

Les surfaces qui peuvent être usinées par un même outil peuvent être regroupées dans un groupe de surfaces. **Les entités d'usinage peuvent donc être associées. En effet, nous considérons qu'une entité est la combinaison des surfaces couplées avec une opération d'usinage.** Ainsi, la recherche des différents niveaux d'usinage (c'est-à-dire l'enchaînement ordonné des opérations), les posages, les machines et les outils d'usinage seront sélectionnés pour compléter la génération de la gamme de fabrication (figure 3.3).

L'intérêt majeur de la méthode REFM réside dans le fait que les gammes générées dans la phase de capitalisation, soient sauveées dans une base de données REFM (modèle de données du KBE) afin d'être réutilisées dans une phase de réutilisation pour des cas similaires.

Phase de réutilisation : Cette phase permet de réutiliser les connaissances déjà acquises et sauveées d'une pièce afin de re-fabriquer une pièce similaire ; c.à.d. d'extraire des gammes de fabrication préalablement sauveées et les ajuster selon les cas d'études. Le but de cette phase est donc de minimiser le temps de RC en utilisant des connaissances préalablement sauveées. En d'autres termes, le but est d'accélérer le processus de RC en

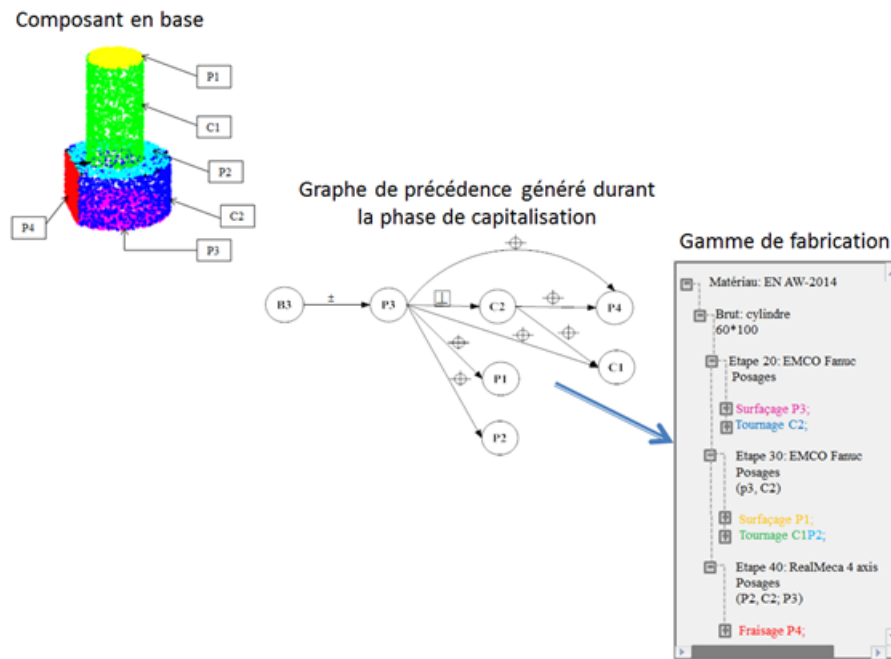


FIGURE 3.3: Méthodologie d'élaboration de la stratégie d'usinage.

évitant les étapes redondantes.

Afin d'extraire les connaissances utiles, le cas d'étude doit être comparé avec une autre pièce déjà rétro-conçue. Cette comparaison peut être faite de plusieurs manières comme discuté dans l'état de l'art du chapitre 2. Nous avons choisi la comparaison entre les graphes d'adjacence des pièces, par un processus de mise en correspondance entre deux graphes d'adjacence.

On a choisi ce type de graphe pour comparer deux pièces puisqu'il permet de considérer le niveau local et global (il nous faut trouver la similarité entre pièce et décliner géométriquement la stratégie d'usinage). En plus, le graphe d'adjacence semble être le plus en adéquation (en couplage) avec notre méthodologie et les graphes de précedence. En effet, ces derniers permettent de décrire la stratégie d'usinage d'une pièce. Pour récupérer une stratégie d'usinage dans la base, on a pensé à un graphe d'adjacence afin de lier la topologie à la stratégie d'usinage décrite par le graphe de précedence.

La figure 3.4 démontre d'une manière plus exhaustive le concept principal de cette méthode.

Nous supposons que cette phase débute à partir de la pièce physique et de son nuage de points assemblés et filtrés. La méthode consiste premièrement à générer le graphe d'adjacence du cas d'étude et à comparer celui-ci avec les graphes d'adjacences des pièces en base. Un graphe d'adjacence est défini dans cette thèse comme une représentation des surfaces d'une pièce par des nœuds ainsi que les relations d'adjacence existant entre ces surfaces par des

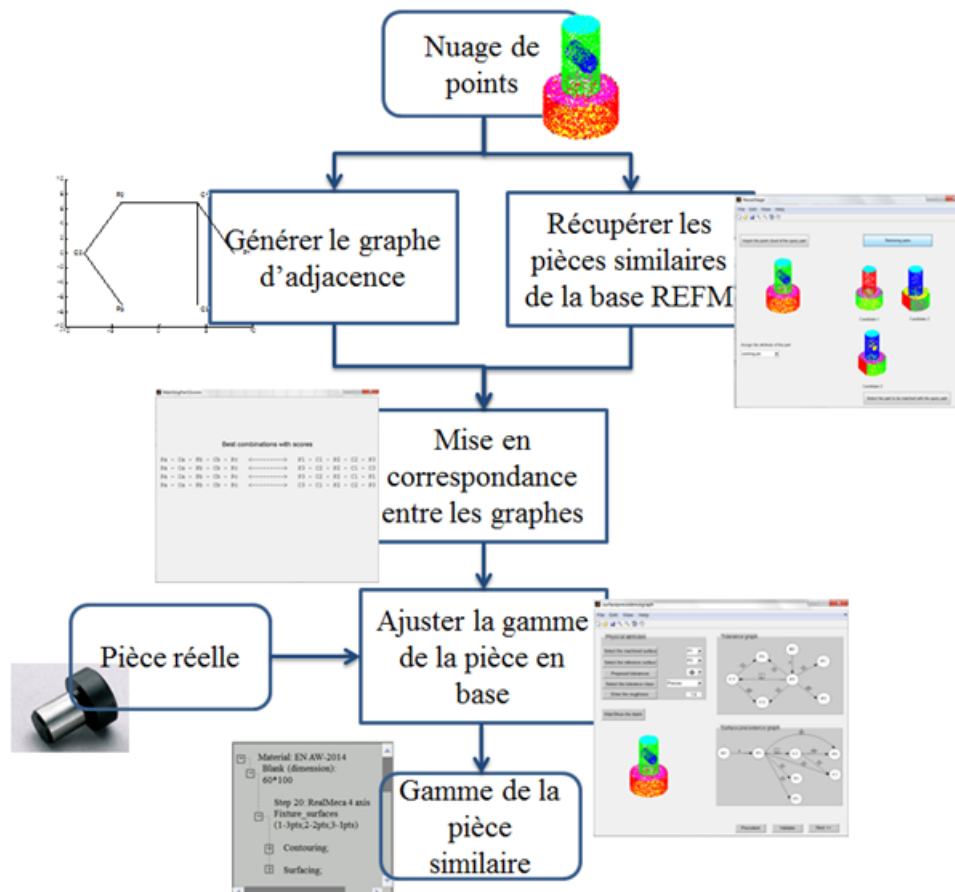


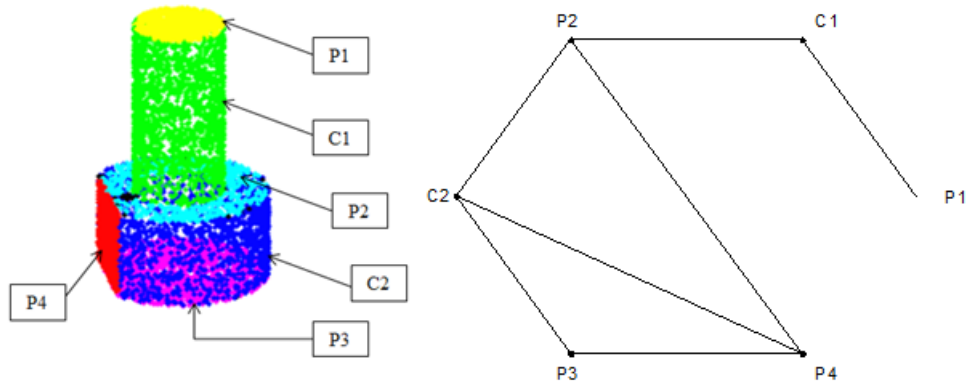
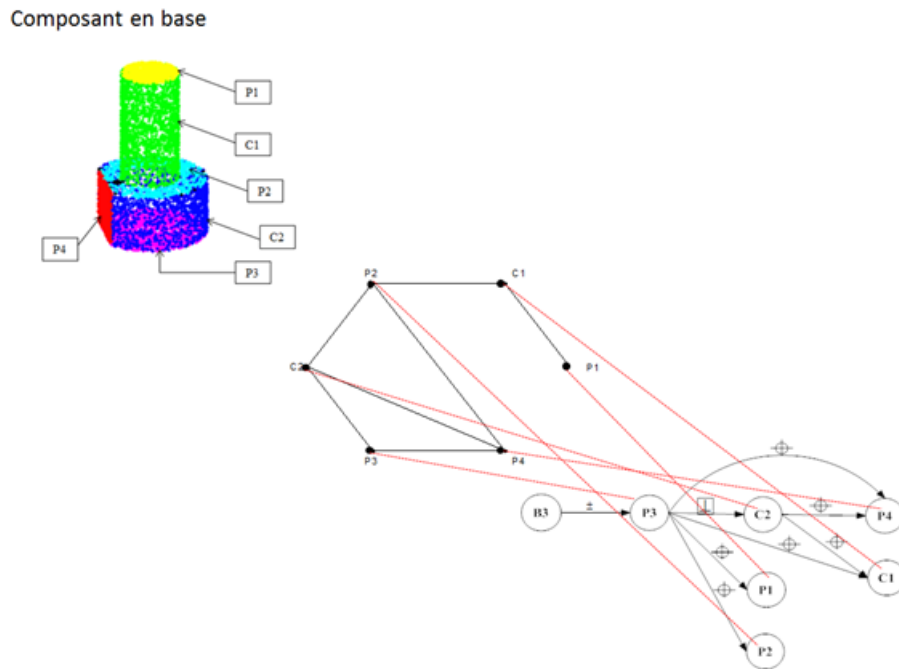
FIGURE 3.4: Le processus général de la phase de réutilisation.

arêtes. Ainsi, comme illustré à la figure 3.5, deux nœuds du graphe sont reliés par une arête si les surfaces qu'ils représentent sont adjacentes.

Après la génération des graphes d'adjacence, ces graphes doivent être comparés (c'est-à-dire, mis en correspondance). La mise en correspondance est basée sur un algorithme de propagation. Il permet une mise en correspondance entre des nœuds de même type de surface. Une fois la mise en correspondance faite, il ne reste qu'à associer les connaissances des surfaces appariées et réciproquement aux surfaces du cas d'étude. Cette association se réalise via des graphes d'adjacence des pièces en base et celui généré sur le cas d'étude. En base, les nœuds entre les graphes de précedence et d'adjacence sont communs et portent le même identifiant (figure 3.6).

La mise en correspondance entre graphes d'adjacence permet d'identifier les nœuds coté cas d'étude avec la pièce la plus similaire en base (figure 3.7).

Le graphe de précedence est ensuite associé aux nœuds du cas d'étude. Cette association permet d'appliquer totalement ou partiellement la gamme d'usinage en fonction du score de match des graphes d'adjacence (figure 3.8). Des surfaces du cas d'étude peuvent être non appariées. Dans ce cas l'utilisateur doit appliquer la phase de capitalisation sur ces surfaces.

FIGURE 3.5: *Graphe d'adjacence d'un pion de centrage.*FIGURE 3.6: *Liens en base entre graphe de précédence et graphe d'adjacence.*

Ainsi, la gamme de fabrication (figure 3.9) du cas d'étude est obtenue en utilisant des connaissances sauvées et en minimisant l'intervention de l'utilisateur (voir chapitre 6).

Pour synthétiser, dans cette thèse, nous avons développé une démarche de rétro-conception qui permet de capitaliser les connaissances de fabrication et de supporter les aspects récurrents de la RC en sauvant de nouveaux cas d'étude et en réutilisant les anciens cas connus.

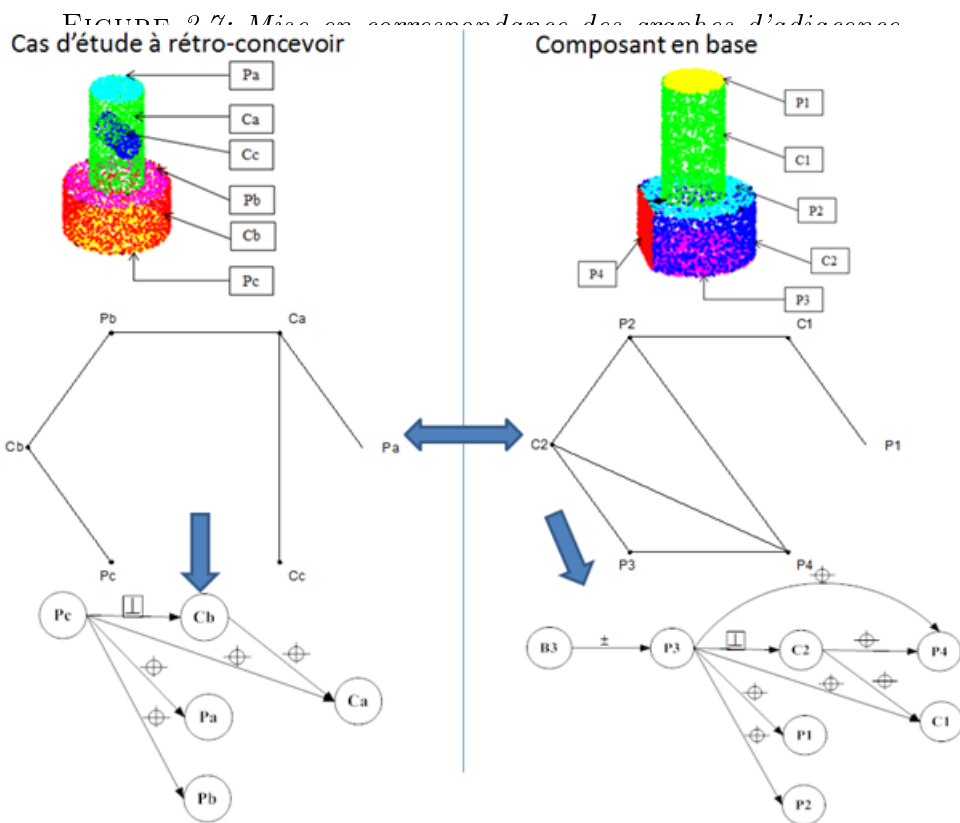
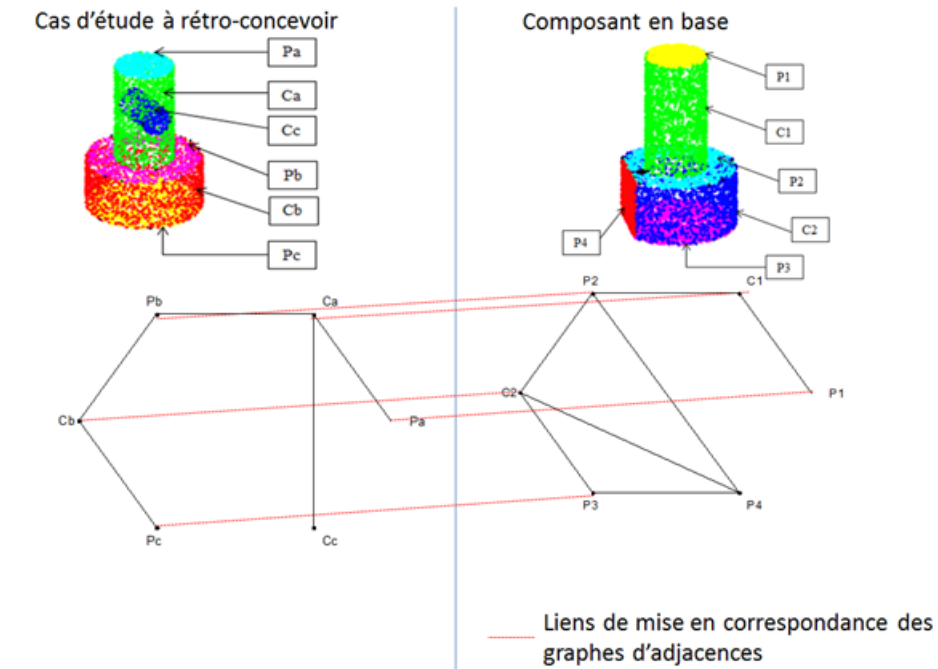


FIGURE 3.8: Association partielle ou complète du graphe de précedence sur le cas d'étude à rétro-concevoir.

3.2 Présentation détaillée des activités (IDEF0)

Dans cette section, les activités de la méthode REFM seront représentées en utilisant un formalisme d'analyse de la valeur IDEF0 (Vernadat, 1999).

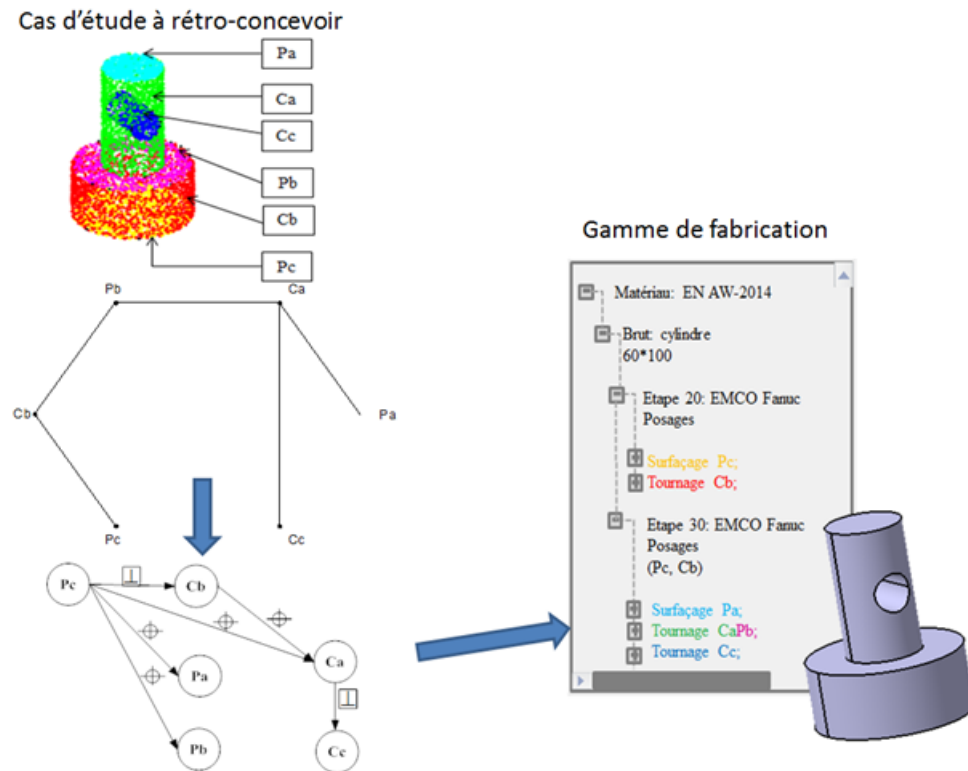


FIGURE 3.9: Génération de la gamme de fabrication du cas d'étude à rétro-concevoir.

3.2.1 Phase de capitalisation

3.2.1.1 A0 : Définir des gammes de fabrication

La première activité A0 est de définir des gammes. Les paramètres de cette activité sont :

Les entrées :

- Le fichier nuage de points : il servira de support pour la segmentation et l'acquisition de connaissances de fabrication.
- Le modèle physique : la pièce sera utile pour l'analyse notamment pour l'analyse du procédé de fabrication.
- Une mise en plan minimaliste ou non mise à jour.

Il est à noter que (cf. chapitre 1, les hypothèses 2) la phase de capitalisation peut aussi se réaliser sur des modèles CAO ou FAO paramétrés. Cependant, nous considérons que seuls le nuage de points, une mise en plan et la pièce réelle sont disponibles. Ceci correspond plus à la réalité de la RC.

Les contrôles :

- Nous représentons dans ce cas les contraintes. Dans le contexte de la RC, ce sont

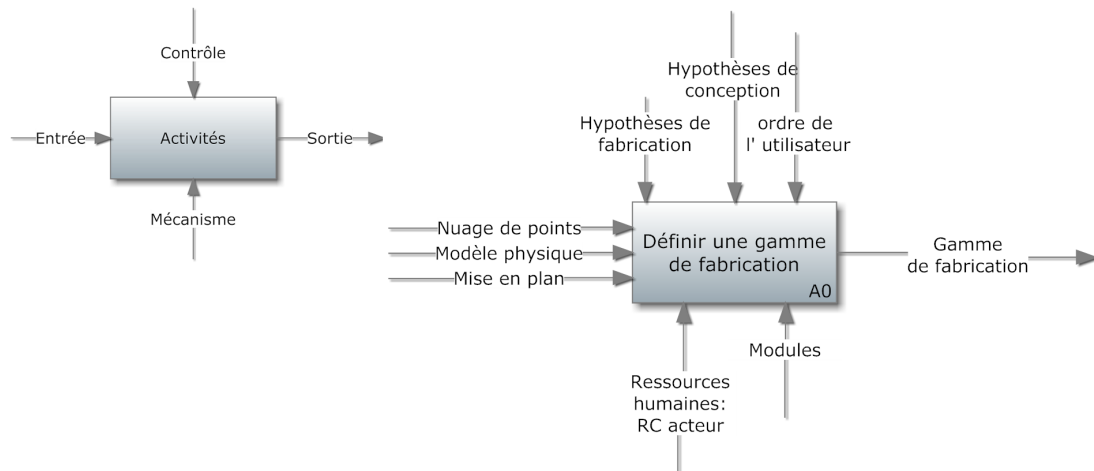


FIGURE 3.10: L'activité principale A0-IDEF0 de la phase de capitalisation : Définir des gammes de fabrication.

des hypothèses que l'acteur suppose ou fixe. Dans notre méthode, les domaines de la fabrication et de la conception sont considérés. Par conséquent, deux contrôles sont possibles. Nous les nommons « hypothèses de fabrication » et hypothèses de conception ».

Les mécanismes :

- Nous les représentons par les ressources humaines et logiciels. C'est l'acteur de RC qui gère le processus, il sera guidé dans ses choix par des modules (comme par exemple CES EduPack) contenant des informations sur la fabrication.

Les sorties :

- La sortie correspond à une gamme de fabrication.

Cette activité A0 peut se décomposer en deux sous activités explicitées dans le détail à la figure 3.11.

3.2.1.2 A1 : Segmenter le nuage de points

L'activité A1 correspond à segmenter le nuage de points de la pièce à rétro-concevoir en régions. Nous rappelons qu'une région est un regroupement des points. Une ou plusieurs régions correspondent à une surface de la pièce. Les paramètres de cette activité sont :

Les entrées :

- Le fichier de nuage de points représente l'entrée.

Les contrôles :

- Le contrôle dépend uniquement de l'ordre d'exécution donné par l'utilisateur.

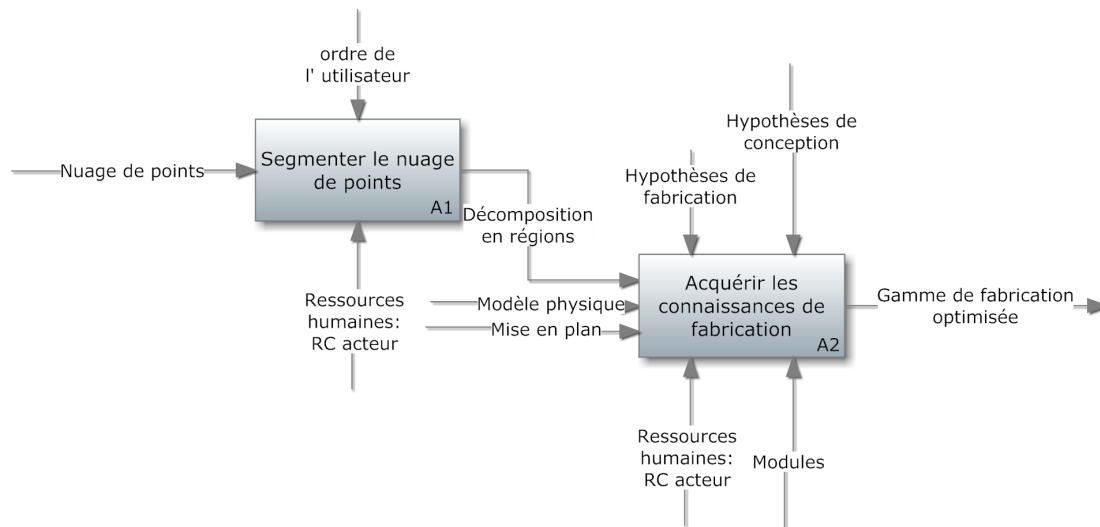


FIGURE 3.11: La décomposition de A0-IDEF0 du processus global de la phase de capitalisation.

Les mécanismes :

- Nous les représentons par les ressources humaines, l'acteur de RC qui réalise la segmentation ou donne l'ordre de son exécution.

Les sorties :

- La sortie est une décomposition en régions du nuage de points. Un code de couleur permettra de différencier la nature des régions.

A la suite de cette activité, une activité d'acquisition de connaissances de la pièce et des procédés est nécessaire.

3.2.1.3 A2 : Acquérir les connaissances de fabrication

Cette activité permet à l'utilisateur d'établir une analyse de fabricabilité afin d'aider à la génération d'une gamme, à optimiser la séquence des opérations et à choisir les outils adéquats pour la re-fabrication. Les paramètres de cette activité sont :

Les entrées :

- Les entrées sont constituées de la pièce réelle et du nuage de points décomposé en régions.

Les contrôles :

- Les hypothèses de fabrication et les hypothèses de conception contrôlent cette activité.

Les mécanismes :

- La ressource est humaine et représentée par l'acteur de RC. En plus, l'acteur de RC sera guidé par des modules comme le module CES EduPack d'Ashby (Ashby *et al.*, 2013) afin de choisir les matériaux, les opérations d'usinage et les outils de fabrication.

Les sorties :

- En sortie, une gamme de fabrication optimisée sera créée.

Dans le chapitre qui suit, nous suggérons de décomposer en formalisme IDEF0 les activités correspondant à l'acquisition des connaissances de fabrication.

3.2.2 Phase de réutilisation

3.2.2.1 A0 : Définir des gammes de fabrication

La première activité A0 de la phase de réutilisation est de définir des gammes. Les entrées, les mécanismes, et les contrôles de cette activité sont (figure 3.12) :

Les entrées :

- Le fichier nuage de points : il servira de support pour récupérer les pièces similaires, pour générer le graphe d'adjacence et pour ajuster la gamme.
- Le modèle physique : la pièce sera utile pour ajuster la gamme stockée dans la base de données REFM.

Les contrôles :

- Les hypothèses de fabrication et les hypothèses de conception contrôlent cette activité.

Les mécanismes :

- La ressource est humaine et est représentée par l'acteur de RC. Il est supporté par la base de données REFM contenant les pièces déjà rétro-conçues.

Les sorties :

- La sortie correspond à une gamme de fabrication.

Cette activité A0 peut se décomposer en cinq sous activités explicitées dans le détail à la figure 3.13.

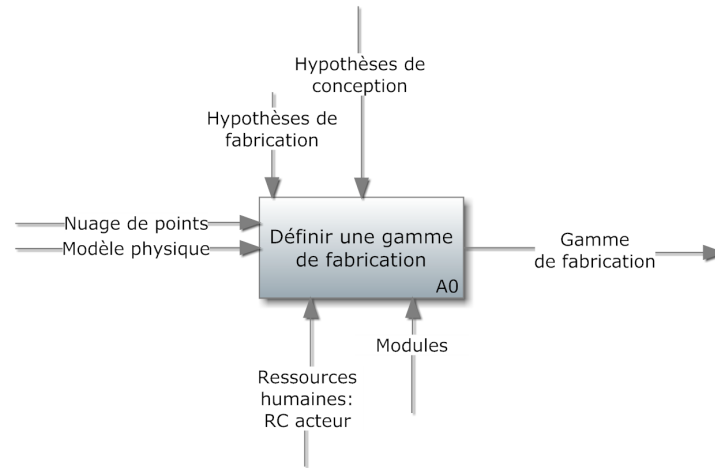


FIGURE 3.12: L'activité principale A0-IDEF0 de la phase de ré-utilisation : Définir des gammes de fabrication.

3.2.2.2 A1 : Segmenter le nuage de points

L'activité A1 correspond à segmenter le nuage de points de la pièce à rétro-concevoir en régions. Les paramètres de cette activité sont :

Les entrées :

- Le fichier de nuage de points représente l'entrée.

Les contrôles :

- Le contrôle dépend uniquement de l'ordre d'exécution donné par l'utilisateur.

Les mécanismes :

- Nous les représentons par les ressources humaines. l'acteur de RC qui réalise la segmentation ou donne l'ordre de son exécution.

Les sorties :

- La sortie est une décomposition en régions du nuage de points. un code de couleur permettra de différencier la nature des régions.

3.2.2.3 A2 : Récupérer les pièces similaires de la base de données

L'activité A2 correspond à récupérer de la base de données REFM, les pièces de la même famille ou de la même nature de la pièce à rétro-concevoir.

Les entrées :

- Le fichier nuage de points segmenté représente l'entrée.

Les contrôles :

- Les hypothèses de conception guident les choix de l'utilisateur.

Les mécanismes :

- L'acteur de RC représente la ressource humaine de cette activité. Il est supporté par la base de données REFM contenant les familles de pièces. Une famille de pièces est une classe de composants mécaniques tels que chapeau de réducteur, pion de centrage, piston etc.

Les sorties :

- La sortie est une ou plusieurs pièces qui sont de la même famille que le cas d'étude.

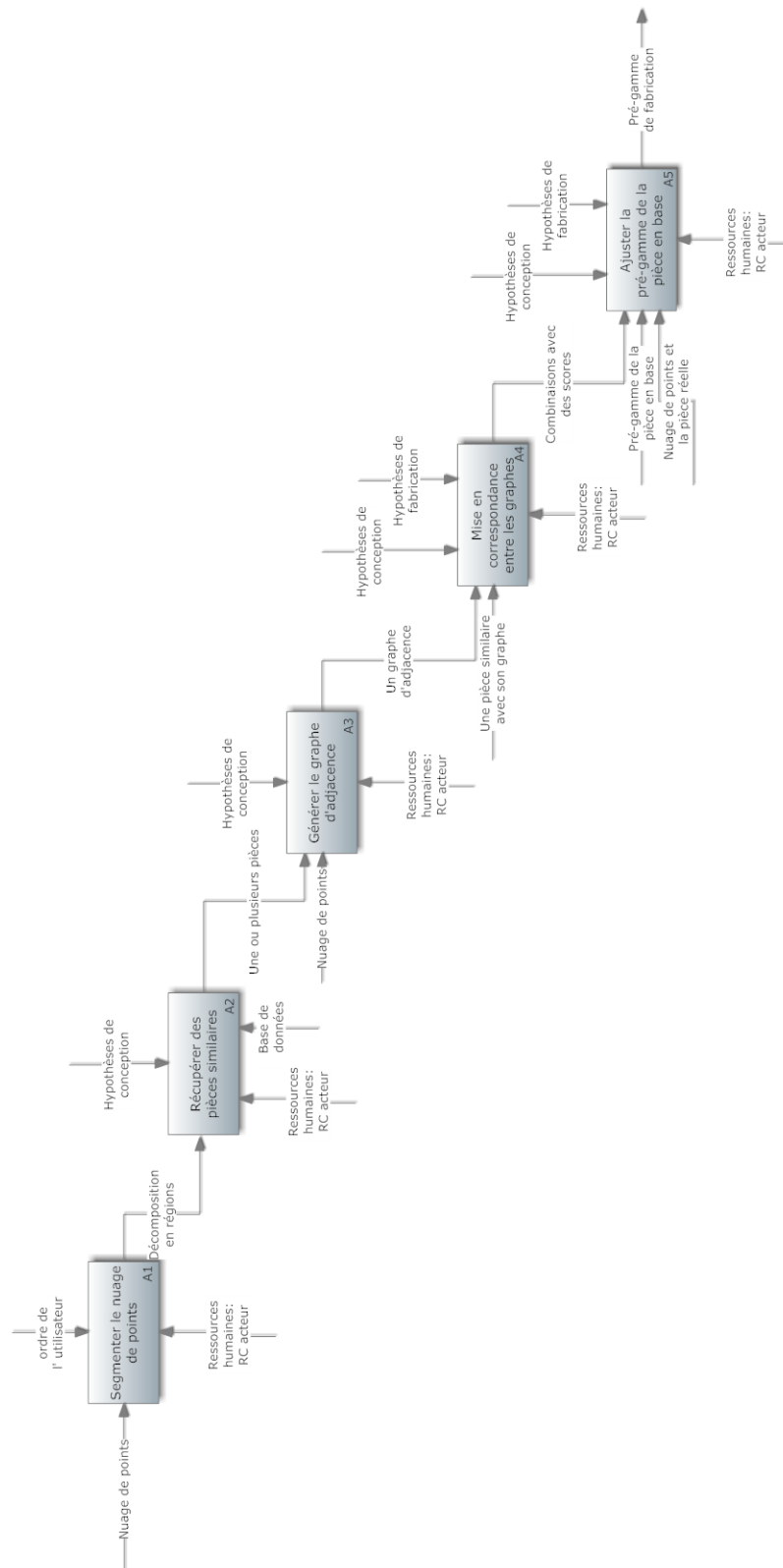


FIGURE 3.13: La décomposition de A0-IDEF0 du processus global de la phase de ré-utilisation.

3.2.2.4 A3 : Générer le graphe d'adjacence

Cette activité permet de générer le graphe d'adjacence de la pièce à retro-concevoir.

Les entrées :

- Le fichier nuage de points segmenté représente l'entrée.

Les contrôles :

- Les hypothèses de conception contrôlent cette activité.

Les mécanismes :

- Nous les représentons par les ressources humaines. L'acteur de RC donne l'ordre d'exécution du graphe.

Les sorties :

- En sortie, un graphe d'adjacence de la pièce à retro-concevoir est généré.

3.2.2.5 A4 : Mise en correspondance entre les graphes

Cette activité permet de comparer le graphe d'adjacence du cas d'étude avec le graphe d'adjacence d'une pièce en base qui est similaire ou de même famille que le cas d'étude.

Les entrées :

- Le graphe d'adjacence généré dans l'activité A2.
- Une des pièces avec son graphe d'adjacence récupéré par l'activité A1.

Les contrôles :

- Les hypothèses de conception et les hypothèses de fabrication contrôlent cette activité.

Les mécanismes :

- Nous les représentons par les ressources humaines. l'acteur de RC donne l'ordre d'exécuter la comparaison entre les graphes.

Les sorties :

- Les sorties sont des combinaisons de mise en correspondance entre deux graphes, avec des scores exprimés en pourcentage.

3.2.2.6 A5 : Ajuster la gamme de la pièce en base

Cette activité permet d'ajuster ou d'associer la gamme de la pièce en base au cas d'étude.

Les entrées :

- Le nuage de points segmenté et la pièce réelle à retro-concevoir.
- La gamme de la pièce en base.

Les contrôles :

- Les hypothèses de conception et les hypothèses de fabrication contrôlent cette activité.

Les mécanismes :

- La ressource est humaine et est représentée par l'acteur de RC.

Les sorties :

- En sortie, une gamme sera créée.

Conclusion Chapitre 3

Dans ce chapitre, nous avons présenté la démarche globale de la méthode REFM, ainsi que les activités principales. La démarche REFM sera décrite dans les deux chapitres suivants et sera appuyée par des cas d'études académiques : un pion de centrage et un chapeau de réducteur.

Conformément aux principes de « capitalisation » et de « réutilisation », la méthode REFM sera tout d'abord illustrée par deux nouvelles pièces où la gamme de fabrication est à capitaliser (figure 3.14) puis par deux pièces de même famille où la gamme d'usinage peut être partiellement ou complètement réutilisée (figure 3.15).

En général, dans cette thèse, les nuages de points utilisés dans la phase de capitalisation sont issus des scans (scan laser CCD, 0.005 mm en absolue), et les nuages de points utilisés dans la phase de réutilisation sont issus d'une tessellation des modèles CAO.

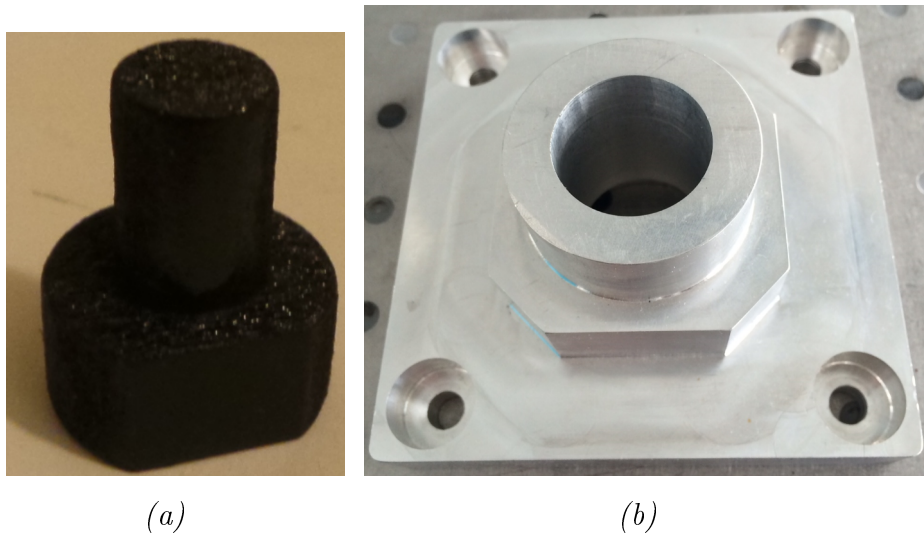


FIGURE 3.14: Les cas d'études pour illustrer la phase de capitalisation : (a) Pion de centrage et (b) Chapeau de réducteur.

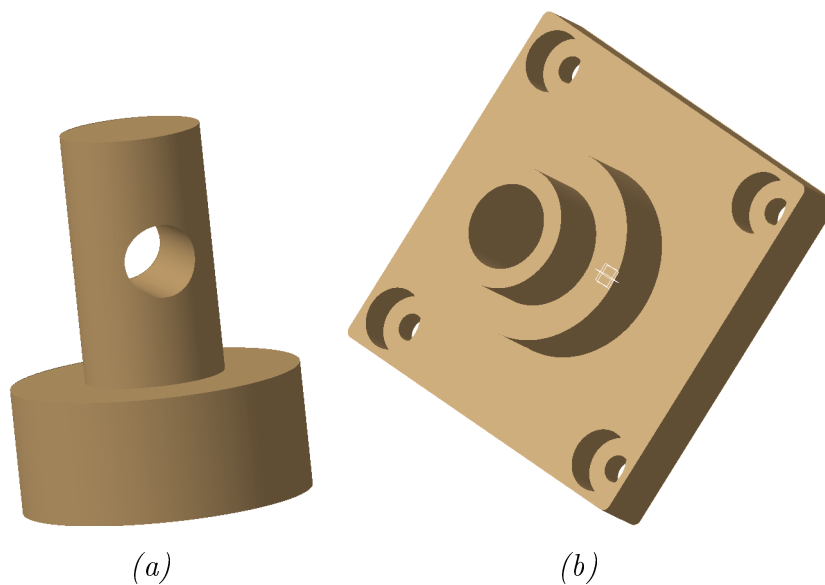


FIGURE 3.15: Les cas d'études pour illustrer la phase de réutilisation : (a) Pion de centrage (nuage de points STL, généré à partir d'une CAO) et (b) Chapeau de réducteur (nuage de points STL, généré à partir d'une CAO).

Chapitre 4

Phase de capitalisation

Introduction Chapitre 4

Dans ce chapitre, les différentes étapes de la phase de capitalisation seront expliquées en détail. Les interactions entre l'utilisateur et le modèle de données (base de données REFM) seront illustrées sur les deux cas d'études. Ce chapitre sera décomposé en trois sections :

- Processus global : le processus global de la phase de capitalisation est expliqué dans cette section. Il est divisé en deux étapes : la segmentation et l'acquisition des connaissances de fabrication.
- La segmentation : le nuage de points de la pièce à retro-concevoir sera partitionné en régions.
- L'acquisition des connaissances de fabrication : les connaissances de fabrication sur le cas d'étude seront supposées dans cette section. L'utilisateur doit établir une analyse de fabricabilité à partir du nuage de points et de la pièce réelle, pour aboutir à la construction d'un modèle APEF (Avant Projet d'Etude de Fabrication).

4.1 Processus global

Nous supposons que la base de données REFM est au départ vide. Cela signifie qu'il n'y a pas encore de pièces retro-conçues dans la base. En effet, nous considérons que la démarche REFM est applicable pour une seule entreprise. La capitalisation ne peut se faire que sur ses produits car sa culture en termes de stratégies et de fabrication est unique. Néanmoins, pour faciliter la phase de réutilisation (cf chapitre 5, partie 2), les pièces dans la base de données sont classifiées par familles de pièces (cf. modèle de données du REFM conclusion partie 2).

Conformément à l'hypothèse 2 (chapitre 1, partie 1), nous considérons que la phase

de capitalisation se réalise à partir du nuage de points, de la pièce réelle et d'une mise en plan (souvent non mise à jour). Bien que la capitalisation puisse réellement se faire sur des données plus complètes telles que des modèles CAO ou FAO paramétrés etc. Le nuage de points, la pièce réelle et sa mise en plan correspondent à la réalité la plus contraignante de la RC. Nous avons donc, pour ces raisons, choisi cette configuration.

Le modèle « CAO fabrication » doit être généré à partir de zéro, **l'utilisateur doit être assisté dans le processus de rétro-conception.**

Donc, deux démarches principales composent cette phase (figure 4.1) :

- Les techniques de segmentation : où le nuage de points est séparé en régions. Chaque région est un regroupement de points. Cette étape permet de repérer pour l'utilisateur les surfaces et plus globalement la géométrie de la pièce.
- Les techniques d'acquisition des connaissances de fabrication : où l'utilisateur doit fournir des hypothèses sur la pièce à retro-concevoir.

La décomposition IDEF0 de la segmentation et de l'acquisition de connaissances de fabrication, et les algorithmes seront présentés ci-dessous.

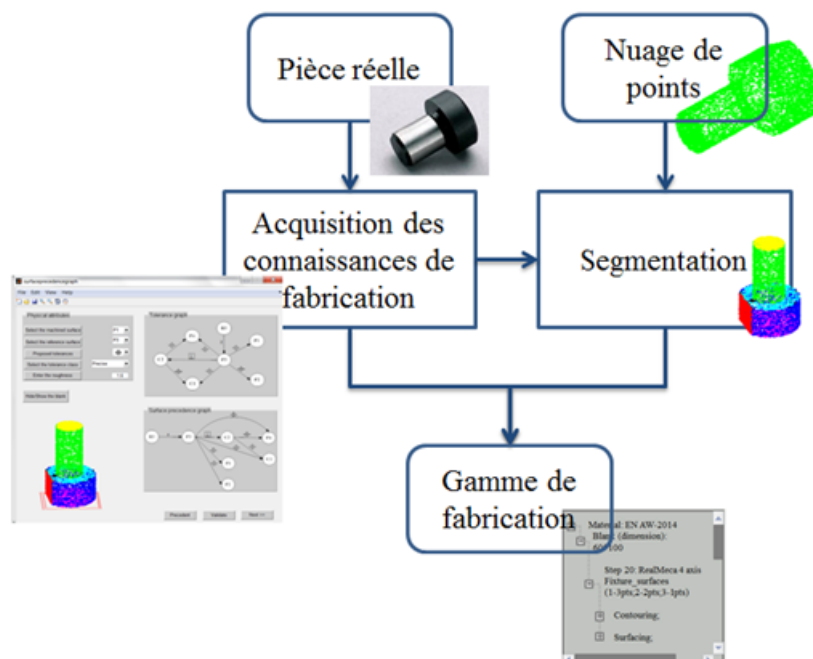


FIGURE 4.1: Le processus général de la phase de capitalisation.

4.2 La segmentation

La segmentation, en rétro-conception, est le processus qui consiste à séparer le nuage de points d'un objet en n nuages de points représentant les n régions qui composent cet objet. Trois types de segmentations sont possibles :

- Automatique : l'utilisateur peut exécuter une segmentation automatique qui sera en charge de rechercher des régions primitives dans le nuage de points.
- Manuelle : l'utilisateur lui-même segmente le nuage de points.
- Hybride (automatique et manuelle) : l'utilisateur, dans ce cas, passe en mode manuel après une exécution automatique. Il pourra même spécifier certaines régions automatiquement et d'autres manuellement.

4.2.1 La segmentation automatique, par accroissement de régions

D'une manière hiérarchique, cet algorithme illustré, à la figure 4.2, recherche tout d'abord toutes les régions planes, cylindriques, sphériques, puis coniques, le reste est considéré libre. D'un point de vue calculatoire, le principe est le suivant :

- Une région échantillon cylindrique de rayon R englobe une région de points.
- La méthode de moindres carrés est utilisée pour approximer l'échantillon par une région primitive (plan, cylindre, sphère et cône).
- Une étude de la dispersion de la distance perpendiculaire entre la primitive approximée et les points de l'échantillon permet d'éliminer ou non l'affectation à la région testée.
- Si l'échantillon est bien la primitive considérée, il est alors incrémenté de son rayon jusqu'à la régionalisation totale selon les mêmes critères. Les points ne répondant pas aux critères sont éliminés. Les autres points sont absorbés dans la région.

4.2.2 La segmentation manuelle

L'utilisateur peut segmenter lui-même une zone correspondant à une surface, selon les hypothèses de fabrication et de conception. Ce type de segmentation permet de s'assurer de la bonne segmentation du nuage de points pour l'ajustement d'une entité d'usinage.

L'algorithme de ce type de segmentation se résume à générer un polygone incluant la surface à extraire et met de côté les points qui se trouvent à l'intérieur de la surface délimitée

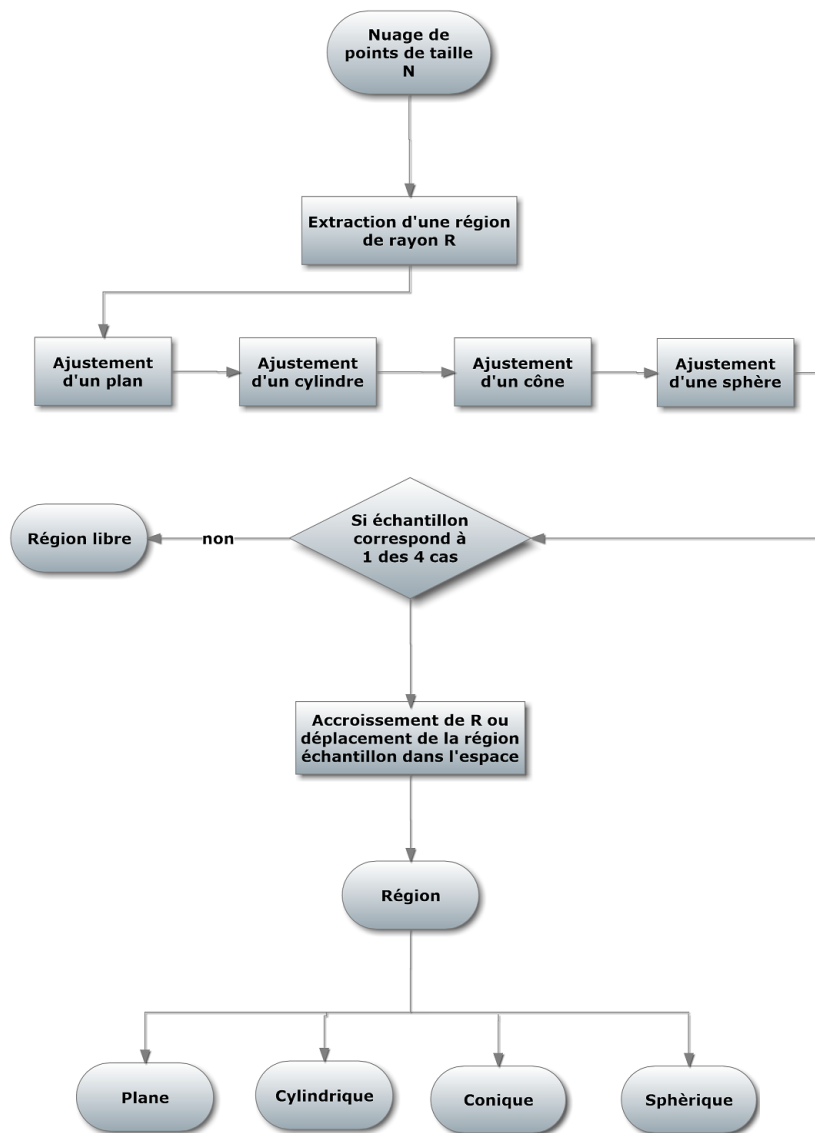


FIGURE 4.2: *L'algorithme de la segmentation automatique.*

par ce polygone. Cette tâche sera forcément répétée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de surfaces non segmentées.

4.2.3 La segmentation hybride

Elle combine les techniques manuelle et automatique :

- Segmentation manuelle : pour des surfaces de formes gauches, l'utilisateur spécifie lui-même la zone du nuage correspondante à la surface.
- Segmentation automatique : les surfaces constituées de formes simples (plans, cylindres, etc.) pourront être directement détectées par une segmentation automatique.

Par conséquent, la combinaison de la segmentation manuelle et automatique est possible. Les résultats d'une segmentation automatique peuvent être considérés pour une zone et ceux d'une segmentation manuelle pour une autre zone.

Cette segmentation peut être utilisée dans le cas où une segmentation automatique est lancée et les résultats de cette dernière ne sont pas satisfaisants pour l'ajustement d'entité d'usinage. Dans ce cas, l'utilisateur peut annuler l'opération de segmentation automatique et définir la région manuellement, ou bien regrouper ou supprimer des zones de primitives pour améliorer l'ajustement.

4.2.4 Formalisation de la technique de segmentation d'un nuage de points-A1 IDEF0

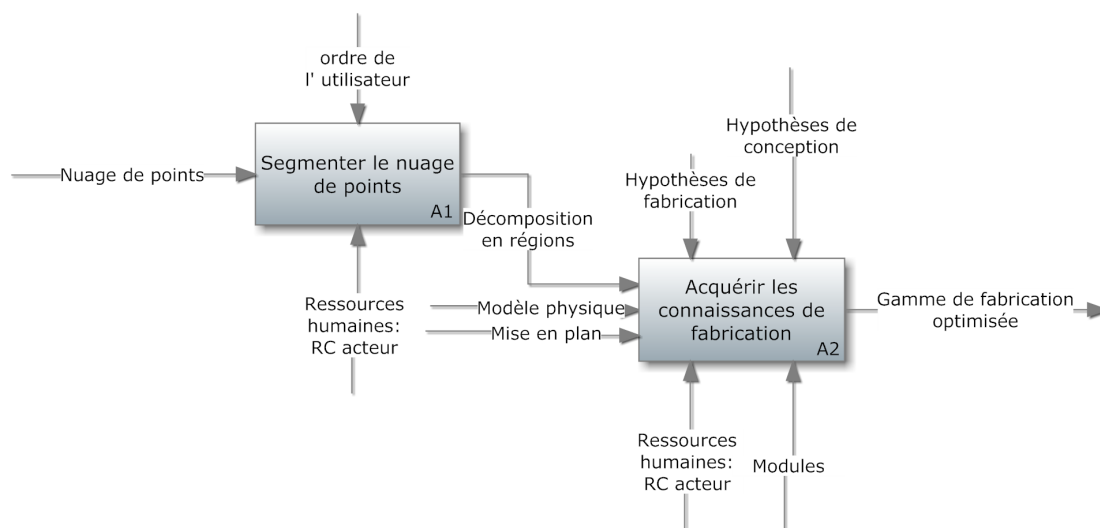


FIGURE 4.3: La décomposition de A0-IDEF0 du processus global de la phase de capitalisation.

L'activité A1 correspond à segmenter le nuage de points de la pièce à rétro-concevoir en régions. Les paramètres de cette activité sont :

Les entrées :

- Le fichier de nuage de points.

Les contrôles :

- Le contrôle dépend uniquement de l'ordre d'exécution donné par l'utilisateur.

Les mécanismes :

- Nous les représentons par les ressources humaines. l'acteur de RC qui réalise la segmentation ou donne l'ordre de son exécution.

Les sorties :

- La sortie est une décomposition en régions du nuage de points. Un code de couleur sera mis en place pour différencier la nature des régions.

La méthode de segmentation automatique est appliquée sur les deux pièces d'étude : le pion de centrage et le chapeau de réducteur. Les résultats sont obtenus aux figures 4.4 et 4.5 où le pion de centrage est divisé en six régions alors que le chapeau de réducteur est divisé en trente-deux régions.

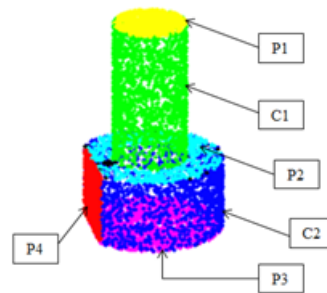


FIGURE 4.4: Pion de centrage segmenté.

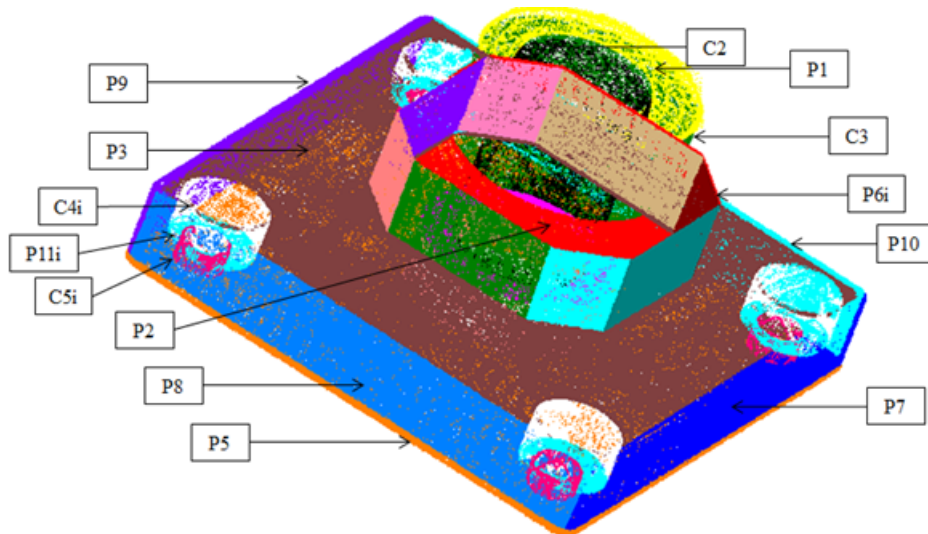


FIGURE 4.5: Chapeau de réducteur segmenté.

4.3 L'acquisition des connaissances de fabrication

Cette étape permet de rétro-concevoir un cas d'étude en tenant compte des aspects fabrication dans le processus de rétro-conception. L'acquisition des connaissances de fabrication est un point novateur de notre méthode REFM. En effet, l'acquisition des connaissances va permettre :

- De révéler les vues fabrication importantes à prendre en compte pour obtenir une bonne rétro-conception.
- D'établir une analyse de fabricabilité à partir du nuage de points et de la pièce réelle, afin d'aider à la génération d'un modèle « CAO fabrication ».
- D'identifier les surfaces usinées de la pièce.
- D'évoluer par le biais de paramètres procédés, la gamme de fabrication.

Cette étape se fait manuellement par l'utilisateur dans le but de capitaliser toutes ses connaissances sur la pièce à rétro-concevoir pour enfin les réutiliser directement dans la rétro-conception d'une pièce similaire.

4.3.1 Formalisation de la technique d'acquisition des connaissances de fabrication-A2 IDEF0

A partir de la décomposition du processus global (figure 4.3) de la phase de capitalisation de la méthode, la section précédente a explicité l'activité A1 (Segmenter le nuage de points). Cette section va expliciter l'activité A2 (Acquérir des connaissances de fabrication, (figure 4.3)).

Cette activité permet à l'utilisateur d'établir une analyse de fabricabilité afin d'aider à la génération d'une gamme de fabrication. Les paramètres de cette activité sont :

Les entrées :

- Les entrées sont constituées de la pièce réelle, du nuage de points et d'une mise en plan non mise à jour.

Les contrôles :

- Les hypothèses de fabrication et les hypothèses de conception contrôlent cette activité.

Les mécanismes :

- La ressource est humaine et est représentée par l'acteur de RC. En plus, l'acteur de RC sera guidé par des modules (tels que CES EduPack) afin de choisir les matériaux et les outils de fabrication. Les matériaux permettent ici d'aider à filtrer les types de de procédés possibles.

Les sorties :

- En sortie, une gamme de fabrication sera créée. Le niveau de détail de cette gamme s'apparente à un Avant Projet d'étude de fabrication.

Figure 4.6 illustre la décomposition IDEF0 de l'activité A2. Cette dernière est décomposée en deux sous-activités.

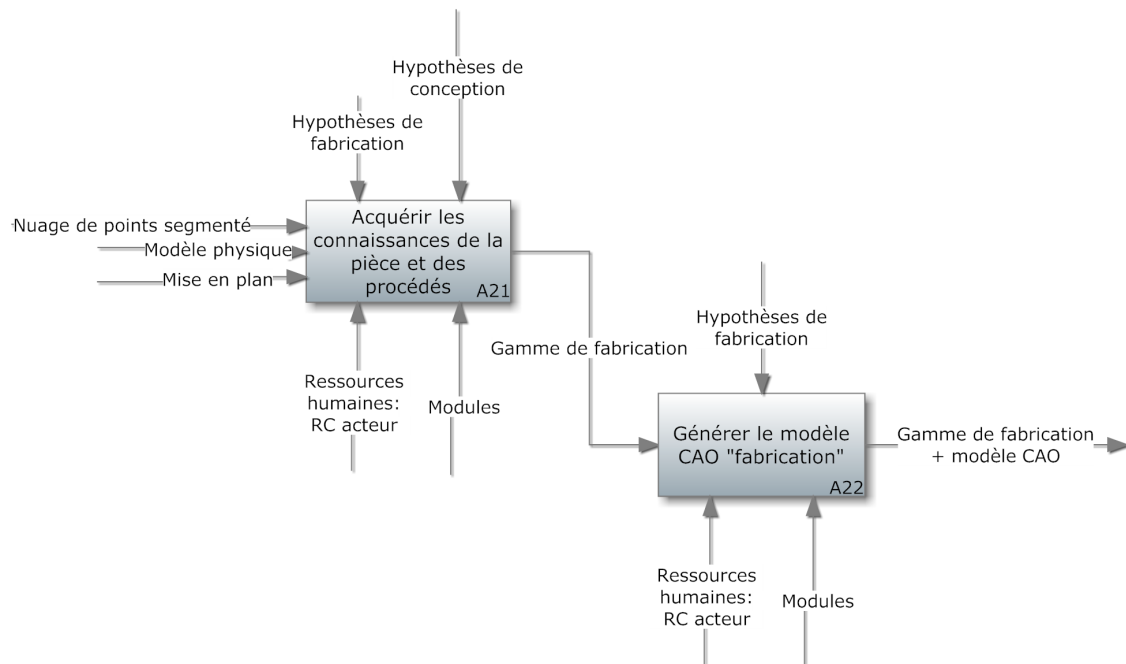


FIGURE 4.6: La décomposition de A2-IDEF0 : Acquérir les connaissances de fabrication.

4.3.2 A21 : Acquérir les connaissances de la pièce et des procédés

Cette activité permet à l'utilisateur d'établir une analyse de fabricabilité afin d'aider à la génération d'une gamme de fabrication. Les paramètres de cette activité sont :

Les entrées :

- Les entrées sont constituées de la pièce réelle, du nuage de points décomposé en régions et d'une mise en plan.

Les contrôles :

- Les hypothèses de fabrication et les hypothèses de conception contrôlent cette activité.

Les mécanismes :

- La ressource est humaine et est représentée par l'acteur de RC. En plus, l'acteur de RC sera guidé par des modules afin de choisir les matériaux et les opérations d'usinage.

Les sorties :

- En sortie, une gamme de fabrication sera créée.

A la suite de cette activité, une activité (Générer le modèle CAO « fabrication ») est nécessaire pour obtenir le modèle CAO associé à la gamme de fabrication obtenue précédemment.

L'activité A21 est divisée en quatre activités :

A211 Sélectionner le brut et le matériau

L'activité A211 permet à l'utilisateur de déterminer le brut du cas d'étude et son matériau (figure 4.7). Les paramètres de cette activité sont :

Les entrées :

- Le nuage de points et la pièce réelle constituent les entrées de cette activité.

Les contrôles :

- Le contrôle est assuré par les hypothèses de conception et de fabrication.

Les mécanismes :

- L'acteur de rétro-conception assure la ressource. Il est guidé par le module CES d'Ashby.

Les sorties :

- En sortie, un brut qui englobe le cas d'étude et un matériau sont sélectionnés.

Comme déjà dit dans les chapitres précédents, la méthode REFM aide l'utilisateur dans la phase de capitalisation à extraire ses connaissances et à extraire des informations à partir de la pièce à retro-concevoir.

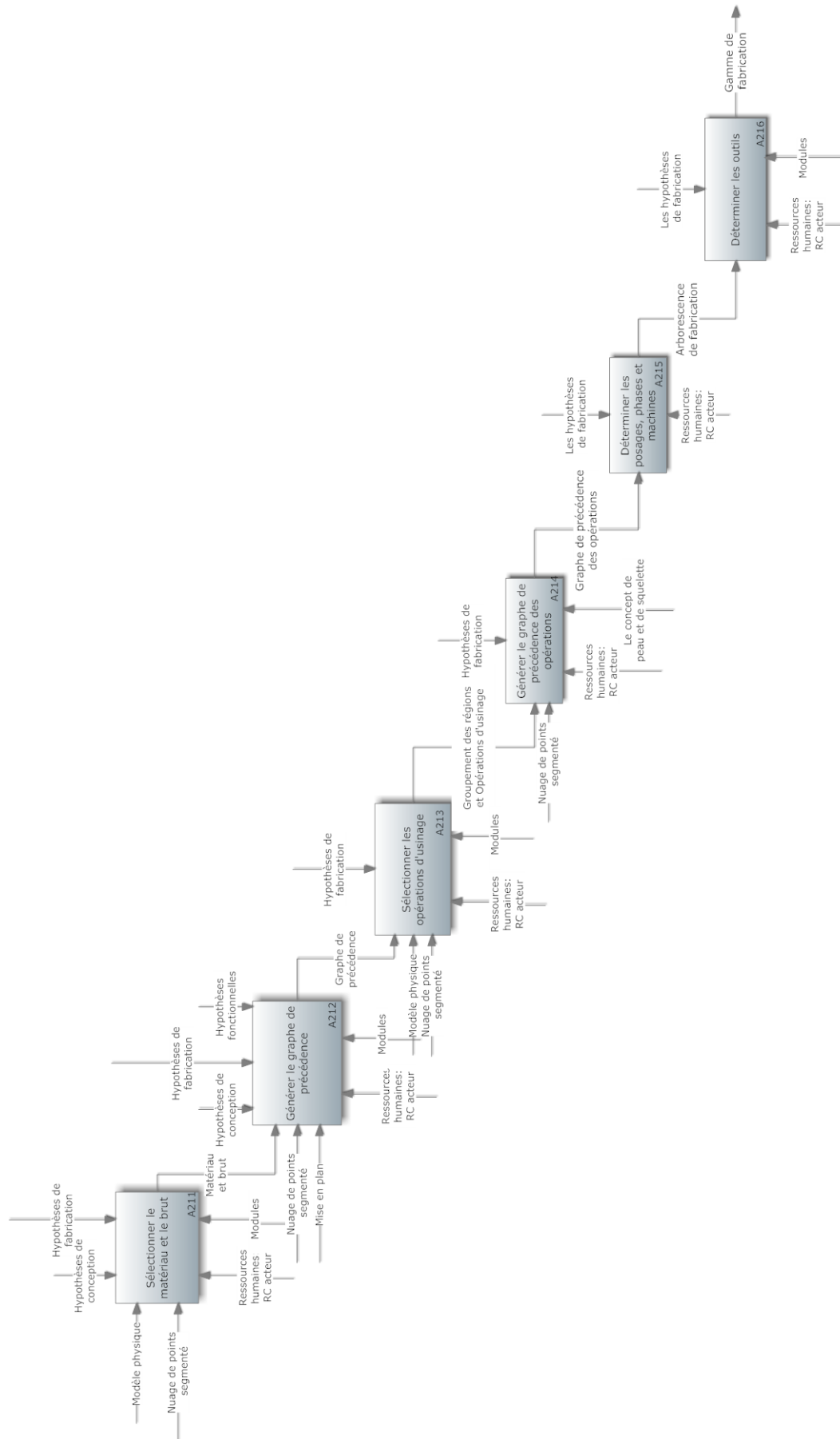


FIGURE 4.7: La décomposition de A21-IDEF0 : Acquérir les connaissances de la pièce et des procédés.

Cette activité est basée sur la conception pour la fabrication (Design For Manufacturing DFM).

En effet, pour sélectionner le matériau, les étapes suivantes sont à suivre :

- L'utilisateur doit peser la pièce à retro-concevoir.
- Le volume de la pièce sera calculé à partir de son nuage de points. Ainsi la densité de la pièce (la densité est le rapport de la masse par le volume) sera obtenue.
- Le système CES EduPack d'Ashby est à utiliser dans cette étape. Donc, la méthode se base sur le système CES EduPack pour proposer à l'utilisateur deux ou trois matériaux ayant la même densité calculée dans l'étape précédente, et puis l'utilisateur doit choisir le matériau qui convient le plus selon ses expériences et la culture de son entreprise.

Il est à noter que si l'utilisateur n'est pas satisfait des matériaux candidats, ce dernier pourra ajouter un matériau supplémentaire. Dès le matériau déterminé, le brut de la pièce est à calculer. Pour rappel, la méthode REFM concerne les pièces usinées. Ainsi, le brut provient d'un procédé précédent.

Ashby suggère de classer ces procédés selon le schéma présenté à la figure 4.8 :

- Procédés primaires : présentés par le premier niveau sur la figure. Ils représentent la création de forme telle que la fonderie, le moulage, le forgeage, etc.
- Procédés secondaires : représentés par le deuxième niveau de la figure. Ils sont spécifiques à la modification de forme comme les procédés d'usinage, de découpage, de meulage, etc. ; et à l'amélioration des propriétés de la surface telle que le traitement thermique.
- Le troisième niveau de la figure concerne les procédés dits assemblage comme le soudage, le rivetage, etc. ; et puis les procédés de traitements de surfaces de l'assemblage telle que le polissage et la mise en peinture.

D'après Ashby, des bruts qui englobent les cas d'étude (pion de centrage et chapeau de réducteur) et qui proviennent des procédés primaires (laminage, extrusion, etc.) (figures 4.9 et 4.10) peuvent être proposés. Ces bruts sont obtenus à partir d'un algorithme de calcul d'un cylindre englobant ou d'une boîte englobante (Chang *et al.*, 2011), (Man *et al.*, 2014). Nous n'avons pas implémenter jusqu'à maintenant de méthode de calcul de la boîte englobante. La méthode REFM n'est pas capable pour l'instant de calculer des bruts provenant des procédés de mise en forme (moulage, forgeage, etc.).

A212 Graphe de précedence des surfaces

L'activité A212 permet à l'utilisateur de générer le graphe de précedence des surfaces

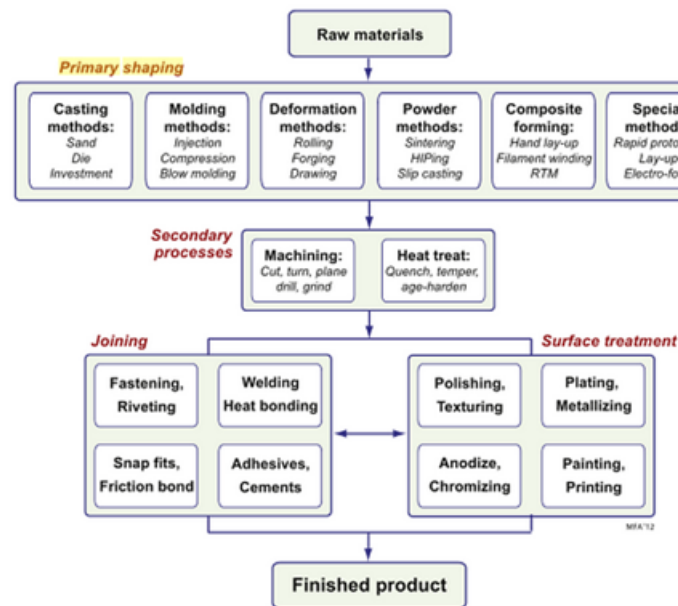


FIGURE 4.8: Le classement des procédés de fabrication (Ashby et al., 2013).

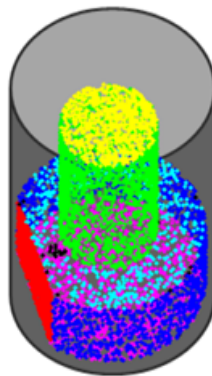


FIGURE 4.9: Brut proposé par REFM pour le pion de centrage.

(ou graphe de cotation) de la pièce. Les paramètres de cette activité sont :

Les entrées :

- Le nuage de points, le brut et la mise en plan (partielle ou non mise à jour) constituent les entrées de cette activité.

Les contrôles :

- Le contrôle est assuré par les hypothèses fonctionnelles d'une part et les hypothèses de conception et de fabrication d'autre part.

Les mécanismes :

- L'acteur de rétro-conception assure la ressource. Il est guidé par le module CES EduPack d'Ashby.

Les sorties :

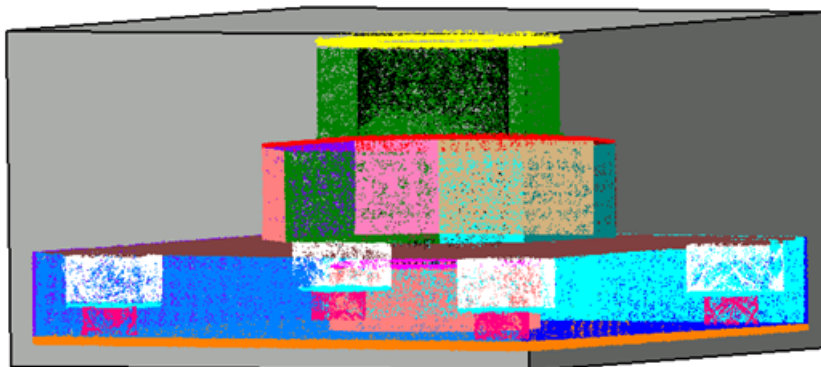


FIGURE 4.10: Brut proposé par REFM pour le chapeau de réducteur.

- Le graphe de précedence des surfaces est considéré comme la sortie de cette activité.

Pour générer un graphe de précedence un expert s'appuie sur :

- Un nuage de points segmenté
- Une mise en plan minimaliste
- Son expérience
- Des modes opératoires de l'entreprise
- Des règles de fabrication ; comme par exemple : Un plan support d'un alésage, doit être surfacé avant de façon à ne pas obstruer l'alésage par les copeaux provenant du surfacage.

Chaque nœud de ce graphe correspond à une surface de la pièce. La figure 4.11 représente un exemple de deux surfaces d'une pièce présentées par deux nœuds avec la contrainte d'usinage entre eux. Dans cette figure, la surface P5 doit être usinée après la surface P3. En plus, elle doit être usinée par rapport à la surface P3 avec une tolérance d'orientation de perpendicularité.

Chaque surface est représentée par un cercle contenant le label de la surface (B : Surface brute, P : Plan usiné, C ou Cy : Cylindre usiné, Co : Cône usiné).



FIGURE 4.11: Exemple d'une dépendance entre deux surfaces représentée sous forme de graphe.

Cette méthode peut être utilisée pour recenser et repérer les surfaces usinées et les surfaces brutes de la pièce à rétro-concevoir. Ce graphe orienté acyclique fait apparaître des antériorités entre les surfaces. Ces antériorités permettent d'imposer l'ordre des opérations

d'usinage, ainsi que les niveaux et les posages à respecter lors de la rétro-conception de la pièce (Ali *et al.*, 2014a).

Dans notre contexte de thèse le graphe de précédence des surfaces est obtenu à partir du nuage de points segmenté et de la mise en plan disponible. Son obtention constitue le cœur de la démarche d'acquisition des connaissances. En effet, l'utilisateur déterminera l'antériorité des régions (ou groupes de régions) du nuage de points pour construire le graphe de précédence. Les nœuds représentent une région ou un groupe de régions et un arc correspond à une dépendance « fonctionnelle » entre les régions. Cette dépendance fonctionnelle est principalement déterminée par les compétences de l'utilisateur.

Par exemple, ce dernier doit tenir compte dans son analyse des surfaces les plus critiques du point de vue des tolérances pour ne pas additionner des tolérances provenant d'opérations précédentes. Il peut notamment se baser sur des règles de « bon sens » telles que :

Un plan support d'un alésage, doit être surfacé avant de façon à ne pas obstruer l'alésage par les copeaux provenant du surfacage. Des surfaces d'appui de la pièce doivent être choisies de façon à garantir le meilleur positionnement. Ces surfaces devront être les plus étendues possibles et d'une bonne qualité...

Pour générer le graphe de précédence, les démarches méthodologiques en interaction avec le nuage de points segmenté sont à suivre :

- L'utilisateur déterminera une région (ou groupe de régions) usinée et sa surface de référence afin d'obtenir un graphe de tolérance. Le graphe de tolérance représente de façon non ordonné les dépendances fonctionnelles entre les régions. Ce dernier est le support pour la génération du graphe de précédence.
- Une ou plusieurs tolérances telles que le parallélisme, la perpendicularité, la localisation, la concentricité seront proposées à l'utilisateur ; et celui-ci pourra choisir la tolérance qu'il trouve la plus appropriée. Pour cela, un calcul du produit scalaire du vecteur directeur V_x de la région X et du vecteur directeur V_y de la région Y doit être fait pour identifier les types de tolérances entre les deux surfaces X et Y . En effet :

Si X et Y sont deux plans ou deux cylindres :

$$|\vec{V}_x \cdot \vec{V}_y| = \begin{cases} > 0.9 \text{ alors } X // Y \\ < 0.1 \text{ alors } X \perp Y \\ \text{Si non, une surface est inclinée par rapport à l'autre.} \end{cases}$$

Si X et Y sont un plan et un cylindre :

$$|\vec{V}_x \cdot \vec{V}_y| = \begin{cases} > 0.9 \text{ alors } X \perp Y \\ < 0.1 \text{ alors } X // Y \\ \text{Si non, une surface est inclinée par rapport à l'autre.} \end{cases}$$

Les valeurs de seuil proposées ci-dessus ont été déterminées de façon empirique à partir de la numérisation et de la segmentation du chapeau de réducteur.

- La pièce réelle étant disponible. Quelques états de surface pourront être mesurés par un rugosimètre. À partir de la base de données d'Ashby, la méthode peut suggérer une liste de classes de tolérances en se basant sur le matériau de la pièce sélectionnée dans la première étape de la phase de capitalisation, et en se basant sur la rugosité de la surface mesurée. Ainsi, l'utilisateur déterminera en se basant sur ses propres compétences la classe de tolérance convenable à la surface. Les valeurs des tolérances ne pouvant être déterminées par rapport au nuage de points, nous avons proposé les classes suivantes : (1) très précis, (2) précis, (3) large.

Le graphe de tolérance est appliqué sur toutes les surfaces usinées de la pièce. Ainsi le graphe de précédence des surfaces peut être généré de façon automatique. Ce graphe permet de révéler l'ordre d'usinage des surfaces. Cependant, cet ordre est proposé par un algorithme de « libération de contraintes » (Adragna *et al.*, 2014) illustré à la figure 4.25 :

- Les régions ou groupes de régions qui n'ont pas de contraintes (c.à.d. les surfaces qui positionnent d'autres surfaces, mais elles ne sont positionnées par d'autres) sont affectées à un ordre ième. Par exemple, les surfaces de la pièce brute sont au premier ordre parce qu'elles positionnent et ne sont pas positionnées.
- Les contraintes des surfaces qui sont dans l'ordre ième sont libérées. Ainsi, des nouvelles régions qui n'ont pas de contraintes apparaissent, et donc elles sont considérées au i+1ème ordre ; et ainsi de suite.

Les figures 4.13 et 4.14 montrent un exemple d'un graphe de tolérance et un graphe de précédence orienté du pion de centrage et du chapeau de réducteur. À noter ici que la surface B3 dans la figure 4.13 est une surface brute qui donc n'apparaît pas dans le nuage de points segmenté, vu que toute la pièce a été usinée. Cette surface B3 est une surface du brut englobant.

A213 Sélectionner les opérations d'usinage

Après la génération du graphe de précédence, les opérations d'usinage doivent être sélectionnées. L'activité A213 permet à l'utilisateur de déterminer les opérations d'usinage de chaque région ou groupe de régions de la pièce. Les paramètres de cette activité sont :

Les entrées :

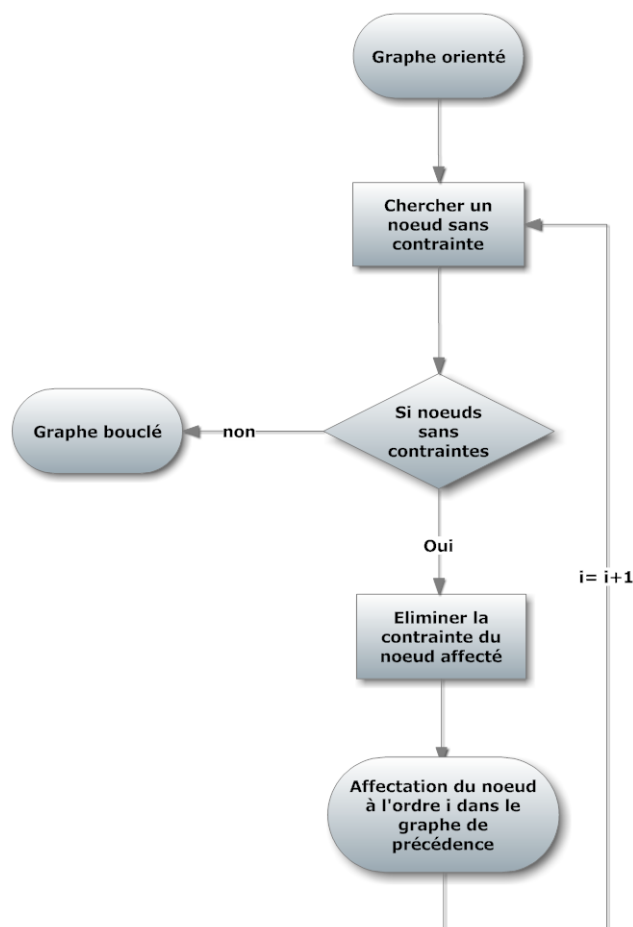


FIGURE 4.12: L'algorithme de libération de contraintes.

- Les entrées sont constituées de la pièce réelle et du nuage de points décomposé en régions.

Les contrôles :

- Les hypothèses de fabrication contrôlent cette activité.

Les mécanismes :

- La ressource est humaine et est représentée par l'acteur de RC.

Les sorties :

- En sortie, les opérations d'usinage de chaque entité seront choisies.

Dans le but de déterminer les opérations d'usinage, les régions qui peuvent être usinées par une même opération doivent être groupées par l'utilisateur. Ce groupement est conditionné par les moyens mis en œuvre (machines et outils). En fait, les régions qui sont accessibles par un même outil peuvent être groupées pour être usinées en même temps. Dans le cas du pion de centrage, l'utilisateur peut grouper les deux surfaces C1 et P2 dans un

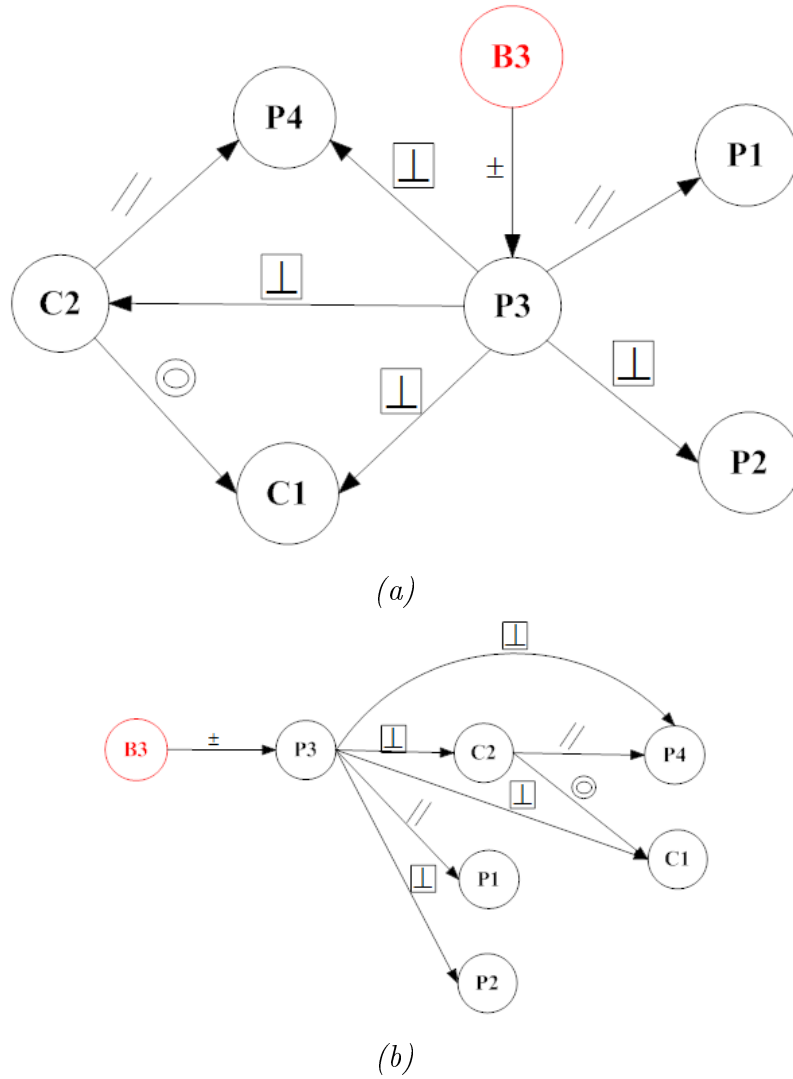


FIGURE 4.13: Exemples (a) d'un graphe de tolérance et (b) d'un graphe de précédence du pion de centrage.

groupe en utilisant un même outil comme indiqué dans la figure 4.15.

Dans le cas du chapeau de réducteur, les régions P3 et P6i peuvent être groupées dans GF, C3 et P2 dans HF, P4 et C1 dans IF, C4i et P11i dans JiF. Les figures 4.16 à 4.19 montrent les groupes de surfaces.

Dans le cas du pion de centrage, le plan P1 et le plan P3 doivent être usinés par les opérations de dressage, le groupe HF et le cylindre C2 par les opérations de tournage (chariotage et dressage), et le plan P4 par l'opération de fraisage. Dans le cas du chapeau de réducteur, les plans P1, P5 doivent être usinés par les opérations de surfacage, les surfaces P7, P8, P9, P10 et les groupes GiF et IF par des opérations de contournage, le cylindre C2 par une opération d'alésage, les cylindres C5i par des opérations de perçage, les groupes JiF et HF par des opérations de lamage. Il est à noter que l'utilisateur peut modifier les opérations

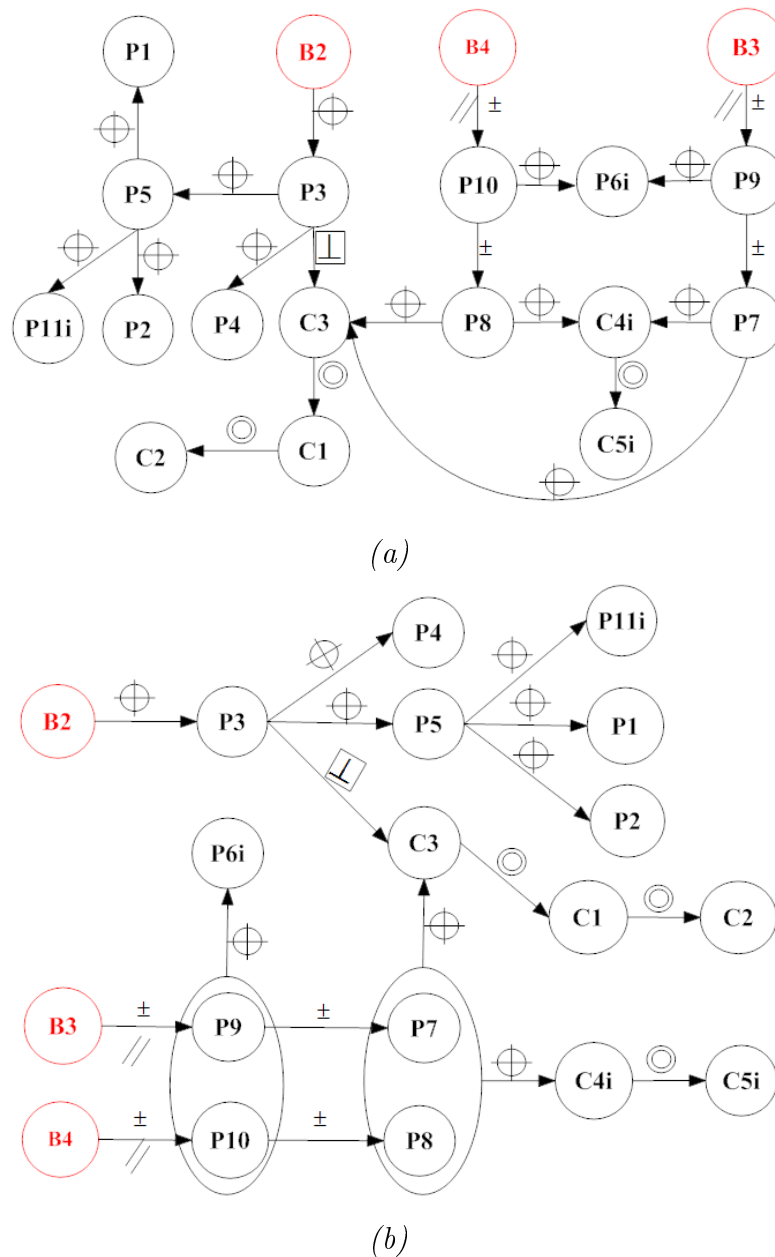


FIGURE 4.14: Exemples (a) d'un graphe de tolérance et (b) d'un graphe de précédence du chapeau de réducteur.

d'usinage en fonction de ses besoins et de la disponibilité des machines dans l'industrie. Les figures 4.15 à 4.19 illustrent le regroupement logique par outil des régions. Les modèles du pion de centrage et du chapeau de réducteur sont choisis volontairement « propres » (modèle CAO) pour faciliter la compréhension. Ensuite, par ces groupements proposés, un graphe de précédence des opérations peut être généré.

A214 Générer le graphe de précédence des opérations d'usinage

Cette activité permet d'ordonner les opérations d'usinage. Les paramètres de cette

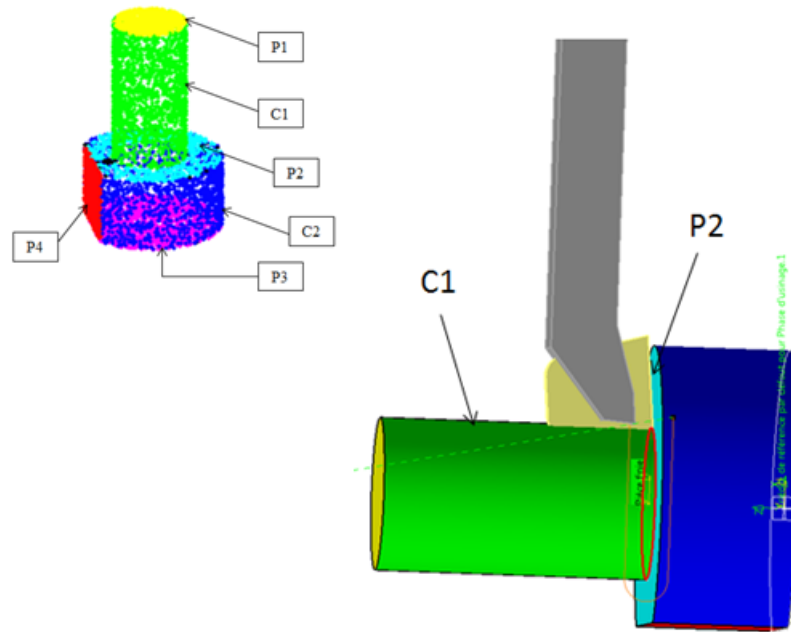


FIGURE 4.15: Groupement des deux surfaces $C1$ et $P2$ dans un groupe nommé HF .

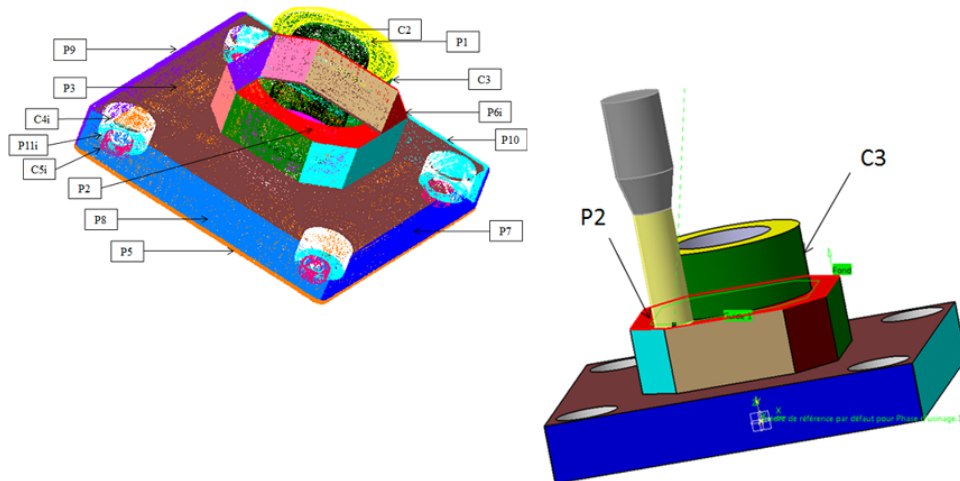


FIGURE 4.16: Groupement des deux surfaces $C3$ et $P2$ du chapeau de réducteur dans un groupe nommé HF .

activité sont :

Les entrées :

- L'entrée est constituée du groupement des régions et des opérations d'usinage.

Les contrôles :

- Les hypothèses de fabrication contrôlent cette activité.

Les mécanismes :

- La ressource est humaine et est représentée par l'acteur de RC.

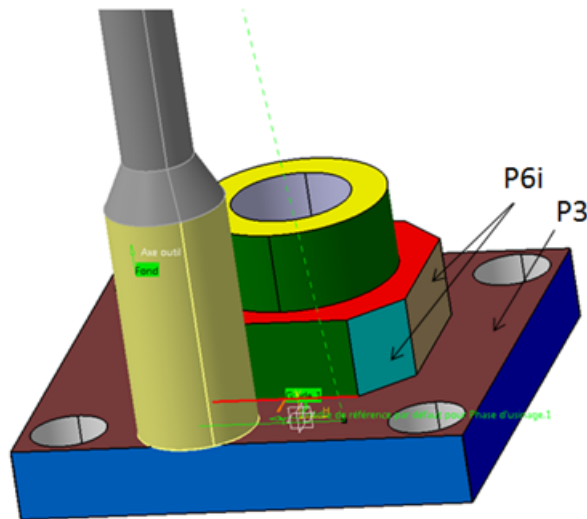


FIGURE 4.17: Groupement des surfaces $P3$ et $P6i$ du chapeau de réducteur dans un groupe nommé GF .

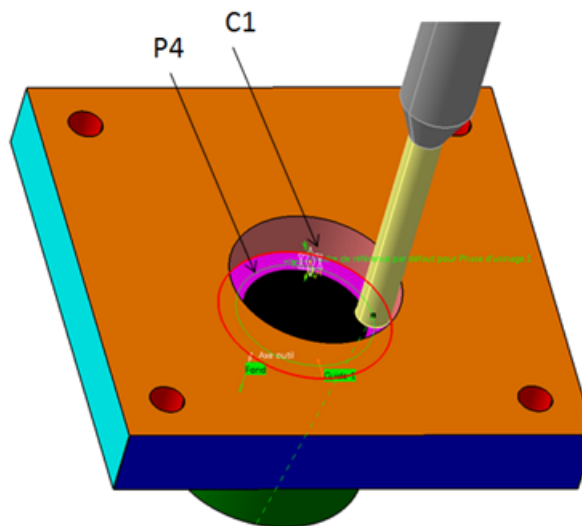


FIGURE 4.18: Groupement des deux surfaces $C1$ et $P4$ du chapeau de réducteur dans un groupe nommé IF .

Les sorties :

- En sortie, un graphe de précedence des opérations est obtenu.

Cette activité permet de créer un nouveau graphe de précedence basé sur les opérations d'usinage et les contraintes d'orientation héritées du graphe de précedence des surfaces.

Comme le graphe de précedence des régions, ce graphe est orienté et ses nœuds (opérations d'usinage) peuvent être ordonnés pour définir le graphe de précedence des opérations d'usinage. Donc, la sortie de cette étape est un graphe qui donne l'ordre des opérations d'usinage. On le nomme : graphe de précedence des opérations d'usinage. Les figures 4.20 et 4.21

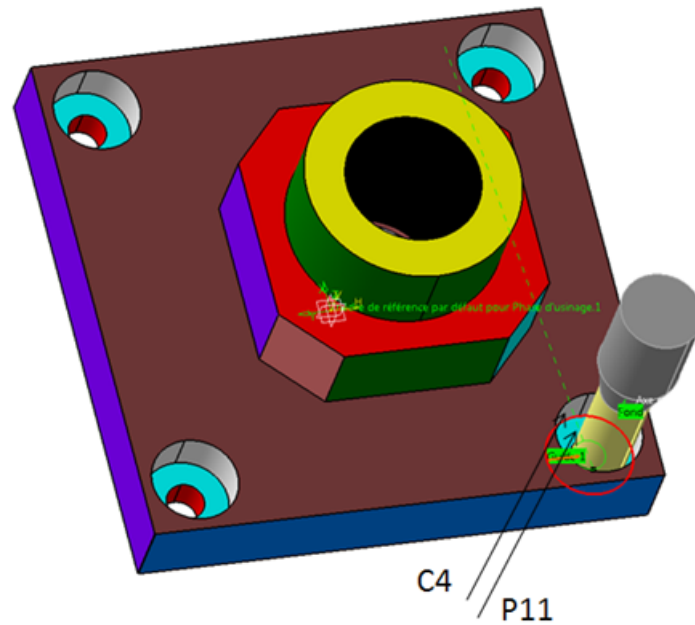


FIGURE 4.19: Groupement des deux surfaces $C4i$ et $P11i$ du chapeau de réducteur dans un groupe nommé JF .

montrent les graphes de précédence des opérations du pion de centrage et du chapeau de réducteur. On remarque d'après la figure 4.13 qui illustre le graphe de précédence du pion de centrage que le plan P3 est la première surface à usiner, en fonction de la surface brute B3. Cela est traduit en opération dans le graphe de précédence des opérations à la figure 4.20. On voit que le surfacage du plan P3 est la première opération d'usinage à réaliser sur le pion de centrage. Par rapport au graphe de précédence des opérations du chapeau de réducteur à la figure 4.21, on remarque qu'en premier lieu, il y a les opérations de contournage du groupe GF, des plans P9 et P10. Cependant, vu que l'usinage du groupe GF dépend de l'usinage des plans P9 et P10 (cela est traduit par la flèche qui lie les labels CP9 et CP10 au label CGF qui découle du graphe de précédence des surfaces à la figure 4.14), donc les opérations de contournage des plans doivent être appliquées avant le contournage du groupement de surfaces GF.

Ainsi des niveaux d'usinage peuvent être créés. L'algorithme de « libération de contraintes » peut être utilisé ici pour sortir les différents niveaux. Chaque niveau contient les entités qui se réfèrent à des entités déjà usinées. La table 4.1 montre les différents niveaux trouvés pour le pion de centrage.

A215 Déterminer les posages, phases et les machines

Une fois les opérations ordonnées, les opérations peuvent être regroupées en phases en respectant les niveaux trouvés et en tenant compte des régions qui interviennent dans

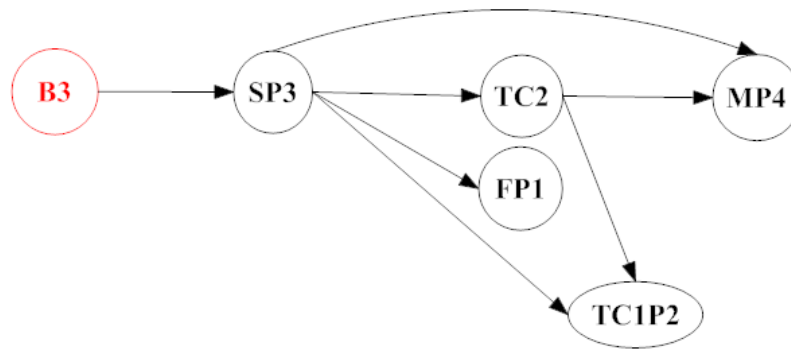


FIGURE 4.20: Graphe de précédence des opérations du pion de centrage.

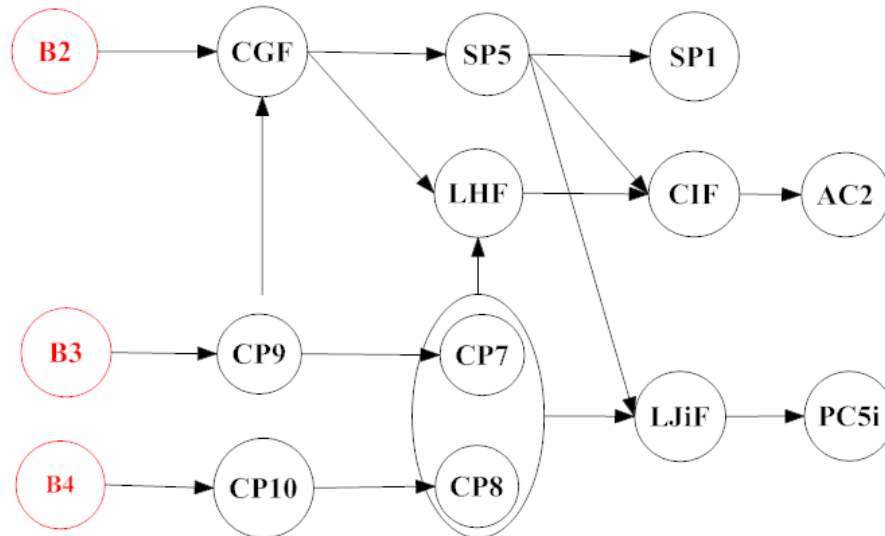


FIGURE 4.21: Graphe de précédence des opérations du chapeau de réducteur.

les posages. L'utilisateur doit réduire le nombre de phases. En effet, chaque nouvelle phase introduit la possibilité de produire des erreurs de positionnements additionnels. Donc, en minimisant le nombre des phases, la précision globale de la pièce à re-fabriquer augmente. Le nombre de phases se détermine par les régions qui interviennent dans les différents posages.

Pour respecter le principe d'isostatisme la méthode de localisation la plus populaire utilisée pour les pièces prismatiques est une combinaison d'appui primaire, secondaire et tertiaire qui peut être de type 3-2-1r (plan, linéaire, butée), de type 3-2-1c (plan, centreur, locating) ou de type 4-1-1 (pivot, butée, butée) (figure 4.22).

Par exemple, le principe de la méthode 3-2-1 est le suivant :

- L'appui primaire est généralement la surface plane la plus accessible et la plus grande pour réaliser une stabilité plus élevée.
- L'appui secondaire est destiné à la surface la plus étendue pour que les deux points d'appui soient les plus éloignés possibles.
- L'appui tertiaire est perpendiculaire à l'appui secondaire, en minimisant les défauts

TABLE 4.1: Différents niveaux dans le cas du pion de centrage.

Opération	Dépend de	Dépend de	Dépend de	Dépend de	Niveau
SP3	B3				Niveau 1
TC2	SP3				Niveau 2
FP1	SP3				Niveau 2
TC1P2	SP3	TC2			Niveau 3
MP4	SP3	TC2			Niveau 3

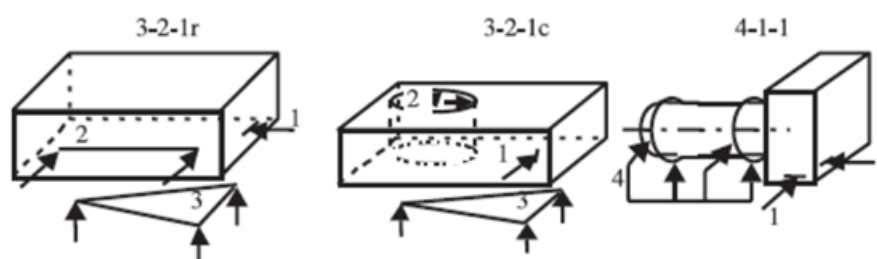


FIGURE 4.22: Les différents types de posage (Paris, 1995).

de mise en position et rendant les surfaces à usiner accessibles.

Selon le principe ci-dessus et de façon interactive avec le nuage de points segmenté, l'utilisateur pourra déterminer le nombre de phases, la nature des machines et les régions intervenant dans les différents posages. Le choix des machines est laissé libre à l'utilisateur car nous supposons que ce dernier connaît la ressource machine disponible.

Par conséquent, à partir du graphe de précédence des opérations du nuage de points segmenté, et du choix des phases et machines, il est possible d'établir une arborescence de fabrication liée à la géométrie de la pièce numérisée et segmentée.

Pour synthétiser, dans les deux cas d'études, nous obtenons les stratégies d'usinage suivantes avec les arborescences de fabrication illustrés aux figures 4.23 et 4.24 :

Cas du pion de centrage, trois phases sont définies :

- La première phase (machine : EMCO Fanuc) groupe les opérations SP3 et TC2.
- La deuxième phase (machine : EMCO Fanuc) groupe les opérations FP1 et TC1P2.
- La troisième (machine : RealMeca 4 axis) contient l'opération MP4.

Cas du chapeau de réducteur, trois phases sont définies :

- La première phase (machine : RealMeca 4 axis) groupe les opérations CGF, CP9,

CP10 et LHF.

- La deuxième phase (machine : RealMeca 4 axis) groupe les opérations CP7, CP8, SP5, CIF et AC2.
- La troisième (machine : EMCO Fanuc) groupe les opérations SP1, LJiF et PC5i.

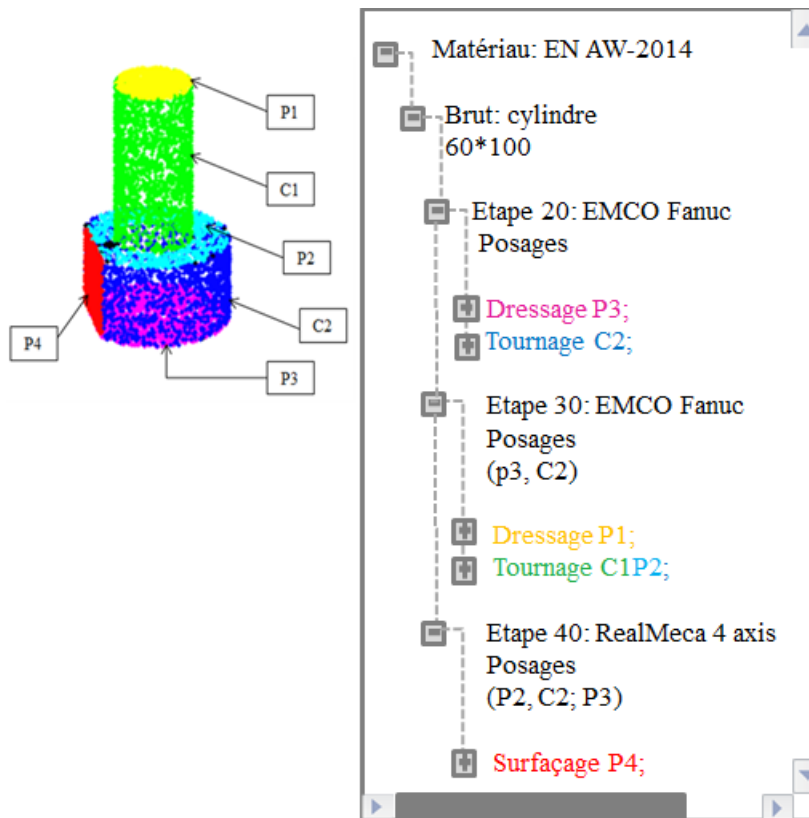


FIGURE 4.23: Arborescence de fabrication, cas du pion de centrage.

A216 Choix des outils et paramètres de coupe

L'arborescence ainsi générée peut être enrichie par les outils d'usinage et les conditions de coupe associées. La sélection des outils dépend de la finition des surfaces et du matériau de la pièce. La méthode REFM n'a pas vocation à devenir une solution FAO avec des simulations de trajectoire outils et d'usinage mais bien de préparer un modèle CAO orienté fabrication permettant ainsi d'évaluer la fabricabilité du cas d'étude.

Par conséquent, les outils et les paramètres de coupe sont déterminés par l'utilisateur. Ce dernier est supposé connaître sa ressource machine et peut s'appuyer sur des manuels techniques comme le manuel de Sandvik (<http://www.sandvik.com/>) et autres pour compléter l'arborescence des informations sur les outils et paramètres de coupe à considérer.

Néanmoins, l'arborescence complète nommée dans cette thèse « gamme de fabrication » est illustrée par la figure 4.25.

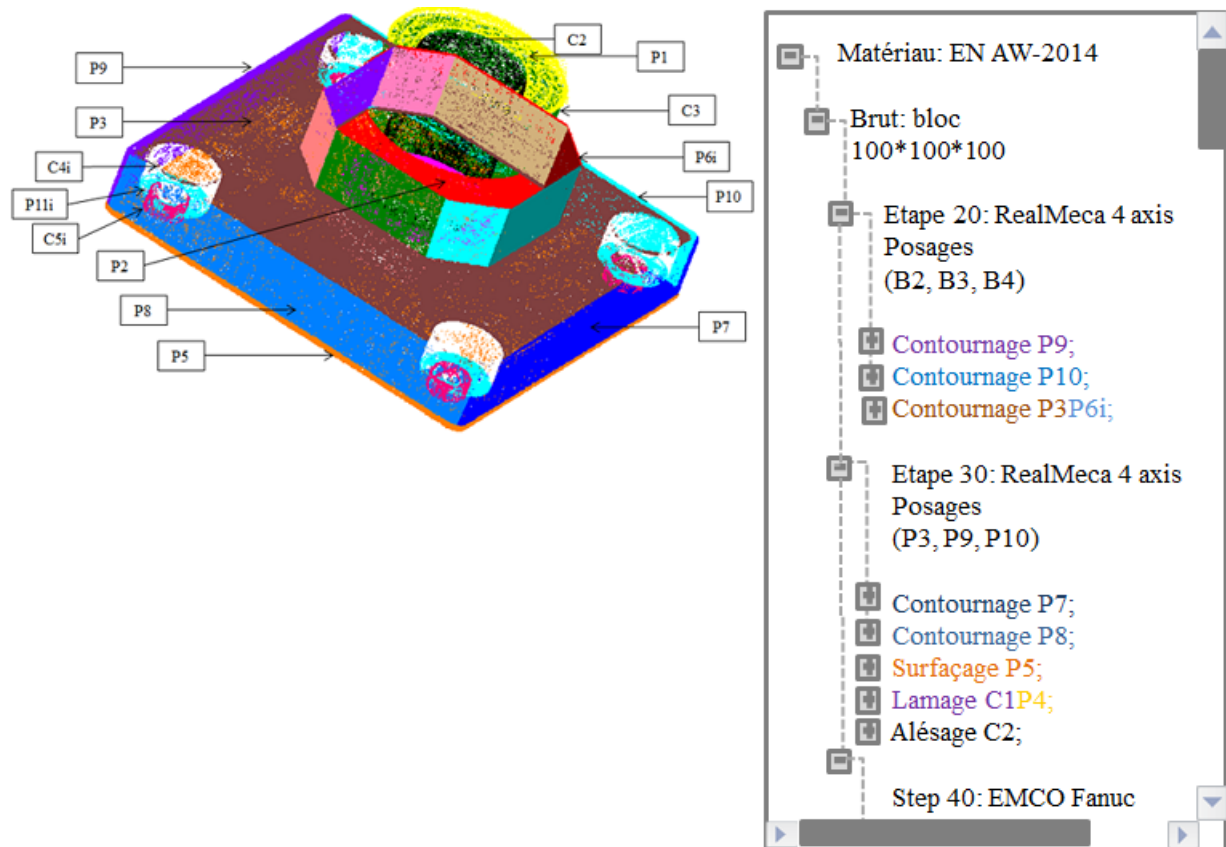


FIGURE 4.24: Arborescence de fabrication, cas du chapeau de réducteur.

4.3.3 A22 Générer le modèle CAO « fabrication »

L'analyse de la fabricabilité est réalisée dans l'activité précédente. Le modèle CAO solide associé doit être généré. Pour cela, une approche par entités, proposée dans les travaux de (Thompson *et al.*, 1999), (Durupt, 2010) et (Durupt *et al.*, 2013) est réutilisée.

L'activité A22 associée permet à l'utilisateur de lier les opérations d'usinage à la géométrie (au nuage de points). Les paramètres de cette activité sont :

Les entrées :

- Les entrées sont constituées du nuage de points qui est décomposé en régions.

Les contrôles :

- Les hypothèses de fabrication contrôlent cette activité.

Les mécanismes :

- La ressource est humaine et est représentée par l'acteur de RC. Cette activité sera basée sur le concept de peau et de squelette (Roucoules, 2007) (Durupt, 2010) et (Durupt *et al.*, 2013).

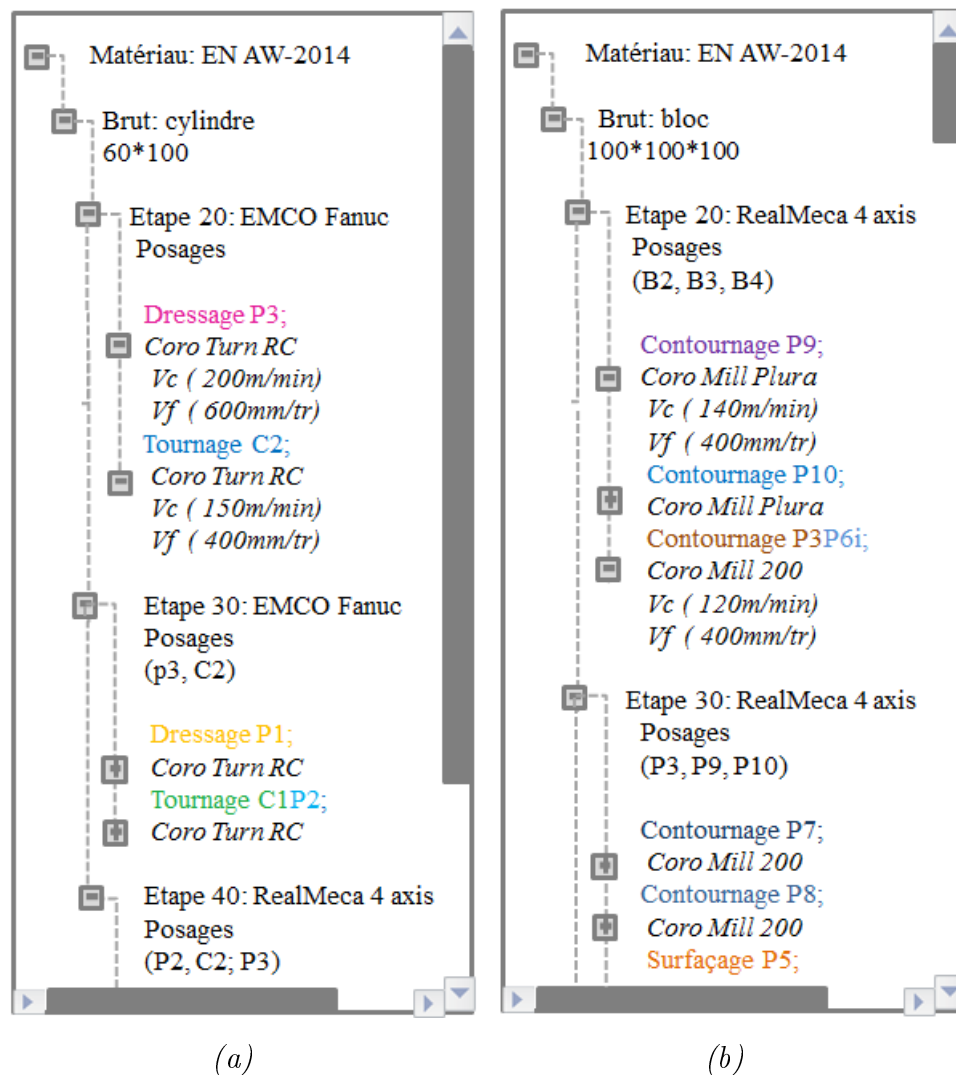


FIGURE 4.25: Gammes de fabrication (a) du pion de centrage et (b) du chapeau de réducteur.

Les sorties :

- En sortie, un modèle CAO orienté fabrication est créé.

L'identification 3D d'entité permet de traduire les opérations du processus de fabrication en géométrie.

Le concept de peau et de squelette est utilisé dans la méthode REFM. La modélisation par entités peaux et squelettes est utilisée dans la bibliographie pour la modélisation de produit. En effet, (Skander *et al.*, 2008) et (Roucoulès, 2007) s'intéressent à la modélisation de produit en utilisant des entités de formes caractérisées simultanément par des données du produit (données technologiques) et de fabrication (contraintes issues des outils et procédés de fabrication).

Les entités peaux et squelettes ont été introduites dans la bibliographie par (Belloy, 1994) et les définitions proposées seront considérées pour ce travail de thèse.

Entité Peau : Elles permettent de décrire les surfaces fonctionnelles ou de fabrication des pièces d'un mécanisme. Elles supportent des informations telles que la géométrie (forme cylindrique, plan...), des intervalles de tolérances et des attributs de cotation. A notre sens, la peau est une surface que nous qualifierons de fonctionnelle car elle est issue d'une vue métier. Cette considération s'approche des peaux métier définies dans (Roucoules, 1999) et (Roucoules, 2007). En effet, les peaux pour l'auteur sont des surfaces fonctionnelles pour la fabrication ou pour les autres intervenants dans le cycle de vie du produit.

Entité Squelette : Selon l'auteur (Belloy, 1994), les squelettes de pièces représentent le flux de matière et relient les peaux entre elles, ils correspondent à un ensemble de fibres neutres permettant de localiser la position qu'aura ultérieurement la matière qui compose la pièce.

Ce type de modélisation est utilisé dans la bibliographie et surtout dans le cadre de la rétro-conception. nous pouvons citer les travaux de (Urbanic *et al.*, 2008) dans le cas de rétro-conception de pièces de révolution.

Ces entités personnalisables sont constituées d'une peau et d'un squelette. La peau est considérée comme la texture habillant le squelette. En revanche, le squelette est constitué de six éléments principaux :

- Une section initiale IS
- Une section finale FS
- Aucune ou plusieurs sections intermédiaires
- Une trajectoire T : la trajectoire représente l'évolution dans l'espace de la section initiale vers la section finale.
- Une ou plusieurs lois d'évolution BL : elle(s) représente(nt) l'évolution dans l'espace de la peau de la section initiale vers la section finale. La particularité est qu'il peut y avoir plusieurs lois d'évolution. En effet, du à la complexité de l'entité, plusieurs lois d'évolutions sont nécessaires pour mieux guider la peau. A titre d'exemple, une pièce de révolution possède une seule loi d'évolution. Idem, pour les sections de même nature et de même barycentre. En revanche, plusieurs lois sont nécessaires lorsque les sections sont de nature différentes où lorsque la peau ne suit pas une évolution uniforme le long de la trajectoire.
- Une fonction de type extrusion, révolution, balayage en enlèvement ou ajout de matière.

La figure 4.26 présente les formes 3D possibles. On peut remarquer que des formes

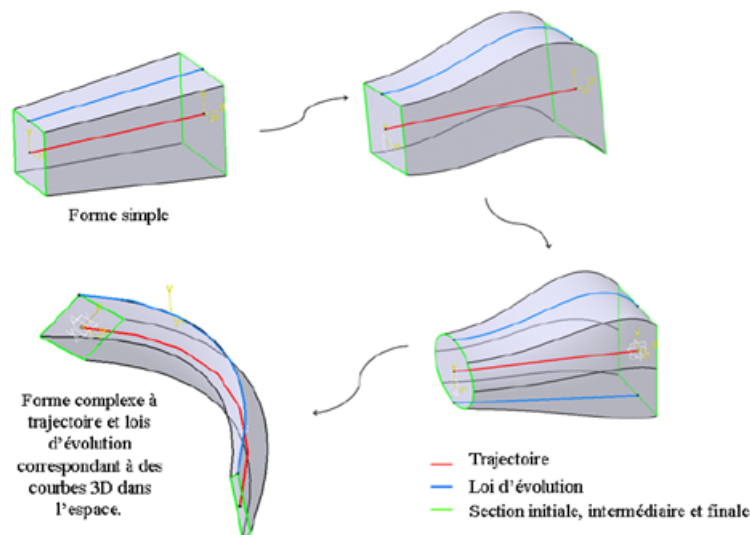


FIGURE 4.26: la modélisation par entités peaux et squelettes (Durupt, 2010).

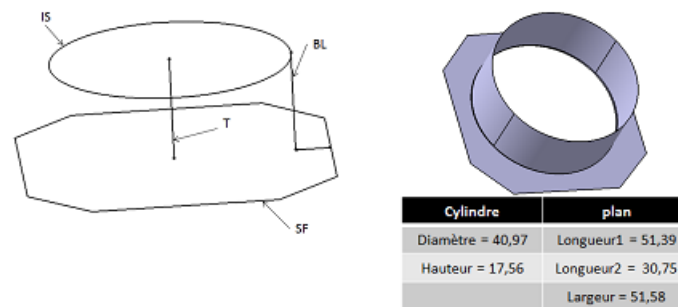


FIGURE 4.27: Identification d'une entité du chapeau de réducteur.

3D complexes, c. à. d. où les trajectoires ainsi que les lois d'évolution sont des courbes 3D sont réalisables. Par des opérations de révolution, d'extrusion, d'enlèvement de matière et de balayage, des formes complexes peuvent être représentées.

Par exemple, la figure 4.27 nous montre un exemple d'identification d'une entité du chapeau de réducteur basé sur le concept de peaux et squelettes. Par conséquent, la figure 4.28 regroupe quelques entités d'usinage du chapeau de réducteur en se basant sur le concept de peaux et squelettes.

Les paramètres que portent ces entités ne sont pas métiers (vitesse de coupe, avance, élanement) mais géométriques. Chaque entité est donc paramétrable géométriquement selon les paramètres : Longueur, Rayon et Angle.

L'ajustement des entités dans le nuage de points se base sur un algorithme proposé dans PHENIX (Durupt *et al.*, 2013). L'ajustement est interactif et se base sur une optimisation par les moindres carrés. cette opération permet :

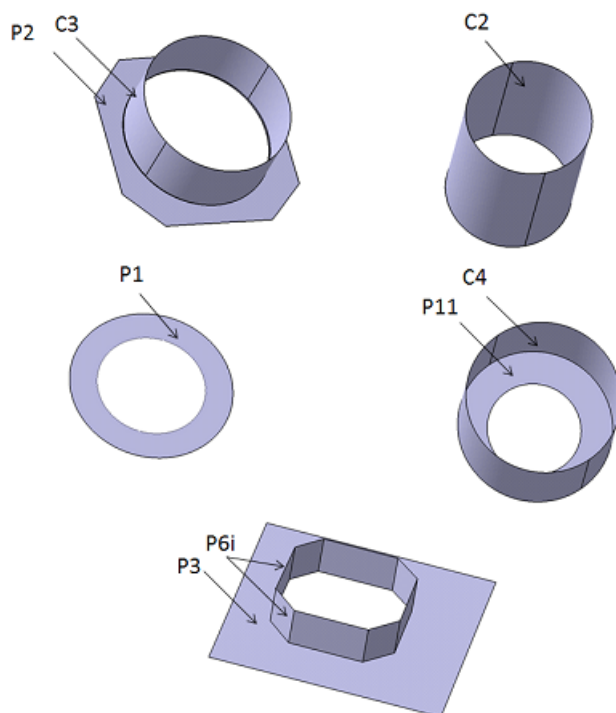


FIGURE 4.28: Entités d'usinage dans le chapeau de réducteur.

- De renseigner les valeurs de paramètres menants.
- D'ajuster aux régions les constituants géométriques de l'entité métier théorique.

La démarche d'ajustement est interactive avec l'acteur de la RC. En effet, deux interventions de l'utilisateur sont considérées :

- L'utilisateur spécifie la ou les régions pour lesquelles l'entité se trouve.
- Sur ces régions, l'utilisateur spécifie les sections initiales et finales pour assurer l'orientation du placement.

Afin de permettre l'élaboration de ces deux opérations, l'hypothèse suivante est considérée :

Toutes les entités métier théoriques possèdent les extrémités planes.

Cette hypothèse présente l'avantage de ramener l'interpolation des éléments de sections à un problème en 2 dimensions.

Comme évoqué dans la thèse de (Durupt, 2010), les limites de l'approche par ajustement d'entité sont les jointures entre les entités qui ne sont pas gérées. La qualité du modèle CAO obtenu n'est pas optimale et ce dernier devra être repris.

En remarque, dans notre contexte de thèse, nous n'avons pas amélioré ou développé l'ajustement 3D. Nous avons considéré que le point novateur premier est l'obtention d'une

tion appelée « gamme de fabrication » à partir du cas à RC. L'analyse à base de graphe de précedence puis par arborescence permet de stocker, sous la forme matricielle, l'analyse de fabricabilité. Le point novateur de la phase de capitalisation est de pouvoir lier directement les régions du nuage de points segmentés à une arborescence de fabrication.

Conclusion Chapitre 4

Ce chapitre a explicité la démarche du processus de rétro-conception qui est supporté par la phase de capitalisation. Dans cette phase, les techniques de segmentation et les techniques d'acquisition des connaissances de fabrication sont combinées. A la fin de cette phase, un arbre de rétro-conception orienté fabrication et une gamme de fabrication sont générés. Les techniques d'extraction des connaissances de fabrication sont utilisées afin d'intégrer et gérer les connaissances d'un expert et les contraintes de fabrication dans le processus. Donc cette phase se base essentiellement sur les connaissances de l'utilisateur. Une fois la gamme générée, elle est stockée dans une base de données avec d'autres données comme le graphe de précedence des surfaces, le graphe de précedence des opérations afin d'être utilisée pour des autres cas similaires.

Le chapitre 5 traitera de la phase de réutilisation où les cas d'études traités dans le chapitre 4 sont réutilisés pour retro-concevoir des cas similaires.

Bien que la phase de capitalisation puisse pouvoir rétro-concevoir une pièce en intégrant directement des contraintes de fabrication, nous pouvons notamment exposer les limites suivantes de l'approche :

- La capitalisation change d'un utilisateur à un autre. En effet, les règles expertes sont différentes d'un expert et d'une entreprise. Les systèmes KBE doivent normalement « standardiser » ces règles. Néanmoins, nous n'avons pas détaillé le modèle KBE proposé. Il correspond à une première proposition non consolidée.
- Le niveau d'un graphe de précedence dépend des données d'entrées : si on part d'un modèle CAO coté selon la norme GPS, donc le graphe de précedence est à haut niveau. Alors que si on part d'un nuage de points segmenté avec une mise en plan minimaliste, donc le graphe de précedence est d'un bas niveau et ça varie d'un expert à un autre.
- Les contraintes liées aux procédés de fabrication initiaux (dépouilles, congés, etc.) ne sont pas intégrées car REFM est dédié usinage. Néanmoins, les congés d'usinage résultants d'opérations d'usinage ne sont pas pris en compte. La méthode REFM ne permet pas de capitaliser les connaissances liées à la fonction et/ou procédé simultanément. Comme par exemple, une gorge de dégagement de filetage.
- La démarche de classification en famille de pièces n'est pas développée dans ce ma-

nuscrit, l'utilisateur doit assigner une catégorie de pièces telle que : pion de centrage, chapeau de réducteur, piston, support de frein etc. Le contenu de la base de données par catégorie est utilisé comme référence pour la phase de réutilisation.

- La robustesse de la segmentation n'est pas évaluée car cette dernière est très dépendante de la qualité du nuage de points. Des étapes manuelles de regroupement ou de délimitation de région sont nécessaires pour délimiter les surfaces. par exemple, par la méthode de segmentation utilisée, les surfaces gauches ne sont pas segmentées, elles sont considérées en une seule région.
- La gamme de fabrication obtenue n'est pas exhaustive. En analogie avec un logiciel de FAO, la génération des trajectoires, la définition des phases, la modélisation des outils, la définition des cycles (paramètre de coupe) et la simulation de l'usinage sont définis. Dans notre méthode, seuls les opérations, les phases et les posages sont définis.
- La non prise en compte d'un modèle CAO décomposé géométriquement en étapes d'usinage.
- L'identification 3D par entité n'est pas développée dans cette thèse. Les entités considérées ne sont pas des entités d'usinage comme elles sont définies dans la norme STEP-NC (Newman *et al.*, 2008).

Chapitre 5

Phase de réutilisation

Introduction Chapitre 5

Nous rappelons, que dès qu'une gamme est générée, cette dernière est stockée dans la base de données REFM afin d'être réutilisée sur des cas similaires. Le processus de rétro-conception dans la phase de réutilisation est réalisé avec une intervention minimale de l'utilisateur. Cette phase sert à réutiliser une gamme stockée dans la base de données REFM afin de re-fabriquer une autre pièce similaire. Une méthode de mise en correspondance entre deux graphes d'adjacence est utilisée pour choisir la pièce la plus proche de la base de données. Ce chapitre sera organisé autour de cinq sections :

- Processus global : le processus global de la phase de réutilisation sera défini dans cette section.
- La récupération des pièces similaires de la base de données : les pièces similaires seront récupérées de la base de données en se basant sur la famille de pièces.
- La génération des graphes d'adjacence : dans cette section, la définition d'un graphe d'adjacence sera donnée et le graphe d'adjacence de la pièce à retro-concevoir sera généré.
- La mise en correspondance entre les graphes d'adjacence : la méthode de mise en correspondance entre deux graphes sera expliquée en détail dans cette section.
- L'ajustement de la gamme de la base de données : dans cette section, les cas rencontrés par l'utilisateur lors de l'ajustement de la gamme sélectionnée seront explicités. La méthode d'ajustement correspondant à chaque cas sera détaillée.

5.1 Processus global

La phase de réutilisation permet de minimiser l'interaction de l'utilisateur dans le processus de RC. En effet, cette phase réutilise une gamme de fabrication stockée dans la base de données REFM afin de re-fabriquer une autre pièce similaire.

Les entrées de cette phase sont le nuage de points et le modèle physique. Cette phase permet d'introduire le processus de mise en correspondance entre deux graphes d'adjacence dans un contexte de RC. Le processus de mise en correspondance est basé sur la similarité topologique entre les pièces mécaniques. Le but est d'ajuster la gamme de fabrication d'une pièce stockée dans la base de données REFM pour obtenir la gamme de fabrication d'une pièce similaire. L'idée de cette phase est d'éviter la génération d'une gamme de fabrication d'une pièce à retro-concevoir à partir de zéro, ce qui permet à l'utilisateur de gagner du temps au moment de la RC. La figure 5.1 rappelle le processus global de cette phase.

L'approche technique de cette phase est décomposée en cinq étapes :

- La segmentation du nuage de points en n régions.
- La récupération des pièces similaires de la base de données : cette étape sert à récupérer de la base de données REFM, les pièces de la même famille ou de la même nature de la pièce à retro-concevoir.
- La génération d'un graphe d'adjacence : cette étape sert à générer le graphe d'adjacence de la pièce à retro-concevoir. Le graphe d'adjacence est défini comme la représentation des surfaces de la pièce et les liens entre ses surfaces.
- La mise en correspondance entre les graphes : cette étape sert à comparer le graphe d'adjacence de la pièce à retro-concevoir avec le graphe d'adjacence d'une ou des pièces en base qui sont similaires ou de même famille que la pièce d'étude.
- L'ajustement de la gamme de la pièce en base : cette étape sert à ajuster ou associer (selon le pourcentage de similarité entre des deux pièces) la gamme de fabrication de la pièce en base à la pièce d'étude.

Les algorithmes issus de cette approche seront illustrés sur les deux cas d'études académiques (le pion de centrage et le chapeau de réducteur) illustrés aux figures 5.2 et 5.3. Ces deux cas sont différents de ceux présentés dans le chapitre précédent et sont nommés « pièce requête» :

Le pion de centrage illustré à la figure 5.2 contient un trou de perçage. Le pion de centrage retro-conçu dans la phase de capitalisation contient un méplat. Pour le chapeau de réducteur, les surfaces P6i dans le chapitre 4 sont remplacées par un cylindre nommé C4 (figure 5.3).

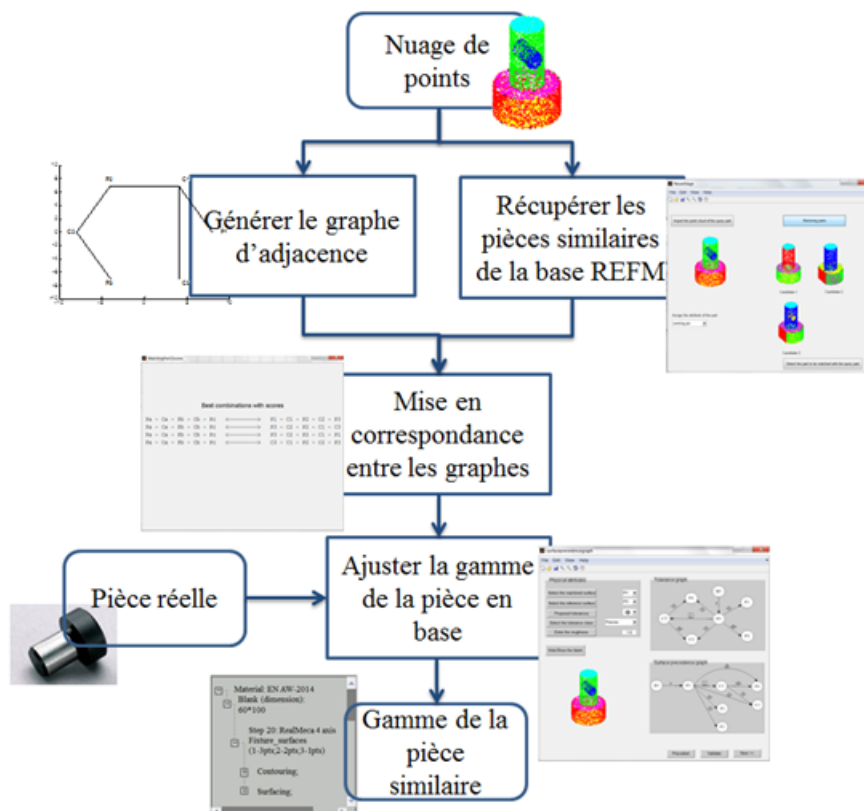


FIGURE 5.1: Le processus général de la phase de réutilisation.

5.2 Récupérer les pièces similaires de la base de données

Dans cette étape, les pièces déjà retro-conçues sont considérées classifiées au préalable par familles de pièces, ce qui permet de donner une toute première orientation à l'utilisateur. Nous supposons que « REFM system » puisse être implanté dans des entreprises qui traitent plusieurs familles de composants. Une première sélection par famille de pièces permet donc :

- De différencier les cas à retro-concevoir selon leur nature (famille de pièces).
- De pouvoir établir une première classification à l'utilisateur permettant ainsi d'accéder aux connaissances pour la famille de pièces considérée. Par exemple, si un pion de

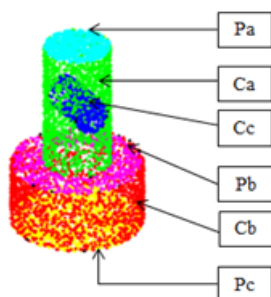
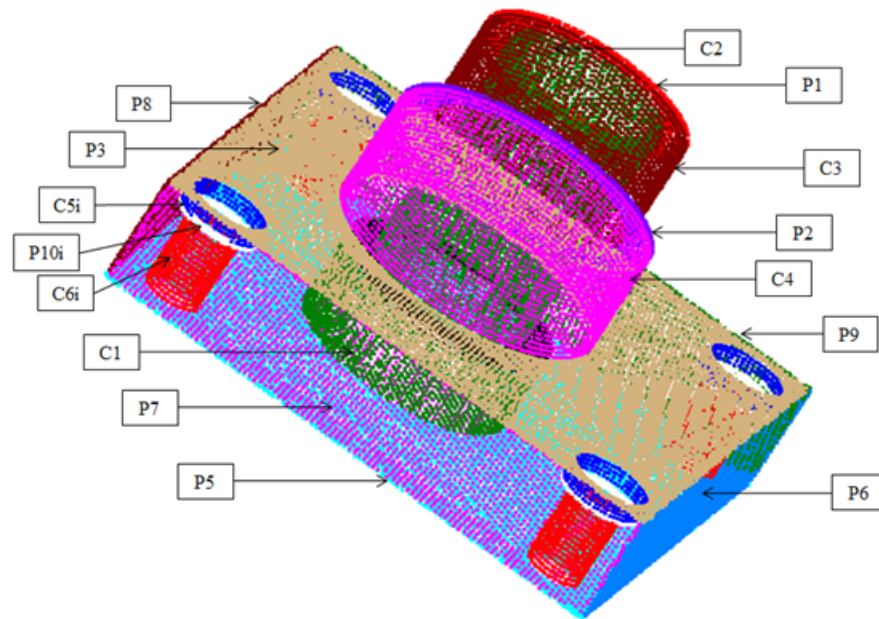


FIGURE 5.2: Pièce requête : pion de centrage.

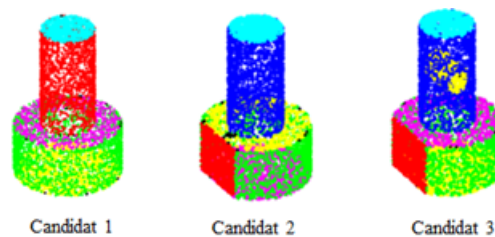
FIGURE 5.3: *Pièce requête : chapeau de réducteur.*

centrage est à retro-concevoir et que cette famille est préalablement sauvée dans la base, l'utilisateur pourra accéder directement à toutes les connaissances (graphe de précedence des surfaces, gamme de fabrication, entité de fabrication) déjà acquises. Nous considérons qu'à une famille de pièces est associée une ou plusieurs pièces.

Une fois le nuage de points segmenté, l'utilisateur est en charge de sélectionner la famille correspondante au cas d'étude. Ainsi, la mise en correspondance se réalisera entre le cas d'étude et l'ensemble des pièces de la famille.

La mise en correspondance se base sur le principe de comparaison par graphe d'adjacence. Ce graphe est obtenu à partir de la segmentation du nuage de points.

En remarque, il est important de noter que durant la phase de capitalisation, le graphe d'adjacence des cas d'études est généré et stocké dans le modèle de données de la base REFM. La figure 5.4 illustre trois pièces « pion de centrage » contenues dans la base de données. Elles sont nommées « Candidat ». Pour chacune d'entre elles, un graphe d'adjacence est associé.

FIGURE 5.4: *Pièces associées à la famille « pion de centrage ».*

5.3 La génération d'un graphe d'adjacence

– Définition 1 (Graphe)

On appelle graphe le couple $G = (V, E)$ formé par un ensemble V d'éléments appelés nœuds et par un ensemble E de paires de nœud $\{u, v\}$. Les éléments de E sont appelés les arêtes de G .

Les graphes sont appelés ainsi puisqu'ils peuvent être représentés graphiquement.

– Définition 2 (Sous-graphe)

Soit $G = (V, E)$ un graphe. Et soit $G' = (V', E')$ un sous-graphe de G , noté $G' < G$, si les trois conditions suivantes sont vérifiées :

- $V' \subseteq V$
- $E' \subseteq E$
- $\forall \{u, v\} \in E'$, on a $u \in V'$ et $v \in V'$.

Le graphe d'adjacence d'un modèle CAO est défini comme une représentation des surfaces d'une pièce et les liens entre ses surfaces. Les nœuds de ce graphe correspondent aux surfaces. Chaque nœud est représenté par le label de la surface (P : surface plane, C ou Cy : surface cylindrique, Co : surface conique et ainsi de suite). Une arête entre deux nœuds existe si les surfaces correspondantes disposent d'une connexion entre elles.

Lié à notre contexte de thèse, le graphe d'adjacence est généré à partir du résultat de la segmentation. Les nœuds du graphe représentent donc les régions. Il faut signaler ici que la méthode de segmentation utilisée pour partitionner le nuage de points, conditionne les résultats d'adjacence. Il est nécessaire dans ce cas de mener une étude sur la segmentation afin d'estimer puis d'optimiser la représentativité des graphes d'adjacence.

Afin de générer un graphe d'adjacence, il faut détecter une connexion entre deux régions. L'algorithme proposé permet de trouver au moins un point d'une région ayant un point voisin le plus proche (distance ϵ) d'une autre région. Ce critère de seuil est comparé à la plus petite distance euclidienne entre 2 régions. Cette valeur de seuil est déterminée arbitrairement. L'étude sur la segmentation permettrait d'affiner cette valeur de seuil.

Les figures 5.5 et 5.6 illustrent les graphes d'adjacence des pièces requêtes et des pièces de la base de données. Une fois le graphe d'adjacence de la pièce à retro-concevoir construit, la procédure de mise en correspondance entre deux graphes peut commencer.

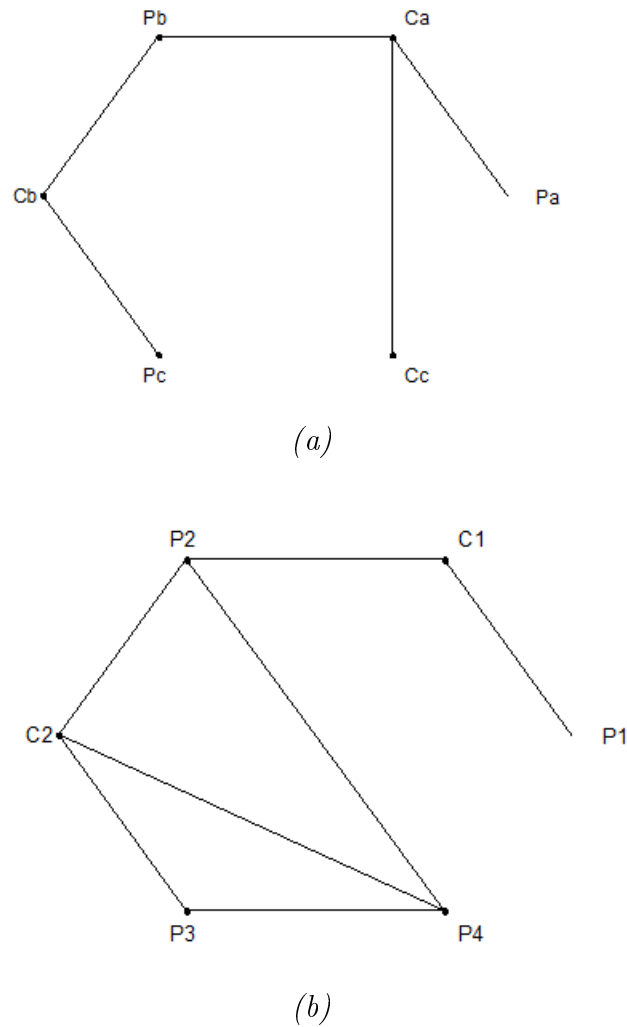


FIGURE 5.5: Les graphes d'adjacence (a) de la pièce requête et (b) la pièce candidate du pion de centrage.

5.4 Mise en correspondance entre les graphes

La méthode de mise en correspondance entre deux graphes est un problème classique de comparaison. En général, la comparaison de graphes consiste à établir une correspondance entre les nœuds et les arêtes des structures que l'on cherche à comparer. Cette problématique est définie dans la littérature comme étant un problème de recherche d'isomorphisme de graphes (Conte *et al.*, 2004).

– Définition 3 (Isomorphisme de graphes)

Deux graphes $G1 = (V1, E1)$ et $G2 = (V2, E2)$ sont isomorphiques, s'il existe une injection $\varphi : V \rightarrow V'$, telle que pour chaque paire de nœuds $v_i, v_j \subset V$, si $(v_i, v_j) \in E$ alors $(\varphi(v_i), \varphi(v_j)) \in E'$.

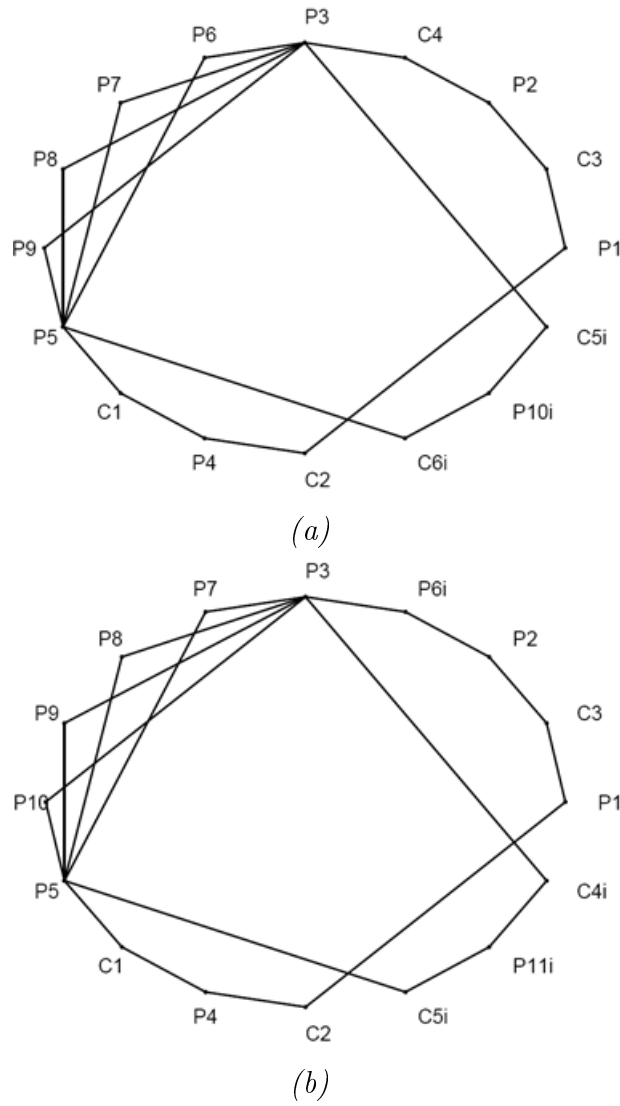


FIGURE 5.6: Les graphes d'adjacence (a) de la pièce requête et (b) la pièce candidate du chapeau de réducteur.

Selon les objectifs, on peut être amené à chercher si un motif précis représenté par un graphe est contenu dans un autre graphe. Dans ce cas, les graphes ne sont plus comparés dans leur intégralité mais on cherche s'il existe une occurrence du graphe représentant le motif recherché dans le graphe cible. On parle alors d'isomorphisme de sous-graphes.

– Définition 4 (Isomorphisme de sous-graphes)

Un graphe $G = (V, E)$ est isomorphe à un sous-graphe S' du graphe $G' = (V', E')$, s'il existe une injection $\varphi : V \rightarrow V'$, telle que pour chaque paire de nœuds $\{vi, vj\} \subset V$, si $(vi, vj) \in E$ alors $(\varphi(vi), \varphi(vj)) \in E'$.

Dans cette thèse, la méthode de mise en correspondance est basée sur un algorithme de propagation. Cet algorithme, illustré à la figure 5.7, est le suivant : il permet de vérifier

différentes contraintes pour la cohérence de mise en correspondance. Par exemple, il considère tout simplement l'étiquette ou le label des nœuds. Il ne permet une mise en correspondance qu'entre des nœuds de même étiquette c. à. d. de même type de région. Après chaque mise en correspondance, l'algorithme permet de vérifier une deuxième contrainte. Il permet de vérifier que les deux nœuds appariés sont connectés par des arêtes à des nœuds de même étiquette ou de même nature. Si c'est le cas, il continue la mise en correspondance entre deux nouveaux nœuds. Si tel n'est pas le cas, il arrête la mise en correspondance et il cherche un nouvel appariement (Ali *et al.*, 2014b).

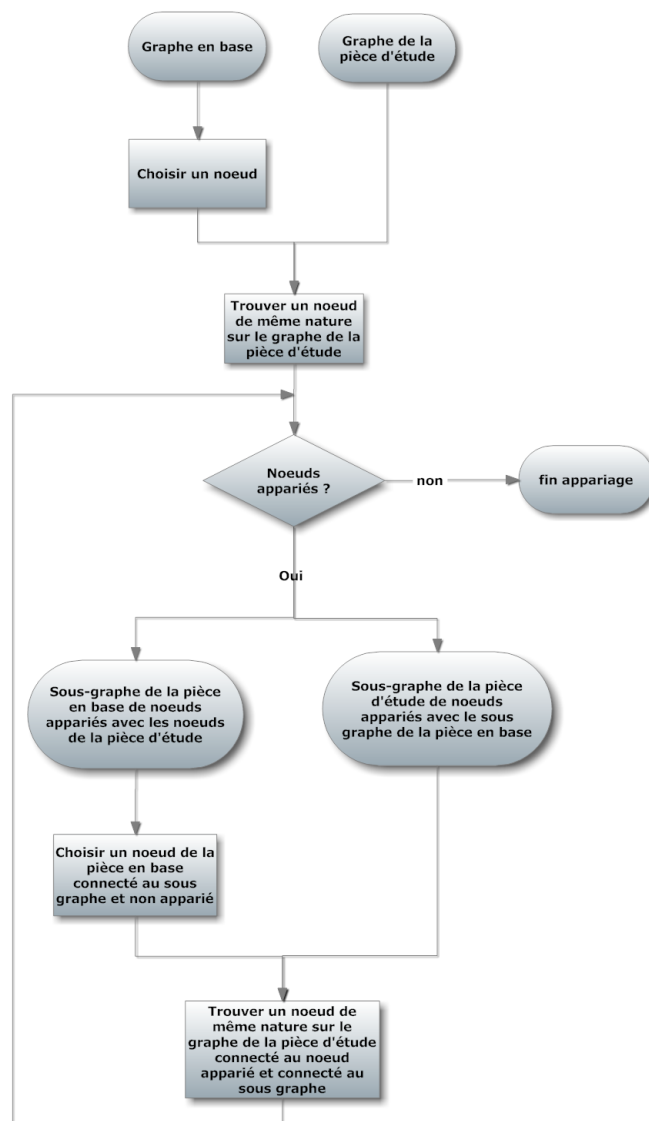


FIGURE 5.7: L'algorithme de mise en correspondance.

En d'autres termes, la méthode consiste à tester toutes les combinaisons possibles. Elle commence à appairier arbitrairement deux surfaces X_i et X_j ayant la même topologie ou la même nature (X_i : surface qui appartient à la pièce en base et X_j : surface qui appartient

à la pièce d'étude). En utilisant les connexions entre les nœuds, la mise en correspondance est effectuée en considérant ici seulement les natures des nœuds. L'appariement est effectué jusqu'à ce qu'aucun nœud soit disponible dans un graphe d'adjacence ou jusqu'à ce que les nœuds n'aient pas la même nature. Si, à la fin du processus tous les nœuds d'un graphe G sont mis en correspondance avec succès avec les nœuds d'un graphe G' en base et si G et G' sont de taille égale, alors un isomorphisme de graphes est détecté. Si G contient moins de nœuds que G' , alors un isomorphisme de sous-graphes de G vers G' est détecté.

Les résultats de mise en correspondance entre deux graphes sont donnés par trois valeurs :

1. le score du sous-graphe de la pièce en base $Score_G'b$.
2. le score du sous-graphe de la pièce à retro-concevoir $Score_G'r$.
3. le score total qui est la multiplication des deux scores au-dessus $Score_Total$.

$$Score_G'b = \frac{nb_{Noeuds_{G'b}}}{nb_{Noeuds_{Gb}}}$$

$$Score_G'r = \frac{nb_{Noeuds_{G'r}}}{nb_{Noeuds_{Gr}}}$$

$$Score_Total = Score_G'b \times Score_G'r$$

$nb_{Noeuds_{G'b}}$ Nombre des nœuds mis en correspondance dans le graphe $G'b$.

$nb_{Noeuds_{G'r}}$ Nombre des nœuds mis en correspondance dans le graphe Gr .

$nb_{Noeuds_{Gb}}$ Nombre des nœuds du graphe $G'b$.

$nb_{Noeuds_{Gr}}$ Nombre des nœuds du graphe Gr .

$Score_G'b$ et $Score_G'r$ sont les scores des deux sous-graphes de la pièce en base et la pièce à retro-concevoir dans la même combinaison.

Pour choisir les meilleures combinaisons, il faut comparer les valeurs du $Score_Total$ des combinaisons. Les meilleures sont celles qui ont la plus grande valeur de $Score_Total$. Il faut noter que pour une seule pièce de la base de données, correspond plusieurs combinaisons ayant la même valeur de $Score_Total$.

Concernant le pion de centrage, le résultat de la mise en correspondance entre les deux pièces est de 42 combinaisons. La figure 5.8 nous montre les combinaisons ayant le meilleur score.

P1 - C1 - P2 - C2 - P3 83.3% <-----> Pa - Ca - Pb - Cb - Pc 83.3% so 69.38%
P1 - C1 - P2 - C2 - P4 83.3% <-----> Pa - Ca - Pb - Cb - Pc 83.3% so 69.38%
P1 - C1 - P2 - C2 - P3 83.3% <-----> Pc - Cb - Pb - Ca - Pa 83.3% so 69.38%
P1 - C1 - P2 - C2 - P4 83.3% <-----> Pc - Cb - Pb - Ca - Pa 83.3% so 69.38%

FIGURE 5.8: Meilleures combinaisons avec les scores.

Après avoir obtenu les meilleures combinaisons, l'angle entre les vecteurs directeurs de surfaces peut être utilisé pour éliminer certaines combinaisons ayant la même valeur de *Score_Total*. Par exemple, la seconde et la quatrième combinaison de la figure 5.8 peuvent être éliminées. Dans la seconde combinaison, Pc est perpendiculaire à Cb alors que P4 qui est mis en correspondance avec Pc est parallèle à C2 qui est mis en correspondance avec Cb. Donc, finalement, il reste deux combinaisons possibles. L'utilisateur pourra en choisir une. Concernant le chapeau de réducteur, le résultat de la mise en correspondance entre les deux pièces est 108 combinaisons. D'après les résultats, la seule combinaison dont le score de 93.83% est le plus haut est à considérer (figure 5.9).



FIGURE 5.9: Meilleure combinaison avec les scores.

La dernière étape qui consiste à ajuster la gamme de fabrication doit être effectuée.

5.5 Ajuster la gamme de la pièce en base

Comme énoncé précédemment, le but de la phase de réutilisation est de permettre à l'utilisateur de ne pas appliquer la phase de capitalisation sur toute la pièce à retro-concevoir pour obtenir une gamme de fabrication du cas d'étude.

La figure 5.10 illustre les liens de « matching » entre les nœuds des deux graphes d'adjacence de la pièce candidate et requête du pion de centrage.

Le graphe de précedence et graphe d'adjacence en base de la pièce candidate possède les mêmes identifiants de nœuds car ils sont construits sur la même pièce. Le graphe de précedence de la pièce requête peut être généré pas à pas. La figure 5.11 illustre la première étape de la génération. Les nœuds Pc et Cb sont associés via les graphes d'adjacence aux nœuds P3 et C2 du graphe de précedence. Le type de tolérance est directement repris du type d'arête, dans ce cas, une perpendicularité.

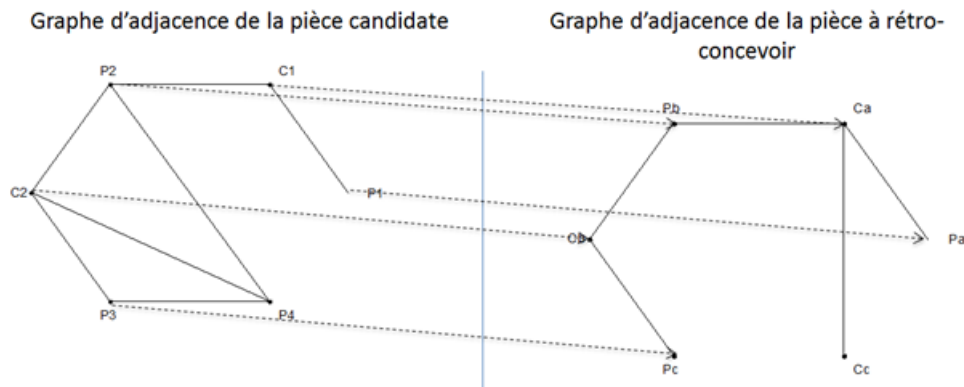


FIGURE 5.10: Liens entre les graphes d'adjacences de la pièce requête et de la pièce candidate.

Etape par étape, le graphe de précédence de la pièce requête est généré (figure 5.12).

On peut remarquer que la surface Cc du graphe d'adjacence n'apparaît pas dans le graphe de précédence comme le montre la figure 5.12. Cela signifie que le graphe de précédence ne peut pas dans certains cas être généré totalement. Nous avons listé ci-dessous, les différents cas possibles :

Quatre cas au total peuvent se présenter :

Premier cas : où la pièce d'étude est déjà renseignée dans la base. Alors l'utilisateur peut récupérer la pré-gamme de fabrication de la pièce en base. Cela signifie que la pièce à retro-concevoir et la pièce en base ont la même topologie ($Score_G'r = Score_G'b = 100\%$). Dans ce cas, la gamme de fabrication complète de la pièce en base à rétro-concevoir pourra être récupérée.

Deuxième cas : où la pièce en base contient une ou plusieurs surfaces de plus que la pièce d'étude. C.à.d. des surfaces de la pièce en base ne sont pas appariées ($Score_G'b < 100\%$). Alors que la pièce requête est totalement appariée ($Score_G'r = 100\%$). Alors les surfaces supplémentaires doivent être éliminées du graphe de précédence des surfaces de la pièce en base. Ainsi, si une surface éliminée, positionne une autre surface X, dans ce cas l'utilisateur doit choisir une autre surface que la surface éliminée pour positionner la surface X.

Troisième cas : où la pièce requête contient une ou plusieurs surfaces de plus que la pièce en base. C.à.d. la pièce en base est entièrement appariée ($Score_G'b = 100\%$) et au moins une surface de la pièce à retro-concevoir n'est pas appariée ($Score_G'r < 100\%$). Alors la phase de capitalisation doit être appliquée aux surfaces supplémentaires. Puis la pré-gamme de fabrication doit être complétée en intégrant les informations des surfaces supplémentaires.

Quatrième cas : où le deuxième et le troisième cas se rencontrent en même temps.

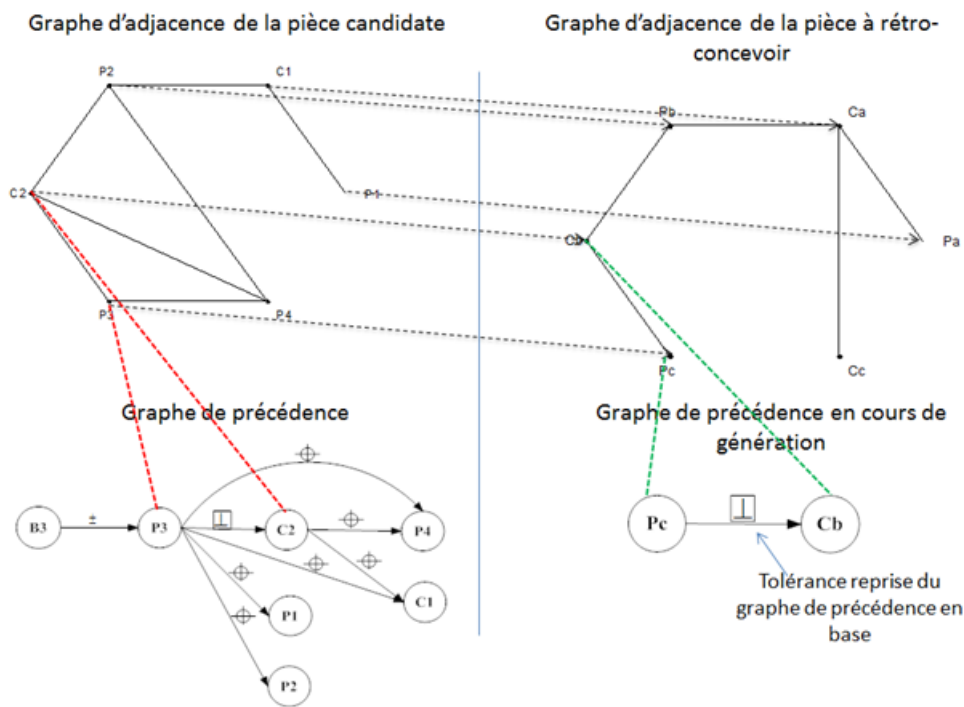


FIGURE 5.11: Première étape de la génération du graphe de précedence du pion de centrage.

C.à.d. il y a au moins une surface de la pièce à retro-concevoir qui n'est pas appariée et au moins une surface de la pièce en base n'est pas appariée. Dans ce cas les deux derniers scénarios seront appliqués.

Le pion de centrage correspond au quatrième cas. Pour intégrer la surface Cc dans le graphe de précedence, l'utilisateur doit appliquer la phase de capitalisation sur cette surface. Figure 5.13 montre le graphe de précedence des surfaces et le graphe de précedence des opérations du pion de centrage étudié dans la phase de réutilisation. Ainsi, la gamme de fabrication de la pièce requête est obtenue à la figure 5.14.

Le deuxième cas d'étude du chapeau de réducteur correspond au quatrième cas. Les surfaces P6i sont éliminées de la pièce en base. L'utilisateur doit appliquer la phase de capitalisation sur la surface C4 se trouvant dans la pièce requête. Dans ce cas, le graphe de précedence des surfaces et le graphe de précedence des opérations du chapeau de réducteur dans la base sont ajustés comme ci-dessous (figure 5.15 : par exemple, la surface P10i de la pièce requête est appariée avec la surface P11i de la pièce en base, et P11i sera remplacée par P10i dans le graphe de précedence des surfaces, les surfaces P6i sont supprimées du graphe de précedence des surfaces et la surface C4 est intégrée et ainsi de suite.). Ainsi, la gamme de fabrication de la pièce requête est obtenue à la figure 5.16.

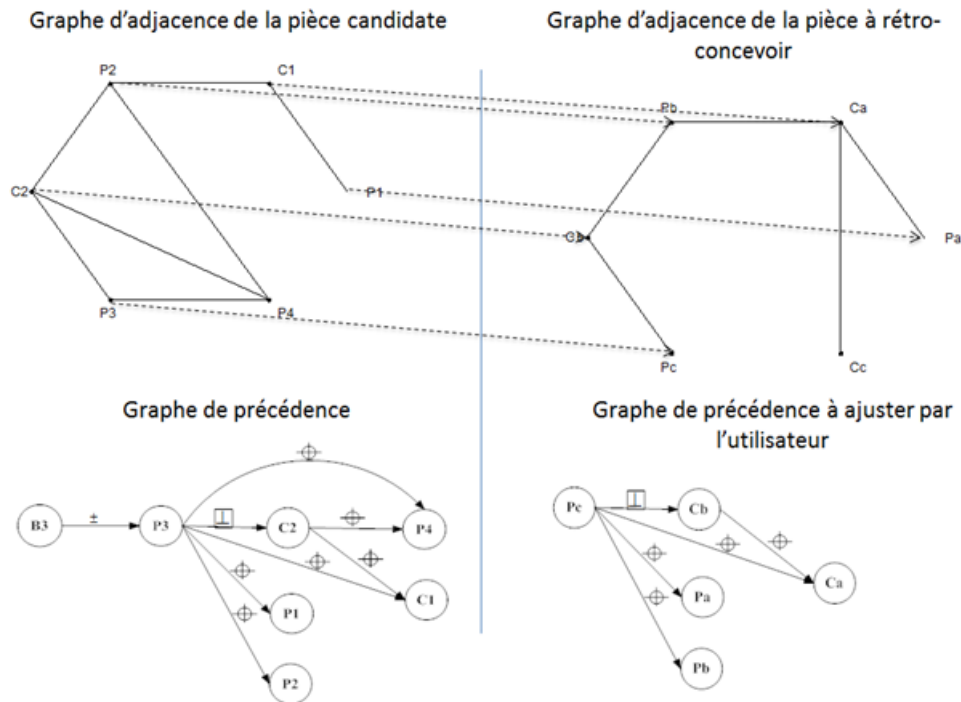


FIGURE 5.12: La génération du graphe de précedence de la pièce pion de centrage.

Conclusion Chapitre 5

Ce chapitre a explicité la démarche de la phase de réutilisation, support du contexte récurrent de la RC. Cette phase sert à réutiliser une gamme stockée dans la base données REFM afin de re-fabriquer une autre pièce similaire. Une méthode de mise en correspondance entre deux graphes d'adjacence est utilisée pour choisir une pièce similaire de la base de données. Une fois la pièce déterminée, et que les résultats de mise en correspondance sont acceptables, la gamme stockée dans la base est partiellement ou totalement associée à la pièce requête.

Le but de cette phase est bien d'éviter la génération d'une gamme de fabrication d'une pièce à retro-concevoir à partir de zéro, ce qui permet à l'utilisateur de gagner du temps au moment de la RC.

Bien que la phase de réutilisation puisse pouvoir appliquer une gamme de fabrication à un cas d'étude à partir d'un cas connu, nous pouvons notamment exposer les limites suivantes de l'approche :

- La famille de pièces doit être déterminée. L'appariement par graphe d'adjacence ne fonctionne pas pour déterminer automatiquement la famille. Plusieurs familles portant une dénomination différente peuvent être très proche géométriquement.
- La robustesse de la segmentation n'est pas évaluée. Le résultat de cette dernière influence le nombre de région et donc la taille des graphes d'adjacence. Néanmoins,

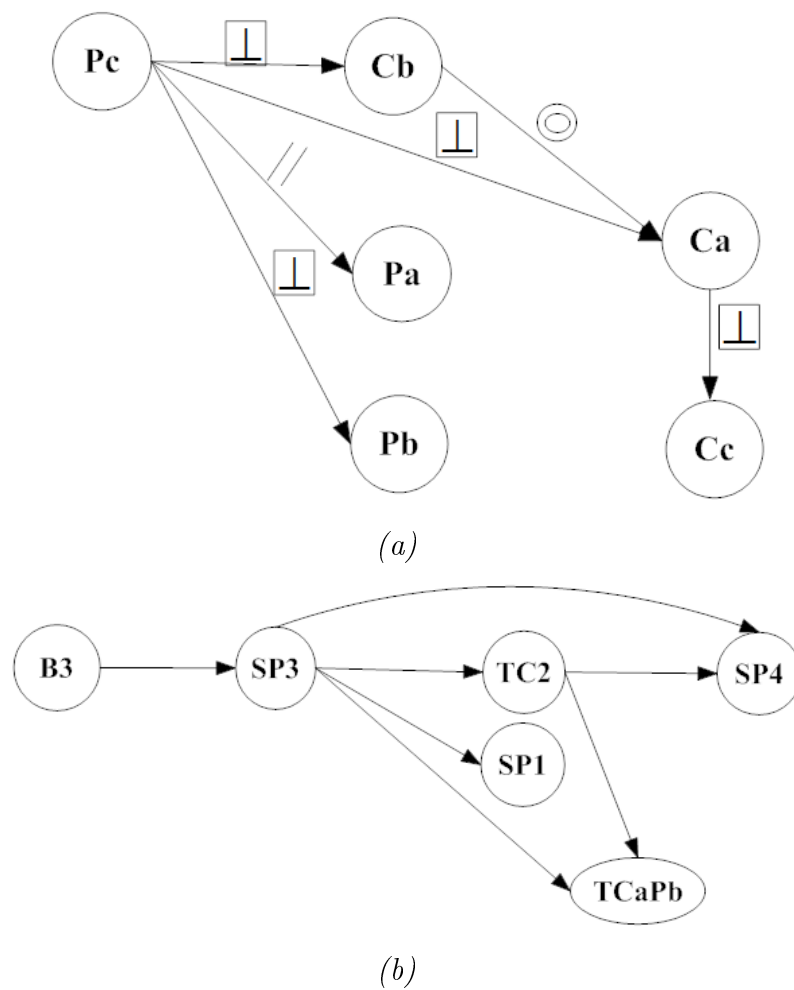


FIGURE 5.13: (a) Graphe de précédence des surfaces et (b) graphe de précédence des opérations du pion de centrage.

pour consolider la segmentation avec les objectifs de REFM, il serait souhaitable en perspective de mener une étude fine sur les segmentations et les résultats issus des numérisations (palpage mécanique MMT et numérisation laser CCD) par rapport à la densité des points et à la complétude de la digitalisation.

- La robustesse de l'appariement par graphe d'adjacence n'est pas évaluée sur un panel de cas d'étude permettant de quantifier la robustesse de l'appariement.
- La méthode n'est pas capable jusqu'à maintenant d'identifier la pièce la plus similaire parmi celles de la même famille.
- La méthode n'a pas encore testé l'appariement de deux pièces de familles différentes.

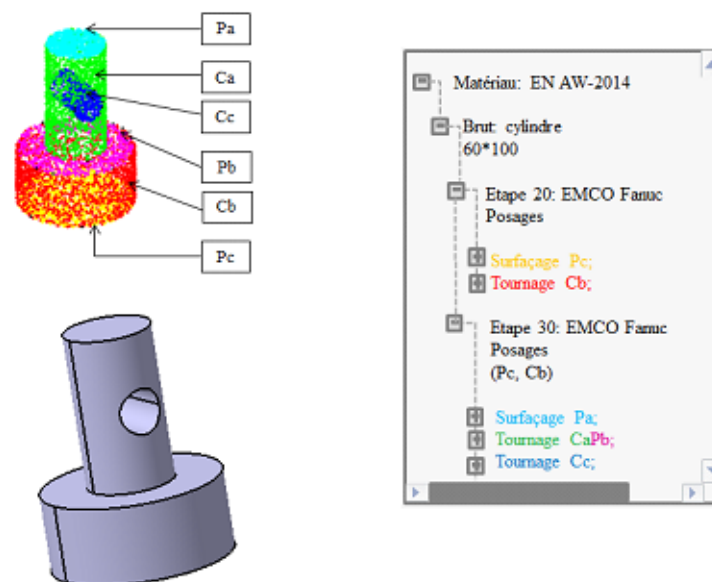


FIGURE 5.14: Gamme de fabrication du pion de centrage.

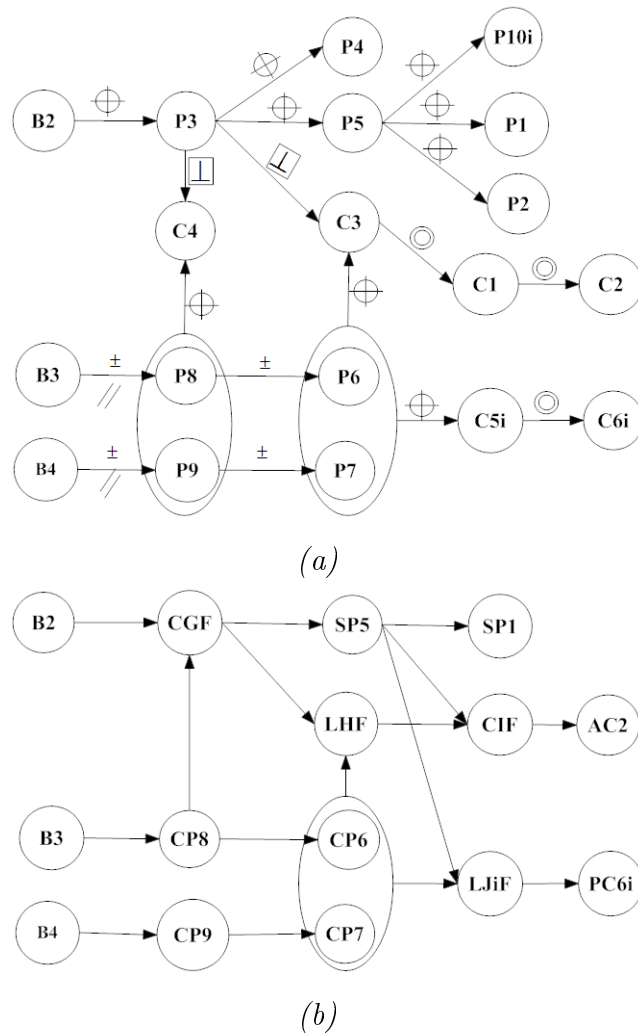


FIGURE 5.15: (a) Graphe de précedence des surfaces et (b) graphe de précedence des opérations du chapeau de réducteur.

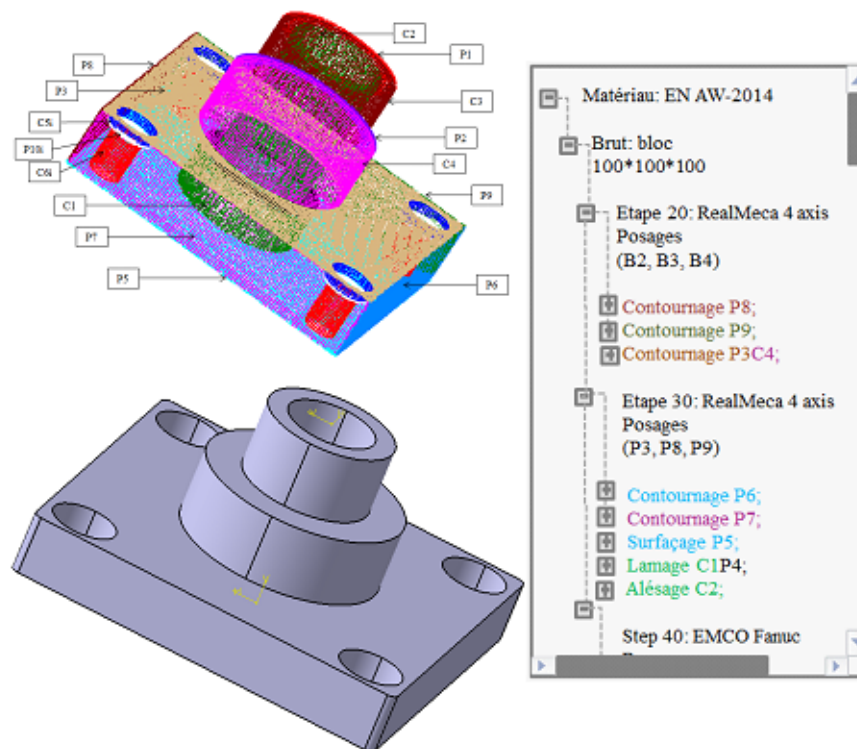


FIGURE 5.16: *Gamme de fabrication du chapeau de réducteur.*

Conclusion Partie 2

Les concepts de la méthode REFM ont été présentés et justifiés dans cette partie. Cette conclusion permet de rappeler la finalité et de juger la portabilité de cette méthode. Nous rappelons comme illustré à la figure 5.17 qu'elle est divisée en deux phases principales :

- La phase de capitalisation, figure 5.17.
- La phase de capitalisation, figure 5.17.

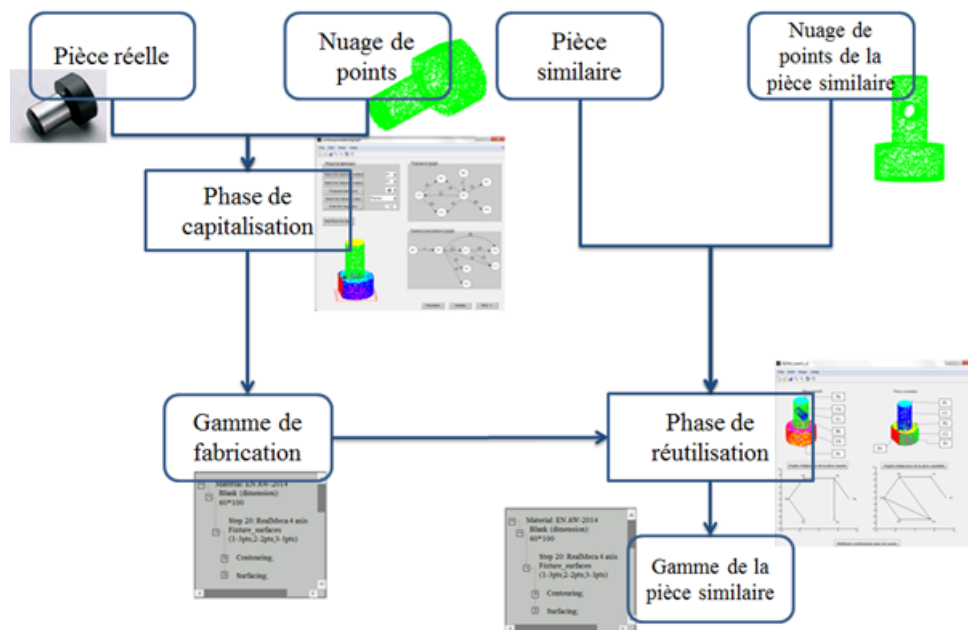


FIGURE 5.17: Le processus global de REFM.

La phase de capitalisation

La phase de capitalisation se réalise complètement dans le tout premier cas d'étude de rétro-conception. Elle a pour but d'aider l'utilisateur à analyser la pièce, à émettre des suppositions, à sauver les hypothèses et de fournir toutes ses connaissances de fabrication.

A ce stade, une question peut survenir : « Cette phase n'est-elle pas finalement plus longue que la rétro-conception classique qui consiste à construire un modèle CAO manuellement puis à partir de ce modèle, le nouveau fabricant définit par l'utilisation de logiciel FAO

une gamme de fabrication ? »

Le temps de la rétro-conception n'en sera pas plus long pour les raisons suivantes :

- La rétro-conception classique est réalisée sans méthodologie. Une approche purement géométrique est souvent utilisée pour retro-concevoir. Sans méthodologie et sans l'intégration du concept du DFM, un tel processus peut demander beaucoup d'itérations. A partir de ce constat, cette partie a proposé une méthode bien structurée, basée sur la combinaison des approches géométriques et des méthodologies d'acquisition de connaissances de fabrication. Par conséquent, le temps sera inférieur à un processus classique surtout dans le cas où l'utilisateur doit utiliser le logiciel FAO pour définir une gamme de fabrication.
- La méthode REFM supporte également les contextes récurrents, elle permet de sauver dans la base de données la gamme et toutes les informations utiles pour un cas d'étude de même nature déjà renseigné dans la base. Par conséquent, une gamme connue sera proposée après la mise en correspondance entre deux pièces. Dans ce cas, il ne reste qu'à ajuster la gamme selon la pièce à retro-concevoir. Le temps d'application de cette méthode dans ce contexte sera beaucoup moins long.

La phase de réutilisation

La phase de réutilisation se réalise en utilisant une gamme stockée dans la base de données pour retro-concevoir une pièce de la même famille en évitant les étapes redondantes. Dans le but de choisir la gamme convenable de la base, une méthode de mise en correspondance entre les graphes d'adjacence de la pièce à retro-concevoir et d'une pièce dans la base est effectuée. Cette méthode est basée sur la similarité topologique entre les pièces mécaniques. La gamme de fabrication de la pièce en base correspondante est partiellement ou totalement appliquée sur le cas d'étude.

La figure 5.18 propose un modèle de classes (diagramme UML) non exhaustif du modèle de données REFM. Ce modèle est construit à partir de la méthode décrite ci-dessus mais n'a pas été implémenté.

Le diagramme UML proposé est un premier élément d'un modèle de données KBE. Nous nous sommes limités à définir la démarche globale (capitalisation et réutilisation par précedence) pour démontrer la faisabilité et l'intérêt REFM. Il serait néanmoins souhaitable de rapprocher REFM des modèles de données PLM et MPM.

Dans cette partie, nous avons présenté la méthode selon deux cas d'études simples. Afin de justifier REFM à un plus fort niveau, nous suggérons de confronter cette méthode à des problématiques plus industrielles. La partie suivante illustrera par le biais de deux cas

d'études (le support de frein et le boîtier de différentiel), le démonstrateur *REFM system*.

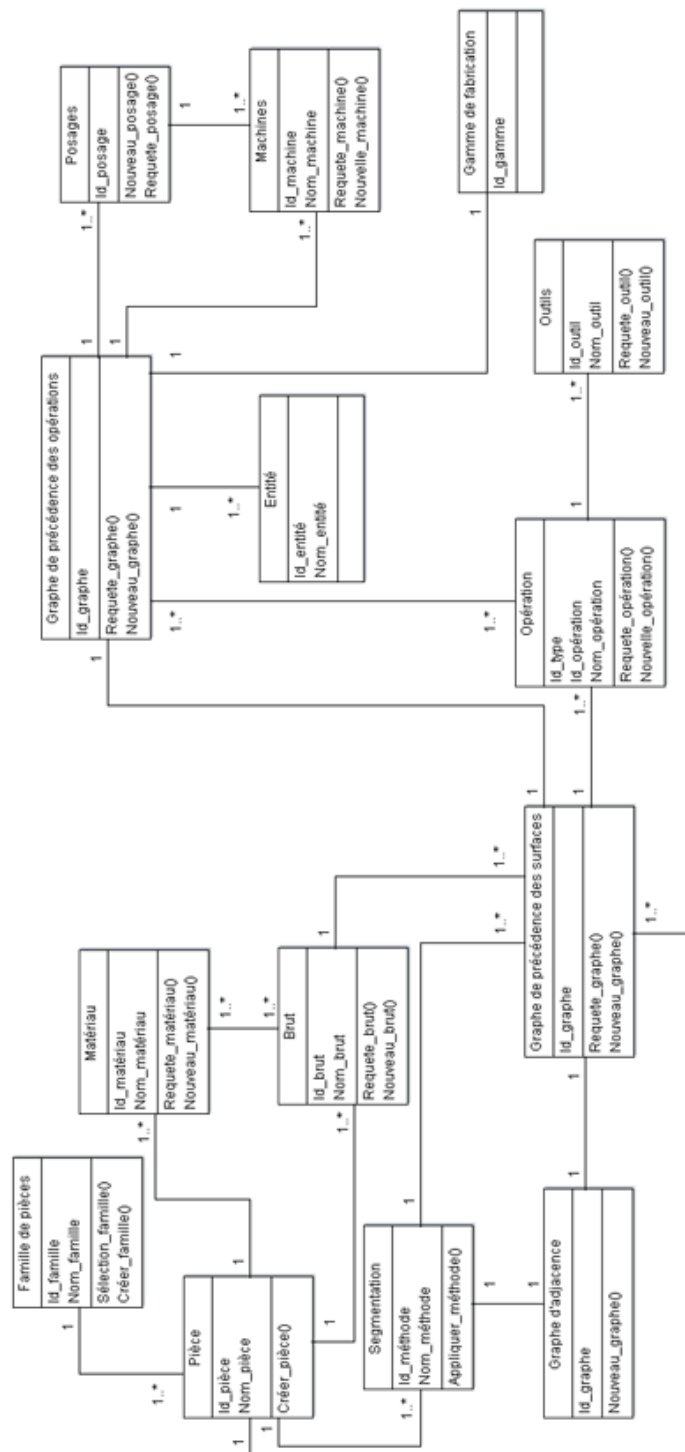


FIGURE 5.18: Diagramme de classes UML de la méthode REFM.

Troisième partie

APPLICATION DE LA METHODE REFM SUR DES CAS INDUSTRIELS

Introduction Partie 3

La partie précédente a explicité la méthode REFM. Cette dernière partie démontre la validité industrielle de la méthode. Dans cette partie, nous présentons un démonstrateur nommé "*REFM system*". A travers deux cas d'études, pouvant être industriellement concrets, les interfaces du démonstrateur sont exposées. Ces interfaces sont faites sur MATLAB 2010, mais elles ne sont pas totalement développées.

Les cas d'études sont respectivement deux supports de frein et deux boitiers différentiels d'un véhicule. Le contexte considéré est celui où seul le nuage de points, la pièce physique et une mise en plan sont disponibles.

Deux cas d'études serviront à capitaliser. Deux autres serviront à la réutilisation.

Chapitre 6

Support de frein

6.1 La phase de capitalisation

L'objectif de cette section est d'obtenir la gamme de fabrication d'un support de frein en analysant ce dernier. La pièce physique, le nuage de points et une mise en plan minimaliste sont disponibles (figure 6.1).



FIGURE 6.1: *Support de frein : pièce physique, nuage de points et une mise en plan.*

6.1.1 Segmenter le nuage de points

La méthode de segmentation hybride est utilisée pour segmenter le support de frein. En effet, cette pièce contient des surfaces brutes considérées ici comme des surfaces gauches. Ces surfaces sont segmentées manuellement et sont considérées comme une seule surface brute (figure 6.2, région noire). Les autres surfaces sont segmentées par la méthode de segmentation automatique. En total, le support de frein est segmenté en 19 régions.

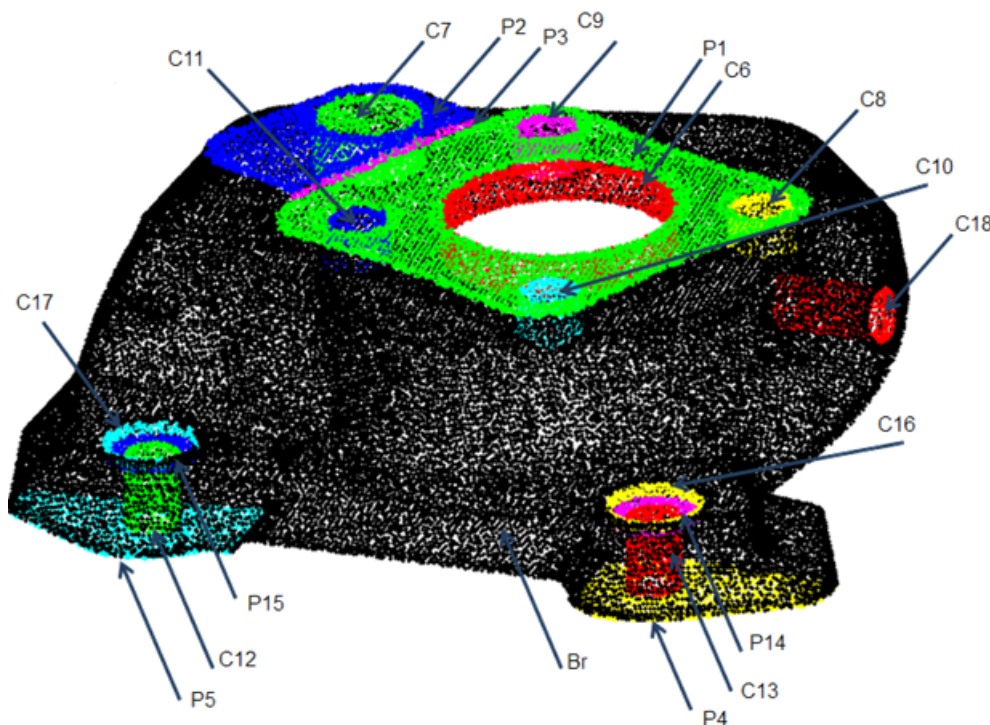


FIGURE 6.2: Nuage de points segmenté du support de frein.

6.1.2 Sélectionner le brut et le matériau

La première étape de REFM permet de sélectionner le brut et le matériau.

Concernant le matériau, l'utilisateur doit peser la pièce (figure 6.3) puis le volume peut être calculé à partir du nuage de points du support de frein. Ainsi, la densité est estimée. En se basant sur le système CES EduPack d'Ashby, REFM propose deux matériaux ayant la densité de la pièce d'étude : X1CrNi25-21 et X1CrNiMoCuN20-18-7 (figure 6.3). Si les matériaux proposés ne conviennent pas, l'utilisateur peut en renseigner d'autres.

Concernant le brut, REFM est pour le moment capable de proposer des bruts provenant des procédés de laminage ou d'extrusion, de section circulaire ou rectangle. Dans ce cas précis du support de frein, le brut réel est issu d'une étape de fonderie. Les bruts issus des procédés de moulage, forgeage... sont plus compliqués à déterminer et non implémentés dans

l'état actuel de REFM. Cependant, le fait de ne pas proposer un brut pour le support de frein, n'influe pas sur la méthodologie REFM car des surfaces brutes sont présentes sur la pièce finie. La présence des surfaces brutes en fin de fabrication de la pièce permet dans la méthodologie REFM de faire le lien avec les autres surfaces usinées pour la création du graphe de précedence.

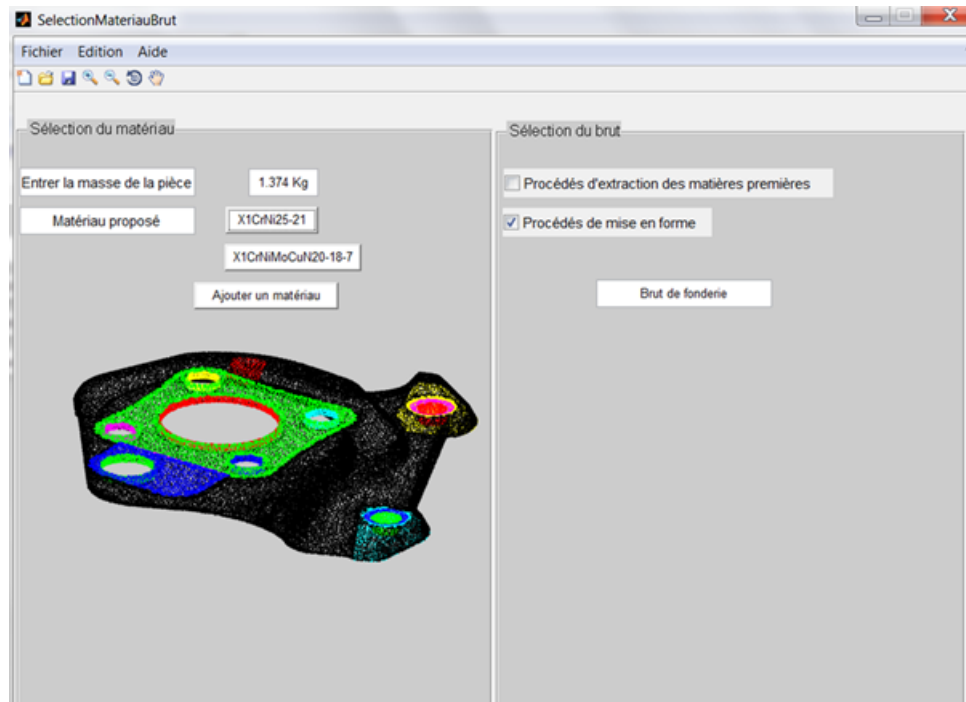


FIGURE 6.3: Choix du matériau et du brut via le support de frein.

6.1.3 Graphe de précedence des surfaces

Cette étape est basée sur l'analyse de l'utilisateur et sa connaissance de la pièce. L'utilisateur renseigne la fonction de la pièce via le graphe de tolérance qui relie les surfaces de la pièce d'étude et représente les dépendances entre elles. Afin de générer ce graphe, l'utilisateur sélectionne une surface usinée et sa surface de référence (figure 6.4). En fonction des types des surfaces et de leurs vecteurs directeurs, REFM propose des symboles de tolérance appropriés que l'utilisateur choisit. Associée à cette tolérance géométrique, l'utilisateur définit la classe de tolérance. Toujours en fonction des connaissances de l'utilisateur sur les fonctions des surfaces usinées, l'utilisateur renseigne leur rugosité. Selon l'usure de la pièce (surface usée), l'utilisateur peut mesurer la rugosité de la surface usinée par un rugosimètre. La figure 6.4 illustre la création de l'information du lien entre le cylindre C7 et le plan P2 comme référence avec une tolérance de perpendicularité de classe très précise, un état de surface de 1,6 micromètre. Un arc entre ces deux surfaces sera ajouté dans le graphe de

tolérance où le type de tolérance est affiché. La surface de départ de l'arc est la surface de référence P2 alors que la surface d'arrivée est la surface usinée C7. Le calcul du graphe de précedence par REFM se fait en simultané de la saisie du graphe de tolérance (figure 6.4).

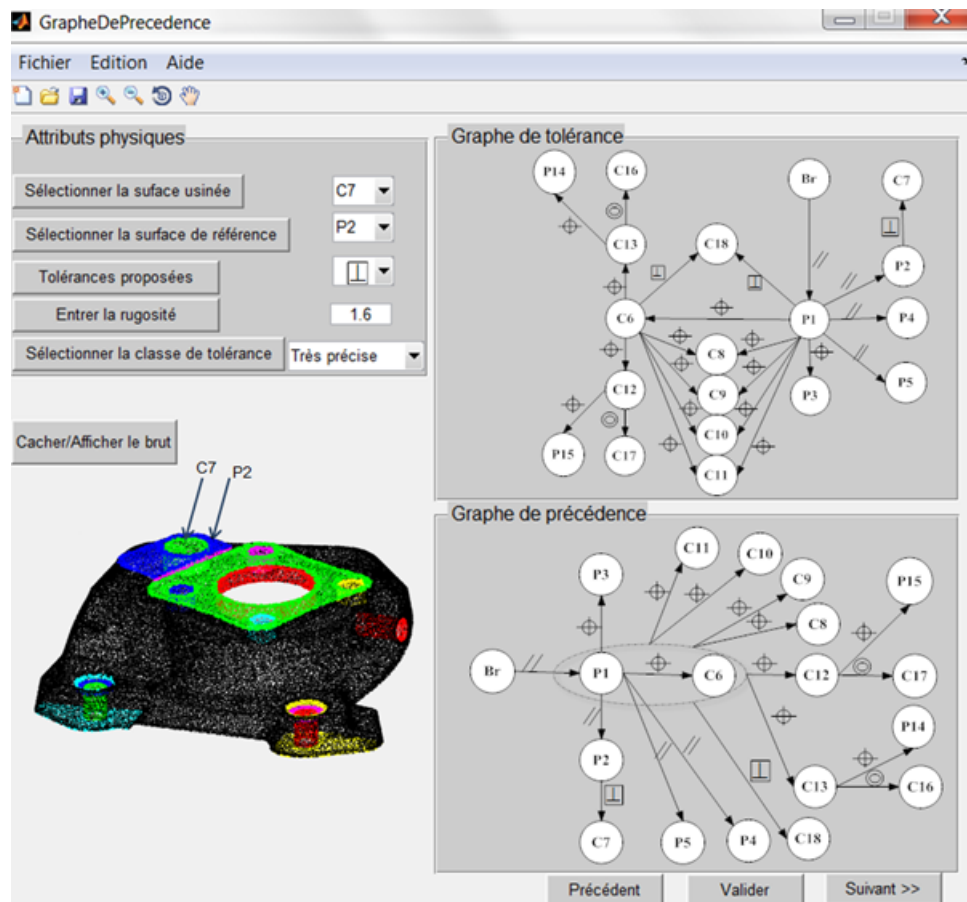


FIGURE 6.4: Graphe de précedence des surfaces du support de frein.

6.1.4 Sélectionner les opérations d'usinage

Une fois le graphe de précedence des surfaces généré, les opérations d'usinage doivent être choisies. L'utilisateur, via ses connaissances des procédés d'usinage conventionnelles et à travers l'interface REFM, définit le groupement des surfaces qui sont réalisées par une même opération d'usinage en se basant sur la géométrie de la pièce. Dans le cas du support de frein, l'utilisateur groupe les surfaces P1 et P3 dans un même groupe HF, P14 et C16 dans IF, P15 et C17 dans JF comme représenté dans la figure 6.5.

Après le groupement des surfaces, l'utilisateur sélectionne une surface ou un groupe de surfaces pour déterminer son opération d'usinage. Par exemple, l'utilisateur sélectionne le plan P2 dans la figure 6.5, alors REFM propose deux opérations : surfacage et dressage ainsi l'utilisateur peut choisir celui qui lui convient.

Dans la figure 6.5, les plans P2, P4 et P5 sont à usiner par des opérations de surfacages, le groupe HF par une opération d'épaulement, les cylindres C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13 et C18 par des opérations de perçage, les groupes JF et IF par les opérations de lamage. Noter que l'utilisateur peut modifier les opérations d'usinage en fonction de ses exigences. Après, les entités standards peuvent être générées. En effet, une entité est la combinaison des surfaces couplées à une opération d'usinage.

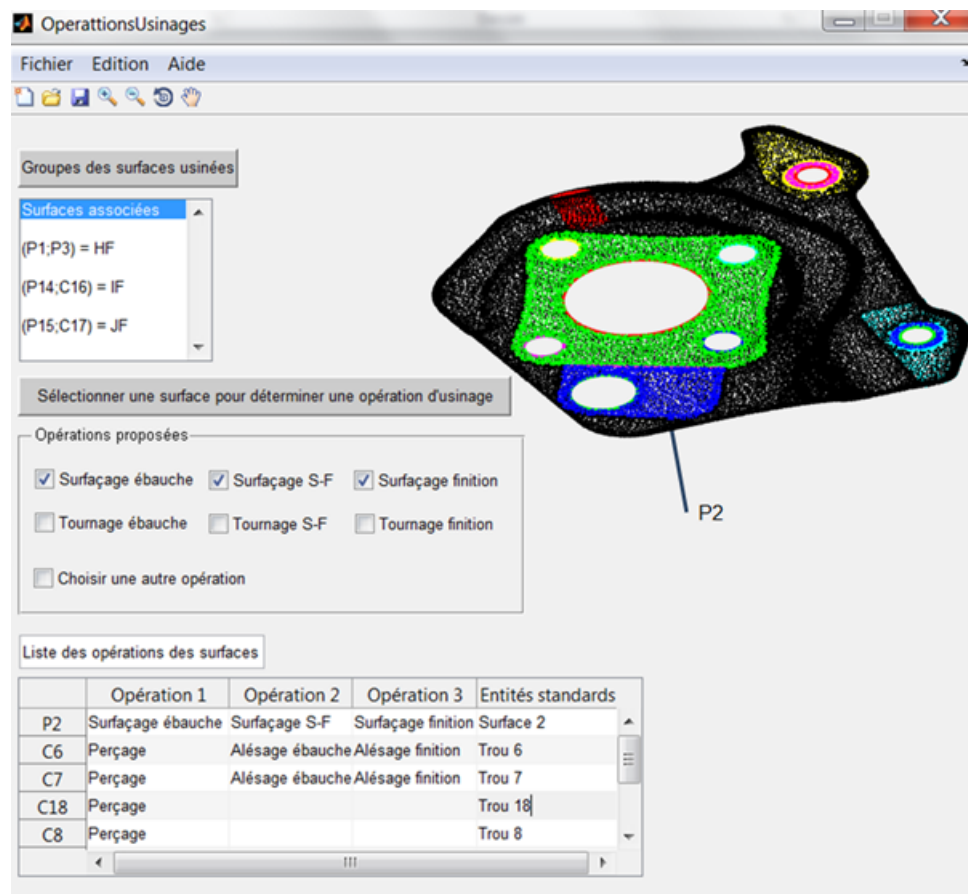


FIGURE 6.5: Les opérations d'usinage du support de frein.

6.1.5 Le graphe de précedence des opérations d'usinage et les phases

Dans cette étape, REFM crée le graphe de précedence des opérations d'usinage du support de frein. Ce graphe de précedence des opérations d'usinage est composé des opérations d'usinage et des contraintes de précedence héritées du graphe de précedence des surfaces. L'ordre des opérations d'usinage proposé par cette méthode respecte un ordre logique défini par le graphe de précedence des surfaces. Dans la figure 6.6, les surfaces P1 et P3 sont usinées par la même opération d'épaulement nommée SHF, les surfaces C6, C7, C8, C9, C10, C11,

C12, C13 et C18 sont usinées par des opérations de perçage indépendantes nommées DC6, DC7, DC8, DC9, DC10, DC11, DC12, DC13 et DC18 respectivement, les surfaces P14 et C16 (de même pour P15 et C17) sont usinées par une opération de lamage, les surfaces P2, P4 et P5 sont usinées par des opérations de surfacage indépendantes nommées respectivement FP2, FP4 et FP5.

La dernière étape avant la création de la gamme de fabrication est la définition des phases d'usinage. Une phase d'usinage est un groupement des opérations de fabrication associées à un posage défini sur des surfaces de posage. L'utilisateur définit donc les groupements d'opérations dans des phases (figure 6.6) associées à des surfaces de posage. Ainsi la gamme de fabrication du support de frein est générée (figure 6.7).

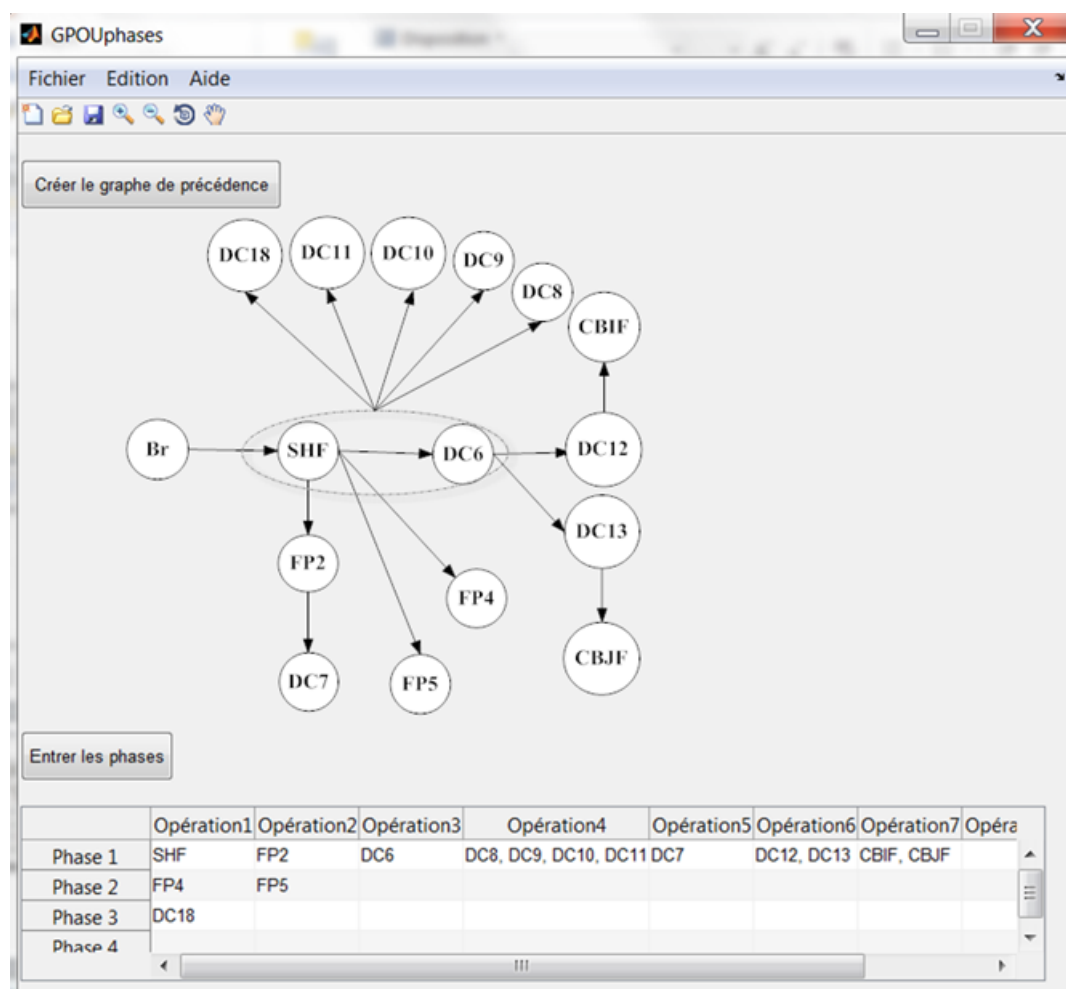


FIGURE 6.6: Graphe de précedence des opérations et les phases.

Comme évoqué dans la partie précédente, chapitre 4, l'ajustement d'entité n'est pas implémenté.

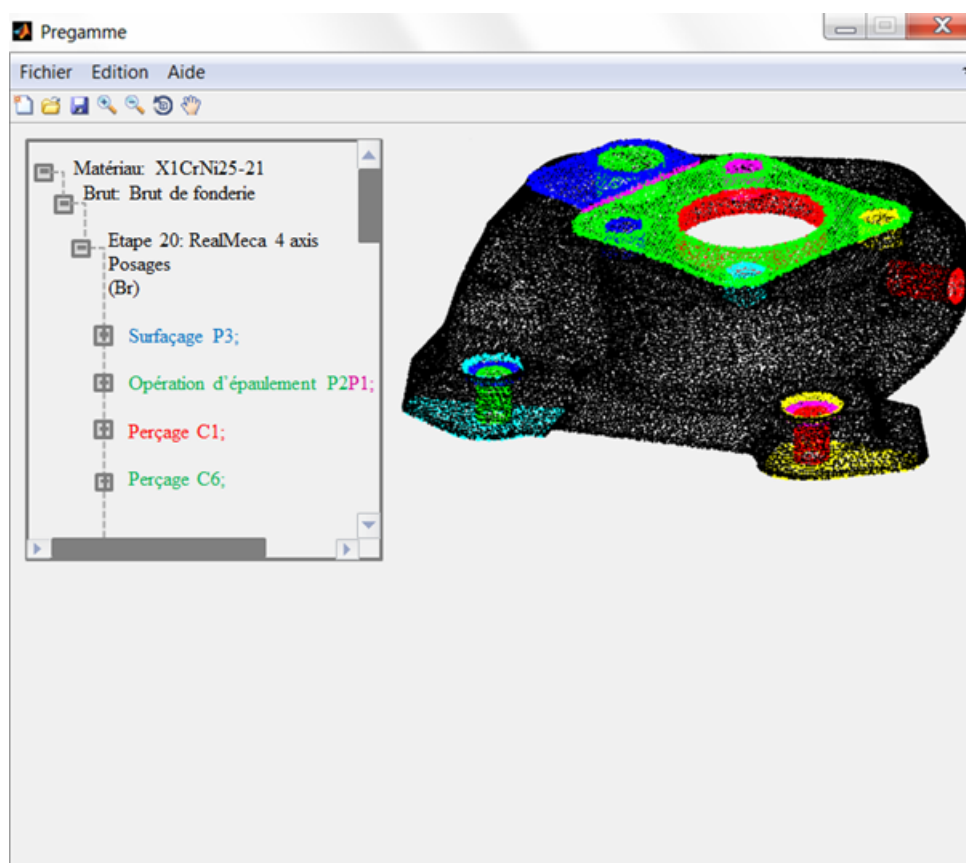


FIGURE 6.7: Gamme de fabrication du support de frein.

6.2 La phase de réutilisation

Comme déjà mentionné, cette phase permet de supporter le processus récurrent de la RC. Elle permet de retro-concevoir une pièce requête en se basant sur une pièce similaire dans la base de données.

La nouvelle pièce considérée diffère de la pièce précédente (figure 6.8). Deux opérations de perçage sont ajoutées, et les deux lamages inférieurs ont été remplacés par deux opérations de fraisage. Quatre cônes sont placés au-dessous des trous C8, C9, C10 et C11.

Après la segmentation du nuage de points, l'utilisateur doit sélectionner la famille de la pièce (figure 6.9). Si REFM propose plusieurs pièces, l'utilisateur doit en choisir une. Deuxièmement, une nouvelle interface apparaît où la pièce requête et la pièce candidate sont présentées avec ses graphes d'adjacence (figure 6.10). Puis, les résultats de la mise en correspondance entre ces graphes sont obtenus à la figure 6.11. Il faut noter que les résultats de la mise en correspondance sont fait à la main. REFM n'est pas encore capable jusqu'à maintenant de faire la mise en correspondance des pièces complexes comme le support de frein et le boîtier de différentiel (cf. chapitre 7).



FIGURE 6.8: support de frein à rétro-concevoir.

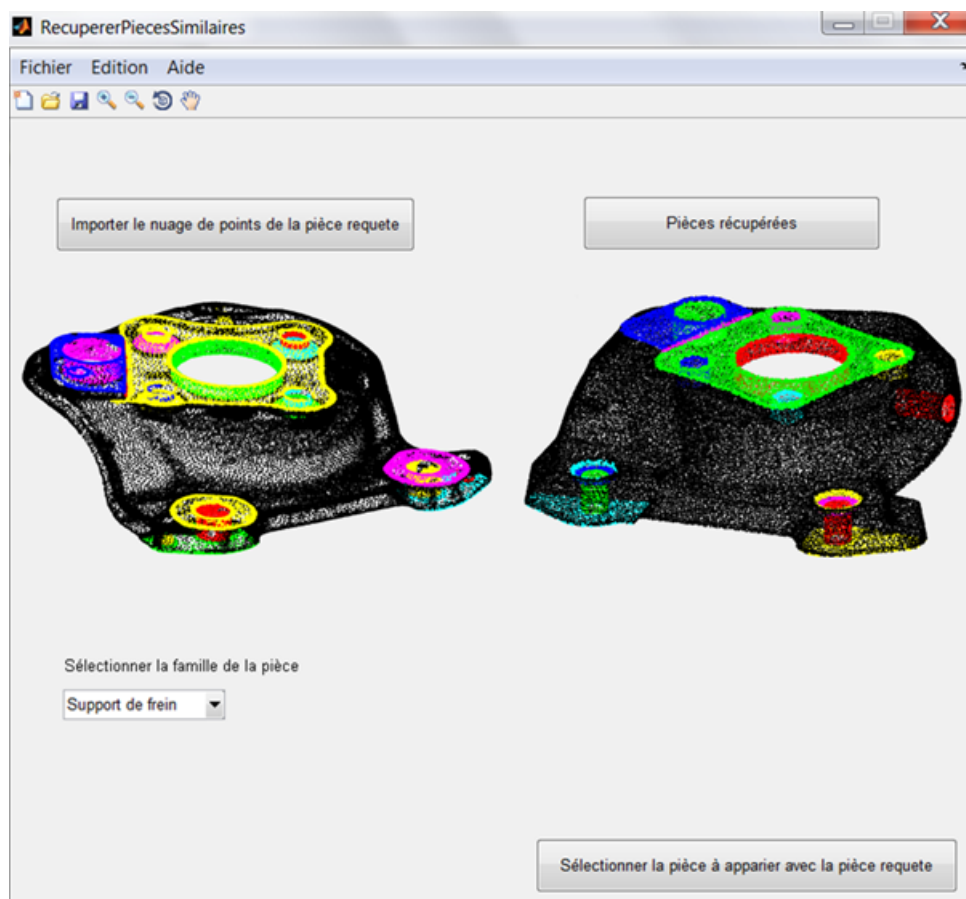


FIGURE 6.9: Récupérer les pièces similaires de la base de données.

Le nombre d'appairage possible dépend des pièces à appairer. Dans le cas des deux supports de frein, plusieurs combinaisons sont possibles. Les scores des sous-graphes dans chaque combinaison et le score total sont utilisés pour comparer ces combinaisons et choisir les meilleurs appairages. Dans le cas d'étude, trois combinaisons ont le meilleur score total : 56.13% (figure 6.11).

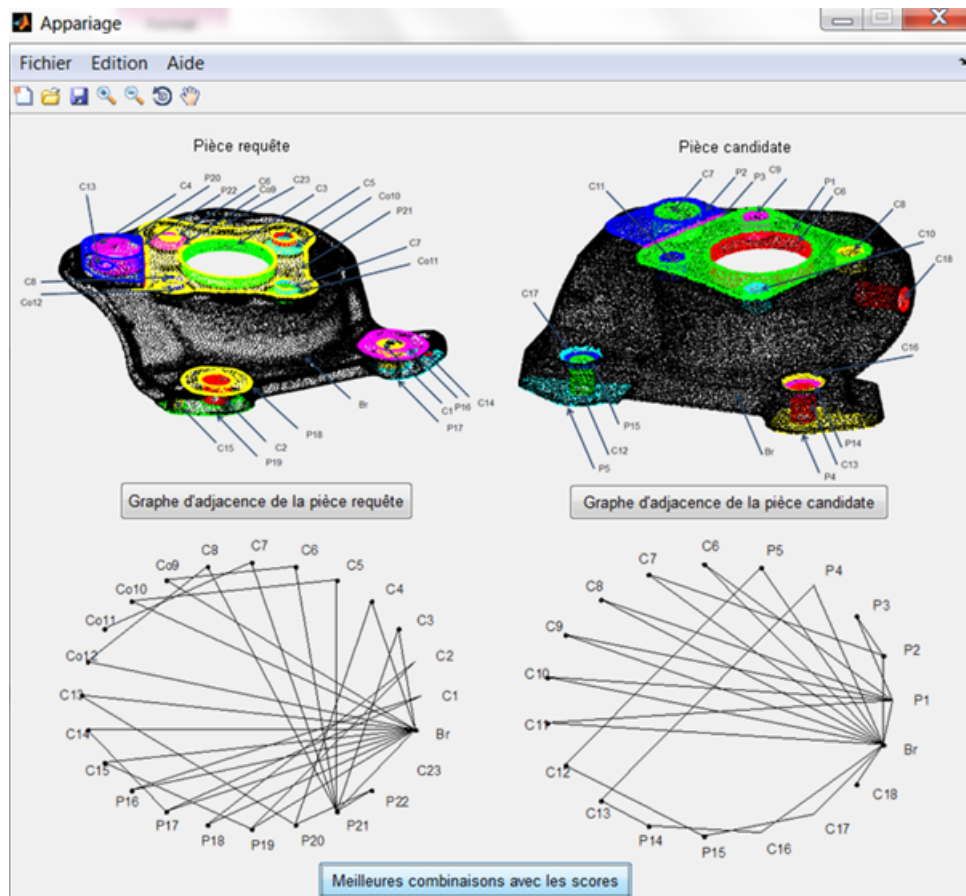


FIGURE 6.10: Graphes d'adjacence de la pièce requête et la pièce en base.

Le $Score_{G'b}$ du graphe de la pièce candidate en base dans ces trois combinaisons est de 84.21%. Ceci signifie que près de 84% de la pièce candidate en base se retrouve apparié avec la pièce à refabriquer.

Le $Score_{G'r}$ du graphe de la pièce requête à refabriquer dans ces trois combinaisons est de 66.66%. Ceci signifie que près de 66% de la pièce à refabriquer se retrouve apparié avec la pièce à candidate en base.

On constate donc que malgré la forte ressemblance visuelle des pièces, les scores d'appariage sont faibles.

Le choix d'un appariage par l'utilisateur permet d'appliquer une partie de la connaissance de la pièce candidate en base sur la pièce requête (portion du graphe de précedence, portion du groupement de surface par les opérations d'usinage, portion des groupement des opérations dans les phases de la gamme de fabrication). Cependant, comme l'appariage n'est que partiel, la dernière étape de la phase de réutilisation permet d'ajuster la gamme partielle de pièce requête à refabriquer héritée de la pièce candidate en base. Dans ce cas, REFM doit éliminer certaines surfaces comme C18 du graphe de précedence des surfaces dans la base de données. Puis l'utilisateur doit appliquer la phase de capitalisation sur certaines surfaces de

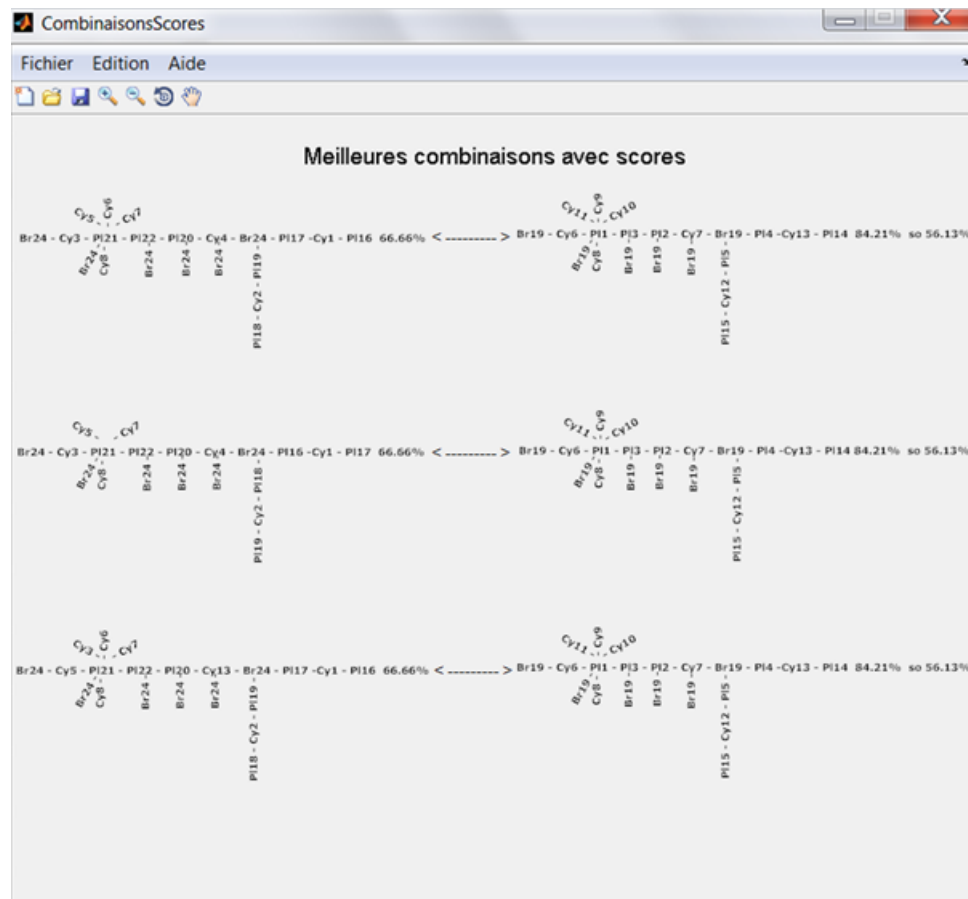


FIGURE 6.11: Les meilleures combinaisons avec les scores.

la pièce requête et qui ne se trouvent pas dans la pièce en base comme Co9, Co10, Co13...

Ainsi, la gamme du support de frein est obtenue dans la figure 6.12.

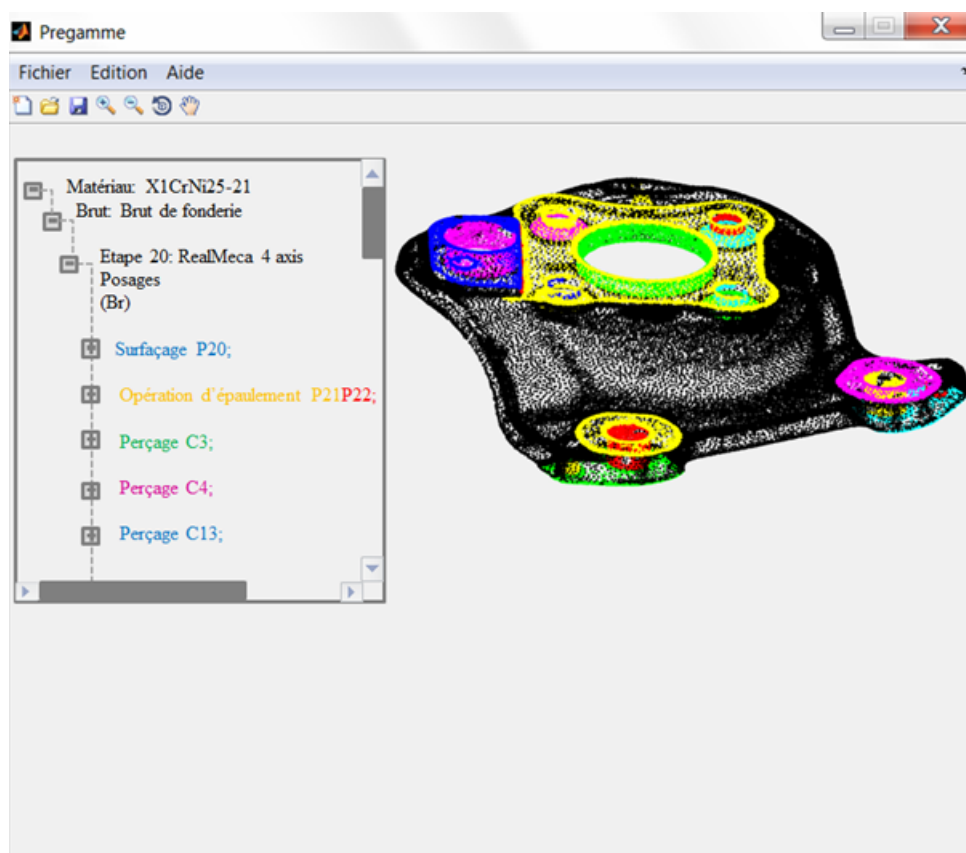


FIGURE 6.12: Gamme de fabrication du support de frein.

Chapitre 7

Boitier de différentiel

7.1 La phase de capitalisation

L'objectif de cette section est d'obtenir la gamme de fabrication d'un boitier de différentiel en analysant ce dernier. La pièce physique, le nuage de points et une mise en plan minimaliste sont disponibles (figure 7.1).

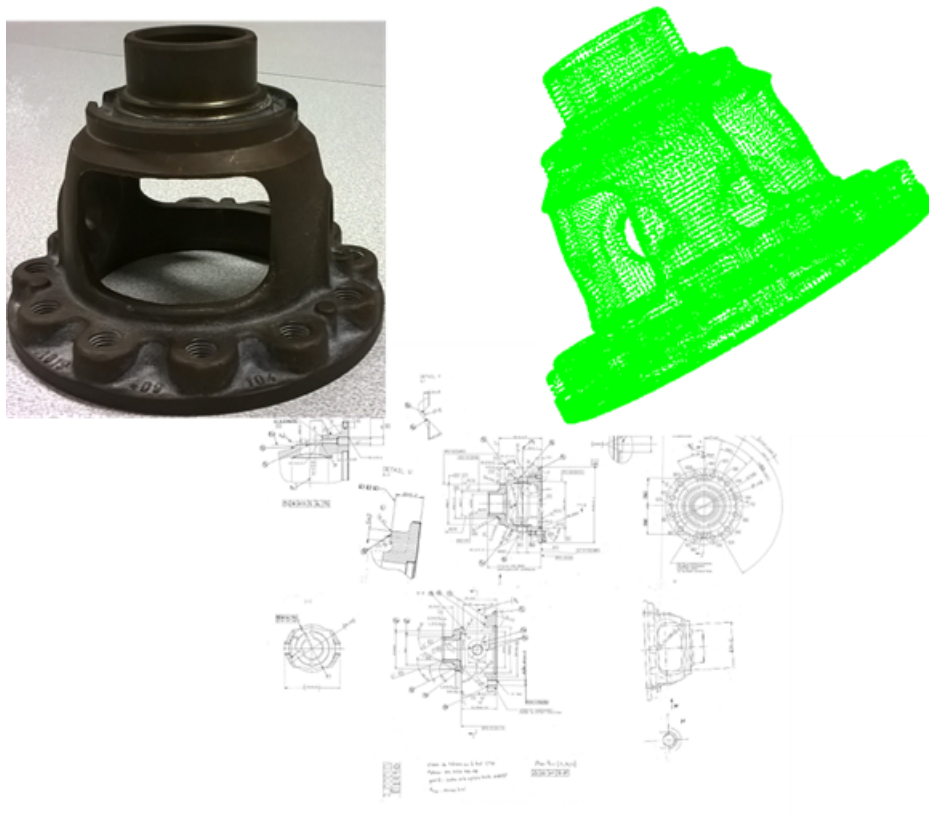


FIGURE 7.1: *Boitier de différentiel : pièce physique, nuage de points et une mise en plan.*

7.1.1 Segmenter le nuage de points

Comme le support de frein, cette pièce contient des surfaces gauches brutes, elle est donc segmentée par la méthode hybride. Les surfaces brutes sont considérées comme une seule surface brute. Le boitier de différentiel est segmenté en 28 surfaces comme nous montre la figure 7.2.

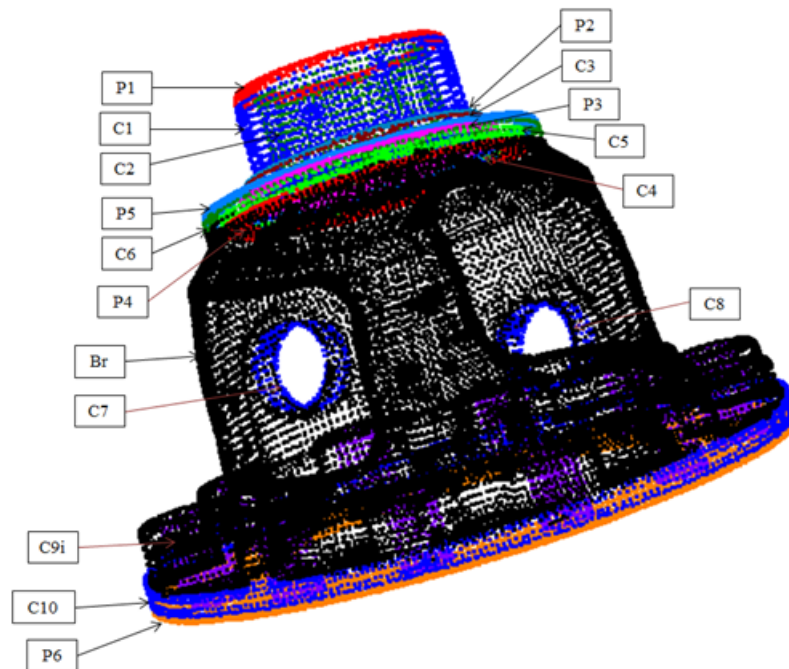


FIGURE 7.2: Nuage de points segmenté du boitier de différentiel.

7.1.2 Sélectionner le brut et le matériau

Pour déterminer le matériau du boitier de différentiel, l'utilisateur entre la masse de la pièce puis REFM calcule le volume de la pièce à partir de son nuage de points. Ainsi, la densité est calculée. Donc en utilisant le système d'Ashby, deux matériaux peuvent être proposés, ce qui permet à l'utilisateur de choisir le matériau.

7.1.3 Graphe de précédence des surfaces

Dans cette étape, l'utilisateur doit fournir ces connaissances et ces informations sur le boitier de différentiel afin de générer son graphe de précédence des surfaces. La figure 7.4 montre le graphe de précédence des surfaces du boitier. Ce graphe est alors généré par l'expert. Il sélectionne la surface usinée (par exemple C2 à la figure 7.4) puis la surface de référence (C1), et REFM calcule le produit scalaire des vecteurs VC2 et VP1 afin d'identifier

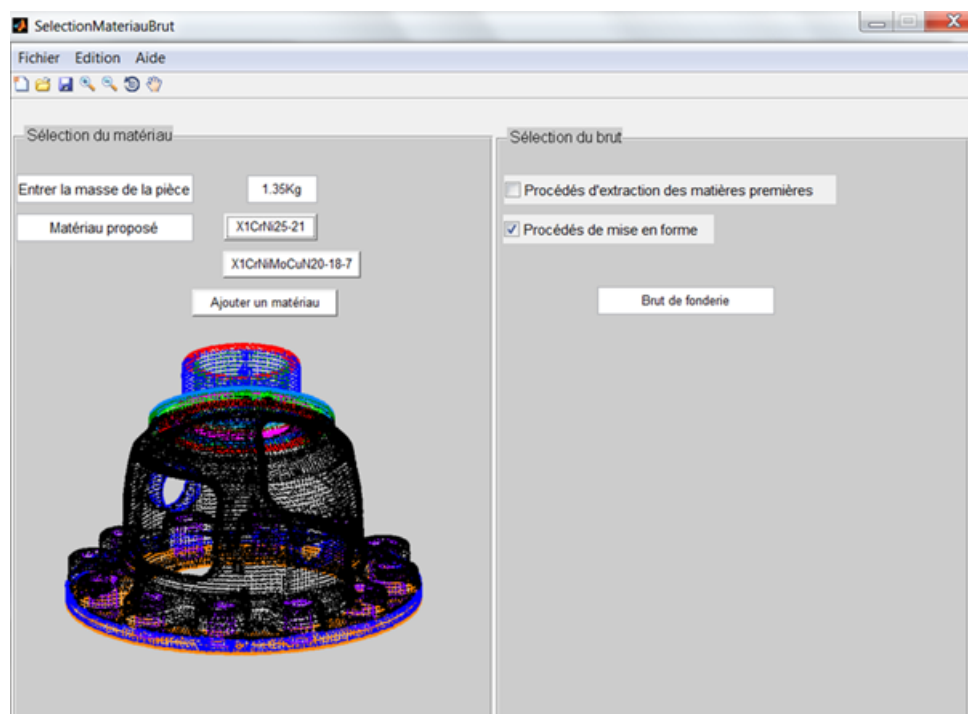


FIGURE 7.3: *Choix du matériau et du brut via le boîtier de différentiel.*

le type de tolérances entre ces deux surfaces. Ensuite, l'utilisateur mesure la rugosité de la surface usinée (C2) et choisit une classe de tolérance comme indiqué à la figure 7.4. Un arc entre ces deux surfaces sera ajouté dans le graphe de tolérance où le type de tolérance est affiché. La surface de départ de l'arc est la surface de référence C1 (surface de référence) alors que la surface d'arrivée est la surface usinée C2. Une fois le graphe de tolérance effectué, REFM peut générer le graphe de précedence des surfaces du boîtier de différentiel représenté à la figure 7.4.

7.1.4 Sélectionner les opérations d'usinage

Dans cette étape, l'utilisateur doit sélectionner une opération d'usinage à chaque surface ou groupement de surface. Pour cela, REFM demande à l'utilisateur de grouper les surfaces qui peuvent être usinées par une même opération en se basant sur la géométrie de la pièce. Dans le cas du boîtier de différentiel, l'utilisateur groupe les surfaces C1 et P2 dans un même groupe HF, C3 et P3 dans IF, C4, P4 et C5 dans JF comme représenté à la figure 7.5.

Après le groupement des surfaces, REFM demande à l'utilisateur de sélectionner une surface ou un groupe de surfaces pour déterminer son opération d'usinage. Par exemple, l'utilisateur sélectionne le cylindre C2 dans la figure 7.5, alors REFM propose l'opération de perçage.

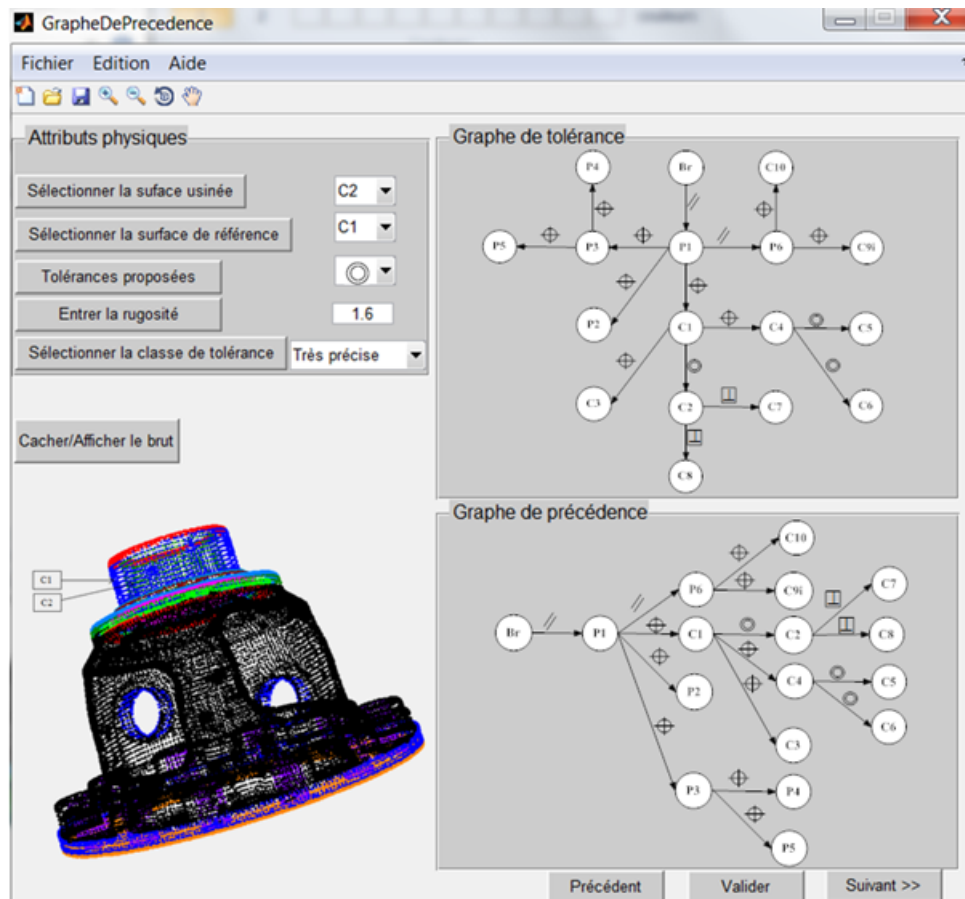


FIGURE 7.4: Graphe de précédence des surfaces du boîtier de différentiel.

Dans la figure 7.5, les plans P1, P5 et P6 sont à usiner par des opérations de dressage, les groupes HF, IF et JF par des opérations d'épaulement, les cylindres C6 et C10 par des opérations de chariotage, les cylindres C2, C7 et C8 par des opérations d'alésage, les cylindres C9i par des opérations de perçage. Noter que l'utilisateur peut modifier les opérations d'usinage en fonction de ses exigences.

7.1.5 Le graphe de précédence des opérations d'usinage et les phases

Dans cette étape, REFM ordonne les opérations d'usinage du boîtier de différentiel selon l'ordre logique défini par le graphe de précédence des surfaces c. à. d. implicitement l'ordre proposé par l'utilisateur. Dans la figure 7.6, les surfaces P1, P5 et P6 sont usinées par des opérations de dressage indépendantes nommées DP1, DP5 et DP6, les groupes HF, IF et JF sont usinés par des opérations d'épaulement indépendantes nommées EHF, EIF et EJF, les surfaces C6 et C10 sont usinées par des opérations de chariotage indépendantes nommées CC6 et CC10, les surfaces C2, C7 et C8 sont usinées par des opérations d'alésage

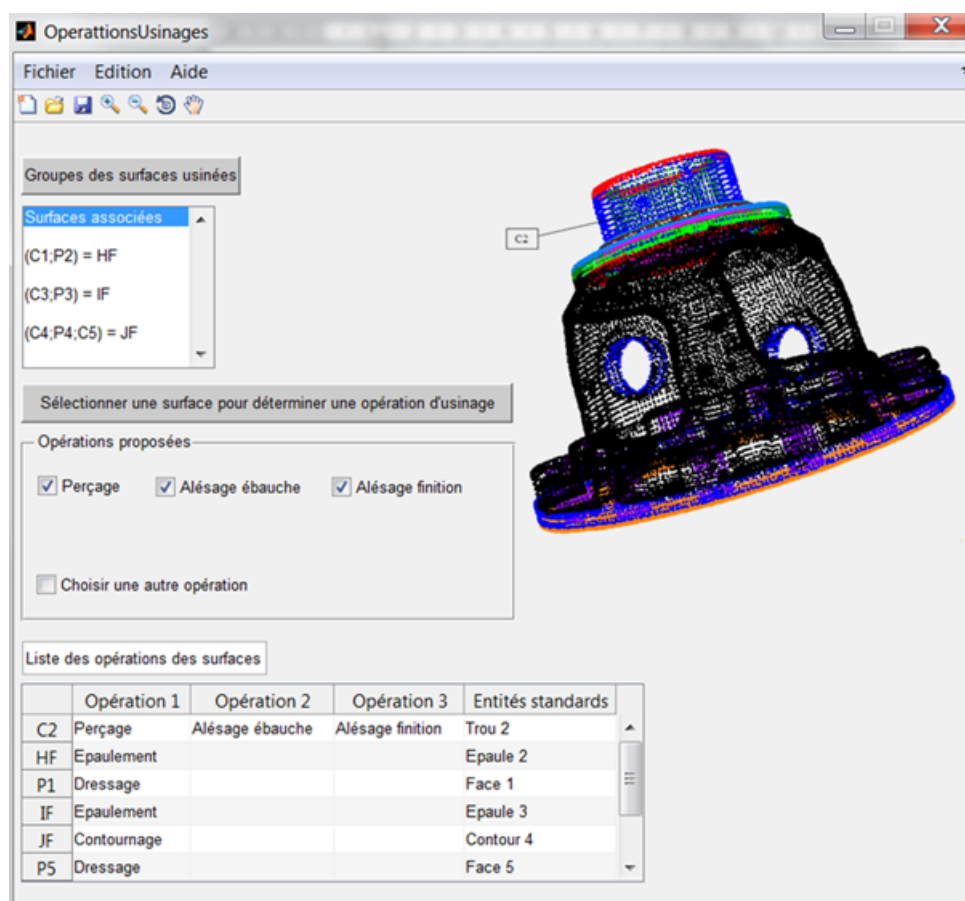


FIGURE 7.5: Les opérations d'usinage du boitier de différentiel.

indépendantes nommées AC2, AC7 et AC8, les surfaces C9i sont usinées par des opérations de perçage nommées PC9i. Après cette étape l'utilisateur doit choisir les surfaces de posage et ainsi la gamme de fabrication du boitier de différentiel est générée dans la figure 7.7.

7.2 La phase de réutilisation

Le processus de rétro-conception dans cette phase est réalisé par REFM avec une interaction minimum de l'utilisateur. Donc, cette phase sert à réutiliser une gamme stockée dans la base données REFM afin de re-fabriquer une autre pièce similaire.

Le nouveau boitier de différentiel vu dans la figure 7.8. est proportionnellement plus gros que le précédent, le diamètre extérieur est plus important. En plus, les cylindres C7 et C8 ont un diamètre plus important dans le cas précédent. Deux cylindres (C10 et C11) sont ajoutés dans le nouveau cas.

Premièrement, l'utilisateur doit sélectionner la famille de la pièce (figure 7.8). Si REFM propose plusieurs pièces, l'utilisateur doit choisir une. Deuxièmement, une nouvelle interface

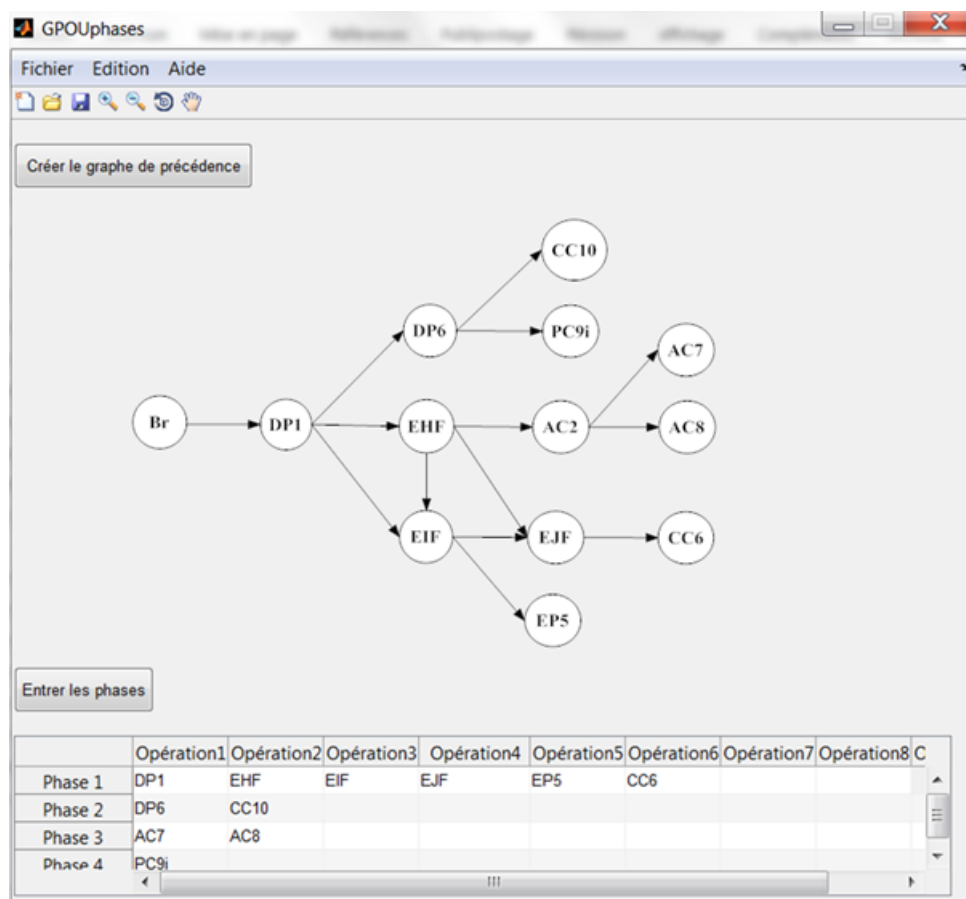


FIGURE 7.6: Graphe de précedence des opérations et les phases.

apparaît où la pièce requête et la pièce candidate sont présentées avec leur graphe d'adjacence (figure 7.9). Puis, les résultats de la mise en correspondance entre ces graphes sont obtenus à la figure 7.10.

Dans le cas du boîtier différentiel, deux combinaisons ont le meilleur score total : 93.33% comme indiqué à la figure 7.10.

Le $Score_{G'b}$ du graphe de la pièce candidate dans ces deux combinaisons est de 100%. C.à.d. toute la pièce a été appariée.

Le $Score_{G'r}$ du graphe de la pièce requête dans ces deux combinaisons est de 93.33%. Dans le cas où plusieurs combinaisons ont le même score total, il faut alors choisir une parmi ces combinaisons. Dans le cas du boîtier, la première combinaison peut être éliminée. Dans cette combinaison, C10 (un cylindre dans la pièce requête) est apparié avec C12 (un cylindre dans la pièce candidate).

Après que l'utilisateur ait choisi une combinaison parmi celles qui restantes (on considère que l'utilisateur a choisi la deuxième combinaison), la dernière étape de la phase de réutilisation est à appliquer. Cette étape permet d'ajuster la gamme dans la base à la pièce

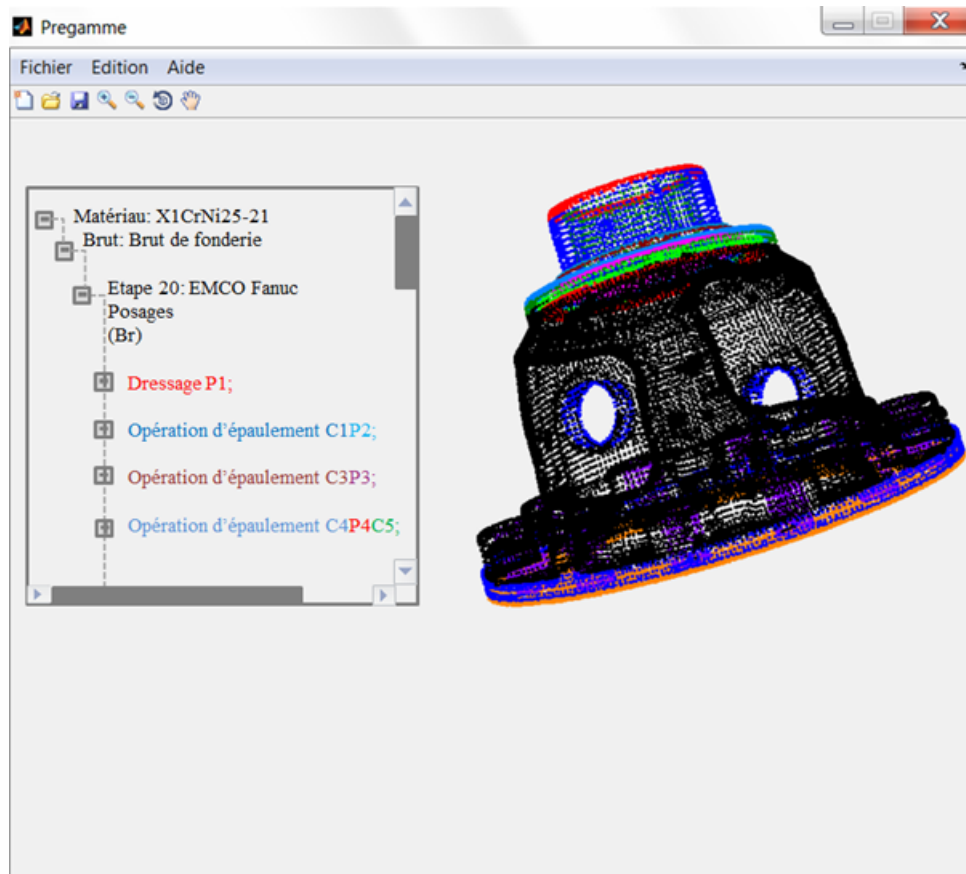


FIGURE 7.7: Gamme de fabrication du boîtier de différentiel.

requête. Vu que toutes les surfaces de la pièce candidate sont appariées ($score_G'b = 100\%$), alors on peut constater qu'il n'y a pas de surfaces à éliminer dans la pièce candidate. Alors l'utilisateur doit appliquer la phase de capitalisation sur certaines surfaces de la pièce requête puisque ses surfaces ne sont pas toutes appariées ($score_G'r = 93.33\%$).

Ainsi, la gamme du boîtier de différentiel est obtenue à la figure 7.11.

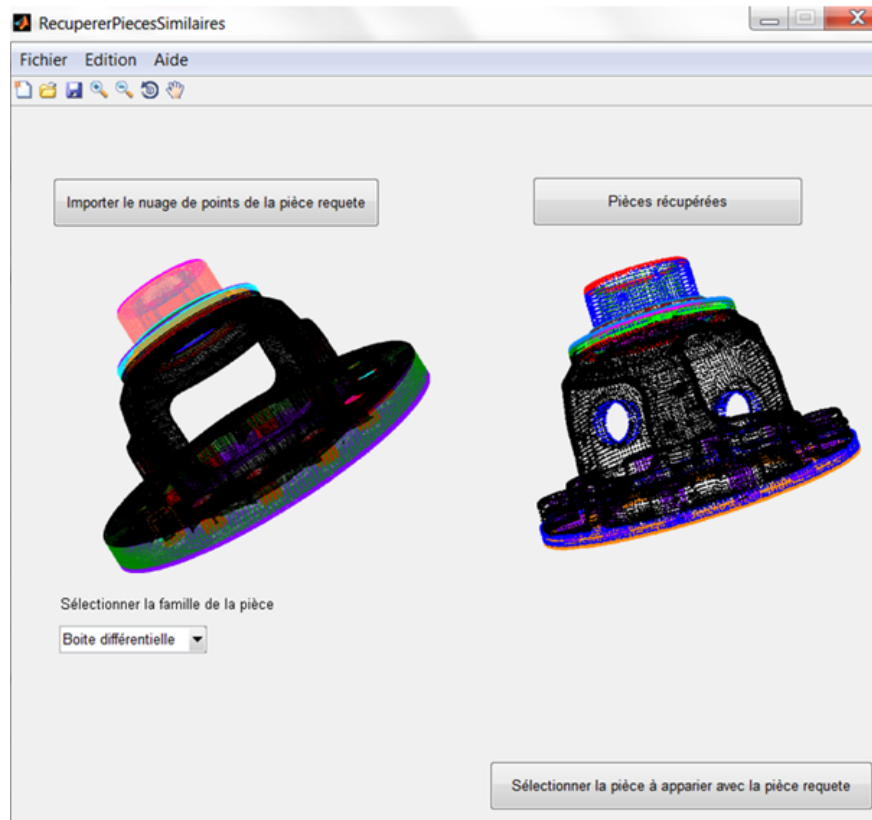


FIGURE 7.8: Récupérer les pièces similaires de la base de données.

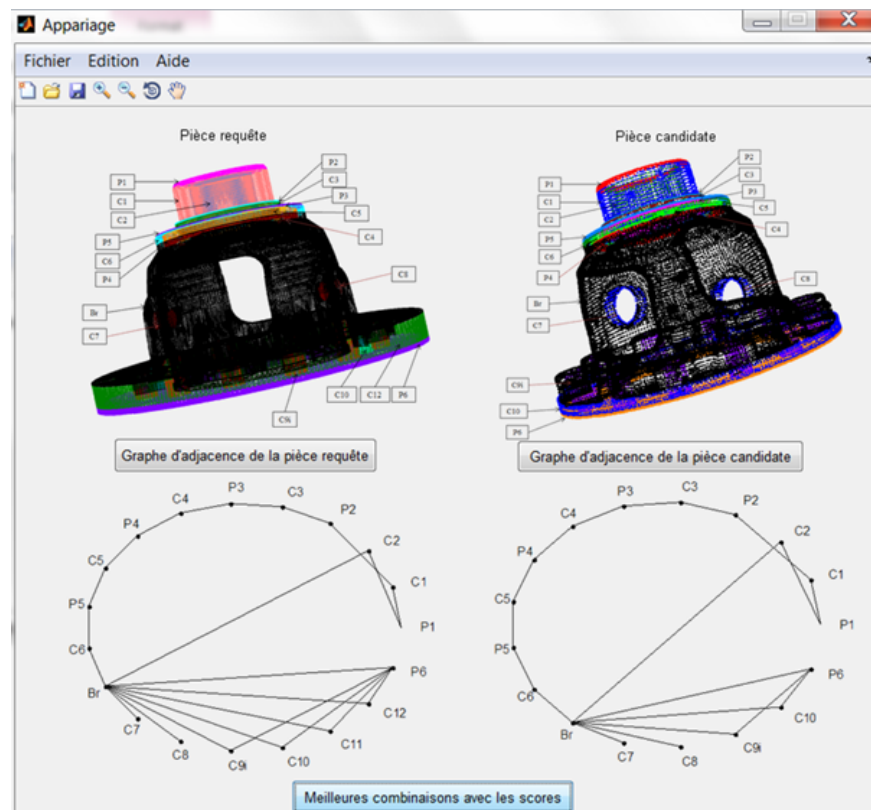


FIGURE 7.9: Graphes d'adjacence de la pièce requête et la pièce en base.

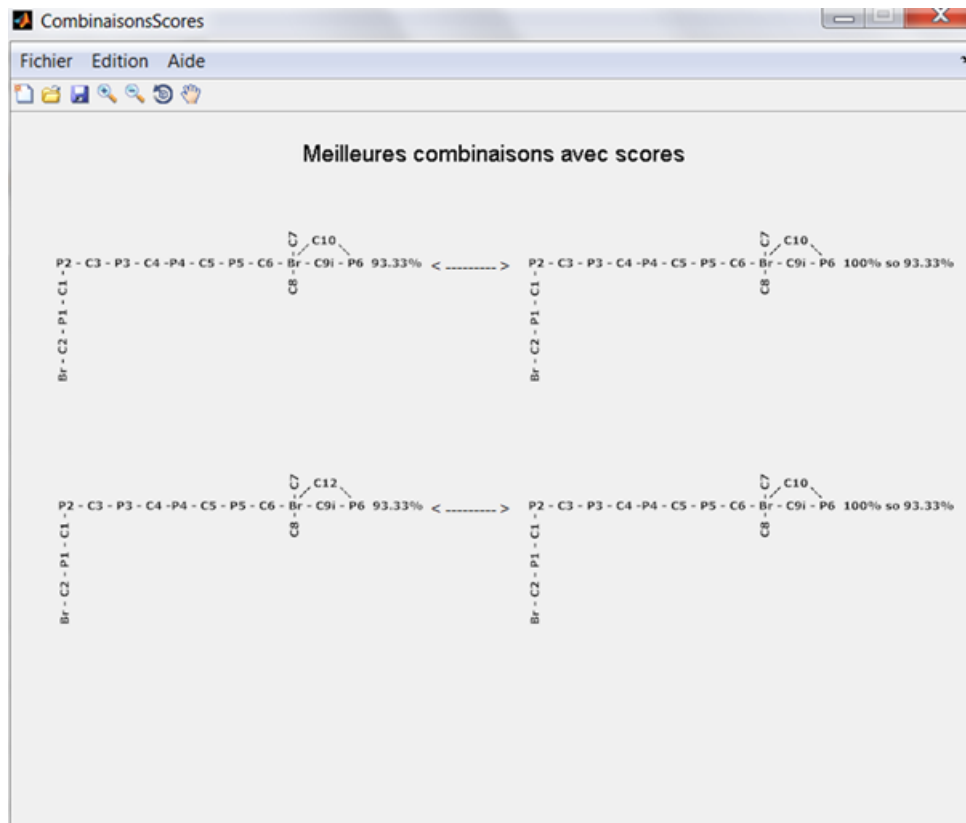


FIGURE 7.10: Les meilleures combinaisons avec les scores.

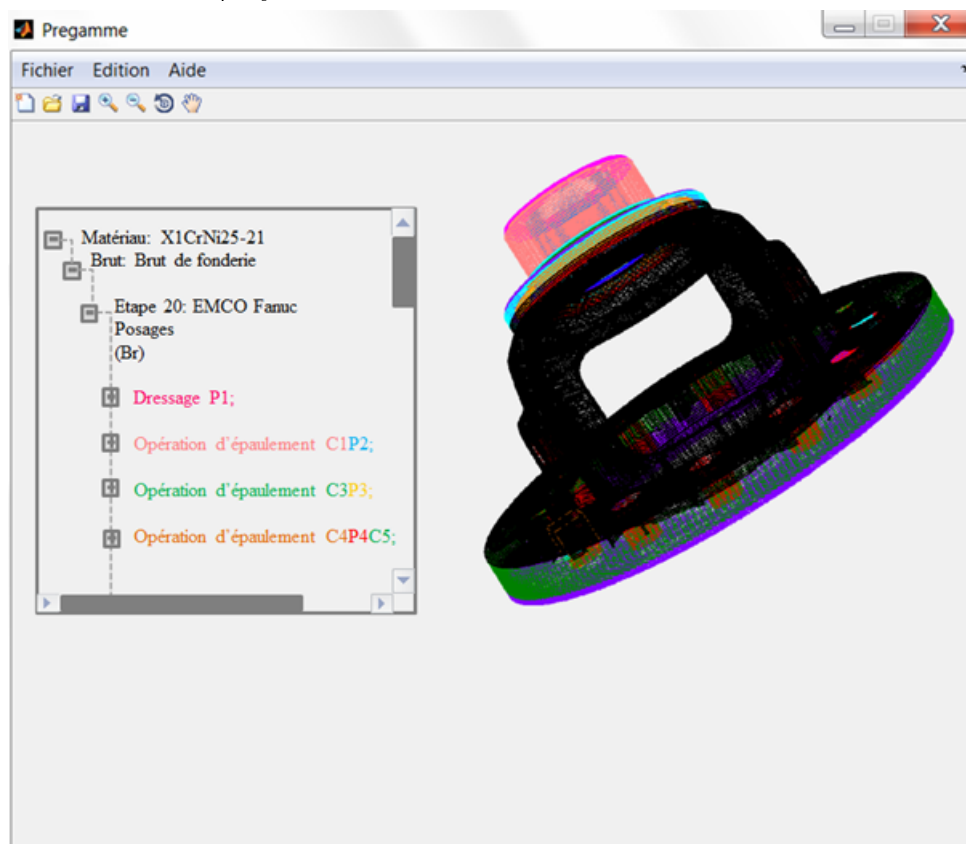


FIGURE 7.11: Gamme de fabrication du boitier de différentiel.

Conclusion Partie 3

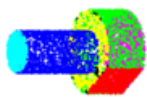
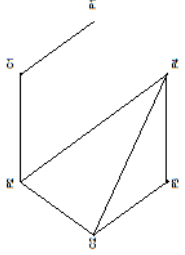
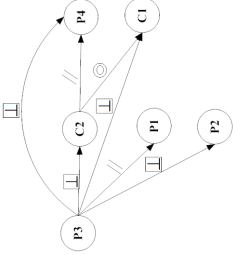

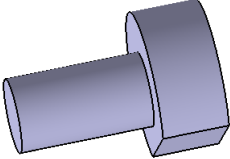
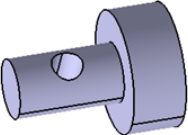
Dans cette partie, quatre cas pouvant être considérés comme industriel ont été retro-conçus. La portabilité de REFM a été montrée dans les cas suivants :

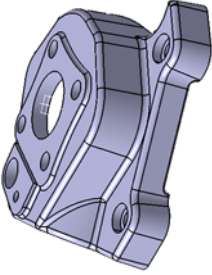
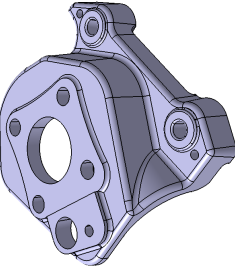
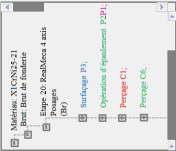
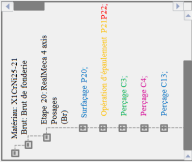
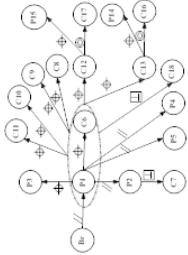
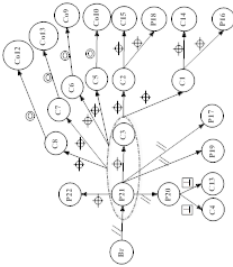
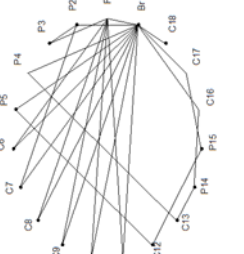
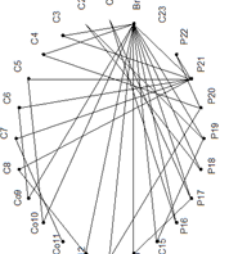
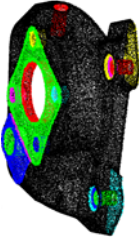
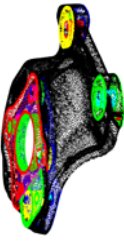
- Dans un nouveau cas de rétro-conception : REFM permet d’analyser le cas d’étude et de tenir compte des connaissances de fabrication du cas d’étude dans le processus de rétro-conception.
- Dans un contexte routinier : REFM permet de réutiliser des connaissances déjà acquises sur un cas d’étude pour rétro-concevoir des cas d’études similaires. Dans ce contexte, REFM sera supposée plus rapide qu’un processus de rétro-conception classique.

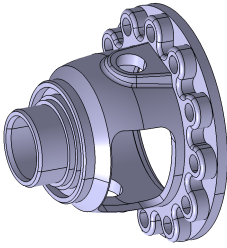
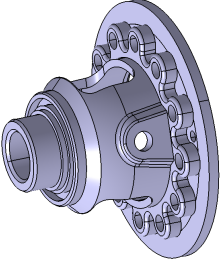

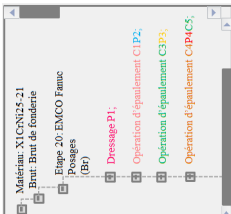
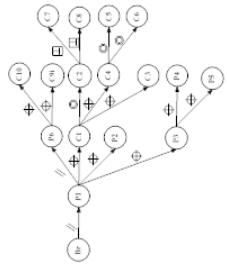
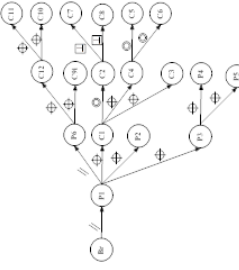
Il est vrai que les cas illustrés sont moins complexes que la réalité industrielle. Cette complexité est liée à la géométrie d’une pièce (usinage 5 axes). Notre cas permet d’estimer des géométries d’usinage plus simple comme des trous, des perçages, des lamages, des surfaçages, des alésages et des poches de formes simples. Pour cela, il sera intéressant de s’appuyer sur la norme STEP-NC et notamment la description des entités d’usinage pour gérer la complexité.

La table ci-dessous récapitule les cas étudiés dans ce manuscrit. Elle montre le nuage de points segmenté de chaque cas d’étude, avec son graphe de précédence des surfaces, son graphe d’adjacence, sa gamme de fabrication et son modèle CAO.

TABLE 7.1: Table de synthèse des techniques de segmentation.

Nuage de points segmenté		Graphe d'adjacence		Graphe de précedence des surfaces		Gamme de fabrication		Modèle CAO		
--------------------------	---	--------------------	---	-----------------------------------	---	----------------------	---	------------	---	---

Conclusion générale

Ce mémoire de thèse a présenté une nouvelle démarche de rétro-conception pour la fabrication (Reverse Engineering For Manufacturing REFM). Cette démarche permet de rétro-concevoir une pièce mécanique en considérant les étapes de fabrication de cette pièce. En d'autres termes, notre approche permet d'intégrer le plus tôt possible les contraintes de fabrication dans le processus de rétro-conception.

Comme vu dans les chapitres précédents, notre méthodologie a permis de supporter le processus exceptionnel et le processus récurrent de la rétro-conception en intégrant les contraintes de fabrication. La sortie de REFM est un modèle « CAO fabrication » avec une arborescence pensée d'un point de vue usinage contenant des informations sur le brut, le matériau, les opérations d'usinage, les phases et les posages.

Pour résumer, le but de cette thèse est de fournir une gamme de fabrication d'une pièce physique dans un contexte récurrent limitant l'aide de dessins d'ingénieries et de documentations. Donc, REFM a été divisée en deux grandes phases : phase de capitalisation et phase de réutilisation (figure 7.12).

La phase de capitalisation :

La phase de capitalisation a permis d'assister l'utilisateur dans le processus de rétro-conception afin d'analyser le nuage de points et la pièce réelle à rétro-concevoir en le guidant sur le choix du matériau, des différentes étapes de fabrication... L'intérêt de cette phase est de permettre une meilleure rétro-conception en suggérant une méthodologie apportant une démarche structurée. En plus, le but de cette phase est de sauvegarder les connaissances de l'utilisateur accumulées afin d'être réutilisées dans des cas similaires.

REFM, dans cette phase, a combiné les approches géométriques et les méthodologies d'acquisition de connaissances de fabrication. Le point novateur de REFM a été de développer l'étape « Acquisition de connaissances de fabrication ». En sortie de cette phase, une gamme est générée en respectant les dépendances fonctionnelles entre les surfaces et en optimisant la séquence d'usinage. REFM a intégré des bases de données qui contiennent toutes les

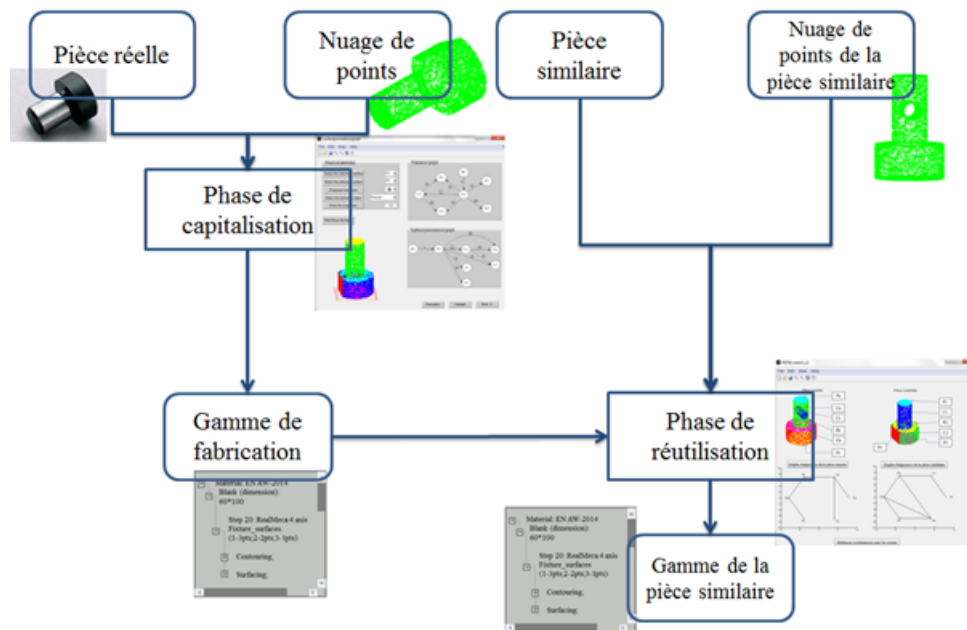


FIGURE 7.12: Schéma récapitulatif de la méthodologie REFM.

informations nécessaires pour la construction d'une gamme. Dans ce contexte, le système d'Ashby (Ashby *et al.*, 2013) est approprié. Le principal avantage de cette méthodologie est d'intégrer, le plus tôt possible, les contraintes de fabrication dans le cycle de vie du produit en suggérant des corrélations entre les possibilités de fabrication, les matériaux et ainsi de suite.

Ainsi, chaque nouvelle pièce rétro-conçue sera stockée dans une base de données REFM afin de la re-exploiter dans la phase de réutilisation pour la rétro-conception d'une pièce similaire.

La phase de réutilisation :

La phase de réutilisation a permis à l'utilisateur de réutiliser les connaissances préalablement sauvées et les extraire sur un nouveau cas d'étude. L'intérêt de cette phase est d'accélérer le processus de rétro-conception en évitant les étapes redondantes. Donc, le processus de rétro-conception est réalisé avec une interaction minimum de l'utilisateur.

REFM, dans cette phase, a permis à l'utilisateur de réutiliser une gamme stockée dans la base données REFM afin de re-fabriquer une autre pièce similaire. Pour cela, une méthode de mise en correspondance entre la pièce d'étude et une pièce dans la base est utilisée afin d'associer ou ajuster la gamme de fabrication de la pièce en base à la pièce d'étude. Cette méthode est effectuée plus précisément entre les graphes d'adjacences des pièces. Elle est basée sur la similarité topologique entre les pièces mécaniques. La sortie de cette phase est une gamme associée ou ajustée à la pièce d'étude.

Perspectives

Les perspectives de ce travail sont diverses que ce soit au niveau de la phase de capitalisation qu'au niveau de la phase de réutilisation. Nous proposons d'organiser les perspectives en trois horizons : à court terme, à moyen terme et à long terme.

Les perspectives à court terme :

Vers une méthode de classification en famille de pièces : REFM propose de grouper les pièces similaires par famille de pièces, mais elle ne définit pas jusqu'à maintenant de critères de regroupement. Une méthode de classification en famille de pièces pourrait être proposée pour offrir plus d'automatisation. Pour cela, les méthodes par squelettisation (Jouili, 2011) pourraient être une piste de solutions.

La Proposition d'un brut de fonderie : Vu dans les chapitres précédents, REFM peut proposer des bruts provenant des procédés primaires. REFM n'est pas capable de proposer des bruts provenant des procédés de mise en forme (moulage, forgeage). Pour cela, une méthode permettant de proposer des entités plus complexes, comme les surfaces gauches d'un brut, devraient être étudiées. En effet, dans cette thèse, REFM ne traite que les pièces partiellement ou entièrement usinées. Dans le cas où la pièce est partiellement usinée, c.à.d. il reste des surfaces brutes et où le brut lui-même provient de la fonderie, les surfaces brutes ont été considérées comme une seule surface (c. à. d. une seule région de points).

De la RC vers une simulation d'usinage FAO intégrée : Aujourd'hui, la sortie du système REFM est une arborescence incluant le brut et des informations de type opérations d'usinage, posages, phases. Cette arborescence est appuyée sur le graphe de précedence des opérations et toute l'analyse de fabrication qui en découle. La transcription dans cette thèse est faite à la main, cependant, en termes de perspective la transcription peut être automatique car elle se résumera à la traduction d'un graphe sous la forme d'une arborescence.

Une autre perspective relative serait de proposer l'élaboration d'une gamme de fabri-

cation au sens FAO, c'est-à-dire incluant la gamme complète avec les outils de coupe, leurs paramètres, les conditions de coupe, et la simulation de l'usinage etc.

De plus, l'aspect coût de fabrication au moment de la RC pourrait être considéré afin de pouvoir estimer le prix de la re-fabrication.

D'une approche par entité géométrique vers des entités complexes métier (liens avec STEP-NC) : Le couplage entre les paramètres métier et la géométrie n'est pas explicité dans cette thèse. La mise en place d'une méthode d'identification entre le « métier » et la « géométrie » devraient être intégrée et testée en s'appuyant sur des travaux de standardisation comme le STEP-NC où une description exhaustive d'entités d'usinage (avec trajectoire associée) est proposée (Newman *et al.*, 2008).

Les perspectives à moyen terme :

La RC à partir de données hétérogènes : Les données d'entrée supposées dans cette thèse sont la pièce physique, le nuage de points et une mise en plan minimaliste. Les algorithmes proposés ne traitent que les nuages de points issus de numérisation. Les autres données hétérogènes pourraient être traitées informatiquement pour permettre plus d'automatisation. Par exemple, les mises en plan au format CATDrawing ou autre pourraient être traitées afin de générer le graphe de précedence. Tout l'enjeu serait de coupler le nuage de points segmenté avec les mises en plan et les photos.

La RC avec alternatives de fabrication : Dans cette thèse, la sortie du système REFM est une gamme de fabrication telle que pensée à l'origine. Des alternatives de fabrication pourraient être proposées en fonction des connaissances des procédés, des types de machines disponibles dans l'entreprise etc.

Les perspectives à long terme :

La RC vers des nouveaux procédés (l'émergence de la fabrication additive) (Desmedt, 2013) : Aujourd'hui, REFM est focalisée sur la RC dans un contexte d'usinage. La fabrication additive métallique pourrait à long terme être une alternative de fabrication en production de petite série. Des problématiques de RC apparaîtraient, l'enjeu majeur serait d'adapter des pièces de conception connues et aux procédés conventionnels (usinage, fonderie) à la fabrication additive.

La rétro-conception vers les solutions PLM (Product Lifecycle Management), MPM (Manufacturing Process Management) et ERP (Enterprise Res-

source Planning) (Eynard *et al.*, 2004), (Danjou *et al.*, 2015) : La RC dans cette thèse a été centrée sur un contexte atelier et sur le lien entre un bureau d'études et un bureau des méthodes. La réalité industrielle est plus compliquée et la RC est une problématique rencontrée par des donneurs d'ordre qui doivent gérer des produits plus complexes (automobile, aéronautique, nautique etc.) où un composant est produit par plusieurs usines aux ressources machines et procédés différentes. Un des enjeux serait d'assurer le couplage entre une solution de RC pour la fabrication avec les mBOM (manufacturing Bill Of Material) du composant et d'étudier l'interopérabilité avec les solutions PLM (Product Life cycle Management), MPM (Manufacturing Process Management) et ERP (Entreprise Resource Planning). Ces solutions gèrent la multi-représentation (au sens conception, industrialisation et production) du produit ou composant et donc la multi-expertise associée.

Les publications scientifiques

Ces travaux de thèse ont fait l'objet des publications scientifiques suivantes :

Revues scientifiques :

- (Ali *et al.*, 2014a)

Conférences Internationales avec actes et comité de lecture :

- (Ali *et al.*, 2014b)
- (Adragna *et al.*, 2014)
- (Ali *et al.*, 2013)
- (Ali *et al.*, 2012)

Bibliographie

- Abella, R.J., Daschbach, J.M., & McNichols, R.J. 1994. Reverse engineering industrial applications. *Computers & Industrial Engineering*, **26**(2), 381 – 385.
- Adragna, P.A., Ali, S., Durupt, A., Nguyen, V.D., & Lafon, P. 2014. Influence of part geometrical tolerancing in the REFM methodology. *In : Proceedings of the Joint Conference on Mechanical, Design Engineering & Advanced Manufacturing*.
- Ali, S., Durupt, A., Adragna, P.A., & Troussier, N. 2012. 3D Information Management Enabling Manufacture Engineering. *Pages 513–520 of : Proceedings of the ASME Information Management and PLM*.
- Ali, S., Durupt, A., & Adragna, P.A. 2013. Reverse Engineering for Manufacturing Approach : Based on the Combination of 3D and Knowledge Information. *Pages 137–146 of : Abramovici, Michael, & Stark, Rainer (eds), Smart Product Engineering*. Lecture Notes in Production Engineering. Springer Berlin Heidelberg.
- Ali, S., Durupt, A., Adragna, P.A., & Bosch-Mauchand., M. 2014a. A Reverse Engineering for Manufacturing approach. *Computer-Aided Design and Applications*, **11**(6), 694–703.
- Ali, S., Adragna, P.A., & Durupt, A. 2014b. Reverse Engineering for manufacturing REFM of parts in a routine context : use of graph description and matching algorithm. *In : Proceedings of the Joint Conference on Mechanical, Design Engineering & Advanced Manufacturing*.
- Ashby, M. F., Shercliff, H., & Cebon, D. 2013. *Materials : engineering, science, processing and design*. Publisher : Butterworth-Heinemann ; third edition.
- Ashby, M.F., Bréchet, Y.J.M., Cebon, D., & Salvo, L. 2004. Selection strategies for materials and processes. *Materials & Design*, **25**(1), 51 – 67.
- Attene, M., Falcidieno, B., & Spagnuolo, M. 2006. Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives. *The Visual Computer*, **22**(3), 181–193.
- Bagci, E. 2009. Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing : Three case studies. *Advances in Engineering Software*, **40**(6), 407 – 418.

- Belloy, P. 1994. *Intégration de connaissance métier dans la conception : un modèle pour les pièce mécaniques. Application à l'usinage et à l'estampage*. Ph.D. thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble 1.
- Bénière, R., Subsol, G., Gesquière, G., Le Breton, F., & Puech, W. 2013. A comprehensive process of reverse engineering from 3D meshes to {CAD} models. *Computer-Aided Design*, **45**(11), 1382 – 1393.
- Bernard, A., Laroche, F., Ammar-Khodja, S., & Perry, N. 2007. Impact of New 3D Numerical Devices and Environments on Redesign and Valorisation of Mechanical Systems. *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology*, **56**(1), 143 – 148.
- Bernard, A., Laroche, F., Sébastien, R., & Durupt, A. 2010. New trends in Reverse-Engineering : Augmented-Semantic models for redesign of existing objects. *Ouvrage collectif Reverse-Engineering*, 27 pages. sous la coordination de Paolo Bartolo.
- Berretti, S., Del Bimbo, A., & Pala, P. 2009. 3D Mesh decomposition using Reeb graphs. *Image and Vision Computing*, **27**(10), 1540 – 1554. Special Section : Computer Vision Methods for Ambient Intelligence.
- Besl, P.J., & Jain, R.C. 1988. Segmentation through variable-order surface fitting. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, **10**(2), 167–192.
- Beudaert, X. 2013 (July). *Open CNC : optimized interpolation for 5-axis high speed machining of complex surfaces*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- Blanch, R., Ferrer, I., & Garcia-Romeu, M.L. 2012. A model to build manufacturing process chains during embodiment design phases. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **59**(5-8), 421–432.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. A. 2010. *Product Design for Manufacture and Assembly*. CRC Press ; third edition.
- Bourdet, P., & Villeneuve, F. 1990. *Groupe GAMA : La gamme automatique en usinage*.
- Bruneau, M., Durupt, A., Roucoules, L., Pernot, JP., & Eynard, B. 2013. Towards new processes to reverse engineering digital mock-ups from a set of heterogenous data. *In : International conference on Graphics Engineering*.
- Canny, J. 1986. A Computational Approach to Edge Detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, **PAMI-8**(6), 679–698.
- Chang, C.T., Gorissen, B., & Melchior, S. 2011. Fast Oriented Bounding Box Optimization on the Rotation Group $SO(3, \mathbb{R})$. *ACM Trans. Graph.*, **30**(5), 122 :1–122 :16.
- Chang, T.C., Anderson, D.C., & Mitchell, O.R. 1990. *QTC-an integrated design/manufacturing/vision inspection system for prismatic parts*. Addison-Wesley.

- Cicirello, V., & Regli, W.C. 2001 (May). Machining feature-based comparisons of mechanical parts. *Pages 176–185 of : Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications*.
- Conte, D., Foggia, P., Sansone, C., & Vento, M. 2004. THIRTY YEARS OF GRAPH MATCHING IN PATTERN RECOGNITION. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, **18**(03), 265–298.
- Corbett, J., Dooner, M., Meleka, J., & Pym, C. 1991. *Design For Manufacture : Strategies, Principles and Techniques*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Danjou, C., Le Duigou, J., & Eynard, B. 2015. Closed-loop manufacturing process based on STEP-NC. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1–13.
- Desmedt, P. 2013. <http://www.usinenouvelle.com/article/fabrication-additive-au-dela-du-mythe-de-l-impression-3-d.N194326>.
- Durupt, A. 2010. *Définition d'un processus de rétro-conception de produit par integration des connaissances de son cycle de vie*. Ph.D. thesis, Université de Technologie de Troyes.
- Durupt, A., Remy, S., Bricogne, M., & Troussier, N. 2013. PHENIX : product history-based reverse engineering. *Int. J. Product Lifecycle Management*, **6**(3), 270 – 287.
- Durupt, A., Remy, S., Ducellier, G., & Pouille, P. 2014. Reverse engineering using a knowledge-based approach. *Int. J. of Product Development*, **19**(1/2/3), 113 – 129.
- Erdos, Gabor, Nakano, Takahiro, & Vancza, Jozsef. 2014. Adapting {CAD} models of complex engineering objects to measured point cloud data. *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology*, **63**(1), 157 – 160.
- Eynard, B., Gallet, T., Nowak, P., & Roucoules, L. 2004. {UML} based specifications of {PDM} product structure and workflow. *Computers in Industry*, **55**(3), 301 – 316. Object-oriented modelling in design and production.
- Feng, C.X., & Kusiak, A. 1995. Constraint-based design of parts. *Computer-Aided Design*, **27**(5), 343 – 352.
- Fisher, R.B. 2004. Applying knowledge to reverse engineering problems. *Computer-Aided Design*, **36**(6), 501 – 510.
- Fuchs, A. 2006. *Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique*. Ph.D. thesis, Université Henri Poincaré - Nancy 1.
- Gagvani, N., & Silver, D. 1999. Parameter-Controlled Volume Thinning. *Graphical Models and Image Processing*, **61**(3), 149 – 164.

- Gallaudet, T.C., & Simpson, J. J. 1991. Automated cloud screening of {AVHRR} imagery using split-and-merge clustering. *Remote Sensing of Environment*, **38**(2), 77 – 121.
- Gameros, A., De Chiffre, L., Siller, H.R., Hiller, J., & Genta, G. 2015. A reverse engineering methodology for nickel alloy turbine blades with internal features. *{CIRP} Journal of Manufacturing Science and Technology*, –.
- Germain, H.J.S. 2002. *Reverse Engineering Utilizing Domain Specific Knowledge*. Ph.D. thesis, University of Utah.
- Gibson, I. 2002. *Software Solutions for Rapid Prototyping*. Wiley.
- Gupta, S.K., Chen, Y., Feng, S., & Sriram, R. 2003. A system for generating process and material selection advice during embodiment design of mechanical components. *Journal of Manufacturing Systems*, **22**(1), 28 – 45.
- Harik, H. 2007. *Spécifications de fonctions pour un système d'aide à la génération automatique de gamme d'usinage : Application aux pièces aéronautique de structure, prototype logiciel dans le cadre du projet RNTL USIQUICK*. Ph.D. thesis, Université Henri Poincaré, Nancy 1.
- Herlem, G., Adragna, P.A., Ducellier, G., & Durupt, A. 2014. An extension of the core product model for the maturity management of the digital mock up : use of graph and knowledge to describe mechanical parts. *International Journal of Product Lifecycle Management*, **7**(1), 94–110.
- Hilaga, M., Shinagawa, Y., Kohmura, T., & Kunii, T.L. 2001. Topology Matching for Fully Automatic Similarity Estimation of 3D Shapes. *Pages 203–212 of : Proceedings of the Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '01. New York, NY, USA : ACM.
- Huang, J., & Menq, C.-H. 2001. Automatic data segmentation for geometric feature extraction from unorganized 3-D coordinate points. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, **17**(3), 268–279.
- Jaques, M.W.S., Billingsley, J., & Harrison, D. 1991. Generative feature-based design-by-constraints as a means of integration within the manufacturing industry. *Computer-Aided Engineering Journal*, **8**(6), 261 – 267.
- Jong, F. D., Reitsema, T., & Hoogeboom, R. 1992. Feature-Based modelling : A way to improve the CAD/CAM process. *International Journal of CAD/CAM and Computer Graphics*, **7**(2), 209–234.
- Jouili, S. 2011. *Indexation de masses de documents graphiques : approches structurelles*. Ph.D. thesis, Université Nancy II.

- Kerbrat, O. 2009. *Hybrid modular tooling design methodology, based on manufacturability analysis*. Ph.D. thesis, Ecole Centrale de Nantes (ECN) .
- Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoët, J.Y. 2011. A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing. *Computers in Industry*, 684–692.
- Krasnov, M., Kisselev, A., Ma-karenko, G., & Chikine, E. 1993. *Mathématiques supérieures*. Acces Sciences.
- Kumar, A., Jain, P. K., & Pathak, P. M. 2013. *Reverse Engineering in product manufacturing : an overview*. DAAAM International Scientific Book 2013. Pages 665–678.
- Kumar, S., Singh, R., & Sekhon, G.S. 2006. CCKBS : A component check knowledge-based system for assessing manufacturability of sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*, **172**(1), 64 – 69.
- Lavoué, G. 2005. *Compression de surfaces, basée sur la subdivision inverse, pour la transmission bas débit et la visualisation progressive*. Ph.D. thesis, Université Claude Bernard - Lyon 1.
- Lin, A.Q., & He, Y.X. 2015. Research Based on Reverse Engineering Technology of Complex Structure Product. *Applied Mechanics and Materials*, **741**, 806–809.
- Man, R., Zhou, D., & Zhang, Q. 2014. An improved collision detection algorithm based on OBB. *COMPUTER MODELLING & NEW TECHNOLOGIES*, **18**(1), 71–79.
- METIS, Projet ANR. 2012. *Consortium : DeltaCAD (Porteur), IFP Energies Nouvelles, Ecole Centrale de Nantes (IRRCyN), ENSAM - Aix en Provence (LSIS), UTC (Roberval), UTT (ICD - LASMIS) - metis.deltacad.fr*.
- Meyer, A. 2002. *Segmentation de nuages de points suivant les lignes caractéristiques*. Ph.D. thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen.
- Meyer, A., & Marin, P. 2004. Segmentation of 3D triangulated data points using edges constructed with a $\{C1\}$ discontinuous surface fitting. *Computer-Aided Design*, **36**(13), 1327 – 1336.
- Minetola, P., Iuliano, L., & Calignano, F. 2015. A customer oriented methodology for reverse engineering software selection in the computer aided inspection scenario. *Computers in Industry*, **67**(0), 54 – 71.
- Mizoguchi, T., Kanai, S., Date, H., & Kishinami, T. 2007. Quasi-Optimal Mesh Segmentation Via Region Growing/Merging. *Pages 547–556 of : Proceedings of the ASME Design Automation Conference*.
- Mohaghegh, K., Sadeghi, M.H., & Abdullah, A. 2007. Reverse engineering of turbine blades based on design intent. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **32**(9-10), 1009–1020.

- Nartz, O., Bernard, A., Ris, G., & Remy, S. 2002. De l'objet \tilde{A} l'objet : rétro-conception d'un bouchon de radiateur de Delahaye 135. *In : Proceedings of the European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*.
- Newman, S.T., Nassehi, A., Xu, X.W., Rosso Jr., R.S.U., Wang, L., Yusof, Y., Ali, L., Liu, R., Zheng, L.Y., Kumar, S., Vichare, P., & Dhokia, V. 2008. Strategic advantages of interoperability for global manufacturing using {CNC} technology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **24**(6), 699 – 708.
- Ouamer-Ali, M.I., Laroche, F., Bernard, A., & Remy, S. 2014. Toward a Methodological Knowledge based Approach for Partial Automation of Reverse Engineering. *Procedia {CIRP}*, **21**(0), 270 – 275. 24th {CIRP} Design Conference.
- Panchetti, M., & Pernot, J. P. and Véron, P. 2010. Towards recovery of complex shapes in meshes using digital images for reverse engineering applications. *Computer-Aided Design*, **42**(8), 693–707.
- Paris, H. 1995. *Contribution à la conception automatique des gammes d'usinage : le problème du posage et du bridage des pièces*. Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Patane, G., & Spagnuolo, M. 2002. Multi-resolution and Slice-oriented Feature Extraction and Segmentation of Digitized Data. *Pages 305–312 of : Proceedings of the ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*. SMA '02. New York, NY, USA : ACM.
- Reeb, G. 1946. *Sur les points singuliers d'une forme de Pfaff complètement intégrable ou d'une fonction numérique*. Paris, comptes rendus académie des sciences édition.
- Regli, W.C., Shokoufandeh, A., & Bespalov, D. 2011 (Sept. 6). *Multi-scale segmentation and partial matching 3D models*. US Patent 8015125.
- Remy, S., Ducellier, G., Charles, S., & Eynard, B. 2008. Advanced STEP parameterized and constrained features for reverse engineering. *International Journal of Computer Application in Technology*, **32**(1), 1–11.
- Roucoules, L. 1999. *Méthodes et connaissances : contribution au développement d'un environnement de conception intégrée*. Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Roucoules, L. 2007. *Une approche au juste besoin : des spécifications fonctionnelles du produit aux choix des procédés de fabrication*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne.
- Saidi, M., Skander, A., & Kaddeche, S. 2015. DFMM Approach : Modelling, Formalization and Choice of Material and Manufacturing Processes. *Pages 121–129 of : Haddar,*

Mohamed, Abbes, Mohamed Slim, Choley, Jean-Yves, Boukharouba, Taoufik, Elnady, Tamer, Kanaev, Andrei, Ben Amar, Mounir, & Chaari, Fakher (eds), *Multiphysics Modelling and Simulation for Systems Design and Monitoring*. Applied Condition Monitoring, vol. 2. Springer International Publishing.

Scra. 2006. *STEP application handbook version 3*, http://www.uspro.org/documents/STEP_application_hdbk_63006_BF.pdf.

Shah, J.J. 1991. Assessment of features technology. *Computer aided design*, **23**(5), 331–343.

Shah, J.J., & Mäntylä, M. 1995. *Parametric and Feature-Based CAD/CAM : Concepts, Techniques, and Applications*. A Wiley-Interscience publication. Wiley.

Skander, A. 2006. *Méthode et modèle DFM pour le choix des procédés et l'intégration des contraintes de fabrication vers l'émergence de la solution produit*. Ph.D. thesis, Université de Technologie de Troyes.

Skander, A, Roucoules, L, & Klein Meyer, J.S. 2008. Design and manufacturing interface modelling for manufacturing processes selection and knowledge synthesis in design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **37**(5-6), 443–454.

Sundar, H., Silver, D., Gagvani, N., & Dickinson, S. 2003. Skeleton Based Shape Matching and Retrieval. *Pages 130– of : Proceedings of the Shape Modeling International*. SMI '03. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society.

Sunil, V.B., & Pande, S.S. 2008. Automatic recognition of features from freeform surface {CAD} models. *Computer-Aided Design*, **40**(4), 502 – 517.

Tangelder, J.W., & Veltkamp, R.C. 2008. A Survey of Content Based 3D Shape Retrieval Methods. *Multimedia Tools Appl.*, **39**(3), 441–471.

Thompson, W.B., Owen, J.C., De St.Germain, H.J., Stark, S.R., Jr., & Henderson, T.C. 1999. Feature-based reverse engineering of mechanical parts. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, **15**(1), 57–66.

Tierny, J., Vandeborre, J., & Daoudi, M. 2006. Graphes de reeb de haut niveau de maillages polygonaux 3D. *Pages 172–177 of : Proceedings of COMpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels (CORESA'06)*.

Tiwari, M. K.and Rama Kotaiah, K., & Bhatnagar, S. 2001. A Case-Based Computer-Aided Process-Planning System for Machining Prismatic Components. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **17**, 400–411.

Tollenaere, M. 1998. *Modélisation des données-gestion des données techniques-conception de produits mécaniques*. Hermes.

- Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, Ch., & Kimura, F. 2009. Design methodologies : Industrial and educational applications. *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology*, **58**(2), 543 – 565.
- Torrance, R., & James, D. 2009. The State-of-the-Art in IC Reverse Engineering. *Pages 363–381 of : Clavier, Christophe, & Gaj, Kris (eds), Cryptographic Hardware and Embedded Systems - CHES 2009. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5747. Springer Berlin Heidelberg.
- Toussaint, L., Demoly, F., Lebaal, N., & Gomes, S. 2010. PLM-based Approach for Design Verification and Validation using Manufacturing Process Knowledge. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, **8**(1), 1–7.
- Tung, T. 2005. *3D indexing of object databases using enhanced Reeb graphs*. Ph.D. thesis, Télécom ParisTech.
- Urbanic, R.J., ElMaraghy, H.A., & ElMaraghy, W.H. 2008. A reverse engineering methodology for rotary components from point cloud data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **37**(11-12), 1146–1167.
- van Vliet, J. W., van Luttervelt, C. A., & Kals, H. J..J. 1999. State-of-the-art Report On Design for Manufacturing. *Pages DETC99/DFM-8970 of : Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences*.
- Várady, T., Facello, M.A., & Terék, Z. 2007. Automatic extraction of surface structures in digital shape reconstruction. *Computer-Aided Design*, **39**(5), 379 – 388. Geometric Modeling and Processing 2006 Geometric Modeling and Processing 2006.
- Vernadat, F. 1999. *Techniques de modélisation en entreprise : applications aux processus opérationnels*. Economica.
- VPERI. 2003. *Army research office virtual parts engineering research initiative*. <http://www.cs.utah.edu/gdc/Viper/Collaborations/VPERI-Final-Report.pdf>.
- Wang, J., Gu, D., Yu, Z., Tan, C., & Zhou, L. 2012. A framework for 3D model reconstruction in reverse engineering. *Computers & Industrial Engineering*, **63**(4), 1189 – 1200.
- Wang, M., & Tseng, Y. 2004. LIDAR data segmentation and classification based on octree structure. *In : Proceedings of the ISPRS Congress, Commission 3*.
- Xia, Z. 2014. Application of Reverse Engineering based on Computer in Product Design. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, **9**(5), 343–354.
- Xiao, D., Lin, H., Xian, C., & Gao, S. 2011. {CAD} mesh model segmentation by clustering. *Computers & Graphics*, **35**(3), 685 – 691.

- Xiao, J., Zhang, J., Adler, B., Zhang, H., & Zhang, J. 2013. Three-dimensional point cloud plane segmentation in both structured and unstructured environments. *Robotics and Autonomous Systems*, **61**(12), 1641 – 1652.
- Xue, C., Hunag, C., Kusiak, A., & Li, P. 1996. Representation of functions and features in detail design. *Computer-Aided Design*, **28**(12), 961 – 971.
- Yang, M., & Lee, E. 1999. Segmentation of measured point data using a parametric quadric surface approximation. *Computer-Aided Design*, **31**(7), 449 – 457.
- Yokoya, N., & Levine, M.D. 1989. Range image segmentation based on differential geometry : a hybrid approach. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, **11**(6), 643–649.
- Yoon, D.H., Kang, H.J., Choi, J., Kim, D.E., & Xin, Huang, X. 2015. 3D Point Cloud Data Basis Shape Management for Assembly of Modularized Large and Complicated Marine Structures. *International Journal of Manufacturing Engineering*, **2015**.
- Zhao, H. 2010. *MULTISENSOR INTEGRATION AND DISCRETE GEOMETRY PROCESSING FOR COORDINATE METROLOGY*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- Zhao, H., Anwer, N., & Bourdet, P. 2013. Curvature-based Registration and Segmentation for Multisensor Coordinate Metrology. *Procedia {CIRP}*, **10**(0), 112 – 118. The Twelfth {CIRP} Conference on Computer Aided Tolerancing.
- Zhao, Z., & Shah, J.J. 2005. Domain independent shell for DfM and its application to sheet metal forming and injection molding. *Computer-Aided Design*, **37**(9), 881 – 898. CAD' 04 Special Issue : Product Design, Integration and Manufacturing.

Résumé

Le processus de rétro-conception (RC), dans la littérature, permet de retrouver un modèle CAO pauvrement paramétré, les modifications sont difficilement réalisables. C'est à partir de ce dernier et d'un logiciel de FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) qu'une gamme de fabrication est générée.

Cette thèse propose une méthode de RC de composants mécaniques dans un contexte de fabrication, nommée « Reverse Engineering For Manufacturing ». Une gamme de fabrication incluant les informations de type opérations d'usinage, posages, phases... est obtenue. Une fois cette gamme générée, elle sera stockée afin d'être réutilisée sur des cas similaires.

L'intégration des contraintes métier dans le processus de RC fait penser aux concepts de Design For Manufacturing (DFM) et Knowledge Based Engineering (KBE). La réutilisation de stratégies d'usinage afin de supporter le contexte récurrent fait penser aux travaux sur le « Shape Matching ». En effet, des travaux sur les descripteurs topologiques permettent de reconnaître, après numérisation, la nature d'une pièce et ainsi appliquer une stratégie d'usinage existante. Cette thèse propose donc un rapprochement entre deux domaines de recherches : la reconnaissance de formes (Shape Matching) et les méthodes de gestion des données techniques (DFM et KBE).

Cette thèse vise à proposer une nouvelle approche de RC dans un contexte d'usinage, et à développer un démonstrateur de RC qui permet de gérer les aspects récurrents de la RC en réutilisant des cas d'études connus.

Mots-clés : Rétro-ingénierie (informatique) ; Gammes d'usinage ; Gestion des connaissances ; Reconnaissances des formes (informatique) ; Conception assistée par ordinateur.

Abstract

Reverse Engineering (RE) process, in the literature, allows to find a poorly parametrized CAD model, the changes are very difficult. It is from this CAD model and a CAM (Computer Aided Manufacturing) software that a CAPP (Computer Aided Process Planning) model is generated.

This thesis proposes a RE methodology of mechanical components in a manufacturing context, called "Reverse Engineering For Manufacturing". A CAPP model including information like machining operations, fixtures, steps... is obtained. Once this CAPP generated, it will be stored for reuse in similar cases.

The integration of design intents in the RE process requires the use of Design For Manufacturing (DFM) and Knowledge Based Engineering (KBE) concepts. The reuse of machining strategies to support the recurrent context requires the use of Shape Matching works. Indeed, works on topological descriptors allow to recognize, after scanning, the nature of a part and thus apply an existing machining strategy. This thesis proposes to combine two research domains : Shape Matching and technical data management methodologies (DFM and KBE).

This thesis aims to propose a new RE approach in machine context, and to develop a RE viewer for managing recurrent aspects of RE by reusing known case studies.

keywords : Reverse Engineering ; Machining ; Knowledge Management ; Pattern recognition systems ; Computer-Aided Design.

Salam ALI

Doctorat : Systèmes Mécaniques et Matériaux

Année 2015

La rétro-conception de composants mécaniques par une approche « concevoir pour fabriquer »

Le processus de rétro-conception (RC), dans la littérature, permet de retrouver un modèle CAO pauvrement paramétré, les modifications sont difficilement réalisables. C'est à partir de ce dernier et d'un logiciel FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) qu'une gamme de fabrication est générée.

Cette thèse propose une méthodologie de RC de composants mécaniques dans un contexte de fabrication, nommée « Reverse Engineering For Manufacturing ». Une gamme de fabrication incluant les informations de type opérations d'usinage, posages, phases... est obtenue. Une fois cette gamme générée, elle sera stockée afin d'être réutilisée sur des cas similaires.

L'intégration des contraintes métier dans le processus de RC fait penser aux concepts de Design For Manufacturing (DFM) et Knowledge Based Engineering (KBE). La réutilisation de stratégies d'usinage afin de supporter le contexte récurrent fait penser aux travaux sur le « Shape Matching ». En effet, des travaux sur les descripteurs topologiques permettent de reconnaître, après numérisation, la nature d'une pièce et ainsi appliquer une stratégie d'usinage existante. Cette thèse propose donc un rapprochement entre deux domaines de recherches: la reconnaissance de formes (Shape Matching) et les méthodologies de gestion des données techniques (DFM et KBE).

Cette thèse vise à proposer une nouvelle approche de RC dans un contexte d'usinage, et à développer un démonstrateur de RC qui permet de gérer les aspects récurrents de la RC en réutilisant des cas d'études connus.

Mots clés : rétro-ingénierie (informatique) - gestion des connaissances - conception assistée par ordinateur - gammes d'usinage - reconnaissances des formes (informatique).

Reverse Engineering For Manufacturing (REFM)

Reverse Engineering (RE) process, in the literature, allows to find a poorly parametrized CAD model, the changes are very difficult. It is from this CAD model and a CAM (Computer Aided Manufacturing) software that a CAPP (Computer Aided Process Planning) model is generated.

This thesis proposes a RE methodology of mechanical components in a manufacturing context, called "Reverse Engineering For Manufacturing". A CAPP model including information like machining operations, fixtures, steps... is obtained. Once this CAPP generated, it will be stored for reuse in similar cases.

The integration of design intents in the RE process requires the use of Design For Manufacturing (DFM) and Knowledge Based Engineering (KBE) concepts. The reuse of machining strategies to support the recurrent context requires the use of Shape Matching works. Indeed, works on topological descriptors allow to recognize, after scanning, the nature of a part and thus apply an existing machining strategy. This thesis proposes to combine two research domains: Shape Matching and technical data management methodologies (DFM and KBE).

This thesis aims to propose a new RE approach in a machine context, and to develop a RE viewer for managing recurrent aspects of RE by reusing known case studies.

Keywords: reverse engineering - knowledge management - computer-aided design - machining - pattern recognition systems.

Thèse réalisée en partenariat entre :

