



HAL
open science

Traitements géométriques et fouille de données pour la reconnaissance d'entités d'usinage complexes

Soumiya Bendjebla

► **To cite this version:**

Soumiya Bendjebla. Traitements géométriques et fouille de données pour la reconnaissance d'entités d'usinage complexes. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Paris-Saclay, 2020. Français. NNT : 2020UPASN002 . tel-02881116

HAL Id: tel-02881116

<https://theses.hal.science/tel-02881116>

Submitted on 25 Jun 2020

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.

Traitements géométriques et fouille de données pour la reconnaissance d'entités d'usinage complexes

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n°579, sciences mécaniques et énergétiques, matériaux
et géosciences (SMEMAG)
Spécialité de doctorat: Génie Mécanique
Unité de recherche : LURPA
Réfèrent : ENS Paris-Saclay

Thèse présentée et soutenue à Cachan, le 06 février 2020, par

Soumiya BENDJEBLA

Composition du Jury

Benoit FURET Professeur des Universités, Université de Nantes – LS2N	Président
Vincent CHEUTET Professeur des Universités, INSA Lyon – DISP	Rapporteur
Laurent TAPIE Maître de Conférences HDR, Université Sorbonne Paris Nord – URB2I	Rapporteur
William DERIGENT Maître de Conférences HDR, Université de Lorraine – CRAN	Examineur
Marija JANKOVIC Professeur des Universités, CentraleSupélec – LGI	Examinatrice
Nabil ANWER Professeur des Universités, Université Paris-Saclay – LURPA	Directeur de thèse
Sylvain LAVERNHE Professeur des Universités, Université Paris-Saclay – LURPA	Co-Encadrant
Charyar MEHDI-SOUZANI Maître de Conférences, Université Sorbonne Paris Nord – LURPA	Co-Encadrant
Bernard HAUTBERGUE Directeur R&D, NCSIMUL, Hexagon Manufacturing Intelligence	Invité

À mes parents et mes grands-mères,

À mon frère et ma sœur.

*« Si j'ai vu si loin, c'est que j'étais monté
sur des épaules des géants. »*

Isaac Newton

Remerciements

Ce manuscrit de thèse est le résultat de plus de trois années de travail menées au sein du Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (LURPA) de l'École Normale Supérieure Paris-Saclay à Cachan. Ceci n'aurait pu être mené à bien sans un encadrement d'une très bonne qualité. C'est pourquoi j'aimerais tout d'abord remercier mes encadrants.

Je souhaite remercier en premier lieu Nabil Anwer, mon directeur de thèse, pour m'avoir donné l'opportunité de me lancer dans cette aventure en me proposant ce sujet de thèse sur une problématique qui continue à m'intéresser. Merci énormément de m'avoir partagé tes connaissances, pour tes conseils et tes remarques pertinentes qui m'ont fait avancer dans mon raisonnement.

J'adresse aussi de chaleureux remerciements à Sylvain Lavernhe pour m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de tes compétences et de ta rigueur intellectuelle. Merci pour ta disponibilité et toutes les heures que tu m'as consacrées. Merci énormément pour ta lecture enrichissante de chacun des chapitres de ce manuscrit ainsi que pour tes multiples conseils et remarques constructives.

J'adresse également mes remerciements à Charyar Mehdi-Souzani pour avoir participé à mon encadrement. Merci pour tes conseils et tes retours critiques notamment lors de la correction de ce manuscrit, me permettant ainsi de l'améliorer.

Merci à vous trois pour votre écoute et votre compréhension tout au long de ce travail ; et pour avoir été toujours présents à mes côtés et pour m'avoir orienté tout en me laissant l'autonomie qui m'a permis de m'évoluer, de tirer le meilleur de moi-même et être fier aujourd'hui du travail réalisé.

J'adresse aussi mes remerciements aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer mes travaux de thèse. Je remercie M. Benoit Furet pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury. Je souhaite remercier M. Laurent Tapie et M. Vincent Cheutet d'avoir accepté de rapporter mes travaux. Je tiens également à remercier Mme. Marija Jankovic et M. William Derigent pour avoir accepté d'examiner mes travaux. Je vous remercie tous pour vos retours critiques, vos questions variées et pour l'intérêt porté à mes travaux.

Je tiens également à remercier l'ensemble des partenaires du consortium du projet LUCID pour la qualité des échanges que nous avons pu avoir pendant les trois années

du projet. Je souhaite notamment remercier Bernard Hautbergue pour l'intérêt porté à mes travaux de thèse et pour avoir participé à mon jury en qualité de membre invité ; Philippe Rameix et Dmitry Bondarenko pour m'avoir toujours réglé les petits soucis que je rencontrais de temps en temps avec NCSIMUL (Hexagon Manufacturing Intelligence) ; Philippe Audinet et Éric Baudoin pour m'avoir fourni les gammes d'usinage qui convenaient à mon besoin et qui m'ont permis ainsi d'illustrer mon approche et de la valider à travers une étude de cas industriel (Safran AE). Je remercie également les partenaires académiques pour les discussions très riches scientifiquement : Alexandre Durupt et Emeric Ostermeyer (UTC) ; et notamment Christophe Rodrigues et Pegah Alizadeh pour tous les échanges autour des problématiques liées aux sciences des données (ESILV). Je vous remercie tous pour votre sympathie. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler, à apprendre et à m'évoluer avec vous.

Un grand remerciement à tous les membres du LURPA que j'ai côtoyé, pour l'ambiance conviviale, particulièrement favorable pour bien mener ces travaux de thèse. Merci à tous les doctorants pour tous les moments passés ensemble durant ces années autour des différentes traditions du laboratoire, notamment aux docteurs : Yassir A., Kamel E., Sif Eddine S., Zuowei Z. (Christopher), Kévin G., et Minh P., qui sont partis l'un après l'autre, laissant chacun un vide irremplaçable, et au futur docteur Yifan Q., pour m'avoir accompagné pendant ces derniers mois de rédaction avec mes très longues journées de travail, avec ses fameuses questions : « *What is your plan for this evening? At what time will you finish?* ».

Merci à mes co-bureaux : Sylvain F., Ting L., Zhiqiang Z. (Éric), avec une pensée spéciale à l'irremplaçable Dr. Jean-Loup G. avec qui j'ai commencé et je termine la thèse pratiquement en même temps. Merci pour l'ambiance conviviale et studieuse que nous avons eue au cours de ces années de thèse au bureau 23 (*le bureau le plus calme, sérieux, varié, rangé, ... avec modestie, le meilleur bureau!*). Merci pour toutes les discussions scientifiques et même non scientifiques dans lesquelles nous abordons tous les sujets qui nous passionnent. Dans tout cela, il ne faut pas oublier la touche unique et spéciale de notre voisin Florian G. qui a toujours eu une place avec nous même s'il passe généralement pour nous embêter. Merci pour tous les fous rires que j'ai eus en votre compagnie surtout en fin de rédaction.

Je tiens tout particulièrement à remercier Dr. Na C. (Eva) avec qui j'ai aimé travailler et collaborer, et avec qui j'ai appris beaucoup de choses notamment la rédaction de papiers. Je remercie aussi Claudine C., Philippe C. et Marc J. pour leurs aides aux tâches administratives, techniques et informatiques.

Je souhaite aussi remercier mes amies. Merci Safia L. pour tous tes messages d'encouragements. Merci Lydia T. d'être venue assister à ma soutenance. Merci au future docteur Najla G. (*la seule amie que je me suis faite depuis mon arrivée en France*) de m'avoir aidé à préparer le pot de soutenance le jour J., et je te souhaite beaucoup de courage pour ta dernière ligne droite. Sans oublier les copines H.B.Biennes (Rebiha S.,

Dr. Meriem El-Batoul F., Feriel M., Nesrine B.), qui sont toujours fières de moi, malgré les distances. J'adresse aussi des chaleureux remerciements à la meilleure Dr. Sarah S. qui a toujours été là pour moi. Nous avons passé un bout de chemin de notre vie ensemble. J'associe à ces remerciements son mari et mon ancien camarade, Ahmed K. qui a tenu à filmer l'intégralité de ma soutenance et m'offrir ainsi un bon souvenir de cette réussite (*Il est temps pour toi de soutenir aussi, n'est-ce pas?*). D'ailleurs, je dédie cette réussite à tous les enseignants que j'ai eus dans mon parcours scolaire et universitaire, parce que chacun à son niveau m'a appris quelque chose, m'a aidé à me développer, à me construire pour arriver là où je suis aujourd'hui. Spéciales pensées à mes enseignants du collège qui étaient les premiers à avoir cru en moi. En outre, M. Zoubir Hamidi et Mme. Djohra Meguedmi qui m'ont beaucoup soutenu et encouragé.

Maintenant, c'est vers ma famille que se tourne ma gratitude. Merci à vous tous d'avoir cru en moi dès le début. Je ne vais pas vous citer tous, vous allez surement vous reconnaître. Mais, je dois citer mes deux références : mes grands-mères qui m'ont toujours protégé avec leurs prières. Je désire grandement remercier Abdelghani et Sadette (*tonton et tata*), et les enfants, pour votre hospitalité et votre accueil chaleureux à chaque fois que je vous rends visite. Je savais toujours que je peux compter sur vous. Je n'oublie pas non plus Soumia et Amira. Merci énormément pour votre aide et vos différents conseils surtout au début de mon installation il y a déjà plus de quatre ans ; et merci Amira d'être venue à ma soutenance.

Mes remerciements vont aussi à mon frère, Redha, et ma sœur, Amira, qui n'ont pas cessé de m'encourager, de me consolider et de me soutenir durant ces dernières années. Merci d'avoir toujours pensé à moi et d'avoir été toujours présents dans ma vie (*malgré que des fois, je suis insupportable, je l'avoue!*).

Ces remerciements ne peuvent s'achever, sans remercier les piliers fondateurs de ce que je suis devenue aujourd'hui, mes parents : Ali et Nadia. C'est l'occasion pour moi de vous remercier pour m'avoir donné l'opportunité d'aller rattraper mes rêves et de m'avoir épaulé durant ces dernières années loin du loyer familial, mais pas seulement. Merci de m'avoir donné l'impulsion du savoir et d'avoir bien exploité mon énergie et mes compétences, dès mon jeune âge. C'est l'intérêt que vous aviez toujours porté à ma scolarité, qui m'a permis aujourd'hui de tracer mon chemin et atteindre ce niveau, me retrouver et surtout me prouver. Merci également pour votre amour, vos attentions, votre éducation et vos qualités sur lesquels je me base pour me construire.

Et pour finir, merci à mes plantes pour la sérénité qu'elles m'ont apportée en les regardant pousser au bureau jour après jour.

Respectueusement,
Dr. Soumiya Bendjebba

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	v
Table des figures	ix
Liste des tableaux	xiii
Liste d'acronymes	xv
Nomenclature	xvii
Glossaire	xix
Introduction générale	1
Chapitre 1. Entités d'usinage - État de l'art	11
1 Introduction	13
2 La notion d'entité dans la chaîne numérique de fabrication	13
2.1 La modélisation par entités	14
2.2 Techniques d'intégration des entités	15
2.3 L'entité dans le cadre STEP et STEP-NC	16
3 L'entité d'usinage	19
3.1 Définition et caractérisation	19
3.2 L'entité d'usinage dans le contexte STEP-NC	23
4 L'entité d'usinage complexe	26
5 Classification des entités d'usinage	30
5.1 Taxonomies de formes régulières	31
5.2 Taxonomies de formes complexes	34
5.3 Taxonomies STEP-NC	39
6 Conclusion	41

Chapitre 2. Modélisation et traitement des données de la chaîne numérique de fabrication	43
1 Introduction	45
2 La chaîne numérique de fabrication	45
3 Extraction et traitement des données de la chaîne numérique de fabrication	47
3.1 Les données géométriques issues de la CAO	47
3.2 Les données d’usinage issues de la FAO et de la simulation.....	53
3.2.1. La fabrication assistée par ordinateur.....	53
3.2.2. La simulation d’usinage.....	55
4 Structuration hiérarchique des données pour la caractérisation de l’entité d’usinage	57
4.1 Structuration des données géométriques	58
4.2 Structuration des données d’usinage.....	60
4.3 Caractérisation de l’entité d’usinage complexe	61
5 Conclusion	63
Chapitre 3. Partitionnement des données de la chaîne numérique pour la caractérisation de l’entité d’usinage complexe	67
1 Introduction	69
2 Mise en correspondance entre la géométrie et la trajectoire.	71
3 Analyse des données d’usinage	75
3.1 Sélection des données	75
3.2 Prétraitement des données	77
3.3 Transformation des données	78
3.3.1. Etude de corrélation	78
3.4 Clustering des données.....	81
4 Découpage de la forme complexe	84
4.1 Segmentation à base de la courbure.....	84
4.1.1. Identification du type de surface	85
4.1.2. Identification des bords.....	87
4.1.3. Regroupement des points	87

4.1.4. Génération des régions	88
4.2 Segmentation à base de la courbure et de la visibilité	90
4.2.1. Analyse de visibilité.....	90
4.2.2. Procédure de segmentation à base de la courbure et de la visibilité	93
4.2.2.1. Analyse de visibilité	94
4.2.2.2. Regroupement des régions.....	95
4.3 Segmentation technologique orientée région.....	97
5 Caractérisation et classification de l'entité d'usinage complexe multi-niveaux.....	99
5.1 Caractérisation de l'entité d'usinage.....	99
5.2 Classification des entités d'usinage complexes	101
6 Réutilisation des données d'usinage	103
6.1 Approche de réutilisation orientée <i>région</i>	104
6.1.1. Mesure de similarité	104
6.1.2. Technique de mesure de similarité orientée <i>région</i>	107
6.1.2.1. Echantillonnage des régions	108
6.1.2.2. Calcul des distances	109
6.1.2.3. Génération des distributions de forme	110
6.1.2.4. Calcul de la similarité	111
6.2 Approche de réutilisation orientée <i>entité</i>	111
6.3 Réutilisation des données d'usinage.....	112
7 Conclusion.....	113
Chapitre 4. Étude de cas	117
1 Introduction	119
2 Traitements de cas existants.....	120
2.1 Extraction des données de la chaîne numérique.....	121
2.1.1. Données géométriques.....	121
2.1.2. Données d'usinage.....	123
2.2 Mise en correspondance	125
2.3 Analyse des données	127

2.4	Découpage topologique.....	131
3	Traitements de nouveaux cas.....	139
3.1	Extraction des données géométriques.....	140
3.2	Découpage topologique.....	141
3.3	Réutilisation des données à travers une mesure de similarité...	142
4	Conclusion.....	146
	Conclusion et perspectives	149
	Bibliographie	157
	Annexes	
A	Analyse en composantes principales	I
B	K-means	V
C	Théorie des graphes	IX

Table des figures

1. Projet LUCID (FUI21).....	6
2. Démarche des travaux de la thèse.....	7
3. Approches de modélisation par entités [Salomons et al., 1993].....	16
4. Flux d'information dans le fichier STEP-NC [Newman et al., 2008].....	17
5. Structure d'un fichier STEP-NC [ISO 14649–10:2002].....	18
6. Structure de l'entité d'usinage [Peng et al., 2017].....	20
7. Modélisation de l'entité d'usinage [Wang et al., 2006].....	22
8. Caractérisation de l'entité d'usinage dynamique [Wang et al., 2017].....	23
9. Définition de l'entité d'usinage dans le contexte STEP-NC [Mokhtar et al., 2009].....	24
10. Modélisation de l'entité d'usinage (outillage de forgeage) [Tapie et al., 2009].....	27
11. Modélisation de l'entité d'usinage (aéronautique) [Zirmi et Paris, 2005].....	28
12. Modèle UML de l'entité d'usinage [Chu et al., 2016].....	30
13. Evolution dynamique de l'entité d'usinage [Liu et al., 2016].....	30
14. Taxonomie de Pratt et Wilson [Wilson et Pratt, 1988].....	32
15. Taxonomie de Gindy [Gindy, 1989].....	32
16. Taxonomie de Yan <i>et al.</i> [Yan et al., 2000].....	33
17. Taxonomie de Anwer [Anwer, 2000a].....	34
18. Taxonomie de Poldermann et Horvath [Poldermann et Horváth, 1996].....	35
19. Taxonomie de Fontana <i>et al.</i> [Fontana et al., 1999].....	35
20. Taxonomie de Gupta et Gurumoorthy [Gupta et Gurumoorthy, 2013].....	36
21. Taxonomie de Tapie <i>et al.</i> [Tapie et al., 2009].....	37
22. Taxonomie de Zirmi [Zirmi, 2006].....	38
23. Classification d'entités de fabrication selon la norme STEP-NC [ISO 14649–10:2002].....	40
24. Chaîne numérique en usinage.....	46
25. Géométrie différentielle discrète.....	49
26. Estimation du vecteur normal à la face [Zhao, 2010].....	50
27. 10 types de surfaces définies par le shape index.....	51
28. Définition de la convexité/concavité des arêtes.....	52
29. Structuration hiérarchique de la représentation triangulaire.....	58
30. Structure hiérarchique des données géométriques.....	59
31. Structure hiérarchique des données d'usinage.....	60

32. Modélisation multi-niveaux de l'entité d'usinage complexe.....	62
33. Processus de découpage basé sur les données de la chaîne numérique ..	70
34. Maillage de la pièce et trajectoire de l'outil.....	71
35. Trajectoire de l'outil.....	72
36. Points caractéristiques suivant la géométrie de l'outil [Duc, 1998].....	72
37. Mise en correspondance entre le maillage et la trajectoire.....	73
38. Cartographies des paramètres de coupe.....	74
39. Matrice des données	76
40. Variation de la vitesse de coupe et le rayon effectif.....	79
41. Cercle de corrélation.....	80
42. Résultats du k-means dans l'espace des paramètres de coupe	82
43. Résultats du k-means projetés sur la trajectoire de l'outil.....	82
44. Variation de Fz au cours du temps	83
45. Procédure de segmentation à base de la courbure	84
46. Classification des surfaces basée sur la courbure moyenne et gaussienne	85
47. Carte de l'indice de forme (couleur et intervalle par type de surface) [Zhao et al., 2013].....	86
48. Carte de l'intensité de courbure [Zhao, 2010]	86
49. Résultats de la segmentation à base de la courbure	89
50. Exemples de G-map et de V-map.....	92
51. Procédure de segmentation à base de la courbure et de la visibilité.....	93
52. Visibilité locale d'un point de la surface.....	94
53. Visibilité globale d'un point de la surface.....	95
54. Résultats de la segmentation à base de la courbure et de la visibilité ..	96
55. Procédure de la segmentation technologique orientée région	97
56. Variation de paramètres de coupe (Fz) sur une région géométrique.....	98
57. Résultats de la segmentation technologique orientée région	99
58. Graphe d'adjacence	100
59. Graphe d'adjacence de l'entité.....	100
60. Classification des entités d'usinage complexe	102
61. Procédure de la réutilisation des données d'usinage	104
62. Fonctions de forme de la distribution de forme	106
63. Echantillonnage aléatoire des points sur une face triangulaire [Osada et al., 2002].....	109
64. Distributions de forme.....	110
65. Démarche de l'étude de cas.....	119
66. Pièce « Impeller ».....	120
67. Gamme d'usinage de la pièce sur NCSIMUL	121
68. (a) Modèle géométrique de la pièce (b) Motif répétitif.....	122
69. (a) Modèle surfacique de l'interpale (b) Maillage de l'interpale	122
70. Modèle de l'interpale avec la trajectoire de l'outil sur NCSIMUL.....	124

71. Modèle de l'interpale avec la surface finie après simulation	124
72. Trajectoire de l'outil.....	125
73. Cartographies des paramètres de coupe.....	126
74. Variation des paramètres de coupe (Vc, Fz, F).....	128
75. Variation des paramètres de coupe (Vc, Fz, F) après l'opération de nettoyage.....	129
76. Cercle de corrélation.....	130
77. Identification du type de surface et des bords	131
78. Résultats de la segmentation à base de la courbure de l'interpale.....	132
79(a). Variation des paramètres de coupe sur la région (a).....	133
79(b). Variation des paramètres de coupe sur la région (b)	134
80. Résultats de k-means dans l'espace des paramètres de coupe « région (b) »	135
81. Indice de silhouette.....	136
82. Découpage de la région (b).....	136
83. Découpage des régions géométriques initiales	136
84. Résultats de k-means dans l'espace de paramètres de coupe des régions découpées	137
85. Résultats de k-means projetés sur la surface de l'interpale	138
86. Résultats de la segmentation technologique orientée région de l'interpale	138
87. Pièce « Impeller 2 »	139
88. Motif répétitif (a) Impeller 1 (b) Impeller 2	140
89. Modèle géométrique de la surface « Interpale 2 ».....	140
90. Identification du type de surface et des bords	141
91. Résultats de la segmentation à base de la courbure de l'interpale 2 ..	142
92. Régions prises en considération dans l'analyse de similarité.....	143
93. Distributions de formes pour les régions des deux pièces.....	144
94. Appariement des régions similaires sur les deux pièces.....	145
A.1. Représentation de la variance expliquée en (%)	III
A.2. Représentation des variables sur le plan factoriel	IV
B.1. Algorithme « <i>Elbow</i> »	VI
B.2. Algorithme de K-means	VII

Liste des tableaux

1. Définitions d'entité.....	14
2. Spécifications des types de surface en fonction du shape index	51
3. Données d'usinage récupérées de la simulation d'usinage (NSCIMUL) ..	57
4. Matrice de corrélation	78
5. Résultats de la mesure de similarité	111
6. Détails de la gamme d'usinage	123
7. Matrice de corrélation des paramètres de coupe.....	130
8. Variations des paramètres de coupe par cluster	137
9. Résultats de la mesure de similarité	145
A.1. Coefficients de définition des composantes principales.....	II
A.2. Valeurs propres et variance expliquée en (%).....	III

Liste d'acronymes

ACP	: Analyse en Composantes Principales
ANGEL	: Atelier Numérique coGnitif intEropérable et agiLe
B-Rep	: Boundary Representation
CAO	: Conception Assitée par Ordinateur
CFAO	: Conception et Fabrication Assitée par Ordinateur
CN	: Commande Numérique
CNC	: Computer Numerical Control
CNN	: Convolutional Neural Network
CP	: Composante Principale
DCN	: Directeur de Commande Numérique
FAO	: Fabrication Assistée par Ordinateur
G-map	: Gauss map (carte Gaussienne)
GPS	: Geometrical Product Specifications
IGES	: Initial Graphics Exchange Specification
ISO	: International Organization for Standardization
KDD	: Knowledge Discovery in Databases
LUCID	: Laboratoire d'Usinage par Caractérisation Intelligente des Données
MOCN	: Machine-Outil à Commande Numérique
NCS	: NC SIMUL
NURBS	: Non Uniform Rational B-Spline
OFF	: Object File Format
PA	: Protocole d'Application
PLY	: Polygon File Format
PMI	: Product Manufacturing Information
PP	: Post-Processeur
STEP	: Standard for the Exchange of Product Data
STEP-NC	: STEP compliant Numerical Control
STL	: STéreo Litographie
UML	: Unified Model Language
V-map	: Visibility map (carte de visibilité)
XML	: Extensible Markup Language

Nomenclature

V	: Vertex (Sommet)
E	: Edge (Arête)
F	: Face (Facette)
d_E	: Vecteur directeur de l'arête E
n_F	: Vecteur normal à la face F
n_V	: Vecteur normal au sommet V
K_1	: Courbure maximale
K_2	: Courbure minimale
s	: Shape index (Indice de forme)
c	: Curvedness (Intensité de courbure)
m	: Convexité/Concavité des arêtes
XYZ	: Position du point piloté de l'outil
IJK	: Orientation de l'axe de l'outil
Vc	: Vitesse de coupe (m/min)
S	: Fréquence de rotation de la broche (tr/min)
F	: Vitesse d'avance sur la trajectoire (mm/min)
Fz	: Avance par dent ($mm/dent$)
h	: Épaisseur de copeaux (mm)
Ap	: Profondeur de passe (mm)
Ae	: Épaisseur de passe (mm)
Ad	: Aire usinée (mm^2)
K	: Courbure Gaussienne
H	: Courbure moyenne
C_L	: Point extrémité d'outil
C_E	: Point centre d'outil

\mathbf{G}	: Graphe d'adjacence valué
\mathbf{G}^+	: Graphe de conditionnement
d_g	: Distance géométrique
d_e	: Distance Euclidienne
d_c	: Distance de courbure
ρ	: Rayon de courbure

Opération d'usinage	Travail d'un outil qui produit une et une seule forme géométrique.
Séquence d'usinage	Suite ordonnée ininterrompible d'opérations d'usinage.
Processus d'usinage	Suite ordonnée interrompible de séquences d'usinage. Il représente l'enchaînement des séquences d'usinage conduisant à la réalisation d'une forme géométrique connue du fabricant. L'ordre des séquences d'usinage d'un processus est impératif.
Gamme d'usinage	Ensemble des informations, plus au moins détaillées, relatives à la réalisation d'une pièce.
Stratégie d'usinage	Méthodologie utilisée pour générer une opération d'usinage. Elle se compose principalement d'une direction de guidage et d'un mode de balayage.
Mode de balayage (Mode de parcours)	Paramètre permettant de définir le sens de parcours des trajets obtenus à partir de la direction d'usinage. Il est lié au mode de coupe.
Direction de guidage (Direction d'usinage)	Paramètre permettant de définir le plan suivant lequel le trajet est décrit.
Mode de coupe	Paramètre permettant de définir si lors de l'usinage l'outil sera utilisé en avalant et/ou en opposition. -En avalant : l'outil avance dans le sens de sa rotation. -En opposition : la direction de l'avance est opposée au sens de rotation de l'outil.

Trajectoire	Combinaison de positionnement, de parcours de l'outil et d'un format de description.
Positionnement de l'outil	Défini par le couple (C_L, u) définissant la position de l'outil et l'orientation de son axe par rapport à la pièce.
Parcours de l'outil	Enchaînement des positionnements outils sur la surface pour l'usiner. Il est déterminé par la donnée d'un mode de balayage permettant d'usiner la totalité de la surface tout en évitant les collisions et par la donnée d'un ensemble de paramètres opératoires (hauteur de crête, tolérance d'usinage).
Format de description	Moyen d'interpréter la géométrie de la trajectoire d'usinage, sous forme de : <ul style="list-style-type: none">-Segments de droites (interpolation linéaire),-Cercles (interpolation circulaire),-Courbes (interpolation polynomiale).
Chaîne numérique de fabrication	Enchaînement de traitements nécessaires à la réalisation d'un produit depuis la conception jusqu'à sa fabrication. Elle se compose de cinq grandes étapes : CAO, FAO, PP, simulation d'usinage et exécution sur MOCN.
Analyse en Composantes Principales	Technique de réduction des variables permettant de combiner les variables initiales corrélées pour définir un ensemble de variables artificielles appelées composantes principales (PC).
Corrélation	Technique de réduction des variables permettant de décrire la relation entre deux variables ou plus.
Knowledge Discovery in Databases	Process d'analyse des données en utilisant les techniques de data mining.
Simulation d'usinage	Reproduction virtuelle de l'enlèvement de matière afin de vérifier et corriger les programmes d'usinage.

Mapping	Mise en correspondance entre les sommets du maillage et les points discrétisés de la trajectoire de l'outil.
Clustering	Technique d'apprentissage non-supervisée permettant de partitionner un ensemble de données en différents paquets homogènes.
K-means	Technique de clustering non hiérarchique permettant de regrouper les individus similaires en groupes (ou clusters) tout en cherchant à minimiser la variabilité dans le même cluster et maximiser la variabilité entre les clusters.
G-map	Projection des normales de la surface sur une surface sphère unitaire.
V-map	Ensemble d'orientations visibles par l'outil pour un point de la surface.

Introduction générale

La révolution numérique dans le monde de la fabrication au début du XXI^e siècle a permis de mettre en place une nouvelle génération d'usines connectées, robotisées et intelligentes dans lesquelles les hommes, les machines et les produits interagissent. Il s'agit de l'industrie 4.0, où l'usine du futur, qui vient effacer la frontière entre le monde réel et le domaine du virtuel permettant aux intervenants de suivre les produits tout au long de leur cycle de vie et d'obtenir ainsi un accès rapide à davantage d'informations pour améliorer leur prise de décision et gagner en efficacité.

Dans cet environnement industriel de plus en plus compétitif et dynamique, une fabrication efficace et de haute qualité est toujours confrontée à de nouveaux défis. Pour les relever, de nouvelles technologies numériques telles que la réalité augmentée, l'intelligence artificielle, l'internet des objets, la maquette numérique sont de plus en plus exploitées. L'application de ces technologies dans l'usine 4.0 permet de transformer le développement, les moyens de production et l'organisation des entreprises.

Dans ce contexte global, la numérisation de la chaîne de fabrication, qui couvre le processus d'industrialisation et de fabrication, représente un élément clé dans la démarche de l'usine du futur. Malgré les avancées et les développements considérables de la maquette numérique, au cours de ces dernières années, l'exploitation de la chaîne numérique fait toujours face à plusieurs enjeux et problématiques.

La chaîne numérique regroupe l'ensemble des étapes nécessaires à la réalisation d'une pièce allant de la conception jusqu'à l'usinage sur les machines-outils à commandes numériques. Au niveau de chaque étape de ce processus, diverses données et informations sont générées. Ceci nécessite l'utilisation de différents types de fichiers et formats numériques. Ces formats de fichiers sont souvent propriétaires et ne décrivent pas l'ensemble des informations disponibles. Ils sont spécifiques pour chacune des étapes de la chaîne (modèle CAO, modèle FAO, fichier APT, fichier Code G). Dans le but d'avoir une chaîne numérique flexible, il est essentiel de garantir la continuité numérique : l'interopérabilité. Cette dernière désigne la capacité d'échanger des données entre les différents éléments d'un système de façon transparente [Ray et Jones, 2006].

Dans ce cadre, le projet industriel ANGEL « *Atelier Numérique coGnitif intEroperable et agiLe* », réalisé en collaboration avec des industriels et des universitaires, entre 2012 et 2014, avait pour objectif d'améliorer la chaîne numérique de fabrication en se basant sur une approche orientée entité. La modélisation par entités devient de plus en plus un élément essentiel pour la spécification et l'intégration des connaissances en ingénierie de produit dans la chaîne numérique. En s'intéressant à la problématique d'hétérogénéité des données d'usinage,

ANGEL a permis de poser les bases d'une nouvelle chaîne numérique bidirectionnelle basée sur le standard STEP-NC en assurant une gestion standardisée et intégrée des données manipulées par la chaîne numérique de fabrication sous un seul format et en évitant ainsi toute discontinuité dans la création et la modification des programmes d'usinage. De plus, ANGEL s'appuie sur l'exploitation du savoir-faire en usinage, à partir des programmes d'usinage existants, afin de créer de nouveaux programmes optimisés et validés pour piloter différentes machines-outils à commande numérique plus rapidement et de manière plus fiable.

En résumé, ANGEL a apporté des premiers éléments de réponse aux problèmes de gestion et d'optimisation des données d'usinage de la chaîne numérique de fabrication à base d'entités d'usinage. Cependant, il reste encore d'autres verrous à lever concernant l'exploitation des données de la chaîne numérique, la maîtrise et la capitalisation du savoir-faire pour la génération de gammes d'usinage dans le cas des formes complexes notamment. Ces développements se limitent aux entités d'usinage 2 axes et demi, et 3 axes, sans aborder les entités d'usinage complexes.

En effet, la génération des gammes d'usinage est un maillon important dans la chaîne numérique de fabrication. Dans les statistiques des pratiques industrielles, il s'est avéré que le temps alloué à la préparation de la gamme et la programmation d'usinage présente plus de 70 % de l'ensemble du processus de fabrication, alors que le temps d'usinage réel est inférieur à 30 % [Huang et al., 2019a]. Ainsi, la génération des gammes d'usinage a une influence directe sur l'efficacité de l'usinage, la qualité et le coût du produit, etc.

Pendant longtemps, la génération des gammes et la conception des programmes d'usinage étaient manuelles et dépendaient principalement des connaissances et de l'expérience des programmeurs. Ceci pose de nombreux problèmes, notamment par rapport au temps de préparation, de validation et le faible niveau d'automatisation.

Une analyse des bases de données des entreprises a conclu que 80 % de nouveaux produits sont conçus en se référant à des conceptions existantes avec une réutilisation directe ou en les modifiant légèrement. Seulement 20 % des pièces sont conçues à partir de zéro. Cette approche est applicable aussi en usinage, car deux géométries similaires correspondent souvent à des paramètres d'usinage similaires [Iyer et al., 2005].

De ce fait, le défi est de pouvoir réutiliser les données d'usinage stockées dans les bases de données des entreprises sur les nouveaux cas de manière efficace afin de générer des programmes d'usinage dans un minimum de temps et à moindre coût.

L'une des méthodologies clés qui permette de réutiliser les données d'usinage des pièces similaires est le raisonnement à partir de cas (*Case-Based Reasoning*). Le raisonnement à partir de cas est une méthodologie qui permet de résoudre de nouveaux problèmes en utilisant ou en adaptant des solutions d'anciens problèmes [Riesbeck et Schank, 2013]. Cette méthodologie est généralement décrite par quatre activités : récupérer, réutiliser, réviser et conserver. Dans le cas de la fabrication, l'idée est de récupérer des cas similaires à partir d'une bibliothèque de pièces pour le nouveau cas, puis de réutiliser la solution proposée par ce cas similaire. Si nécessaire, la solution est révisée ou adaptée pour répondre aux exigences de la nouvelle pièce. Enfin, la nouvelle solution proposée, une fois qu'elle est confirmée et validée, est conservée dans la base de connaissances pour servir à de nouveaux cas.

Dans ce contexte, plusieurs travaux de recherche ont été menés pour assurer la réutilisation des données d'usinage suivant une approche orientée entité. En effet, l'entité d'usinage a été adoptée par de nombreux systèmes de génération de gammes, en raison de sa capacité à faciliter la représentation de divers types de données de pièces sous une forme significative, nécessaire pour piloter la génération automatique de gammes. Cicirello *et al.* [Cicirello et Regli, 2001] ont proposé une approche de comparaison des entités d'usinage extraites des pièces mécaniques en utilisant les graphes de dépendance des entités d'usinage. Par ailleurs, Cardone *et al.* [Cardone et al., 2006] ont développé un algorithme pour mesurer la similitude entre les pièces en suivant une approche à base d'entités d'usinage. L'évaluation de la similarité est assurée à l'aide d'un vecteur défini par quatre paramètres relatifs à l'entité d'usinage : directions d'accessibilité, type de l'entité, tolérances dimensionnelles et la cardinalité des entités. Dans des travaux plus récents, Huang *et al.* [Huang et al., 2015] ont présenté une nouvelle approche qui combine l'évaluation de la similarité entre les entités d'usinage et les techniques de fouilles de données (*data mining*) pour assurer une réutilisation efficace des procédés d'usinage associés aux entités d'usinage similaires.

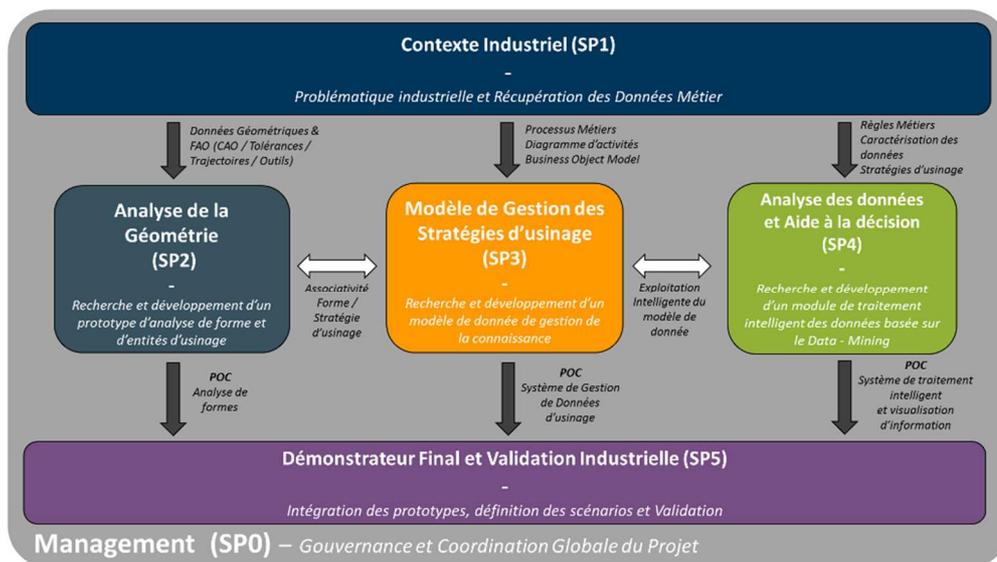
Néanmoins, la recherche sur la réutilisation des processus d'usinage basée sur les entités n'en est encore qu'à ses débuts. La preuve est que seules les formes régulières sont prises en compte dans ces différents travaux. Comme les formes non-régulières, ou complexes sont présentes dans plusieurs applications, l'intérêt porté à ce genre de géométries dans le processus de réutilisation des données d'usinage est de plus en plus croissant.

Cette nécessité a été exprimée par le lancement d'un autre projet industriel LUCID « **L**aboratoire d'**U**sinage par **C**aractérisation **I**ntelligente des **D**onnées » dans lequel s'inscrit notre travail de thèse.

Sur les fondations construites par le projet ANGEL, le projet LUCID (FUI-21) s'est attaché à répondre aux problématiques de gestion, d'intégration et d'exploitation intelligente de l'ensemble des données de la chaîne numérique pour la capitalisation des bonnes pratiques d'élaboration de programmes d'usinage dans le cas de formes complexes.

Comme l'usineur raisonne souvent par analogie à partir d'un cas qu'il connaît et qui présente une similarité avec le nouveau cas, l'idée alors est de s'appuyer sur ce savoir-faire pour constituer une base de connaissances qui va être interrogée lors de la conception de programmes d'usinage de nouveaux cas en proposant la solution la plus proche qui convient à la nouvelle pièce.

Ainsi, LUCID a pour finalité de fournir un outil d'assistance à la conception de programmes d'usinage par la valorisation des données générées par la chaîne numérique et la maîtrise de l'expérience et le savoir-faire industriel. Ceci va permettre de transmettre les connaissances métiers acquises au sein de l'entreprise aux jeunes générations et simplifier l'apprentissage des bonnes pratiques et réduire ainsi le cycle de développement du produit.



(a) Description de l'organisation du projet et les dépendances entre les sous-projets



(b) Partenaires industriels et académiques du projet

Figure 1 — Projet LUCID (FUI21)

Étant données les problématiques abordées, couvrant un large périmètre (gestion de la connaissance, utilisation de standards d'échanges, implémentation informatique, expertise métier, analyse géométrique, etc.) et nécessitant un savoir-faire varié, le projet s'est construit autour d'un consortium regroupant des industriels et des laboratoires de recherche. Il est subdivisé en sous-projets traitants de thématiques différentes, mais complémentaires permettant d'atteindre les objectifs de projet (cf. figure 1).

Comme le montre la figure 1, le LURPA a pour but de créer de nouveaux outils de traitements et d'analyse de la géométrie complexe (SP2). Dans ce contexte global, cette thèse sert de base scientifique pour la réalisation de ce sous-projet. Intitulée « *Traitements géométriques et fouille de données pour la reconnaissance d'entités d'usinage complexes* », elle se base sur une approche orientée entité pour assurer l'exploitation des données de la chaîne numérique dans le contexte des formes complexes.

Notre démarche de travail permettant d'aboutir à cet objectif est illustrée sur la figure 2 et présentée dans ce manuscrit à travers quatre chapitres.

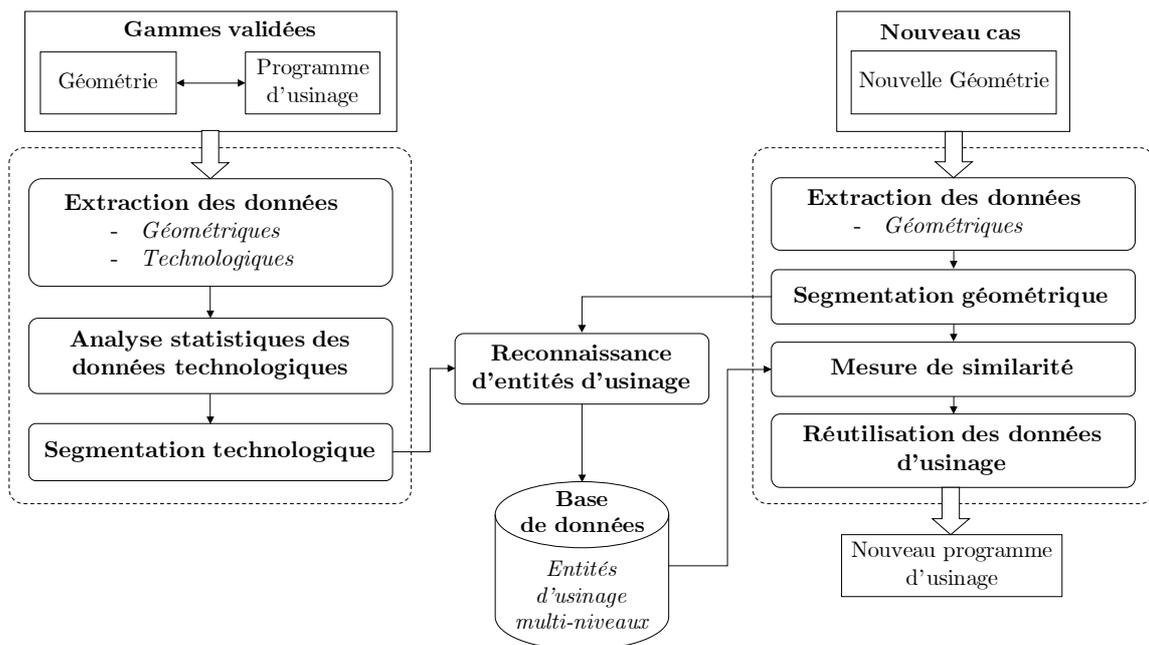


Figure 2 — Démarche des travaux de la thèse

Le chapitre 1 présente une étude bibliographique dans le domaine de la modélisation par entités, la caractérisation et la classification des entités d'usinage de formes complexes. Cette étude permet de situer les objectifs de la thèse par rapport aux différents travaux existants dans la littérature. Bien que les modèles à base d'entités d'usinage sont au centre des activités pour l'intégration CAO/FAO, l'automatisation des gammes d'usinage, l'établissement rapide de

devis de fabrication et surtout la capitalisation des connaissances en usinage, l'analyse de cet état de l'art permet d'identifier quelques verrous, vis-à-vis de l'objectif de notre travail, et de dégager ainsi trois problématiques qui ont tracé le cheminement de notre approche. Les chapitres 2 et 3 répondent chacun à une problématique particulière.

Le chapitre 2 aborde la première question de recherche : « *Comment définir l'entité d'usinage complexe en se basant sur les données de la chaîne numérique ?* ». Le développement d'outils numériques a permis de générer à chaque étape du processus d'industrialisation et de fabrication des données variées, hétérogènes et non-structurées. Dans le cas de formes complexes, il est important d'enrichir l'entité d'usinage avec les données de la chaîne numérique. Pour cela, la première étape consiste à identifier les données de la chaîne numérique dont nous disposons. Il s'agit des données géométriques, des données de la fabrication et des données issues de la simulation d'usinage. Par la suite, la mise en correspondance entre les données accessibles et leur structuration hiérarchique ont permis d'élaborer une nouvelle entité d'usinage complexe multi-niveaux.

À l'issue de cette nouvelle caractérisation de l'entité d'usinage complexe, le chapitre 3 adresse dans sa première partie, la problématique suivante : « *Comment exploiter les données de la chaîne numérique dans la caractérisation de l'entité d'usinage complexe ?* » La réponse à cette question consiste à mettre en place une méthodologie de découpage de la forme complexe en se basant sur les différentes données extraites de la chaîne numérique. Contrairement aux travaux qui proposent des méthodes de segmentation à base des données géométriques et d'autres à base des données de gamme d'usinage, notre méthodologie combine des paramètres géométriques avec des paramètres d'usinage définis à un niveau de détail plus fin pour la création de régions. D'une part, des descripteurs de forme ont été utilisés pour définir une segmentation géométrique. Cette dernière a été raffinée à travers une étude d'usinabilité basée sur une analyse de visibilité. D'autre part, une analyse statistique des données d'usinage a été effectuée. Une technique de fouille de données à base de « *clustering* » est appliquée afin de définir des groupes distincts dans l'ensemble des données d'usinage. Enfin, la combinaison des deux approches a permis de définir une nouvelle segmentation technologique orientée région. Les régions résultantes de cette segmentation ont servi à la caractérisation de l'entité d'usinage en se basant sur la théorie des graphes.

Ces développements permettent de répondre dans la deuxième partie de ce chapitre à la problématique relative à la réutilisation des données : « *Comment exploiter l'entité d'usinage dans le contexte de la réutilisation des données d'usinage ?* ». L'idée est de pouvoir réutiliser les données d'usinage et les connaissances métier dans des nouveaux cas présentant des similitudes avec des pièces déjà traitées et archivées dans la base de connaissance. Pour cela, deux approches

sont envisageables. D'une part, une approche orientée entité s'appuie sur le type d'entité d'usinage définie par un regroupement de régions pour proposer un nouveau programme d'usinage. D'autre part, une approche orientée région qui consiste à chercher, à travers une mesure de similarité, pour chaque région de la nouvelle pièce, la région, la plus similaire dans d'autres pièces. Suite à cette mesure de similarité, des paramètres d'usinage sont adaptés et associés à chaque région de la nouvelle pièce.

Le dernier chapitre, à travers une étude de cas industriel issu de l'aéronautique, permet d'illustrer toutes les étapes de la démarche proposée au cours de ce manuscrit. Cette application montre la validité de notre approche.

Enfin, la conclusion retrace les principales contributions de cette thèse et propose quelques pistes et perspectives.

Chapitre

1

Entités d'usinage - État de l'art

1 Introduction

Ce chapitre présente une étude bibliographique qui touche aux différents travaux en lien avec le domaine de la modélisation par entité. Cela englobe l'introduction de la notion d'entité dans la chaîne numérique, la présentation des standards ISO qui définissent l'entité avec les normes STEP et STEP-NC, ainsi que les développements faits autour de l'entité d'usinage concernant sa caractérisation et ses classifications. En effet, la notion d'entité a fait l'objet de différents travaux de recherche. Néanmoins, plusieurs aspects nécessitent encore de l'approfondissement et différents challenges, notamment autour de l'entité d'usinage complexe, ont besoin d'être relevés. De ce fait, cet état de l'art permet de définir les verrous scientifiques à résoudre dans ce domaine, et ainsi de délimiter le périmètre de notre travail.

2 La notion d'entité dans la chaîne numérique de fabrication

Aujourd'hui, la fabrication moderne est constamment confrontée à une concurrence mondiale importante. Cette concurrence exige des produits de meilleure qualité avec des délais courts pour la conception à la fabrication. Au cours des deux dernières décennies, de nombreux travaux ont été menés principalement pour automatiser et intégrer diverses activités dans le cycle de conception et de fabrication. Malgré tous ces efforts, l'intégration CAO/FAO rencontre plusieurs problèmes liés principalement à la diversité de l'information dans la chaîne numérique [Liu et Wang, 2007]. La CAO se concentre sur la géométrie de la pièce, tandis que la FAO s'intéresse davantage aux caractéristiques du processus d'usinage.

Les techniques de modélisation purement géométriques sont en mesure de générer des pièces de grande complexité. Néanmoins, elles ne permettent de capturer qu'un très bas niveau de sémantique métier. Ces modèles ne peuvent pas être utilisés directement dans les applications en aval, telles que les activités de FAO. De ce fait, il est nécessaire de concevoir des modèles de pièces qui contiennent en plus de l'information géométrique et topologique, des tolérances, des spécifications de matériaux ainsi que des données technologiques liées à la fabrication. En effet, l'adaptation du modèle CAO aux activités aval mène à un modèle enrichi, encapsulant différentes données et propriétés en plus de la géométrie.

2.1 La modélisation par entités

La modélisation par entités, ou *feature modelling*, peut être considérée comme une extension de la modélisation géométrique [Bronsvoort et al., 2006]. Contrairement au modèle géométrique qui ne contient que des informations géométriques, le modèle à base d’entités est enrichi par l’apport d’éléments syntaxiques, touchant aux connaissances des différents métiers intervenant dans le cycle d’industrialisation du produit (conception, tolérancement, fabrication, etc.). La modélisation par entités assure ainsi une représentation des données qualitatives et quantitatives nécessaires au développement du produit. Elle permet de capitaliser le savoir-faire en conception des gammes d’usinage, de répertorier et de prendre en compte plus facilement les différentes contraintes technologiques. Cette approche s’inscrit aussi dans le cadre des travaux de la norme internationale STEP (STandard for Exchange of Product data model) pour la représentation des informations de produit et de leurs échanges (cf. Section 2.3).

La notion d’entité, ou caractéristique, nommée ainsi en France, qui correspond au terme anglais « *feature* », est apparue dans les années 80 comme la forme la plus naturelle de communication entre les acteurs métier dans un même projet [Tollenaere et al., 1998]. Une entité est un élément de modélisation dans un système CAx utilisé pour transmettre des informations géométriques et non géométriques sur le produit à concevoir. Elle a ainsi été adoptée par tous les éléments de la chaîne numérique [Sanfilippo et Borgo, 2016].

Définitions d’entité

« Un volume enlevé par des opérations d’usinage ». [Wilson et Pratt, 1985]

« Une caractéristique permettant d’associer aux objets conçus, en plus des éléments géométriques, un certain nombre de propriétés qui les caractérisent ». [Shah et Mäntylä, 1995]

« Un ensemble de surfaces ayant une sémantique pour une utilisation donnée ». [Mony et al., 1991]

« Un groupement sémantique (atome de modélisation) caractérisé par un ensemble de paramètres, utilisé pour décrire un objet indécomposable utilisé dans le raisonnement relatif à une ou plusieurs activités liées à la conception et l’utilisation des produits et des systèmes de production ». [Tollenaere et al., 1998]

Tableau 1 — Définitions d’entité

Malgré les efforts déployés au cours des 30 dernières années, les approches à base d’entités n’ont toujours pas abouti à une compréhension commune [Sanfilippo et Borgo, 2016]. La notion d’entité reste ambiguë. Elle évoque des idées différentes à chaque fois qu’elle est utilisée dans un domaine différent. Chaque communauté a proposé son propre modèle de données adapté à ses besoins spécifiques. De ce fait, plusieurs définitions d’entité ont été proposées (cf. tableau 1), suivant le point de vue que l’on adopte. En fait, la notion d’entité n’est pas encore claire, et pour arriver à bien la cadrer, il faut développer une *théorie d’entité*.

Étant utilisée dans de nombreux domaines, l'entité existe sous plusieurs types (entité fonctionnelle, de forme, de fabrication, etc.). Tous ces types caractérisent la même entité de façons différentes. En effet, il existe un nombre quasi illimité de types d'entités et il est toujours possible de définir un type qui répond à de nouveaux besoins et qui intègre les caractéristiques et les connaissances souhaitées. Dans cette thèse, une attention particulière est donnée à l'entité d'usinage qui sera détaillée par la suite.

2.2 Techniques d'intégration des entités

Les approches de modélisation basées sur les entités ont joué un rôle pertinent dans la spécification et l'intégration des connaissances qualitatives [Shah et Mäntylä, 1995], et les systèmes CAx basés sur les entités sont actuellement considérés comme les technologies de pointe pour la représentation intégrée des données d'ingénierie des produits. De nombreux travaux dans ce domaine se sont concentrés sur le développement d'algorithmes pour la reconnaissance des entités dans les modèles à base d'entités, ainsi que sur le développement de techniques de conception par entités [Sanfilippo et Borgo, 2016]. La figure 3 permet de situer les approches de modélisation par entités en gamme d'usinage par rapport à un modèle produit issu de la CAO.

a) La conception par entités permet de construire une pièce par assemblage et combinaison d'entités prédéfinies stockées dans une bibliothèque d'entités, dans un système de modélisation interactive et à travers une interface utilisateur graphique. Dans cette bibliothèque d'entités, seule la géométrie de l'entité est définie. Dans le processus de modélisation par entités, le concepteur a besoin de préciser les paramètres de dimension et de positionnement, la face sur laquelle l'entité doit être positionnée ainsi qu'un certain nombre d'autres attributs. Dans certains systèmes, de nouvelles classes d'entités peuvent également être créées par l'utilisateur (entités définies par l'utilisateur), pour les ajouter par la suite au modèle. La conception par entité n'est pas évidente puisque le concepteur raisonne du point de vue fonctionnel en manipulant de la géométrie qui ne correspond pas toujours à des entités « *fabrication* » ou « *usinage* ».

b) L'identification des entités peut se faire de deux façons distinctes :

— La conversion d'entités de conception en entités d'usinage : Cette technique s'intègre au modelleur ayant un système de construction par entités de conception. Des algorithmes tentent de convertir un ensemble d'entités de conception en un ensemble d'entités d'usinage, en utilisant les informations associées à l'entité de conception. Mais la conversion n'est pas toujours possible, car il n'y a pas de bijection entre les deux ensembles.

— La reconnaissance d'entités : Cette technique vise à extraire des entités, à partir d'un modèle géométrique d'un produit, en exploitant les informations géométriques et topologiques contenues dans un modèle CAO et les comparant à des entités génériques prédéfinies dans des taxonomies. De nombreux travaux de recherche ont été menés dans le domaine de la reconnaissance d'entités et ont adopté diverses approches, comme l'approche basée sur les règles, l'approche de décomposition de volume, l'approche à base de graphes, etc. [Han et al., 2000; Di Stefano et al., 2004; Verma et Rajotia, 2010].

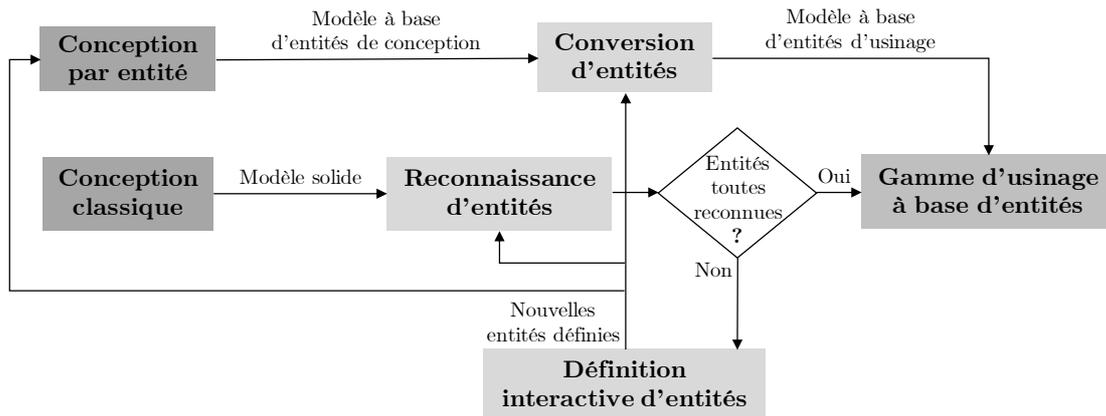


Figure 3 — Approches de modélisation par entités [Salomons et al., 1993]

2.3 L'entité dans le cadre STEP et STEP-NC

La modélisation par entités fournit un cadre de modélisation fort et intégrateur permettant de supporter la complexité des produits. Ainsi, elle permet le rapprochement entre les différents modèles de description de la pièce (modèle CAO, et autres modèles d'application). Cependant, il est indispensable de mettre en œuvre des normes pour gérer l'interopérabilité et le flux d'information entre les différentes applications tout le long de la chaîne CAx [Newman et al., 2008]. De nombreuses solutions ont été proposées (telles que SET, VDA et IGES) pour normaliser l'échange de données, mais elles ne sont pas totalement adaptées à tous les besoins de la chaîne numérique de fabrication [Xu et al., 2005]. Pour faire face à ce problème, l'organisation internationale de normalisation (ISO) a développé un ensemble de standards nommés ISO 10303, mieux connu sous le nom de STEP (STandard for the Exchange of Product model data), dont le protocole d'application ISO 10303-203 développé pour l'échange de données de conception entre les différents systèmes de CAO [Xu et al., 2011].

L'objet de STEP est la normalisation des données de définition des produits de sorte que les représentations de ces derniers soient compréhensibles par les machines et indépendantes de tout système logiciel ou matériel. STEP fournit un

mécanisme neutre capable de décrire les informations d'un produit pour l'ensemble des étapes de son cycle de vie (conception, validation, utilisation, maintenance). STEP est un standard à base d'un ensemble de différentes normes, défini à l'aide d'un langage orienté objet nommé EXPRESS-G. Il permet de couvrir la géométrie-topologie du produit B-Rep, et s'intéresse aussi au dimensionnement, au tolérancement et à la description graphique et sémantique. Il s'appuie sur différents protocoles d'applications (AP), notamment l'AP224 (Mechanical Product Definition For Process Planning Using Machining Features), l'AP223 (Exchange of Design and Manufacturing Product Information for Cast Parts), l'AP242 (Managed Model Based 3D Engineering), l'AP219 (Dimensional Inspection Information Exchange), l'AP238 (Application interpreted model for Computerized Numerical Controllers) et l'AP240 (Numerical Control Process Plan). Il permet ainsi une représentation non ambiguë des données du produit interprétable par tout système informatique en assurant ainsi la continuité du flux dans la chaîne numérique entre la conception et la fabrication.

Dans la volonté d'étendre les possibilités d'échange des données du standard STEP et couvrir ainsi l'intégralité de la chaîne numérique d'industrialisation, une extension des normes STEP, appelée STEP-NC (ISO 14649) [ISO 14649-10:2002; ISO 14649-10:2002] a été développée pour la fabrication par machine à Commande Numérique (CN). Ce standard permet d'améliorer l'interopérabilité entre les systèmes CFAO et les Directeurs de Commande Numérique (DCN), en assurant ainsi un flux bidirectionnel des données. Les modifications effectuées sur la CN, en FAO ou en CAO sont directement répercutées sur la maquette numérique.

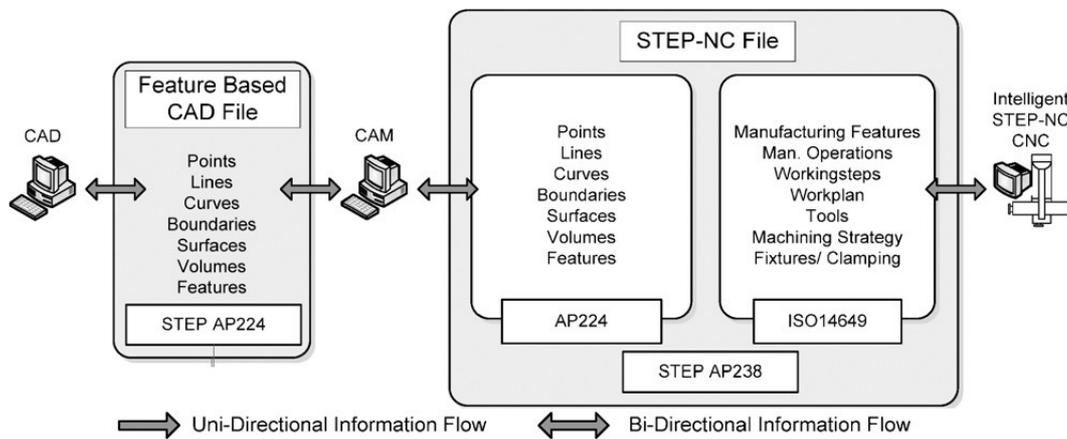


Figure 4 — Flux d'information dans le fichier STEP-NC [Newman et al., 2008]

La figure 4 montre le concept d'une chaîne numérique de fabrication conforme à la norme STEP-NC. La chaîne commence avec un système CAO qui génère non seulement des primitives géométriques telles que les points, les lignes et les courbes, mais aussi les entités telles que les poches, les rainures et les trous.

Dans le système CAO, ces entités géométriques sont représentées à base de points, de courbes et de surfaces. La structure des données d'un tel modèle CAO est définie à l'aide du protocole d'application 224 (ISO10303-224). Ce modèle CAO basé sur les entités est ensuite transmis à la FAO, qui rajoute aux données géométriques, des données relatives à la fabrication et stocke l'ensemble de ces informations dans un fichier AP238. Le fichier STEP-NC résultant enrichit la géométrie définie par l'AP224 par des opérations de fabrication, des entités de fabrication, des outils et des stratégies d'usinage organisés en « *workingsteps* » et « *workingplans* », définis dans la norme ISO14694. Plus de détails sur l'entité STEP-NC sont donnés dans la section 3.2. Ce fichier est ensuite transmis à la commande numérique pour interpréter la structure des données et calculer automatiquement les déplacements d'axes et les changements d'outils nécessaires. Une synthèse graphique à base d'EXPRESS-G des informations disponibles dans un fichier STEP-NC est présentée dans la figure 5.

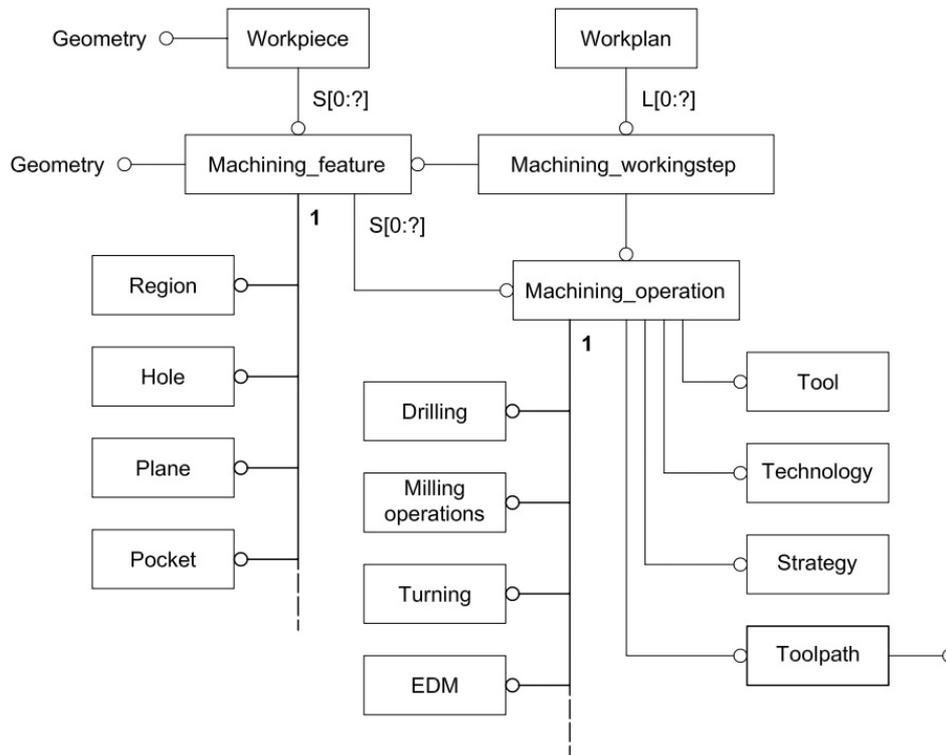


Figure 5 — Structure d'un fichier STEP-NC [ISO 14649-10:2002]

Ainsi, le flux d'informations dans la chaîne de fabrication peut être considéré comme bidirectionnel puisque les informations complètes sur le produit, regroupant les données géométriques enrichies par les données d'usinage, sont transmises à la commande numérique.

3 L'entité d'usinage

La modélisation par entités est un moyen qui offre la possibilité d'intégrer des informations fonctionnelles, géométriques et non géométriques dans la description de produits. Étant utilisée par toutes les phases du cycle de vie de produit, l'entité supporte différentes données à chaque fois qu'elle est utilisée dans une activité spécifique. De ce fait, plusieurs types se distinguent (entité fonctionnelle, topologique, de forme, d'usinage, etc.).

Dans ce travail, nous nous intéressons essentiellement à l'entité d'usinage considérée comme un moyen de description très pertinent dans la chaîne numérique de fabrication et représentée généralement par un volume, un ensemble de surfaces ou un ensemble d'informations attachées à une géométrie. L'entité d'usinage permet de modéliser les différentes données de la pièce et de sa fabrication et d'intégrer en particulier les connaissances d'usinage.

3.1 Définition et caractérisation

De nombreux travaux dans la littérature se sont focalisés en particulier, sur l'entité d'usinage qui a largement contribué aux développements de la chaîne numérique notamment à l'automatisation de la génération de gammes d'usinage [Xu et al., 2011].

Contrairement à l'entité de forme qui se focalise beaucoup plus sur l'aspect géométrique, l'entité d'usinage porte, en plus de la géométrie, d'autres informations relatives à sa fabrication tel que le type de l'outil, la stratégie d'usinage, qui indique l'opération, et les outils requis pour son usinage [Liu et Wang, 2007]. Dans la même voie, les entités d'usinage pour Shah *et al.* [Shah et Mäntylä, 1995] sont « une collection d'éléments géométriques liés auxquels correspond une méthode ou un processus de fabrication particulier ». Ainsi, l'entité d'usinage est définie par des caractéristiques intrinsèques et extrinsèques. Les caractéristiques intrinsèques sont propres à l'entité : le nom de l'entité, le type de l'entité (rainure, poche, trou, etc.), la forme géométrique associée à l'entité, les dimensions nominales et les tolérances dimensionnelles, les spécifications géométriques relatives aux défauts de forme, l'état brut de l'entité, les caractéristiques technologiques et les paramètres de matériaux. Les caractéristiques extrinsèques permettent de décrire les relations de l'entité par rapport et en fonction de son environnement comme les relations géométriques d'orientation et de position, les interactions topologiques de l'entité avec les entités voisines et les informations liées à son processus d'obtention qui regroupent le processus d'usinage, les directions d'accessibilité et le type de mouvement (cf. figure 6).

En fait, plusieurs définitions ont été attribuées à l'entité d'usinage, dont la plupart reprennent la notion de géométrie, en précisant les différents attributs PMI (Product Manufacturing Information) nécessaires à son enrichissement par rapport au domaine d'application. La définition proposée par le groupe GAMA en témoigne [Bourdet et al., 1990] : « une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquels un processus d'usinage est connu. Ce processus est quasi indépendant des processus des autres entités ». De cette manière, la définition de l'entité d'usinage exige l'existence du processus d'usinage et l'indépendance entre les processus d'usinage des différentes entités de la pièce.

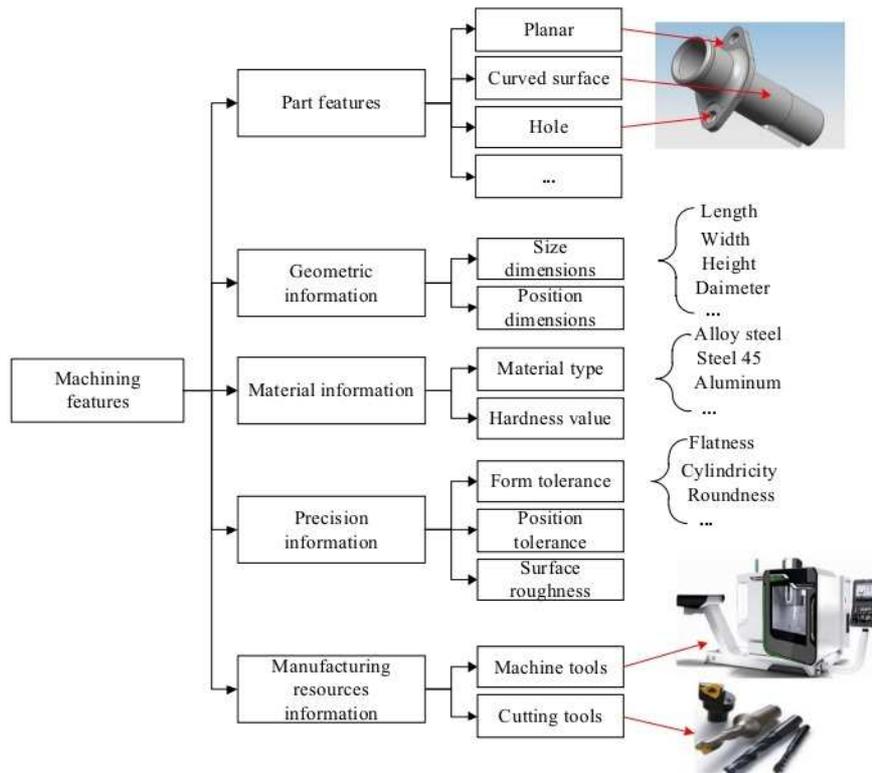


Figure 6 — Structure de l'entité d'usinage [Peng et al., 2017]

Dans [Louati et al., 2005; Elmesbahi, 2009; Chu et al., 2012], l'entité d'usinage est définie comme « un ensemble de surfaces de la pièce pouvant être usinées avec un seul outil, dans la même configuration ». En revanche, Gao *et al.* [Gao et Shah, 1998] ont défini les entités d'usinage comme « un volume continu qui peut subir un enlèvement de matière par une opération d'usinage simple suivant une prise de pièce bien définie ».

L'entité d'usinage a été adoptée par les différentes activités du processus d'intégration de conception-fabrication des produits afin de transmettre les informations de géométrie et de gamme d'usinage aux systèmes FAO. De ce fait, la littérature distingue plusieurs travaux portant sur la notion d'entité d'usinage

(conception à base d'entités [Amaitik et Kilic, 2005], reconnaissance d'entités [Fu et al., 2003], automatisation de la génération de la gamme d'usinage [Manafi et al., 2017], ordonnancement des opérations d'usinage [Liu et Wang, 2007], choix des outils de coupe et optimisation des conditions de coupe [Ji et al., 2018], réutilisation des données d'usinage [Huang et al., 2019b] etc.), dans le but d'améliorer et d'enrichir les différentes définitions et caractérisations de base citées précédemment et profiter ainsi des avantages offerts pour assurer une meilleure intégration des activités de conception et de fabrication de la chaîne numérique.

Aujourd'hui, la génération de gamme d'usinage basée sur les entités est devenue très populaire dans le milieu universitaire et dans l'industrie grâce à sa capacité d'intégrer rigoureusement les données de conception et de fabrication [Liu et Wang, 2007]. Dans cette optique, Liu *et al.* [Liu et al., 2015] ont proposé une mise en correspondance entre l'entité d'usinage et le volume enlevé pour la création de la gamme d'usinage. Pour ce faire, ils définissent la notion de surface et volume d'usinage. La surface d'usinage représente les surfaces qui constituent l'entité d'usinage ; et le volume d'usinage représente le volume enlevé au cours d'une opération d'usinage pour la création de l'entité. De ce fait, l'ensemble des volumes d'usinage et la pièce finie correspondent au brut initial utilisé pour la fabrication de la pièce. La gamme d'usinage est ainsi créée en se basant sur les volumes d'usinage. À partir de la pièce finie, l'approche consiste à combiner les volumes d'usinage un par un jusqu'à arriver à la pièce brute. Cette approche permet de suivre l'évolution dynamique de la pièce à travers l'usinage des différentes entités d'usinage. Par ailleurs, Zhang *et al.* [Zhang et al., 2013] ont défini l'entité d'usinage à travers un ensemble de surfaces usinées par une série d'opérations, enrichie par des informations concernant les dimensions, les tolérances et les directions d'usinage. Le concept d'entité d'usinage considéré comme support de connaissances de fabrication a permis d'aider les utilisateurs de la FAO à créer les bases de connaissances pour les outils de génération de gammes.

Wang *et al.* [Wang et al., 2006] ont utilisé une entité d'usinage enrichie dans une approche géométrique pour la création des séquences d'usinage. Comme la forme d'une pièce évolue au cours de son usinage, une nouvelle caractérisation de l'entité d'usinage, qui considère ces changements, est introduite. Les auteurs définissent une entité d'usinage enrichie qui prend en compte l'aspect dynamique des processus d'usinage, modélisée à travers la combinaison de son volume d'usinage avec les entités géométriques, de surface, de volume ainsi que d'autres informations technologiques nécessaires à l'usinage de l'entité (cf. figure 7). Pour ce faire, ils introduisent la notion de volume maximum d'usinage et volume intermédiaire d'usinage qui reflète le changement dynamique de l'entité pendant son usinage. Le volume maximum d'usinage d'une entité d'usinage est le volume à enlever pour créer l'entité d'usinage directement à partir du brut dans le sens

d'accessibilité de l'outil de coupe. Il est utilisé dans l'entité enrichie pour identifier l'ordonnancement des séquences des entités d'usinage. De même, le volume intermédiaire d'usinage représente l'intersection du volume maximum d'usinage et la pièce courante. Pour un meilleur ordonnancement de séquences, le volume intermédiaire d'usinage est combiné à chaque entité d'usinage pour représenter le changement dynamique de l'entité pendant son usinage. Cette combinaison définit l'entité d'usinage enrichie. Une entité d'usinage enrichie est une entité qui possède des informations sur l'entité d'usinage et son obtention (tolérance et dimensionnement géométrique, le type d'outil, les directions d'accès à l'outil et les conditions de coupe) et son volume d'usinage intermédiaire actuel. Cette combinaison permet d'avoir l'aspect dynamique du processus d'usinage.

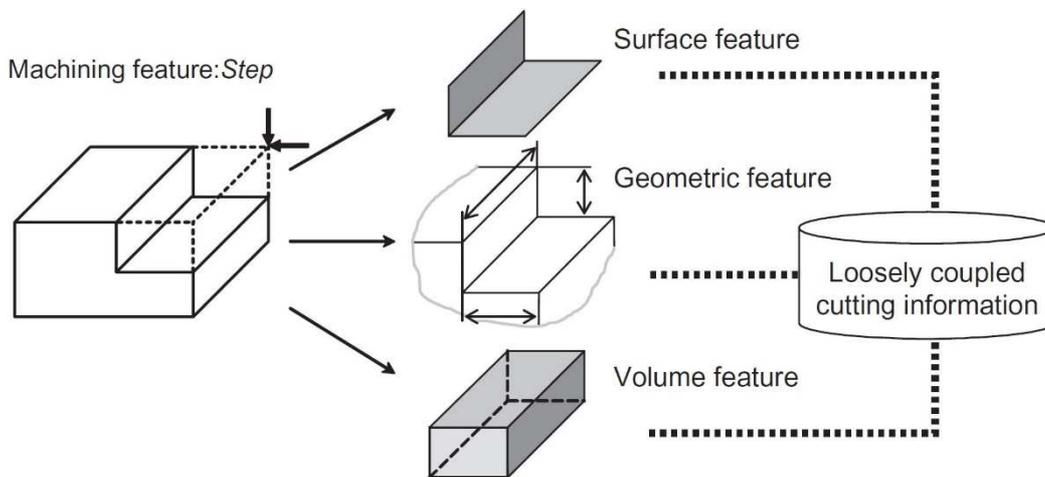


Figure 7 — Modélisation de l'entité d'usinage [Wang et al., 2006]

Dans la continuité de ces travaux, Wang *et al.* [Wang et al., 2017] ont défini une entité d'usinage dynamique qui considère les états intermédiaires de la pièce dans le but d'optimiser simultanément le coût et le temps d'usinage ainsi que la consommation d'énergie lors de la planification des processus. L'entité est caractérisée, à partir du volume enlevé, avec des entités intermédiaires, des états de la coupe et les engagements d'outil, en fonction des machines-outils, des outils, de la trajectoire outil et des paramètres de coupe (cf. figure 8). L'entité intermédiaire représente un état intermédiaire de l'entité qui peut être usinée par une seule opération d'usinage. Ceci implique une correspondance entre l'entité intermédiaire et l'opération. De ce fait, afin d'optimiser le processus d'usinage et réduire ainsi le nombre d'opérations d'usinage, les entités intermédiaires ayant les mêmes modes de coupe et trajectoires sont fusionnées pour être usinées dans la même opération. L'entité dynamique a permis de modéliser la consommation d'énergie à l'aide de la force de coupe instantanée calculée en se basant sur la nouvelle caractérisation de l'entité.

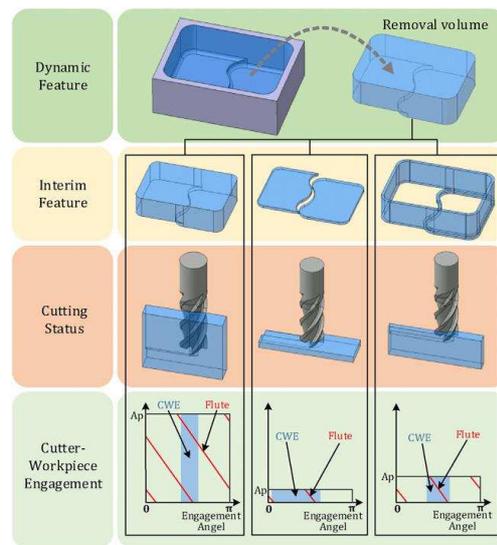


Figure 8 — Caractérisation de l'entité d'usinage dynamique [Wang et al., 2017]

3.2 L'entité d'usinage dans le contexte STEP-NC

STEP-NC, l'extension de la norme STEP (ISO 10303), a été développée pour la commande numérique en se basant sur une approche orientée entité. Il définit ainsi l'entité de fabrication, appelée souvent « STEP-NC *Feature* ». Cette entité permet de rassembler l'ensemble des données de géométrie et de fabrication relatives au processus de fabrication de la pièce définies dans des « *workingsteps* » et « *workingplans* ». Elle permet de décrire les volumes à enlever par usinage pour atteindre l'état final de la pièce. L'entité STEP NC peut être subdivisée en 3 sous-classes : région, entité de transition et entité de fabrication 2.5 axes. Dans le cas des formes complexes, ou gauches, l'entité est appelée région. L'entité de transition est définie seulement sur le bord de deux entités adjacentes, permettant ainsi de décrire le type de raccord entre elles (congé, chanfrein). Dans le cas de l'usinage 2.5 axes, l'entité de fabrication regroupe l'entité répliquée, l'entité composée et l'entité d'usinage. Plus de détail sur la classification de l'entité d'usinage est donné dans la section 5.3.

En se basant sur le langage EXPRESS (cf. figure 9), l'entité STEP NC est définie par un ensemble de paramètres de base appelés attributs : l'identifiant ID, la pièce et les opérations d'usinage. Comme cette définition se base sur une modélisation orientée objet, les attributs sont raffinés par niveau tel que chaque sous-entité hérite les attributs de l'entité mère. Plus la hiérarchie descend, plus les attributs spécifiques apparaissent. De ce fait, l'entité d'usinage hérite les attributs de l'entité de fabrication 2.5 axes et rajoute son emplacement et sa profondeur. D'autres attributs sont par la suite spécifiés pour chaque type d'entité

d’usinage. Par exemple, l’entité « *surface plane* » est définie par : la direction d’usinage, la trajectoire et le profil.

Depuis le lancement des travaux sur STEP, plusieurs recherches ont été menées sur la modélisation par entité et la génération de gamme d’usinage en se basant sur le modèle de données de STEP-NC.

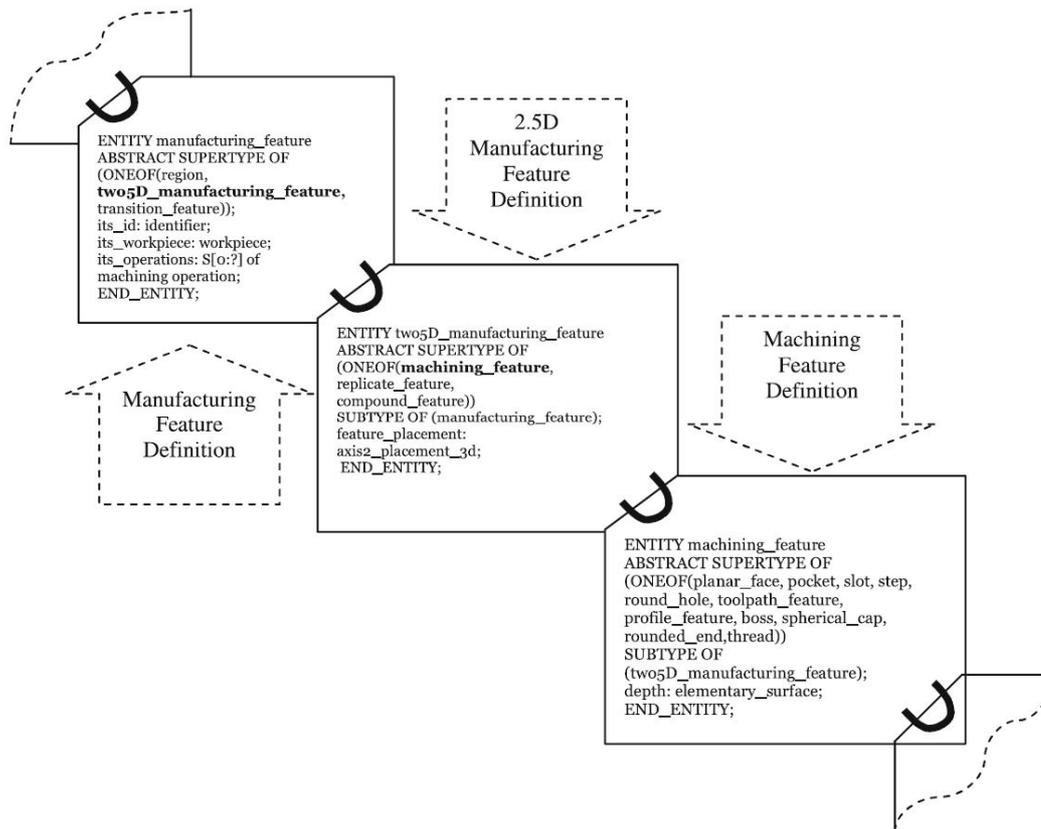


Figure 9 — Définition de l’entité d’usinage dans le contexte STEP-NC [Mokhtar et al., 2009]

Dans le but d’intégrer les tâches de conception et de fabrication, Amaitik *et al.* [Amaitik et Kilic, 2005] ont développé un outil de modélisation par entité en se basant sur STEP. Ce système utilise des entités prédéfinies comme entités de base dans le processus de conception. Les concepteurs peuvent aussi prendre en compte les propriétés de fabrication plus tôt dans la phase de conception de la pièce. La pièce ainsi créée est exportée dans un format XML. Ce fichier peut ensuite être utilisé dans les systèmes de génération de gammes d’usinage sans avoir recours aux processus de reconnaissance d’entités. La modélisation par entités basée sur une approche orientée objet facilite la mise en œuvre, l’extension et la réutilisation du système. Cette modélisation peut être utilisée pour concevoir les pièces prismatiques les plus couramment utilisées. De plus, elle facilite le processus d’intégration des systèmes CAO/FAO en se basant sur les entités STEP

utilisées comme élément de modélisation. De même, dans le cadre de la modélisation par entité, Zhang [Zhang, 2014] a développé un système permettant de modéliser la pièce à base d'entités d'usinage prédéfinies et de générer ainsi sa gamme d'usinage en se basant sur STEP-NC. Il définit l'entité d'usinage comme le volume de matière enlevé du brut enrichi par des sémantiques comme les dimensions et les tolérances qui décrivent la forme et la taille de l'entité, l'état de surface, la dureté et d'autres attributs reflétant les relations entre deux entités ainsi que des éléments relatifs à l'usinage (le procédé d'usinage, les ressources d'usinage, etc.). La structuration des données dans STEP-NC a permis d'automatiser la génération de la gamme d'usinage avec moins d'intervention humaine.

Dans le but d'assurer une interopérabilité CFAO/CN efficace, Xú *et al.* [Xú, et al., 2016] ont proposé une technique de conversion du code G en STEP-NC. La réutilisation des programmes G-code est importante pour la fabrication et la capitalisation des connaissances d'usinage. Néanmoins, la conversion est une tâche fastidieuse lorsqu'elle est effectuée manuellement et les connaissances d'usinage ne sont pas explicites dans le G-code qui est de bas niveau. L'approche développée se base sur la conversion des fonctions canoniques et la reconnaissance d'entités d'usinage. La méthode d'extraction proposée utilise les informations géométriques des surfaces déduites des trajectoires outils et des stratégies d'usinage, en plus des données relatives aux outils de coupe et à la pièce brute. L'utilisation de toutes ces données rend l'extraction plus précise et plus fiable. Cependant, l'approche se limite aux entités prismatiques sans prendre en compte les entités de formes complexes ainsi que l'interaction entre les entités.

Dans le même contexte de l'interopérabilité, Hascoët *et al.* ont développé une plateforme de fabrication : SPAIM (Step-nc Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing) qui contrôle les machines-outils industrielles directement à partir des fichiers STEP-NC permettant ainsi d'améliorer la supervision et l'intégration des systèmes d'usinage [Rauch et al., 2009]. Parmi les modules composant cette plateforme, le module de génération de trajectoire qui, en plus des stratégies définies dans la norme ISO 14649, a été enrichi par une nouvelle stratégie qui permet de définir des trajectoires complexes en répétant un motif (pattern) tout le long d'une courbe de guidage [Laguionie et al., 2009]. Cette plateforme a montré la faisabilité d'utiliser le standard STEP-NC pour réaliser des applications de programmation CN intelligentes avec les machines-outils et commandes CN actuelles.

Enfin, STEP-NC promet une nouvelle génération de MOCN intelligentes. Sa structure orientée objet fournit un modèle de données complet pour la programmation et la fabrication de pièces basées sur les entités. C'est pourquoi certains travaux ont utilisé STEP AP224 et STEP-NC pour la modélisation par entités, la reconnaissance d'entités et la génération de gamme d'usinage. Cependant, peu

de travaux ont été menés sur l’entité d’usinage de forme complexe, définie par la classe région dans la norme STEP-NC.

4 L’entité d’usinage complexe

La modélisation par entités a permis d’étendre la modélisation géométrique en associant une signification fonctionnelle aux différents éléments de la géométrie. Cependant, dans la plupart des systèmes actuels de modélisation par entités, seules les formes régulières canoniques sont développées [Bronsvoot et al., 2006]. Les formes complexes sont moins utilisées en raison de leur définition paramétrée et leur manipulation non intuitive [Van Den Berg et al., 2003]. Comme ces formes sont de plus en plus présentes en conception, il est nécessaire d’étendre la modélisation par entité et définir ainsi l’entité de forme complexe.

Généralement, la notion de forme complexe se réfère aux surfaces qui représentent des variations de forme et de géométrie révélant ainsi des difficultés lors de l’usinage et lors de la mesure. D’après les standards de la spécification géométrique de produits (GPS), qui définissent la surface par rapport à sa classe d’invariance, la surface complexe est une surface n’ayant aucun degré de liberté. D’autre part, Scott et Jiang [Scott et Jiang, 2014] ont défini la surface complexe comme une surface représentant des variations de forme constituée de géométries partielles pouvant être décomposées en différentes parties. Par ailleurs, El Hayek [El-Hayek, 2014] a défini les surfaces complexes comme des surfaces composées de différentes géométries, qui généralement, mais pas nécessairement, n’ont pas de degré d’invariance.

De nombreuses définitions d’entité ont été proposées dans le cas de formes régulières. Néanmoins, la complexité de la géométrie dans le cas des formes complexes nécessite une réadaptation de la définition de l’entité. Une distinction peut être faite entre l’entité surfacique complexe qui se limite à l’aspect géométrique de la surface et l’entité d’usinage complexe qui intègre d’autres données liées à la fabrication.

Les entités complexes sont généralement formées par déformation ou manipulation d’une surface de forme gauche, appelée surface de base. La région déformée a des caractéristiques géométriques nettement différentes et est délimitée du reste de la surface de base par une courbe sur la surface de base appelée la courbe de séparation [Gupta et Gurumoorthy, 2012]. Van den Berg *et al.* [Van Den Berg et al., 2003] ont proposé une définition de l’entité de forme complexe en utilisant des points caractéristiques. La géométrie de la forme complexe est ainsi créée à travers les différentes relations définies entre ces points (distance, angle, etc.). Par ailleurs, Nyirenda et Bronsvoot [Nyirenda et Bronsvoot, 2008] ont introduit une représentation multi niveaux pour la surface complexe, ce qui

facilite l'identification des entités et la définition de nouveaux paramètres de courbe avec des propriétés spécifiques. Sundararajan et Wright [Sundararajan et Wright, 2004] ont défini l'entité complexe avec des informations géométriques et des informations liées à l'interaction entre entités.

Afin de garantir l'efficacité de la coupe et la qualité d'usinage de ces surfaces, une combinaison d'outils de différentes tailles est utilisée. Par conséquent, la surface complexe est toujours divisée en zones usinées dans des opérations et par des outils appropriés en se basant sur différents critères géométriques et d'autres liés à l'usinage. Sunil et Pande [Sunil et Pande, 2008] ont défini l'entité complexe comme un ensemble de régions connexes, ayant une géométrie et une topologie particulière et significative en conception et en fabrication. L'entité d'usinage de forme complexe est généralement définie comme les carreaux de surfaces (*patches*) topologiquement adjacents, pouvant être usinés dans un seul processus d'usinage [Wang et al., 2010].

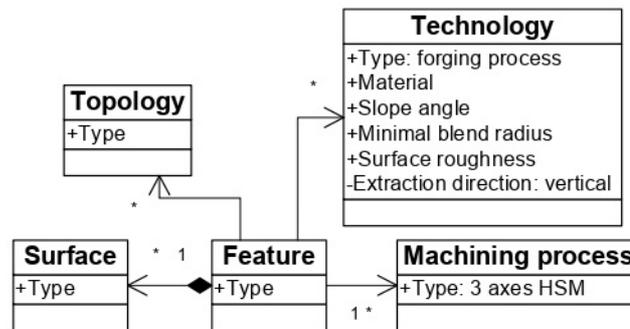


Figure 10 — Modélisation de l'entité d'usinage (outillage de forgeage) [Tapie et al., 2009]

Dans le contexte de la génération de gamme d'usinage des outillages de forge, un modèle à base d'entité d'usinage a été utilisé pour la représentation et la définition de la forme complexe [Mawussi et Bernard, 1995]. Tapie *et al.* [Tapie et al., 2009] ont proposé une méthode de décomposition qui se base sur la création d'entités d'usinage composée de données géométriques auxquelles s'ajoutent d'autres caractéristiques, en prêtant attention notamment aux données relatives au procédé d'usinage des moules de forgeage. L'entité est ainsi structurée à l'aide d'un modèle UML (Unified Modeling Language) en quatre classes : surface, topologie, technologie et procédé d'usinage (cf. figure 10). Cette définition se base principalement sur le point de vue de l'expert industriel qui définit les exigences d'usinage. Cependant, ceci ne permet pas d'automatiser la procédure d'identification des entités. De même, dans le cadre d'estimation des coûts de fabrication des pièces de forgeage, Bouaziz *et al.* [Bouaziz et al., 2006] ont défini le modèle de la matrice à base de l'entité d'usinage. Cette dernière est définie avec quatre types d'informations : des données géométriques, des attributs technologiques

(rugosité, matériau, etc.), l'attribut de forme (forme creuse ou forme en relief) ainsi que le procédé d'usinage adapté à la forme de l'entité.

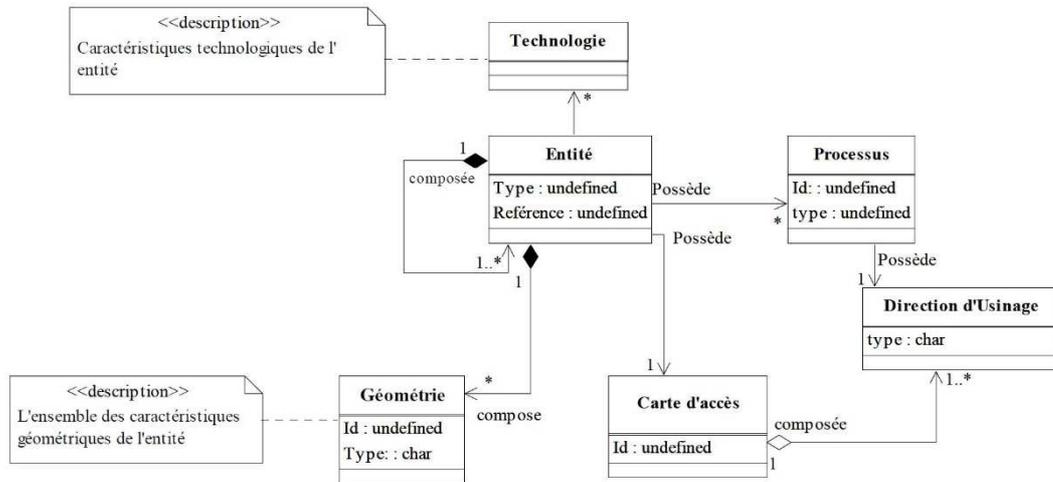


Figure 11 — Modélisation de l'entité d'usinage (aéronautique) [Zirmi et Paris, 2005]

Par ailleurs, plusieurs travaux qui portent sur les entités d'usinage des pièces aéronautiques de structure considérées comme formes complexes sont distingués. Dans le cadre de l'élaboration semi-automatique de gammes d'usinage pour des pièces aéronautiques de structure, Zirmi et Paris [Zirmi et Paris, 2005] ont proposé un modèle qui décompose la pièce en un ensemble d'entités d'usinage élémentaires définies à travers leurs caractéristiques géométriques et technologiques. La donnée de départ étant un modèle CAO, les faces et les arêtes sont enrichies par les données géométriques (rayons de courbure des arêtes, courbure minimale et maximale des faces, etc.), non géométriques (tolérances, états des surfaces, etc.) ainsi que des données technologiques relatives aux moyens de réalisation, nécessaires à l'élaboration de la gamme d'usinage. Durant cet enrichissement, les connaissances métiers, les stratégies d'usinage utilisées et la complexité des pièces dans le domaine aéronautique, sont également prises en compte.

Par ailleurs, ces entités sont liées par des relations topologiques et géométriques adaptées à ce genre de pièces. Ces relations permettent de caractériser les problèmes d'usinage dus aux interactions entre entités et de déterminer ainsi l'ordonnancement des opérations. En effet, toutes ces données et caractéristiques intrinsèques sont structurées dans un modèle global de l'entité présenté dans la figure 11. Dans la même optique, Harik *et al.* [Harik et al., 2008] ont développé un logiciel d'assistance à la génération de gamme d'usinage permettant de raccourcir le temps de prise en main des pièces par le préparateur pour déterminer rapidement la meilleure stratégie d'usinage. Pour ce faire, les auteurs ont proposé une approche pour préparer la géométrie de la pièce d'origine en lui associant un ensemble d'attributs caractéristiques et l'adapter ainsi à la fabrication. L'entité

d'usinage élémentaire est définie à base d'une, et une seule face enrichie par des informations technologiques en s'appuyant sur le savoir-faire du préparateur (accès d'usinage, usinabilité, typage, outils capables). En exploitant l'enrichissement technologique au niveau des entités d'usinage élémentaires, la typologie des liens entre les faces et en analysant le graphe d'adjacence, le regroupement des différentes entités élémentaires d'usinage permet d'identifier cinq types d'entités d'usinage : entité de surfaçage, entité poche, entité flanc externe (2 axes et demi), entité multi poches (3 axes), et entité mince.

Comme les pièces de structures aéronautiques sont souvent usinées en plusieurs opérations, Wang *et al.* [Wang et al., 2018] ont proposé de décomposer les entités d'usinage en sous-entités d'usinage associées chacune à une seule opération d'usinage selon les règles extraites du processus d'usinage. L'entité poche, par exemple, est décomposée par rapport à son usinage en trois sous-entités : le fond, les parois et les coins. Cette décomposition en sous-entités a permis d'optimiser l'ordonnancement des opérations d'usinage en minimisant la trajectoire d'outil hors matière.

En outre, les entités sont généralement définies sur la base de l'état final de la pièce, ce qui n'est adéquat que pour les pièces simples où la variation des propriétés du processus d'usinage n'est pas significative. La définition statique des entités ne peut pas satisfaire aux exigences de planification des processus des pièces de structure aéronautiques pour lesquelles la variation appropriée du processus d'usinage est très importante [Zhao et al., 2016]. Dans ce contexte, ils ont introduit le concept d'entité d'usinage dynamique qui permet de définir et exprimer les états de la pièce en cours de fabrication. Cette entité dynamique est définie à travers une série d'entités intermédiaires reflétant le processus d'usinage ainsi que les caractéristiques dynamiques de l'entité intermédiaire.

Par ailleurs, Chu *et al.* [Chu et al., 2016] ont traité un autre niveau de complexité qui concerne la gestion, la communication et la collaboration entre les différents services de fabrication. Ils ont proposé une approche de fabrication collaborative basée sur le concept d'entité d'usinage et des agents logiciels intelligents (de planification du processus d'usinage, de commande numérique, de simulation et de vérification, d'estimation des coûts, de gestion de production, etc.). L'entité d'usinage est utilisée comme support d'information pour la communication et la collaboration entre tous ces agents et regroupe principalement l'information géométrique (la forme, la position, les dimensions, et les relations géométriques), l'information non géométrique relative au process ainsi que des commentaires qui décrivent le changement d'état de la pièce dans cet environnement collaboratif tel que chaque agent peut enrichir l'entité d'usinage en apportant des nouvelles informations relatives à son état (cf. figure 12).

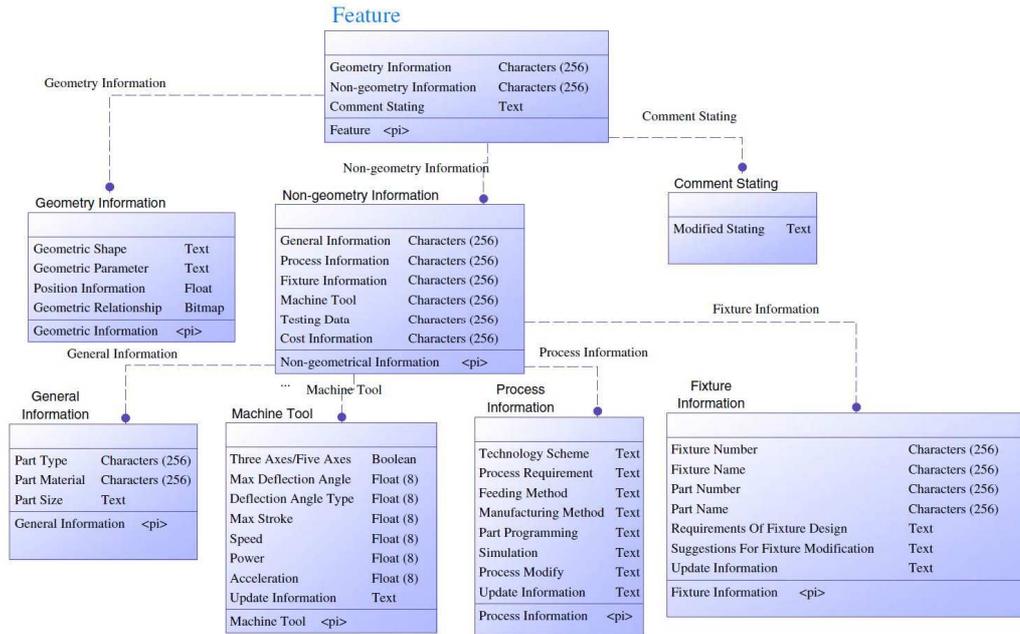


Figure 12 — Modèle UML de l’entité d’usinage [Chu et al., 2016]

Dans la continuité de ces travaux, Liu *et al.* [Liu et al., 2016] ont défini un nouveau concept pour enrichir la notion d’entité. Il s’agit d’une entité dynamique multi-perspective qui représente les changements dynamiques de la forme complexe impliquant les différentes profondeurs de passe, la variabilité de la surface et les changements dans les ressources de fabrication. Dans cette définition, la forme résultante d’une opération est considérée comme une entité intermédiaire. Cette dernière peut être par la suite décomposée en zones d’usinage définies comme sous-entités pour pouvoir sélectionner les outils et les méthodes d’usinage appropriés. Le modèle de l’entité est ainsi mis à jour en analysant les effets de chaque opération d’usinage sur le modèle statique de l’entité (cf. figure 13). L’aspect dynamique de l’entité et l’approche de la fabrication collaborative (*Cloud manufacturing environment*) a permis de créer des processus d’usinage adaptatifs à travers des ajustements pilotés par les événements liés aux différentes phases de fabrication [Liu et Li, 2019].

5 Classification des entités d’usinage

Les entités d’usinage sont généralement classifiées en regroupant dans la même classe les entités ayant des propriétés topologiques, géométriques ou autres caractéristiques communes. Ces entités sont groupées en une structure arborescente hiérarchique, appelée généralement taxonomie. Cette partie expose les différentes taxonomies proposées dans la littérature pour les formes régulières, complexes, ainsi que la classification des entités STEP-NC.

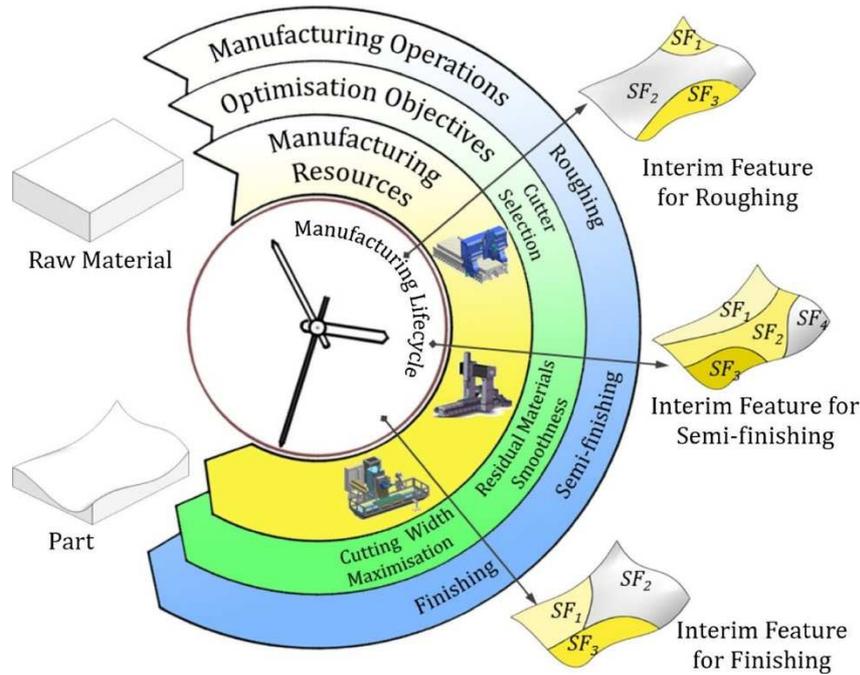


Figure 13 — Evolution dynamique de l'entité d'usinage [Liu et al., 2016]

5.1 Taxonomies de formes régulières

Un certain nombre de taxonomies ont été reportées dans la littérature portant notamment sur des formes régulières (usinage 2 axes et demi). La différence entre ces taxonomies réside dans les critères utilisés dans la définition de chaque classe d'entité d'usinage.

En se basant sur la forme de l'entité, Wilson et Pratt [Wilson et Pratt, 1988] distinguent les entités explicites décrites par des informations géométriques directement exploitables d'un modèle CAO des entités implicites définies par des attributs calculés à partir de primitives CAO (cf. figure 14). De façon identique, Liu *et al.* [Liu et al., 2015] ont classifié les entités d'usinage en fonction de la forme en trois catégories : dépression, protrusion et transition. Gindy [Gindy, 1989] a proposé une taxonomie en distinguant trois types d'entités : dépressions, protrusions et surfaces. Chacune de ces trois catégories est alors subdivisée selon le nombre de directions d'accessibilité externe. Les directions d'accessibilité externe représentent les directions d'approche de l'outil de coupe et ne sont définies que pour des opérations de fraisage. Les classes résultantes sont divisées en fonction de leurs boucles internes qui peuvent être ouvertes ou fermées (cf. figure 15).

Dans la même optique, Shah et Mäntylä [Shah et Mäntylä, 1995] ont classifié les entités en fonction des directions d'accessibilité en trois grandes familles subdivisées en sous-classes :

— Les entités qui constituent une forme interne débouchante (Cut-Thru). Elles sont caractérisées par une seule entrée et une seule sortie, quelle que soit l'orientation de la pièce. Elles imposent des restrictions fortes sur le choix de l'outil et l'accessibilité.

— Les entités qui constituent une cavité bornée (Cut-On). Ce sont typiquement les cavités fermées accessibles. Elles se caractérisent par la présence d'au moins une face accessible suivant une seule direction.

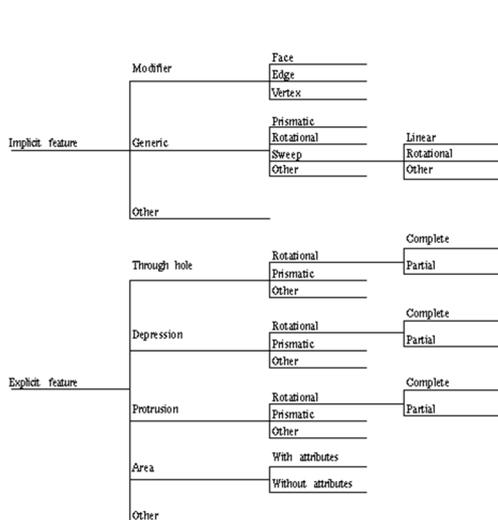


Figure 14 — Taxonomie de Pratt et Wilson [Wilson et Pratt, 1988]

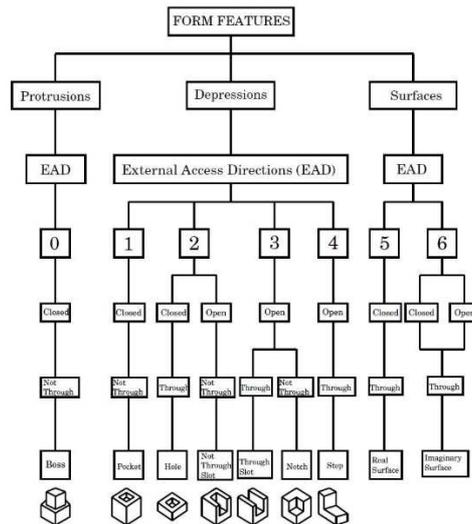


Figure 15 — Taxonomie de Gindy [Gindy, 1989]

— Les entités qui constituent une forme externe accessible (Cut-Around). Elles constituent les frontières externes de la pièce, leur usinage dépend principalement des éléments de mise en position et de fixation sur le montage d'usinage.

En se basant sur l'accessibilité, la géométrie, et la position relative de la face de l'entité volumique, Xu et Hinduja [Xu et Hinduja, 1998] ont défini quatre classes d'entités basiques : trou/poche, poche ouverte/rainure, trou débouchant et entité de forme complexe.

De même, Yan *et al.* [Yan et al., 2000] ont classifié les entités d'usinage en cinq classes principales : trou, poche, poche ouverte, face et protrusion, comme le montre la figure 16. Ces classes sont subdivisées en plusieurs sous-classes selon l'outil de coupe et le mode de coupe utilisés.

Dans le cadre de la reconnaissance d'entités, Nagarajan et Reddy [Nagarajan et Reddy, 2010] ont proposé une taxonomie multi-niveaux pour l'entité d'usinage. Dans le premier niveau, l'entité d'usinage est définie en trois grandes

classes en se basant sur les directions d'accessibilité outil. D'autres critères, définis par niveau, permettent de raffiner ces trois classes et préciser ainsi le type de l'entité.

Machining Feature					Machining Operation			
Feature Type		Code	Contour Geometry			Tool Diameter Limitation	Cutting Mode	
			Circularity	Width	Continuity			
Hole	Milled Hole	O	1	-	Closed	Tool Dia. < Hole Dia.	2 or 3-Axes	
Pocket	Slot	U	< 1	Const		Partial Side Open	Tool Dia. <= Slot Width	--
	Pocket	P		-	Arbitrary Tool Diameter		Tool r <= Fillet/Corner r & Tool Dia. <= Min.Width.	
Open Pocket	Groove	G		Const			Tool Dia. <= Grv. Width	
	Open Pocket	C		-			Tool Dia. <= Pkt. Width	
	Step	T			All-Side Open	-	Multi-Step	
Face	Slope	L		-			-	Z-Level
	Horizontal Face	F						Contour
	Freeform Surface	S			Z-Level / Contour			
Boss	Boss	b		-	-	-	--	

Figure 16 — Taxonomie de Yan *et al.* [Yan et al., 2000]

— Les entités avec une seule direction d'accessibilité possible (Single Axis Accessible Features). Cette classe est ensuite subdivisée en deux sous-classes : trou et poche.

— Les entités avec des directions d'accessibilité multiples (Multiple Axes Accessible Features). Cette classe regroupe les entités qui possèdent au moins deux directions d'accessibilité différentes possibles : marche et rainure.

— Les entités de finition (Finishing Features), qui comprennent les chanfreins et les congés.

Par ailleurs, Anwer [Anwer, 2000a] a proposé une classification basée sur une approche qui intègre des connaissances de gammes et notamment au niveau process (connaissances des opérations d'usinage), dans le cadre de génération de gammes d'usinage en fraisage. Elle repose sur les caractéristiques topologiques des entités et exploite une analyse à base de la théorie des graphes. Il définit ainsi cinq classes, dont chacune est définie par des règles de caractérisation exploitant uniquement les propriétés des graphes. Il s'agit de : passage, dépression, K-protrusion, K-rainure, et chaînage (cf. figure 17).

En effet, en fonction du contexte et du domaine d'application des entités, différents critères sont utilisés pour définir les différentes classes hiérarchiques de l'entité d'usinage. Il s'agit généralement des critères géométriques relatifs à la

forme de l'entité ou des critères relatifs à l'usinage. De ce fait, des critères différents conduisent à des taxonomies différentes.

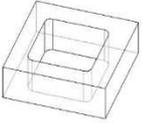
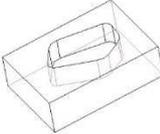
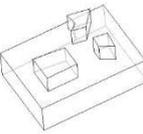
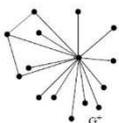
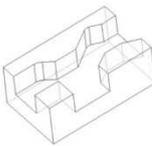
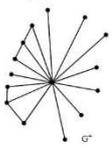
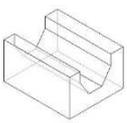
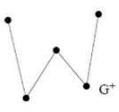
Classes	Passage	Dépression	K-Protrusion	K-Rainure	Chaînage
Exemple	  G^+	  G^+	  G^+	  G^+	  G^+

Figure 17 — Taxonomie de Anwer [Anwer, 2000a]

5.2 Taxonomies de formes complexes

Dans le cas de formes complexes, la littérature révèle quelques tentatives de classification des entités complexes, issues de différents domaines d'applications.

Dans le cadre des entités surfaciques complexes, Poldermann et Horváth [Poldermann et Horváth, 1996] ont proposé une classification pour l'entité surfacique complexe qui distingue les entités globales et les entités locales. Ils définissent ainsi quatre classes : des entités primaires définissant la forme globale de la pièce, des entités secondaires modifiant les entités primaires, des entités de transition (congés), ainsi que des entités auxiliaires (cf. figure 18). En se basant sur cette taxonomie, Fontana *et al.* [Fontana et al., 1999] ont défini deux grandes classes d'entités complexes qui détaillent les classes des entités secondaires et auxiliaires. Il s'agit des entités obtenues par déformation de surface (deformation features or δ -FFF) et des entités obtenues par enlèvement de matière (elimination features or τ -FFF). En fonction de l'emplacement de l'entité sur la surface et le sens de la déformation, l'entité de déformation est subdivisée en plusieurs sous-classes (cf. figure 19). Ces classifications se basent sur des caractéristiques topologiques et morphologiques associées aux fonctions de déformation utilisées pour créer les entités. Aucun paramétrage n'est associé à ces entités proposées. Une indication est toutefois proposée quant aux types de paramètres et de conditions qui pourraient être utiles pour une conception par entités.

Poldermann et Horváth [Poldermann et Horváth, 1996] et Fontana *et al.* [Fontana et al., 1999] ont présenté les entités complexes comme un moyen de

modifier une surface de forme complexe donnée. Ils distinguent l'ajout, la déformation et l'enlèvement des régions d'une telle surface et les classes d'entités proposées sont liées à ces opérations. Cependant, ces taxonomies sont limitées à des domaines particuliers.

Freeform features
Primary surface features
Closed
Single or double curved
Amorphous
Opened
Non-isometric
Isometric
Modifying surface features
Local
Protrusion
Depression
Global
Bend
Wave
Blending
Transition surface features
Simple
Blending
Rounding
Compound
Blending
Rounding
Auxiliary surface features
Holes
Simple
Threaded
Cuttings
Lifted
Lowered
Ears
Single
Double
Fillet
Arc
Chamfer
Ribs
Cross
Fix-length
Slicing
Deformed
Non-deformed

Figure 18 — Taxonomie de Poldermann et Horvath [Poldermann et Horváth, 1996]

Freeform features
Freeform δ -features
Border
Intrusion (step-up)
Extrusion (step-down)
Internal
Intrusion (cavity)
Extrusion (bump)
N-channel
Intrusion (N-groove)
Extrusion (N-rib)
Freeform τ -features
Sharp
Inlet
Hole
N-gap
Finished
Inlet
Hole
N-gap

Figure 19 — Taxonomie de Fontana *et al.* [Fontana et al., 1999]

Dans la même voie, Pernot *et al.* [Pernot et al., 2003], Nyirenda *et al.* [Nyirenda et al., 2005] ont proposé des taxonomies similaires basées sur des propriétés géométriques et topologiques de la surface complexe et des modèles de déformation. Par ailleurs, Gupta et Gurumoorthy [Gupta et Gurumoorthy, 2013] ont adopté la même approche, mais ils ont rajouté l'entité volumique associée à

l'ajout ou à la soustraction de volume et pouvant comprendre également des surfaces complexes (cf. figure 20).

Cependant, il est à noter que ces taxonomies sont définies pour l'entité surfacique complexe. Il ne s'agit pas d'entité d'usinage puisque les critères de définition des classes ne sont pas liés à l'usinage, mais plutôt aux propriétés géométriques et topologiques des surfaces complexes. Contrairement à ces taxonomies, il existe d'autres classifications pour les entités complexes en considérant les données d'usinage. Il s'agit ainsi des classifications d'entités d'usinage basées sur des critères de fabrication qui dépendent du domaine d'application de la pièce.

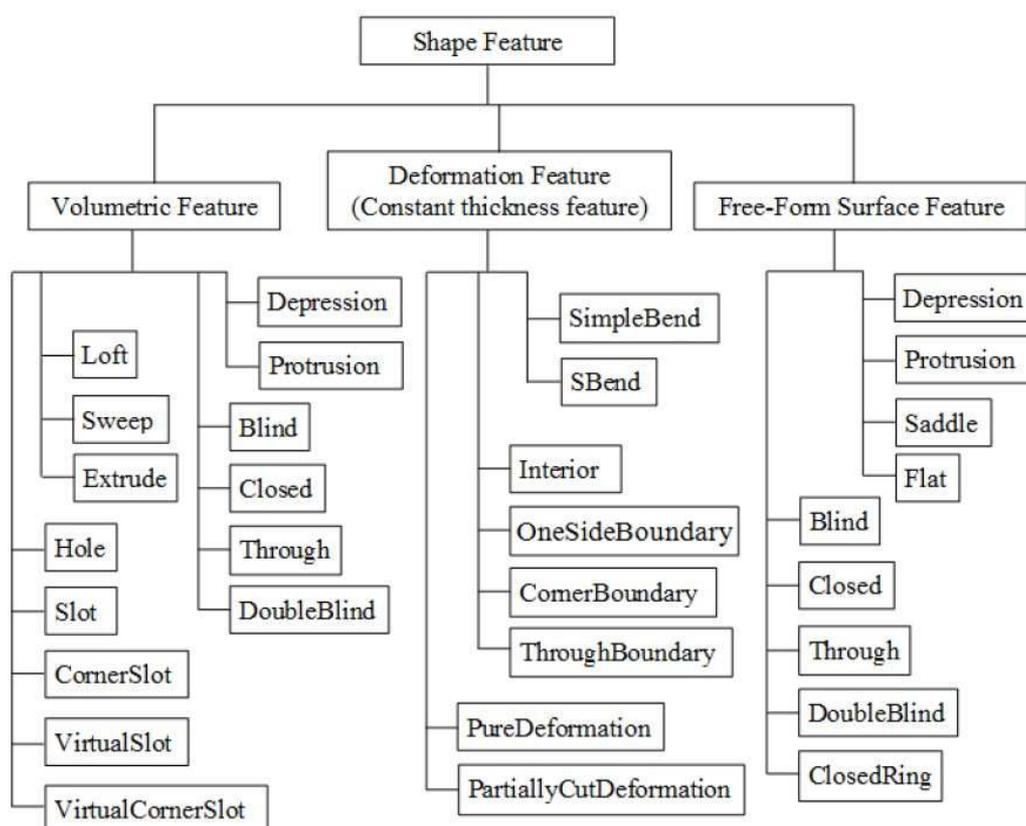


Figure 20 — Taxonomie de Gupta et Gurumoorthy [Gupta et Gurumoorthy, 2013]

Dans le contexte de l'usinage des outillages de forge, Tapie *et al.* [Tapie et al., 2009] a proposé une décomposition basée sur le procédé d'usinage, permettant d'obtenir cinq types d'entités d'usinage dédiées aux moules de forgeage (cf. figure 21) :

— Fond simple : Composée d'un seul plan perpendiculaire à l'axe de l'outil. Le mode de balayage est choisi en fonction des relations topologiques et des critères de productivité.

— Fond quelconque : Composée d'une à plusieurs surfaces, généralement cylindriques, dont les génératrices sont perpendiculaires à l'axe de l'outil et le profil est plan.

— Flanc simple : Composée d'une à plusieurs surfaces réglées dont les génératrices sont planes et obtenue par contournement.

— Flanc quelconque : Composée d'une à plusieurs surfaces réglées dont les génératrices ne sont pas planes.

— Liaison : Assure la transition entre les quatre dernières entités.

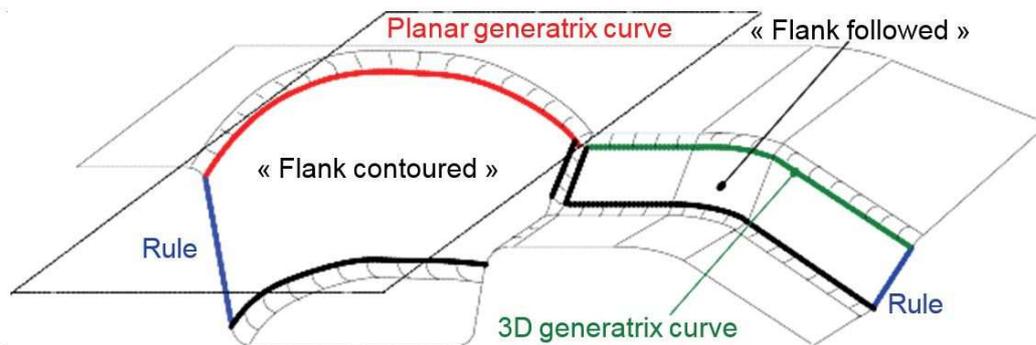


Figure 21 — Taxonomie de Tapie *et al.* [Tapie et al., 2009]

Par ailleurs, il existe d'autres classifications issues de l'industrie aéronautique, proposées dans le cadre des projets industriels notamment le projet USIQUICK [Anwer, 2000b]. Elles sont basées notamment sur l'expertise et le savoir-faire du domaine. Zirni [Zirni, 2006] a proposé une nouvelle classification d'entités d'usinage, dont la géométrie est élémentaire pour simplifier l'identification et supporter les traitements de conception de gamme (cf. figure 22) :

— Entité plane : Caractérise les formes composées d'une géométrie plane usinable en bout et/ou en flanc. Une géométrie plane est formée d'un certain nombre de faces planes, ayant la même primitive et la même normale.

— Entité réglée : Se compose d'une surface réglée usinée uniquement en flanc suivant les directions de ses génératrices.

— Entité masque : Caractérise les formes géométriques avec des faces en contre-dépouille (parois internes d'une cavité fermée, avec angle fermé avec le fond) qui engendre un problème d'accessibilité. Elle est composée des trois faces masquées mutuellement : une face plane principale (complètement masquée), associée à un ensemble de faces (cylindriques, planes ou réglées) en contre dépouille.

— Entité extrémité d'élanement : Caractérise les extrémités de tous les raidisseurs, les voiles, âmes et semelles considérés comme minces. Elle peut avoir

n'importe quelle forme géométrique (plane, réglée cylindrique, quelconque). Elle est usinée en bout ou en flanc avec possibilité de dégradation de la géométrie.

— Entité coin 5 axes : Composée du raccordement complété par les portions adjacentes des géométries des parois. Elle caractérise une forme de raccordement qui impose un usinage en flanc avec une variation continue de la direction de l'outil.

— Entité raccordement : Caractérise toutes les formes géométriques résultant des rayons de raccordement. Cette entité se différencie des entités précédentes par le fait qu'elle peut être complètement agrégée avec une de ses entités voisines.

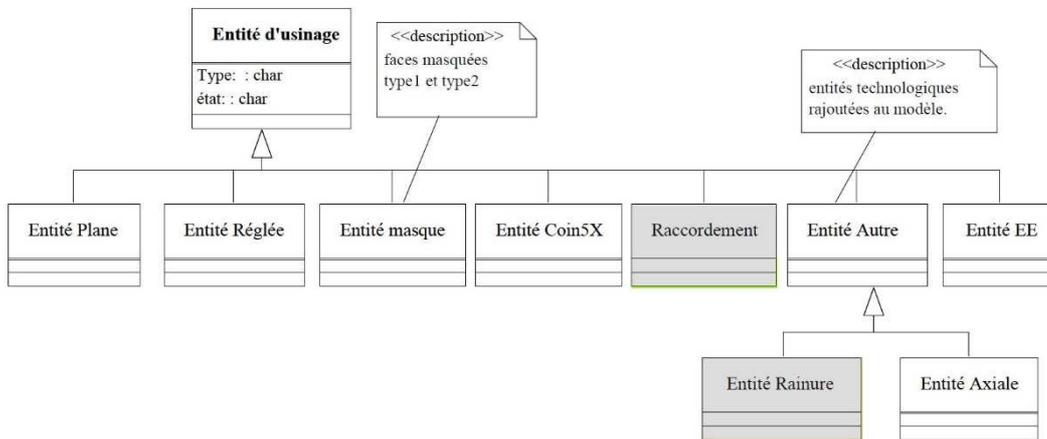


Figure 22 — Taxonomie de Zirmi [Zirmi, 2006]

De même, Harik [Harik, 2007] a défini une entité d'usinage élémentaire à base d'une et une seule face enrichie par des informations technologiques en s'appuyant sur le savoir-faire du préparateur (accès d'usinage, usinabilité, typage de la face selon ses modes d'usinage potentiels, outils capables). En exploitant l'enrichissement technologique au niveau des entités d'usinage élémentaires, la typologie des liens entre les faces et en analysant le graphe d'adjacence, le regroupement des différentes entités élémentaires d'usinage permet d'identifier cinq types d'entités d'usinage :

— Entité de surfaçage (2 axes et demi) : Reconnue par une entité élémentaire, ouverte, usinable en bout dont la direction est colinéaire à la normale à l'entité référence.

— Entité poche (2 axes et demi/ 5 axes) : Regroupe une chaîne de flanc de poche en liaison avec une chaîne de raccordement en liaison avec un fond de poche.

— Entité multi poches (3 axes) : Un regroupement des différentes entités poches qui possèdent des fonds de poche plans parallèles.

— Entité flanc externe (2 axes et demi/5 axes) : Identifiée par une chaîne de flanc externe. L'étude des directions d'usinage définit si cette entité est 2 axes et demi, ou 5 axes.

— Entité mince : Caractérise l'existence d'une entité élémentaire étroite délimitant une entité élémentaire usinable en bout et/ou en flanc.

5.3 Taxonomies STEP-NC

La norme STEP, en essayant de standardiser toutes les taxonomies proposées dans la littérature, définit une bibliothèque structurée pour l'entité STEP-NC. Cette dernière est subdivisée en trois sous-classes : région, entité de transition et entité de fabrication 2.5 axes (cf. figure 23).

— Région : Cette classe correspond aux entités de formes complexes qui nécessitent un usinage 5 axes. C'est une classe large, regroupant toute entité qui ne correspond pas à aucune des autres sous-classes de l'entité de fabrication.

— L'entité de transition : Cette classe représente le bord entre deux entités adjacentes, permettant ainsi de décrire le type de liaison qui existe entre elles, un chanfrein, ou un congé par exemple.

— L'entité de fabrication 2.5 axes : Cette classe regroupe toutes les entités qui se limitent à un usinage 2.5 axes : l'entité répliquée, l'entité composée et l'entité d'usinage.

- *L'entité répliquée* : Il s'agit d'un ensemble d'entités similaires, un cercle de trous, par exemple. L'entité est décrite une seule fois, en mentionnant l'emplacement et le nombre de répétitions.
- *L'entité composée* : Il s'agit d'une entité composée de deux à plusieurs entités, généralement, de types différents. Le volume de matière enlevé est l'union des volumes de tous les éléments qui composent cette entité. Parmi les entités composées, il y a les trous lamés et les trous fraisés, qui se composent de deux trous coaxiaux.
- *L'entité d'usinage* : Il s'agit d'une entité mère de toutes les entités présentes dans les pièces prismatiques usinées avec un usinage 2.5 axes : surface plane, poche, rainure, marche, profil, trou, bossage, spherical cap, extrémité arrondie, filetage.

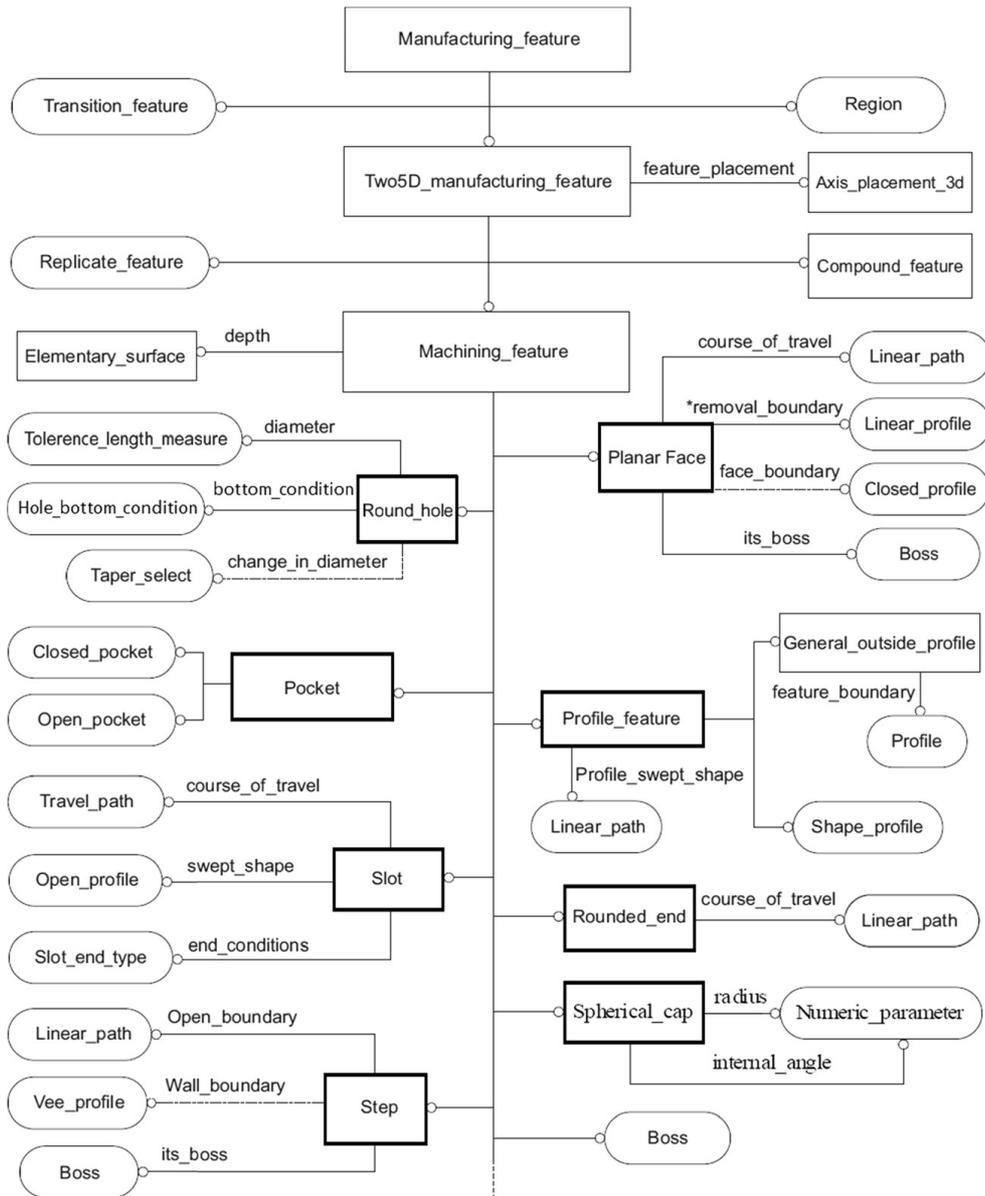


Figure 23 — Classification d'entités de fabrication selon la norme STEP-NC [ISO 14649-10:2002]

L'analyse de cet état de l'art sur la classification des entités d'usinage permet de conclure que seules les formes prismatiques sont prises en considération dans la plupart des travaux existants. Peu de travaux portent sur les formes complexes. Par ailleurs, les travaux qui s'intéressent aux pièces aéronautiques se basent essentiellement, sur des pratiques industrielles. Comme ces classifications ne sont pas définies à travers une méthodologie, leur reconnaissance devient difficile. En outre, la norme STEP-NC définit la forme complexe à travers la classe région qui n'est pas assez explicitée.

6 Conclusion

Ce chapitre présente une étude bibliographique permettant de situer les différents travaux existants dans la littérature qui portent sur la modélisation par entités, notamment l'entité d'usinage complexe. Cette étude a montré qu'il n'existe pas encore une définition unique. Les différentes définitions proposées dépendent toujours du domaine d'application. Dans le contexte de la fabrication, l'entité d'usinage représente une forme géométrique à laquelle sont attachés des spécifications et un processus d'usinage. L'entité d'usinage s'est développée, dans les années 80, principalement autour de la gamme d'usinage dans un environnement numérique assez limité. Or, elle n'a pas trop évolué au cours de ces dernières années. Par ailleurs, la plupart des travaux sur le développement de la notion d'entité d'usinage se sont concentrés sur les formes canoniques simples. Peu de travaux traitent les formes complexes, et définissent l'entité d'usinage complexe en se basant sur l'expertise et le savoir-faire industriel. Il est à noter qu'il existe peu de démarche méthodologique pour la caractérisation de l'entité de forme complexe. De la même manière, STEP-NC définit une classification de l'entité d'usinage qui regroupe toutes les formes non régulières, ne correspondant pas aux formes canoniques connues, dans une classe nommée région. Cette classe qui regroupe toutes les formes complexes obtenues par usinage 5 axes, n'a pas encore été bien développée à ce jour.

À la lumière de cet état de l'art, une reformulation de la notion d'entité d'usinage complexe semble nécessaire. La nouvelle caractérisation devrait profiter du développement numérique et des avantages offerts par les différents maillons de la chaîne numérique. La définition de l'entité d'usinage ne doit pas se limiter au niveau de la gamme d'usinage, mais elle doit tenir compte de toutes les phases du cycle de vie de produit pour assurer une meilleure caractérisation. De ce fait, nous répondons à cette problématique, dans le chapitre suivant, à travers une nouvelle caractérisation de l'entité d'usinage complexe. Cette nouvelle définition bénéficie des développements de la chaîne numérique tout en exploitant les différentes données générées par les différents maillons de cette chaîne.

Chapitre

2

**Modélisation et traitement des
données de la chaîne numérique de
fabrication**

1 Introduction

Après avoir mis en lumière dans le chapitre précédent les besoins en termes de caractérisation de l'entité d'usinage, il convient de proposer dans ce chapitre une nouvelle approche d'élaboration de l'entité d'usinage complexe dans un contexte de chaîne numérique. En effet, cette nouvelle caractérisation doit bénéficier des nouveaux développements de la chaîne numérique et des outils numériques supports des activités de conception et de fabrication. Les données provenant des différentes phases du cycle de vie du produit représentent les éléments de base pour cette caractérisation. Pour cela, une démarche globale de notre proposition est donnée et les différentes étapes qui permettent d'y aboutir sont détaillées par la suite.

2 La chaîne numérique de fabrication

Il y a une cinquantaine d'années, le monde de la fabrication ne ressemblait pas à celui d'aujourd'hui. La réalisation d'un projet industriel, le développement d'un produit et la gestion des données liées à ce produit ne se faisaient pas de la même façon. Le processus du développement au niveau des bureaux d'études et des bureaux des méthodes était manuel et orienté plutôt *papier*. De plus, la fabrication se réalisait sur des machines conventionnelles qui nécessitaient une forte intervention de l'opérateur. Depuis, la fabrication s'est beaucoup développée grâce aux progrès en électronique, automatique et en informatique. Ces progrès ont permis la transformation numérique pour la mise en œuvre des projets à travers l'introduction des logiciels dédiés aux différents traitements nécessaires (conception, simulation, fabrication, etc.) ainsi que des machines-outils à commande numérique plus performantes.

Dans cet environnement numérique, on appelle l'ensemble des étapes nécessaires à la réalisation d'un projet depuis la conception jusqu'à la fabrication du produit fini, une chaîne numérique. Cette chaîne numérique représente un enchaînement de traitements qui génèrent un ensemble de données *informatisées* relatives aux différentes étapes de ce processus. Les fichiers contenant ces données forment une succession de maillons reliés entre eux et interdépendants. Ainsi, la géométrie de la pièce se transforme, évolue et s'enrichit au fur et à mesure avec tout un ensemble de données numériques visant à définir le produit (spécifications géométriques, matériaux, etc.) au niveau de ces différents maillons qui forment la chaîne numérique d'industrialisation du produit.

La chaîne numérique se compose de cinq grandes étapes au niveau des applications métiers : la Conception Assistée par Ordinateur (CAO), la

Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO), le Post-Processeur (PP), la simulation d'usinage et la Machine Outil à Commande Numérique (MOCN) comme illustrée dans la figure 24. Le premier maillon de la chaîne est la CAO. Elle permet de modéliser la géométrie du produit. Par la suite, la problématique de la FAO est de générer les parcours d'outils, qui comprennent les trajectoires de coupe, les retours rapides, les dégagements et les trajectoires d'entrées et de sorties, permettant ainsi de créer la géométrie récupérée de la CAO, tout en spécifiant tout un ensemble de ressources et de paramètres relatifs à la gamme (niveau haut) et à la coupe (niveau bas). Le fichier résultant de la FAO n'est pas directement assimilable par la MOCN. Le post-processeur est alors utilisé pour le traduire et créer un nouveau fichier exploitable par la MOCN. Avant de passer à l'usinage, l'étape de la simulation permet de simuler l'enlèvement de matière afin de corriger les erreurs dans les programmes d'usinage avant de les envoyer aux MOCN et d'éviter ainsi les casses de l'outil, les collisions liées à l'accessibilité, les déplacements rapides dans la matière, etc. De plus, des modules d'optimisation des conditions de coupe peuvent alors être utilisés pour analyser et optimiser les programmes d'usinage tout en prenant en compte les puissances machines, le type de matériau usiné et les caractéristiques des outils renseignés en amont. En fin de chaîne, la MOCN exécute le programme d'usinage vérifié qui lui sera fourni.

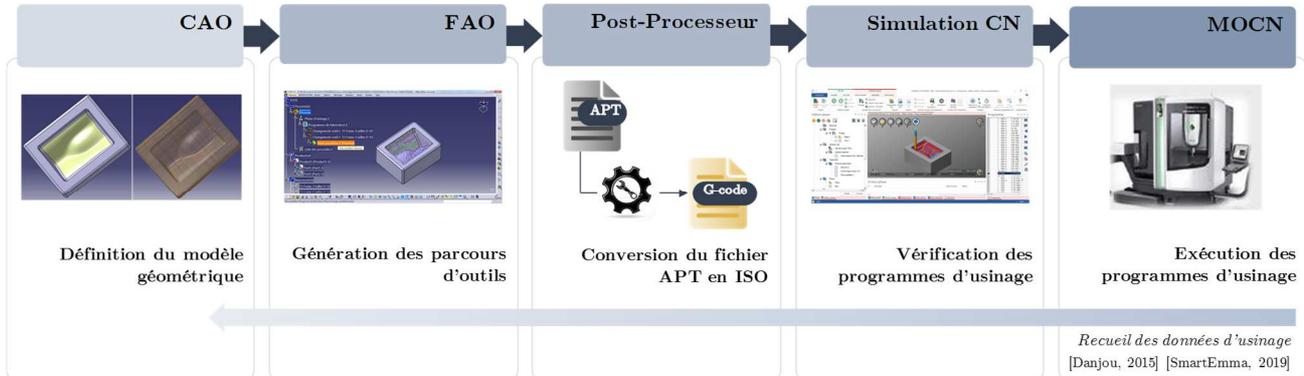


Figure 24 — Chaîne numérique en usinage

Tout au long de cette chaîne d'industrialisation et de fabrication, les données et les informations générées au niveau de chaque étape sont de plus en plus conséquentes. Ces données variées, hétérogènes et plus ou moins structurées nécessitent le développement de techniques spécifiques pour assurer leur gestion et leur capitalisation. Dans ce travail, nous nous intéressons aux données de la chaîne numérique pour aider à la caractérisation de l'entité d'usinage complexe qui va permettre d'assurer l'association de stratégies d'usinage adéquates pour les formes complexes, traduisant un savoir-faire métier qui pourrait être réutilisé.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les différentes définitions proposées pour l'entité d'usinage se limitent aux formes simples et se basent notamment sur la gamme d'usinage. Avec le développement numérique et la variété des données collectées tout le long de la chaîne numérique, il est possible d'enrichir l'entité d'usinage avec des nouvelles données. Les données de la chaîne recueillies à différents niveaux de granularité pourraient définir une entité multi-niveaux avec une variété de données. Par ailleurs, l'interopérabilité entre les différentes phases de la chaîne, de la conception à la fabrication, permettrait d'assurer un aspect dynamique à l'entité. Cette dernière pourrait évoluer et s'enrichir au niveau de chaque phase. Les données de l'usinage extraites au niveau des machines-outils représenteraient un enrichissement pour l'entité en y intégrant des données réelles issues de l'usinage. Néanmoins, les données brutes issues des systèmes numériques ne sont pas directement exploitables. Il s'agit de données de différentes natures qui proviennent de différentes phases et ayant différents niveaux de granularité. De ce fait, il est nécessaire de les extraire, de les organiser et de leur créer des structures qui permettent de bien les exploiter dans le contexte de l'entité d'usinage.

Dans la section suivante, nous allons présenter l'ensemble de données de la chaîne numérique dont nous disposons. Ces données seront par la suite organisées dans des structures hiérarchiques dans le but d'élaborer, d'enrichir et d'alimenter l'entité d'usinage complexe.

3 Extraction et traitement des données de la chaîne numérique de fabrication

Dans le cadre de ce travail, nous disposons de données qui proviennent principalement de trois phases de la chaîne numérique. Il s'agit des données de la CAO, de la FAO et de la simulation d'usinage (cf. figure 24). Dans cette section, les données de la chaîne numérique qui sont accessibles sont présentées ici.

3.1 Les données géométriques issues de la CAO

La première phase de la chaîne numérique est la Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Elle représente l'ensemble des outils logiciels et des techniques informatiques qui permettent d'aider le concepteur dans la modélisation géométrique d'un produit. Dans la modélisation géométrique, deux types de formes sont distinguées : les formes simples et les formes complexes. Les formes simples sont les formes canoniques utilisées dans la plupart des pièces mécaniques comme les plans, cylindres, sphères, etc. Les formes complexes représentent les formes gauches définies généralement à base de courbes de Bézier, B-Splines ou

des NURBS (Non Uniform Rational Basis Spline). Il existe dans les modeleurs géométriques plusieurs techniques de représentation géométrique :

— La représentation par frontière ou le B-Rep. qui consiste à définir la pièce à l'aide d'éléments surfaciques frontières connectés entre eux.

— La représentation paramétrique qui définit la surface par une forme paramétrique avec deux paramètres, désignés par u et v , dans l'espace euclidien \mathbb{R}^3 .

— Le maillage permettant d'approximer les surfaces d'un solide à l'aide de polygones qui peuvent être des triangles, des quadrilatères ou d'autres polygones convexes.

Contrairement aux formes canoniques (plans, cylindres, etc.), la représentation paramétrique polynomiale est souvent utilisée pour les formes complexes. Cependant, notre approche exploite la représentation discrète des surfaces afin de s'approcher aux autres activités de la chaîne numérique. Cette approche basée sur la géométrie discrète définit la surface de la pièce à travers un maillage triangulaire permettant de décomposer une surface continue en éléments géométriques simples. Dans notre cas, ces éléments sont des triangles. Ainsi, le maillage triangulaire permet de construire la structure topologique des surfaces à l'aide de trois éléments essentiels: des sommets (V), des arêtes (E) et des faces (F) (cf. figure 25). Le maillage se base principalement sur la géométrie qui spécifie les coordonnées et les autres caractéristiques géométriques de chaque sommet ainsi que la connectivité, ou la topologie, qui décrit les différentes relations entre les éléments du maillage. Pour ce faire, il existe plusieurs logiciels tels que : CGAL, OpenMesh, MeshLab, FreeCad, Catia, etc., qui assurent la génération du maillage. Le maillage ainsi généré peut-être exporté sous différents formats tels que : Stereolithography (.stl), Polygon File Format (.ply), Object File Format(.off), etc.

Le processus du maillage crée à partir de la surface continue une surface discrète décrite par une structure triangulaire. Le nombre et la taille des triangles dans le maillage dépendent de la précision utilisée lors de l'approximation de la surface originale. Le choix de la finesse du maillage a un impact important sur la précision des résultats des traitements ultérieurs : plus le maillage est fin, plus les résultats sont précis, mais plus le temps de calcul augmente. Elle se base principalement sur la forme de la surface de départ. De ce fait, le maillage peut être classé en deux catégories : maillage régulier et maillage irrégulier. Le maillage régulier est un maillage composé de triangles de taille et forme régulières. Tandis que le maillage irrégulier est une structure dans laquelle la taille des triangles est différente les uns des autres et dépend généralement de la forme locale de la surface. De plus, il existe le maillage hybride qui contient un mélange de parties régulières et de parties non régulières. Les parties de la géométrie qui sont simples sont représentées par des mailles régulières et celles qui sont plus complexes ont des mailles irrégulières. Ce type de maillage est mieux adapté à la gestion des

géométries de formes complexes, en particulier les surfaces ayant des régions à forte courbure puisqu'il offre une plus grande flexibilité géométrique. Pour effectuer un choix pertinent sur le type et la taille du maillage, il faut se baser sur la géométrie initiale et le contexte d'utilisation du maillage. Pour cela, il faut trouver un compromis entre la précision des résultats de traitements et le temps de calcul.

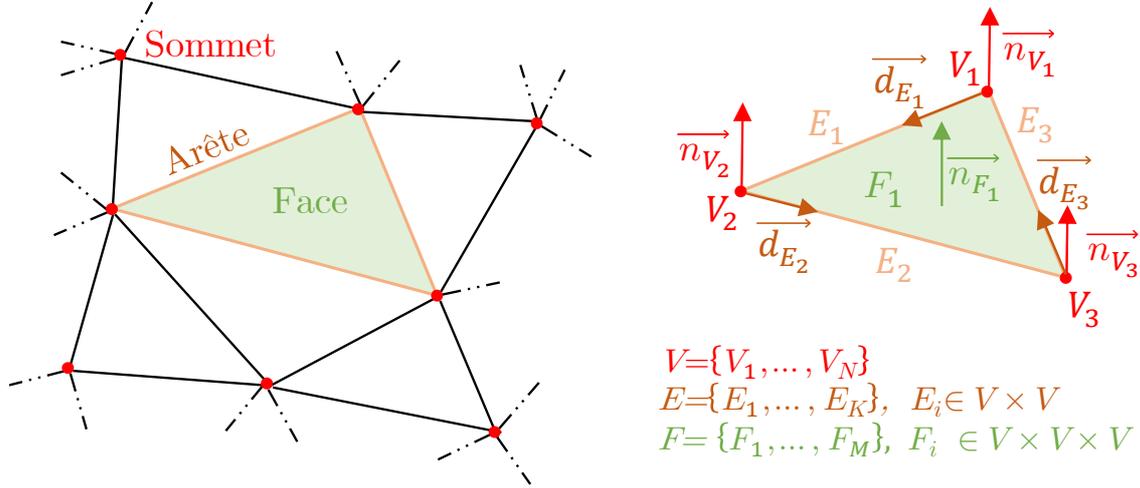


Figure 25 — Géométrie différentielle discrète

Pour simplifier la manipulation de cette représentation triangulaire, différents paramètres, appelés descripteurs de surface, récupérés directement à partir des fichiers du maillage ou calculés à base de ces derniers peuvent être utilisés pour décrire la géométrie (cf. figure 25).

Tout d'abord, le maillage est décrit par trois paramètres essentiels :

— \vec{d}_E : Le vecteur directeur de l'arête E définit l'orientation de l'arête d'une face en se basant sur la convention matière à gauche.

— \vec{n}_F : Le vecteur normal à la face F est un vecteur normal orienté extérieur matière.

— \vec{n}_V : Le vecteur normal au sommet V est un vecteur normal calculé à partir des vecteurs normaux des faces incidentes à ce sommet. Il existe plusieurs méthodes pour calculer ce vecteur normal. Dans ce travail, la méthode développée par Zhao [Zhao, 2010] a été adoptée. Cette méthode a prouvé son efficacité par rapport aux autres méthodes proposées dans la littérature. Il s'agit d'une moyenne pondérée des normales des faces qui composent le voisinage du sommet :

$$\vec{n}(p) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i \cdot \vec{n}_{F_i}}{\|\sum_{i=1}^N \omega_i \cdot \vec{n}_{F_i}\|} \quad (2.1)$$

où: \vec{n}_{F_i} ($i = 1, \dots, N$) représente le vecteur normal à la face F_i et ω_i ($i = 1, \dots, N$) représente les poids correspondants aux vecteurs normaux des faces F_i . N étant le nombre de faces adjacentes.

La particularité de cette méthode réside dans la définition des coefficients de pondération qui tiennent compte de l'influence de la surface de chaque face adjacente et de la distance entre le sommet et les barycentres de ces faces (cf. figure 26). Ils sont définis suivant la formule :

$$\omega_i = \frac{A_i/d_i^2}{\sum_{i=1}^N A_i/d_i^2} \quad (2.2)$$

où: A_i ($i = 1, \dots, N$) représente l'aire d'un triangle F_i incident au sommet p_i et d_i ($i = 1, \dots, N$) est la distances entre le sommet et le barycentre du triangle F_i .

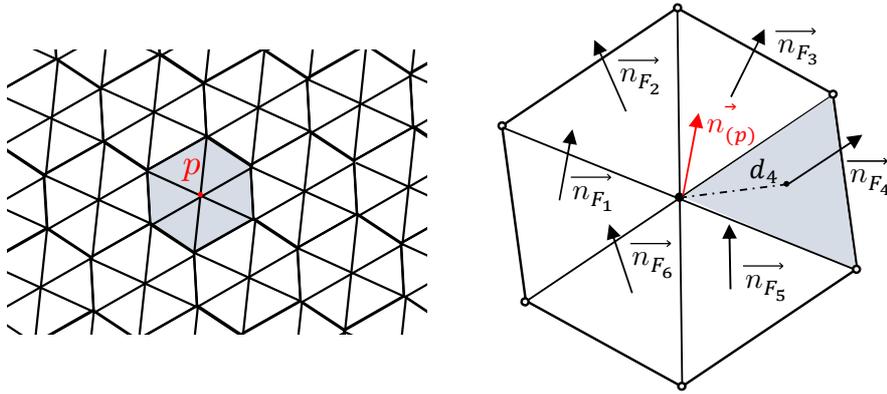


Figure 26 — Estimation du vecteur normal à la face [Zhao, 2010]

Par ailleurs, le maillage est enrichi par d'autres descripteurs de surface basés sur la courbure. Ces descripteurs sont définis par des développements de géométrie différentielle discrète et calculés à la base des éléments du maillage [Zhao et al., 2013] :

— **Indice de forme (Shape index)** : Indice de courbure qui mesure localement le type de la surface au niveau de chaque sommet du maillage (cf. figure 27). Il est calculé à base de la courbure maximale et minimale K_1 et K_2 respectivement suivant la formule suivante [Koenderink et Van Doorn, 1992]:

$$s = \frac{-2}{\pi} \arctan \left(\frac{K_1 + K_2}{K_1 - K_2} \right) \quad (K_1 > K_2) \quad (2.3)$$

Il définit dix types de surfaces locales dans l'intervalle $[-1, +1]$, avec $s = 2$ pour une surface plane. Le type de surface d'un sommet peut être identifié selon la valeur de l'indice de forme suivant le tableau 2.

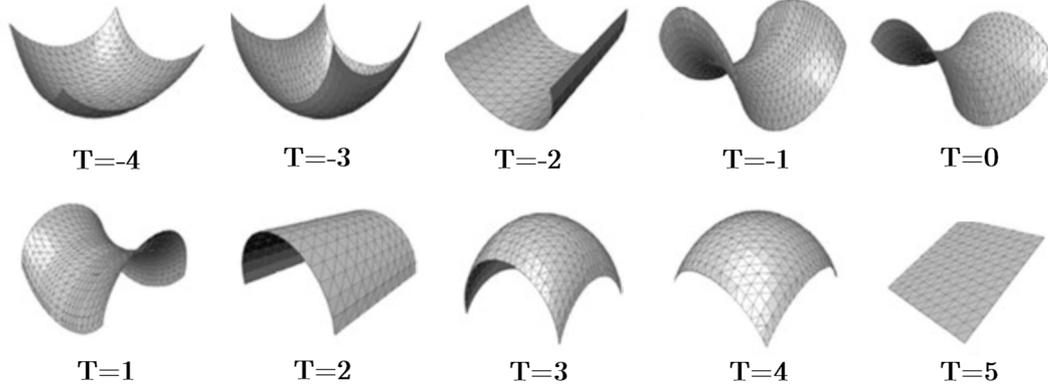


Figure 27 — 10 types de surfaces définies par le shape index

Surface type	Shape index interval	Type label	Surface type	Shape index interval	Type label
Spherical cup	$s \in [-1, -\frac{7}{8}]$	T=-4	Spherical cap	$s \in [\frac{7}{8}, 1]$	T=4
Through	$s \in [-\frac{7}{8}, -\frac{5}{8}]$	T=-3	Dome	$s \in [\frac{5}{8}, \frac{7}{8}]$	T=3
Rut	$s \in [-\frac{5}{8}, -\frac{3}{8}]$	T=-2	Ridge	$s \in [\frac{3}{8}, \frac{5}{8}]$	T=2
Saddle rut	$s \in [-\frac{3}{8}, -\frac{1}{8}]$	T=-1	Saddle ridge	$s \in [\frac{1}{8}, \frac{3}{8}]$	T=1
Saddle	$s \in [-\frac{1}{8}, \frac{1}{8}]$	T=0	Plane	$s = 2$	T=5

Tableau 2 — Spécifications des types de surface en fonction du shape index

— **Intensité de courbure (Curvedness)** : Indice de courbure défini positif qui caractérise l'intensité de courbure :

$$c = \frac{\sqrt{(K_1^2 + K_2^2)}}{2} \quad (2.4)$$

— **Convexité/Concavité des arêtes** : La notion de concavité lie un couple de faces adjacentes et dépend de leurs propriétés topologiques et géométriques. Elle peut être définie à l'aide de l'angle matière (angle situé à l'intérieur de la

matière et formé par les deux faces qui se coupent en cette arête) tel que : une arête est dite concave si l'angle matière est supérieur à 180° , sinon, elle est convexe. La caractérisation de la convexité des arêtes consiste à étudier le signe de la variable m , calculée à base des orientations des faces et des arêtes (cf. figure 28). Dans le cas de surfaces de forme complexe, l'arête séparant deux régions adjacentes est discrétisée en plusieurs morceaux, approximés par de petits segments. Pour cela, la convexité est calculée pour chaque segment à l'aide de la variable m_i définie comme suit :

$$m_i = (\overline{n_{F_{i_1}}} \times \overline{n_{F_{i_2}}}) \cdot d_{E_i} \quad (2.5)$$

où: $\overline{n_{F_{i_1}}}$, $\overline{n_{F_{i_2}}}$ sont des vecteurs normaux de deux faces adjacentes (F_{i_1} et F_{i_2} respectivement) et d_{E_i} est le vecteur directeur de la i^{eme} sous-arête.

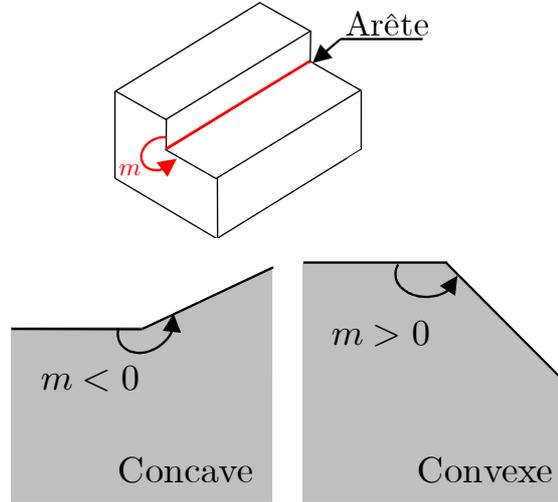


Figure 28 — Définition de la convexité/concavité des arêtes [Anwer, 2000a]

La convexité de l'arête E est ainsi calculée comme une somme pondérée des convexités des sous-arêtes:

$$m = \sum_{i=1}^Q w_i \cdot m_i \quad \begin{array}{l} m < 0 \rightarrow \text{Concave} \\ m > 0 \rightarrow \text{Convexe} \end{array} \quad (2.6)$$

où: w_i est le poids de la i^{eme} sous-arête et Q le nombre total des sous-arêtes. Nous supposons que les poids de tous les petits segments de la même arête sont égaux et positifs, tel que : $\sum_{i=1}^Q w_i = 1$.

De plus, d'autres indices de courbures, classiquement utilisées, sont également définis comme la courbure gaussienne K et la courbure moyenne H .

$$K = K_1 \cdot K_2 \tag{2.7}$$

$$H = \frac{1}{2}(K_1 + K_2) \tag{2.8}$$

En fait, la phase de conception fournit un modèle géométrique natif de la pièce sous un format CAO. Pour pouvoir l'étudier, il a fallu choisir une représentation qui facilite le traitement de formes complexes. De ce fait, la représentation triangulaire a été utilisée. Par ailleurs, dans le but de caractériser l'entité d'usinage, cette représentation nécessite d'être enrichie. Pour cela, différents descripteurs de forme basés sur la courbure ont été attribués aux sommets, arêtes et faces du maillage.

3.2 Les données d'usinage issues de la FAO et de la simulation

3.2.1. La fabrication assistée par ordinateur

La fabrication assistée par ordinateur (FAO), le deuxième maillon de la chaîne numérique, représente l'ensemble des logiciels et des techniques informatiques permettant de générer le programme d'usinage qui décrit les différents mouvements à exécuter au niveau des machines-outils pour fabriquer la pièce, en se basant sur son modèle géométrique créé au niveau de la CAO.

Il faut noter ici que la FAO est une description de la gamme d'usinage, déjà établie par le gammiste, dans un contexte numérique. La gamme d'usinage permet de déterminer les méthodes de fabrication les plus performantes, les dimensionner et les réaliser dans un ordre logique et optimal. Elle décrit le processus de fabrication de la pièce en précisant les différentes étapes nécessaires pour passer d'un état brut à un état fini. Pour ce faire, le gammiste se base sur les données géométriques de la pièce, les spécifications géométriques, les contraintes économiques (quantité et délai), le type de production, les ressources de production disponibles et leurs caractéristiques (machines-outils, outils, moyens de posage, etc.) pour générer les informations nécessaires à sa réalisation de la pièce. Ces informations se résument à une liste de posages définie par la suite ordonnée des opérations d'usinage et des ressources pour les mettre en œuvre, les conditions technologiques (conditions de coupe), les trajectoires d'outils ainsi que l'estimation des temps et des coûts. La tâche de FAO est alors de créer le fichier qui contient les parcours d'outils tout en respectant les contraintes géométriques

données par le concepteur et les exigences technologiques et fonctionnelles définies par le gammiste.

De ce fait, plusieurs paramètres, en fonction du logiciel, sont à déclarer pour définir les différentes opérations. Il s'agit des outils de coupe avec leurs caractéristiques géométriques, les stratégies d'usinage, les vitesses de coupe, d'avance et vitesse de la broche, les modes de balayage, les pas longitudinal et transversal, la lubrification, les types d'approche et de dégagement, etc. Le fichier sortant de la FAO sous format APT ou CL File, regroupant l'intégralité des déplacements outils à effectuer ainsi que des paramètres propres à l'usinage, n'est pas directement exploitable par les MOCN. C'est pour cela qu'il faut le traduire en un langage facilement interprétable par la Commande Numérique (CN) de la machine-outil. Pour ce faire, ce fichier est transféré au Post-Processeur (PP). Le PP est un outil informatique, utilisé après la phase de FAO, pour transférer le fichier FAO en un fichier au format ISO supporté par la plupart des MOCN.

À ce niveau-là de la chaîne numérique, des nouvelles données sont définies et générées pour enrichir la modélisation géométrique. Il s'agit d'un ensemble d'informations relatives à la fabrication de la pièce. Ces données peuvent être classées en deux niveaux différents : les données définies par l'utilisateur, regroupant toutes les informations qui définissent la gamme d'usinage ainsi que les paramètres qui ont été saisis pour créer le programme d'usinage au niveau du logiciel de FAO ; et les données générées après la création des trajectoires d'outils, regroupant toutes les données qui peuvent être identifiées du fichier sortant de la FAO ou après le PP sous format ISO. Entre les deux niveaux, quelques données ne sont pas exploitées. Ce ne sont pas toutes les données définissant la gamme et le programme d'usinage au départ qui sont récupérées après le PP. Certaines données, par exemple les posages, les modes de balayages ou même les vitesses de coupe, déclarées et spécifiées par l'utilisateur avec des valeurs bien précises ne sont pas retrouvées au niveau du fichier sortant du PP. Dans ces travaux, nous ne disposons pas de la gamme complète avec toutes les données d'usinage explicites. Mais plutôt, nous avons accès uniquement aux données générées après le PP. La liste des données que nous avons extraites sera donnée dans la suite de cette section.

En résumé, la phase de FAO permet de compléter les informations géométriques et fonctionnelles attachées à la pièce au niveau de la CAO par les différentes informations indispensables à la mise en œuvre des machines-outils nécessaires à la fabrication de la pièce [Bernard, 2000].

3.2.2. La simulation d'usinage

Avant de passer à l'usinage sur les MOCN, les programmes d'usinage générés au niveau des PP sont généralement vérifiés avec des logiciels de simulation. Cette phase de simulation permet de reproduire virtuellement l'enlèvement de matière et visualiser ainsi l'action des outils dans la matière tout le long de la trajectoire sur la machine-outil afin d'éviter les collisions, vérifier les déplacements rapides et détecter les problèmes liés à l'enlèvement de matière. Cette vérification permet ainsi d'améliorer le taux de rentabilité de l'environnement MOCN, en prévoyant au mieux les aléas de production et évitant toute dégradation de matériel.

Il existe plusieurs logiciels de simulation sur le marché industriel. Dans ce travail, le logiciel NCSIMUL® a été utilisé pour analyser les programmes d'usinage en prenant en considération tous les aspects relatifs au processus d'usinage afin d'assurer une simulation qui reflète la réalité. Pour ce faire, l'environnement de la simulation comporte le programme d'usinage sous format APT ou ISO, les machines, les outils coupants et leurs porte-outils, les éléments de bridages, ainsi que le modèle de la pièce finie et son brut. Par ailleurs, les conditions de coupe du processus d'usinage sont analysées afin d'optimiser les trajectoires des outils utilisés. Pour cela, la trajectoire est découpée en petits segments avec une fréquence de segmentation prédéfinie. La segmentation des mouvements d'outils peut être définie en fonction du temps ou de la distance. La segmentation temporelle définit l'intervalle de temps entre deux points échantillonnés successifs. Tandis que la segmentation en fonction de la distance se base sur la longueur des segments. La longueur des segments est définie par l'utilisateur avec une valeur fixe ou en fonction du pourcentage du diamètre maximum de l'outil coupant. Le découpage de la trajectoire permet d'effectuer des calculs d'enlèvement de matière plus précis pour chaque point échantillonné. Ainsi, la précision des calculs dépend principalement de la fréquence d'échantillonnage.

En effet, le fichier sortant de la simulation associe à chaque point de la trajectoire discrétisée les données de coupe calculées (vitesse de coupe, débit copeaux, etc.) et permet de récupérer aussi les différentes informations relatives à la gamme (machine, temps d'usinage, etc.) et à la trajectoire (positions et orientation de l'outil, etc.). Ces données de gamme et de trajectoire transmises de la FAO sont aussi associées à chaque point de la trajectoire. Par conséquent, nous disposons d'une trajectoire enrichie avec différentes données d'usinage. Le tableau 3 résume toutes les données d'usinage auxquelles nous avons accès après cette simulation. Dans le contexte de la définition de l'entité d'usinage, ces données ne sont pas toutes pertinentes. Des analyses supplémentaires sont nécessaires pour identifier les données qu'il faut garder pour la suite des traitements.

Gamme	
Brut	
Outil	Référence, type, famille, géométrie.
Ligne du programme	
Cycle d'usinage	Nom de la séquence NCSIMUL.
Opération	Numéro de l'opération.
Temps d'usinage	Temps absolu, temps relatif, temps de l'outil.
Machine	
Trajectoire	
XYZ ABC	Positions des axes machines.
XYZ IJK	Position du bout de l'outil et orientation de l'axe de l'outil.
Type de mouvement	Pas de déplacement, mouvement général, réorientation à position constante, mouvement dans le plan perpendiculaire à l'axe de l'outil ...
Type d'intersection	Type d'intersection entre l'outil et le brut : Pas d'interaction brut/outil, tangent à la matière, usinage matière brute, usinage matière déjà usinée.
Coupe	
V_c (m/min)	Vitesse de coupe, dépend essentiellement de la matière à usiner, du matériau constituant l'outil coupant et des capacités de la machine (puissance broche, rigidité, usinage classique ou UGV).
S (tr/min)	Vitesse de la broche.
F (mm/min)	Avance en bout d'outil, exprime la vitesse de déplacement de l'outil par rapport au brut, elle est fonction du nombre de dents de l'outil et de la vitesse de rotation de la broche.
h (mm)	Épaisseur de copeau, mesurée à son maximum (elle n'est pas toujours égale à l'avance par dent).
A_p (mm)	Profondeur de passe, hauteur usinée selon l'axe de la fraise (engagement axial).
A_e (mm)	Épaisseur de passe, largeur engagée de la fraise (engagement radial).
A_d (mm^2)	Aire usinée, surface de contact outil/matière projetée dans le plan perpendiculaire au vecteur de déplacement de l'outil ($A_d \leq A_p \times A_e$).
F_z ($mm/dent$)	Avance par dent.

4. Structuration hiérarchique des données pour la caractérisation de l'entité d'usinage

Volume usiné	Volume de la matière enlevée par l'outil.
Diamètre usiné (<i>mm</i>)	Diamètre effectif.
Angle (°)	Angle compris entre le plan perpendiculaire à l'axe outil et le vecteur déplacement de l'outil.
Débit copeaux (<i>mm³/min</i>)	Volume de matière enlevée par unité de temps.

Tableau 3 — Données d'usinage récupérées de la simulation d'usinage (NSCIMUL)

Enfin, chaque phase de la chaîne numérique offre un ensemble de données variées en termes d'échelle, unités et nature (l'avance par dent : un paramètre de coupe en mm/dent, l'indice de forme : un descripteur de forme, l'opération d'usinage : un élément de la gamme). Les données géométriques et d'usinage, que nous venons d'extraire, représentent les éléments de base qui définissent la notion d'entité d'usinage. Cependant, comme elles sont non homogènes et proviennent de différentes sources à différents niveaux de granularité, elles ne peuvent pas être exploitées directement. Il est nécessaire de les analyser et les structurer afin de pouvoir les utiliser dans ce contexte.

4 Structuration hiérarchique des données pour la caractérisation de l'entité d'usinage

Dans la section précédente, nous avons exposé toutes les données accessibles que nous avons récupérées de la chaîne numérique. Comme il s'agit de données de différentes natures, il est difficile de les exploiter dans leurs états bruts pour la caractérisation de l'entité d'usinage complexe. Une structuration de ces données devient alors nécessaire.

En effet, la structuration de données est une manière d'organiser les données et de les représenter sous une certaine forme pour simplifier leur traitement. Elle représente une étape importante pour assurer une manipulation plus efficace et rapide des données en les modélisant avec des schémas de description. Un schéma de description ou un modèle de données permet d'illustrer la représentation logique des données en précisant les relations et les contraintes qui déterminent comment les données sont organisées. Dans la littérature, il existe de nombreux types de modèles de données, répondant à différentes contraintes, par exemple, un modèle hiérarchique, un modèle relationnel, un modèle réseau, etc. [Gardarin, 2003].

Dans cette section, une méthodologie de structuration des données géométriques et d'usinage, qui représentent les éléments de base dans la définition de l'entité d'usinage, est proposée. Comme les données extraites de la chaîne numérique sont définies à travers différents niveaux de granularité, il est logique de

choisir le modèle hiérarchique. Ce type de modèle permet d'organiser les données de manière arborescente tel que chaque élément contient d'autres éléments d'ordre inférieur jusqu'au dernier niveau. Les liens entre ces niveaux sont de type 1 : N. Ceci veut dire que chaque niveau possède 1 à N éléments descendants d'un niveau plus bas. Ainsi, le schéma est exprimé au moyen d'un arbre ordonné. Le modèle hiérarchique est simple, facile à implémenter et répond à nos besoins pour la caractérisation de l'entité d'usinage complexe.

4.1 Structuration des données géométriques

La conception assistée par ordinateur, la première phase de la chaîne numérique, permet de créer le modèle de la pièce. En fonction du logiciel de conception, plusieurs techniques de représentation géométrique sont possibles. Face à la complexité de caractérisation des formes complexes, un maillage triangulaire, enrichi par plusieurs descripteurs de surface, est adopté ici comme représentation de la forme complexe.

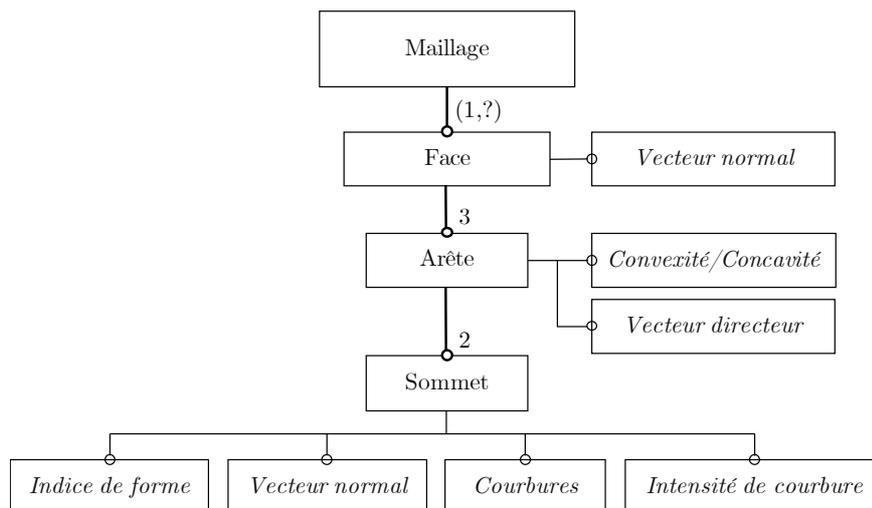


Figure 29 — Structuration hiérarchique de la représentation triangulaire

Dans cette section, toutes ces données sont structurées sous forme d'une structure hiérarchique pour faciliter la caractérisation de l'entité d'usinage. Cette structure permet de décrire comment sont organisées les données. Tout d'abord, la figure 29 présente la structuration hiérarchique de la représentation triangulaire définie par les faces, les arêtes et les sommets. Le sommet, l'élément de base du maillage, est défini par ces coordonnées cartésiennes. De plus, il est enrichi par les différents descripteurs de surface basés sur la courbure définis précédemment (indice de forme, intensité de courbure, etc.). Deux sommets définissent alors une arête. Un vecteur directeur et un indice de convexité sont associés à

chaque arête. De même, une face triangulaire, se composant de trois arêtes et trois sommets, est décrite par son vecteur normal.

À partir de cette représentation discrétisée, l'idée est d'arriver à définir l'entité d'usinage avec les données géométriques. Néanmoins, cette définition doit prendre en considération la forme complexe de l'entité. Pour cela, l'entité est définie en deux niveaux différents avec des sous-entités et des régions (cf. figure 30).

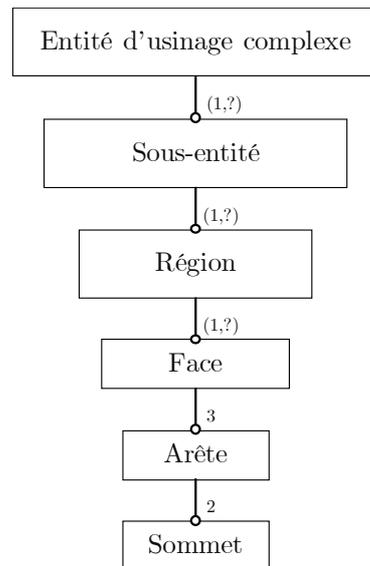


Figure 30 — Structure hiérarchique des données géométriques

Ces deux notions sont définies comme suit :

— **Région** : La région est un ensemble de sommets ayant des propriétés similaires. Un découpage, basé sur l'ensemble de ces propriétés attachées à la géométrie, permet de découper la surface complexe et de créer ainsi ces régions. Les détails concernant la procédure du découpage sont donnés dans le chapitre suivant.

— **Sous-entité** : La sous-entité correspond à un groupe de régions adjacentes qui ont été usinées dans la même séquence d'usinage. La séquence d'usinage étant une suite ordonnée ininterrompue d'opérations d'usinage. Un groupe de sous-entités voisines définissent alors une entité d'usinage en se basant sur les techniques de reconnaissance d'entités.

Enfin, le modèle hiérarchique permet de structurer les données géométriques qui définissent l'entité d'usinage de forme complexe en plusieurs niveaux. Cette structuration arborescente est importante, car elle facilite la manipulation de la forme complexe pour l'élaboration de l'entité d'usinage.

4.2 Structuration des données d'usinage

Comme cité précédemment, les données d'usinage nécessitent aussi une structuration pour pouvoir les exploiter dans la définition de l'entité d'usinage complexe. Ces données correspondent aux données de la gamme, de la FAO et de la simulation d'usinage. En effet, elles varient en comprenant des données de plus haut niveau et des données liées à des niveaux plus bas. La structuration hiérarchique permet alors de mettre en évidence leur granularité dans la définition de l'entité d'usinage.

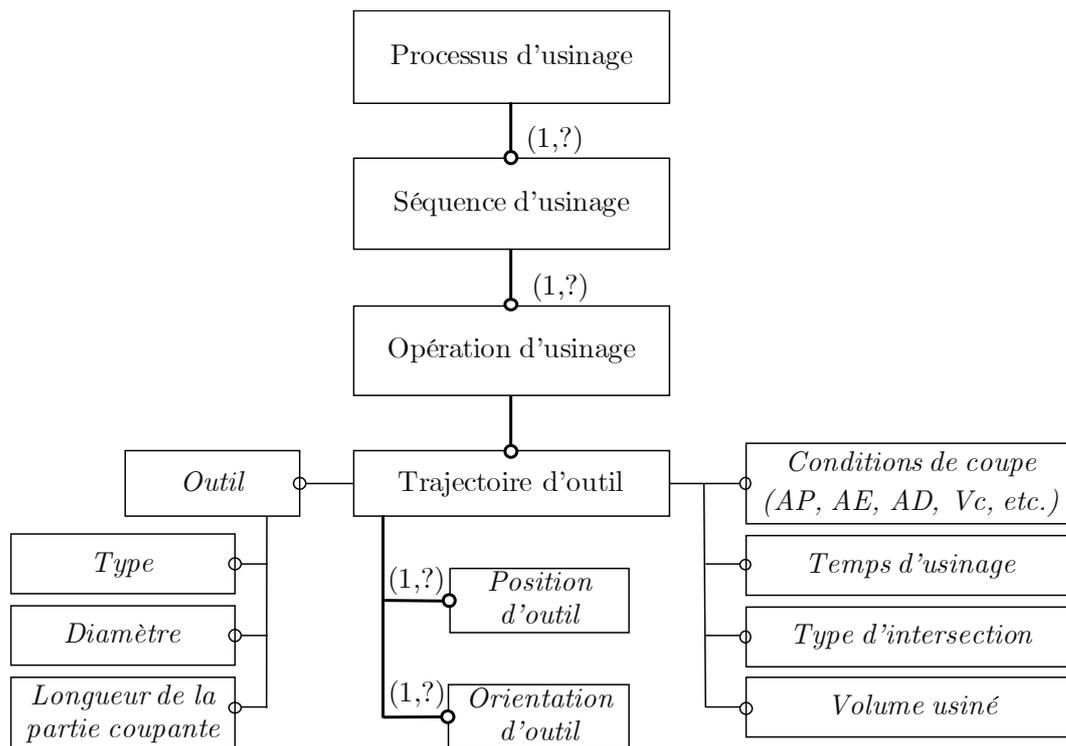


Figure 31 — Structure hiérarchique des données d'usinage

La figure 31 présente le modèle hiérarchique qui permet d'organiser les données d'usinage en introduisant quelques notions d'usinage afin de respecter la granularité. Il s'agit du processus, de la séquence et de l'opération d'usinage. De ce fait, au niveau plus haut, le processus d'usinage est défini. Le processus d'usinage représente un enchaînement ordonné et interruptible de séquences d'usinage conduisant à la réalisation d'une forme géométrique connue du fabricant. Cette définition donnée par Bourdet [Bourdet et al., 1990] doit être adaptée dans le cas de forme complexe, car la forme géométrique n'est connue qu'après certains traitements et analyses réalisés en se basant sur les différentes données extraites. Quant à la séquence d'usinage, elle est définie comme une suite ordonnée ininterrompue d'opérations d'usinage. Enfin, l'opération d'usinage correspond au

travail élémentaire d'un seul outil réalisant une seule forme géométrique. Elle est définie donc par un outil et une trajectoire nécessaire à la génération de la forme. L'outil est caractérisé par le type (cylindrique, torique, etc.), la longueur et le diamètre. La trajectoire représente l'enchaînement des positions outils sur la surface à usiner. Le positionnement de l'outil sur la surface est donné par la position de l'outil et l'orientation de son axe par rapport à la pièce. De plus, la trajectoire d'outil est enrichie avec l'ensemble de données récupérées au niveau de la simulation (conditions de coupe, temps d'usinage, etc.). Chaque point discrétisé de la trajectoire est caractérisé par les différentes données de la coupe.

Enfin, le modèle hiérarchique a permis de définir les différents niveaux de granularité (processus, séquence et opération d'usinage) et d'organiser ainsi les données issues de la simulation.

4.3 Caractérisation de l'entité d'usinage complexe

Les différentes définitions proposées dans la littérature concernant l'entité d'usinage s'accordent sur le fait qu'elle représente une forme géométrique, à laquelle sont attachés des spécifications et un processus d'usinage. Ces entités sont généralement définies au niveau de la gamme, représentant ainsi un état figé de la pièce, sans tenir compte des autres phases du cycle de vie du produit. Pour pallier ce problème, une nouvelle entité d'usinage riche, dynamique et multi-niveaux est proposée.

Dans la plupart des définitions proposées, la forme est préalablement connue et identifiable puisqu'il s'agit principalement de formes simples. Cependant, ce n'est pas le cas avec les formes complexes. Ces formes nécessitent des traitements particuliers pour mieux les caractériser. Dans notre cas, la forme complexe est définie en se basant sur l'ensemble des données extraites de la chaîne numérique. En fait, la chaîne numérique génère des données de différentes natures associées aux différentes phases. Nous disposons principalement des données géométriques, générées ou calculées à partir de la CAO, ainsi que des données d'usinage récupérées au niveau de la simulation d'usinage, regroupant des données de gamme, de FAO et de coupe. Les données géométriques représentent un maillage triangulaire enrichi par différents paramètres définis pour chaque sommet, arête et face. De plus, nous récupérons, au niveau de la simulation, plusieurs paramètres d'usinage attachés à chaque point de la trajectoire discrétisée. Ayant ces deux familles de données, l'idée est de les regrouper pour pouvoir décrire la forme complexe. Une mise en correspondance, également nommée « *mapping* » est donc établie entre les points de la trajectoire et les sommets du maillage triangulaire. Chaque point du maillage est projeté sur un point de la trajectoire de telle sorte que nous lui associons les paramètres d'usinage du point de la trajectoire auquel il est lié. Cette mise en correspondance vient donc enrichir la géométrie avec des

données d'usinage. L'objectif est d'arriver à mieux caractériser la forme complexe à partir de cette géométrie enrichie.

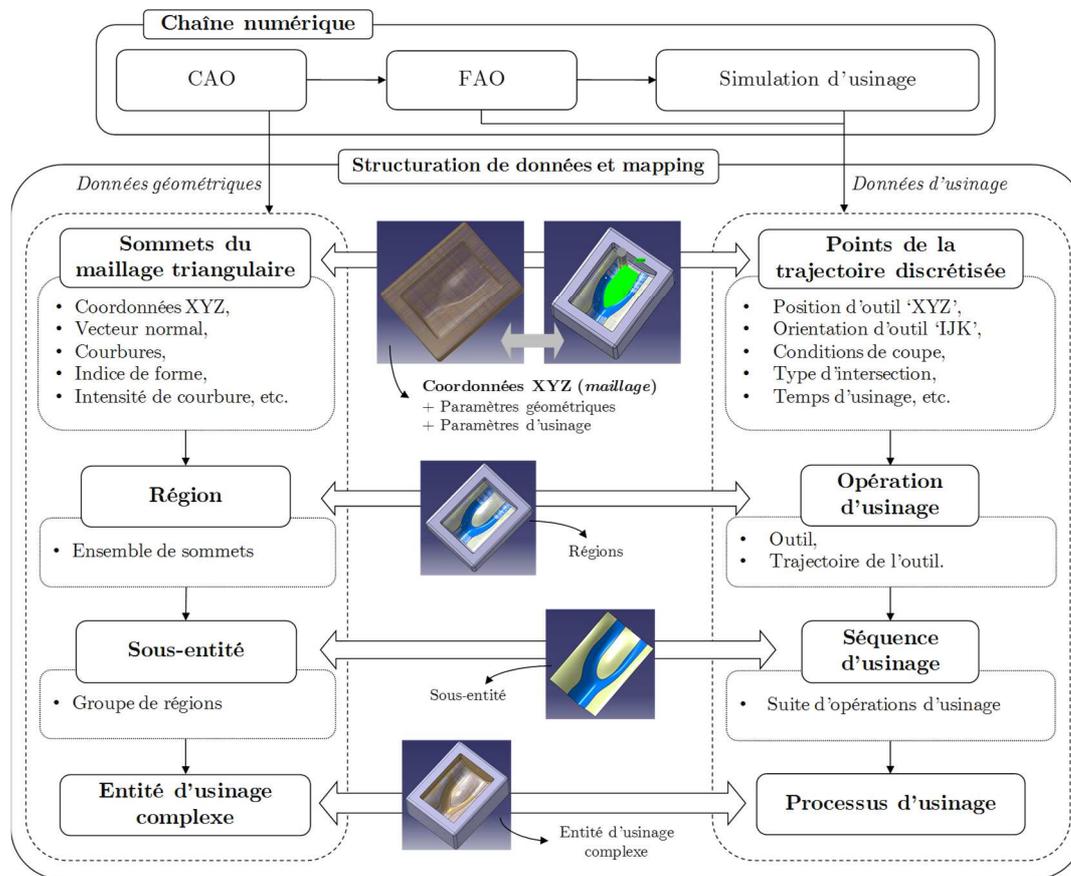


Figure 32 — Modélisation multi-niveaux de l'entité d'usinage complexe

Comme il s'agit de géométries complexes, la forme ne peut pas être directement définie. De ce fait, la caractérisation doit passer par plusieurs étapes en définissant ainsi plusieurs niveaux. Tout d'abord, les sommets adjacents ayant les mêmes propriétés sont liés entre eux, définissant ainsi une « région ». Ce découpage est réalisé avec une des techniques de clustering [Gan et al., 2007] qui permet de diviser l'ensemble des données en différents paquets homogènes, tel que les données de chaque sous-ensemble partagent des caractéristiques communes. La procédure détaillée de ce découpage, qui prend en considération les données géométriques ainsi que les données technologiques, est donnée dans le chapitre suivant. Au niveau de la gamme, chaque région est usinée avec une opération particulière. De ce fait, chaque région ainsi définie est mappée à une opération d'usinage. Cette dernière est alors définie par une stratégie, un outil, et une trajectoire. Par la suite, un ensemble de régions voisines sont regroupées

pour définir une sous-entité. Comme une séquence d'usinage est une suite d'opérations, chaque sous-entité est liée à une séquence d'usinage. Enfin, au niveau supérieur, en utilisant les techniques de reconnaissance d'entités, un ensemble de sous-entités forme une entité d'usinage complexe. Cette dernière est associée au processus d'usinage. Ainsi, pour chaque entité d'usinage, un processus d'usinage est déterminé. La figure 32 présente la modélisation multi-niveaux de l'entité d'usinage complexe en se basant sur les données de la chaîne numérique.

Contrairement aux autres travaux sur l'entité d'usinage qui définissent une forme connue, dans notre cas, l'information concernant la forme n'est pas totalement connue. La forme n'est appréhendée qu'à travers une procédure de « *dé-coupage* » qui permet de créer les régions et définir ainsi la forme. L'entité est donc définie par ses propriétés géométriques et d'usinage qui permettent de caractériser et reconnaître sa forme géométrique.

En effet, notre modèle d'entité est riche, dynamique et caractérisé par des données de différentes natures. Les phases de la chaîne numérique lui permettent d'évoluer dans le temps, en intégrant, au fur et à mesure, les différentes données générées. La structuration des données par niveaux hiérarchiques a permis de gérer les niveaux de granularité des données et de converger ainsi à la définition de l'entité d'usinage multi-niveaux. De plus, des données mesurées provenant de l'atelier peuvent être intégrées à l'entité en les synchronisant avec les données de simulation. Ceci permet d'enrichir encore l'entité avec des données réelles qui vient approuver ou rectifier les données de la simulation.

5 Conclusion

Le chapitre précédent consacré à l'état de l'art a montré qu'il est nécessaire de proposer une nouvelle caractérisation de l'entité d'usinage complexe. Dans la plupart des travaux, l'entité d'usinage consiste à attacher un processus d'usinage à une géométrie prédéfinie mais cette caractérisation ne permet pas de traiter des formes complexes et n'intègre pas explicitement les données de la chaîne numérique qui a connu un développement important ces dernières années.

Ce chapitre répond à la problématique concernant la caractérisation de l'entité d'usinage complexe en bénéficiant des données générées tout le long de la chaîne numérique. En effet, une nouvelle caractérisation de l'entité d'usinage complexe a été élaborée. Pour ce faire, les données accessibles, provenant des différentes phases du cycle de vie du produit, sont tout d'abord exposées. Il s'agit des données géométriques ainsi que des données d'usinage relatif à la gamme, la FAO et la simulation d'usinage. L'exploitation des travaux en géométrie différentielle permet d'avoir une analyse plus fine de la géométrie. Le maillage triangulaire de la pièce est enrichi ainsi par de nouveaux paramètres. Quant à la phase

de simulation d'usinage, elle permet d'associer à chaque point de la trajectoire discrétisée un ensemble de données d'usinage. Toutefois, ces données ont besoin d'être organisées pour pouvoir être exploitées dans le contexte de l'entité d'usinage. Pour cela, des structures hiérarchiques sont alors définies pour les données géométriques ainsi que les données d'usinage. Ces structures définissent les données extraites à travers différents niveaux de granularité. Enfin, une mise en correspondance par niveau est établie entre les deux structures hiérarchiques, permettant ainsi de définir une entité d'usinage multi-niveaux. Le mapping et la granularité des données permettent d'avoir une entité d'usinage plus riche en termes d'attributs, facilitant ainsi la manipulation des formes complexes. Ainsi, la forme géométrique complexe de l'entité d'usinage est définie à l'aide de plusieurs régions. Chaque région représente un ensemble de sommets ayant les mêmes propriétés. Une procédure de découpage permettant de définir ces régions fait l'objet du chapitre suivant.

Par ailleurs, des données issues de l'atelier peuvent être intégrées dans la définition de l'entité. Il s'agit des valeurs réelles collectées au cours ou après l'usinage de la pièce. Des capteurs installés au niveau de la machine peuvent mesurer un ensemble de données pendant l'usinage de la pièce. Ces données sont par exemple les vibrations outil ou pièce, les vitesses réelles d'avance, la puissance de coupe, les efforts de coupe, etc. Un système de monitoring peut être mis en place pour une collecte des données d'usinage en temps réel [SmartEmma, 2019]. Une mesure tridimensionnelle in situ peut être envisageable afin de suivre l'évolution de la pièce et prédire ainsi les défauts. L'analyse de ces données réelles acquises au niveau de la machine devient alors une nécessité pour pouvoir les exploiter dans la caractérisation de l'entité, la validation des systèmes de simulation d'usinage et l'optimisation des programmes d'usinage. Dans ce contexte, des travaux ont été menés pour le développement des systèmes d'aide à la décision pour machines-outils en se basant sur l'analyse des données du monitoring [Wang et al. 2019]. De plus, des mesures de rugosité et des mesures tridimensionnelles peuvent être intégrées dans l'entité pour refléter l'état fini réel de la pièce. Ce feedback de l'atelier forme ainsi une boucle itérative avec les autres phases de la chaîne numérique et présente un enrichissement permettant de définir une entité dynamique qui évolue dans la chaîne numérique.

Enfin, notre définition d'entité se distingue par la mise en correspondance par niveau entre les données d'usinage et les données géométriques, l'analyse des données pour découper et définir les différentes régions, l'aspect dynamique et l'évolution qu'elle subit tout le long de la chaîne numérique ainsi que l'enrichissement avec les données réelles collectées au niveau de l'atelier.

Une entité aussi dynamique et multi-niveaux permettra de représenter au mieux la pièce notamment dans le cas des pièces aéronautiques complexes. Cette nouvelle caractérisation peut être utilisée pour construire une base de données qui structure les données de la chaîne numérique de chaque pièce. La base de données pourra être exploitée par la suite dans différentes applications telles que la réutilisation des processus d'usinage

Chapitre

3

Partitionnement des données de la chaîne numérique pour la caractérisation de l'entité d'usinage complexe

1 Introduction

À l'issue de la synthèse de l'état de l'art, un nouveau cadre méthodologique qui répond à la problématique de la caractérisation de l'entité d'usinage complexe a été proposé dans le chapitre 2. Contrairement aux définitions proposées dans la littérature, notre nouveau modèle se base sur les données de la chaîne numérique. Pour l'élaboration de ce modèle, des nouveaux concepts ont été définis. Ces derniers sont présentés en détails dans ce chapitre, tout en développant une méthodologie qui permettra d'assurer l'exploitation des données de la chaîne numérique dans le contexte de l'entité d'usinage complexe.

D'abord, la mise en correspondance établie entre les données géométriques et les données d'usinage est détaillée. Ceci a permis d'enrichir la représentation géométrique de la pièce avec des données de la simulation d'usinage. Par ailleurs, des méthodes statistiques sont utilisées pour analyser et traiter l'ensemble des données générées au niveau de la simulation d'usinage, à travers une succession d'opérations de traitement nécessaires à leur exploitation.

Comme nous avons défini une entité multi-niveaux caractérisée par des sous-entités et des régions, l'idée est de se baser sur les données géométriques et les données de la simulation d'usinage qui la caractérisent pour proposer une démarche qui permet de découper la forme complexe et définir ainsi les « *régions* ». Il s'agit donc d'un problème de partition, ou segmentation. En effet, le problème de segmentation a été déjà abordé dans la littérature et différentes méthodes ont été proposées. Ces méthodes se distinguent par les critères utilisés pour le découpage. Il existe des méthodes qui se basent sur des critères purement géométriques alors que d'autres découpent la forme complexe en se basant sur des données relatives à la gamme d'usinage [Chen et al., 2003; Sun et al., 2001]. Contrairement à ces techniques, une segmentation qui se base sur la fouille des données géométriques et des données d'usinage qui proviennent de la chaîne numérique est proposée dans ce travail.

Comme le montre la figure 33, notre démarche se caractérise par un processus évolutif qui agrmente l'analyse au fur et à mesure avec différentes données de la chaîne numérique. Les données issues de la CAO permettent de proposer une segmentation géométrique. Pour cela, une technique de segmentation, développée au LURPA, qui définit des critères géométriques basés sur la courbure à partir de la représentation discrète de la surface a été adoptée [Zhao, 2010]. Sans connaissance préalable du processus d'usinage, une analyse d'usinabilité basée sur la visibilité permet d'agrémenter cette segmentation purement géométrique en introduisant un élément qui traduit l'usinage. En s'appuyant sur la mise en cor-

respondance entre la géométrie et la trajectoire de l'outil, un clustering statistique des données de simulation d'usinage est alors appliqué en se basant sur les régions résultantes de la segmentation géométrique. Cette combinaison définit alors une nouvelle segmentation dite technologique orientée région qui repose sur l'ensemble de données technologiques de la chaîne numérique.

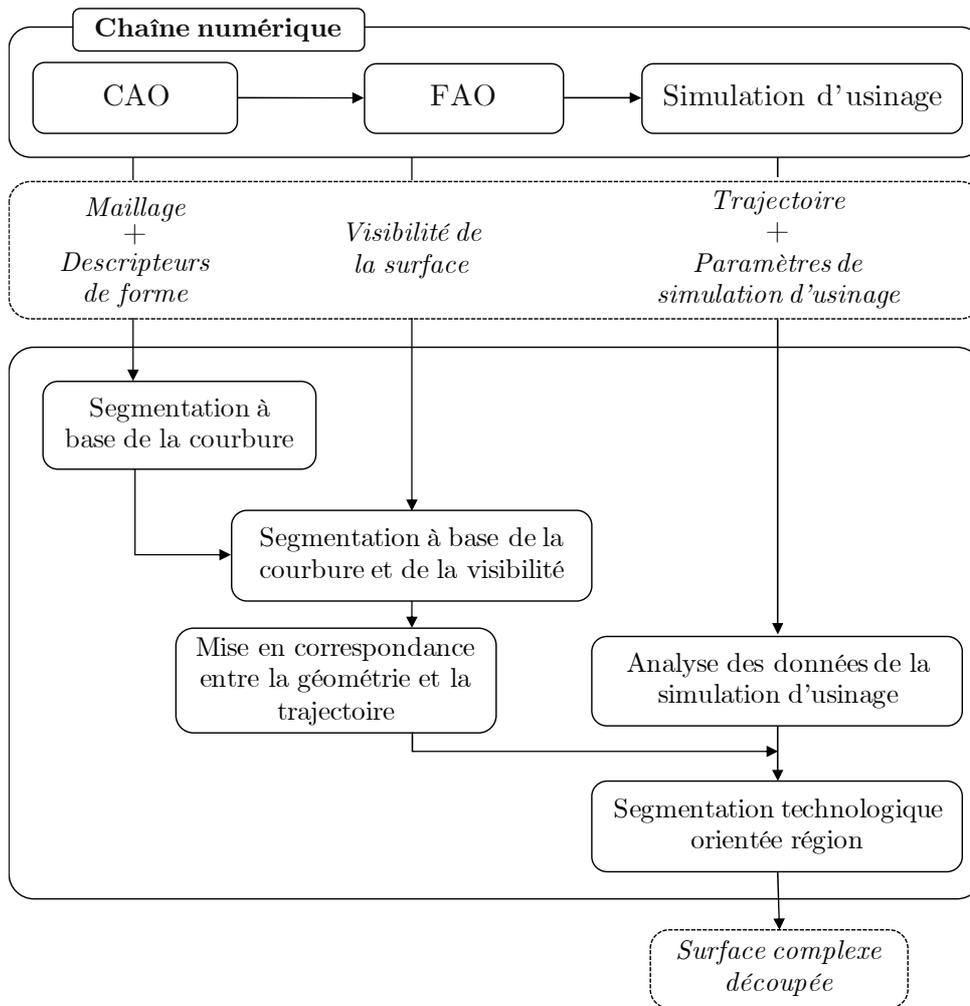


Figure 33 — Processus de découpage basé sur les données de la chaîne numérique

Après avoir découpé la forme complexe en se basant sur l'ensemble des données de la chaîne numérique, l'idée alors est de caractériser l'entité d'usinage complexe multi-niveaux en regroupant ces régions à l'aide de la théorie des graphes. Enfin, une méthodologie d'exploitation de ces régions dans le contexte de la réutilisation des données d'usinage est proposée dans la dernière partie de ce chapitre.

2 Mise en correspondance entre la géométrie et la trajectoire

Dans le cadre de ce travail, nous avons pu extraire plusieurs données qui proviennent des différentes phases de la chaîne numérique (cf. Chapitre 2). Il s'agit principalement d'un ensemble de données attachées à la géométrie de la pièce et des données relatives à l'usinage associées à la trajectoire de l'outil récupérées au niveau de la simulation d'usinage. Afin de gérer toutes ces données, l'idée est d'attacher les données technologiques relatives à l'usinage aux données géométriques et faire ainsi un lien entre la géométrie et l'usinage. Cette mise en correspondance, ou mapping, consiste à associer à chaque point de la pièce un point de la trajectoire de telle sorte que nous lui associons les paramètres technologiques du point de la trajectoire auquel il est lié.

En effet, la pièce est discrétisée en un maillage triangulaire et différents descripteurs de forme, sont associés à chaque sommet, arête et face. De même, la trajectoire outil est échantillonnée et décrite par différentes données d'usinage issues de la simulation d'usinage. De ce fait, nous disposons de deux ensembles de données : des données géométriques et des données d'usinage (cf. figure 34).

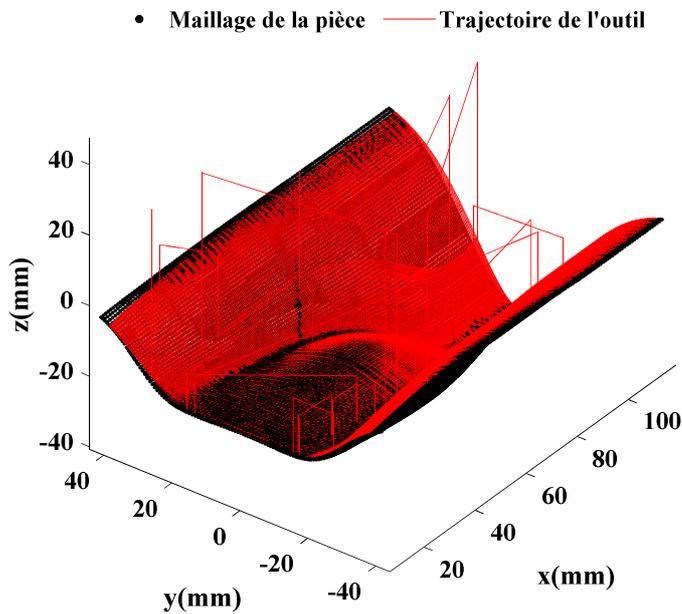


Figure 34 — Maillage de la pièce et trajectoire de l'outil

Avant de procéder au mapping entre les sommets du maillage et les points échantillonnés de la trajectoire, la trajectoire outil est analysée en se basant sur le critère d'intersection entre l'outil et la pièce. Ce paramètre, récupéré du calcul

réalisé au niveau de la simulation, permet de spécifier le type d'intersection entre la pièce et l'outil. Plusieurs types d'intersection sont définis : pas d'interaction brut/outil, tangent à la matière, usinage matière brute et usinage matière déjà usinée. Dans notre cas, la trajectoire outil est délimitée en supprimant les déplacements hors matière pour ne garder que les positions d'outil assurant l'usinage de la pièce. Autrement dit, les positions qui correspondent à un contact entre l'outil et la pièce : « usinage matière brute », « usinage matière déjà usinée » et « tangent à la matière » (cf. figure 35). Comme notre analyse porte sur la surface de la pièce finie, nous nous intéressons qu'à la phase de finition. Seule la trajectoire de finition de la surface est gardée pour l'associer à la géométrie.

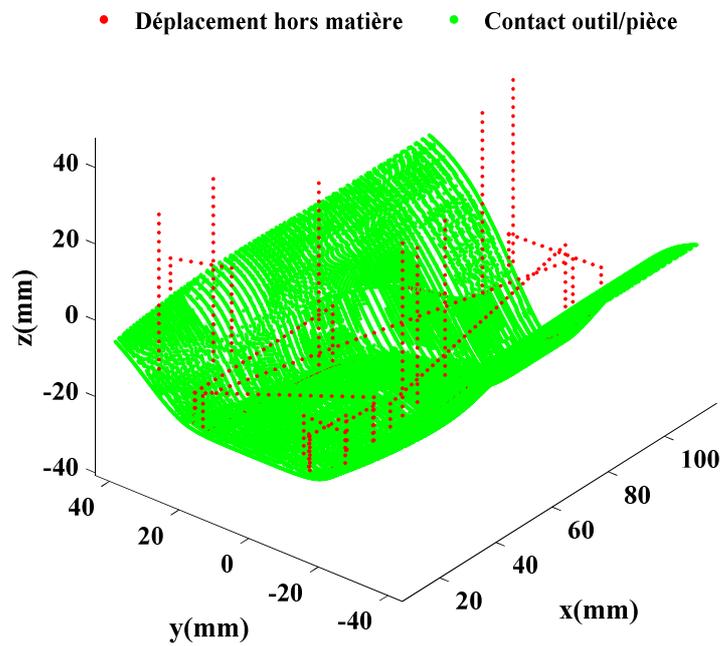


Figure 35 — Trajectoire de l'outil

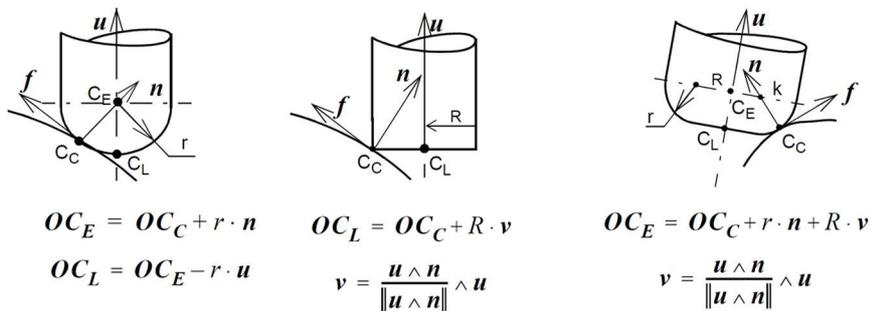


Figure 36 — Points caractéristiques suivant la géométrie de l'outil [Duc, 1998]

Il est à noter ici que les points de la trajectoire fournis par la simulation correspondent aux points extrémité outil : le point CL (cf. figure 36). Afin d'assurer un bon mapping, il est nécessaire de calculer le point centre d'outil (le point CE) à partir du point extrémité outil fourni en se basant sur les dimensions et les orientations de l'outil. La figure 36 illustre les points caractéristiques de trois types d'outil ainsi que les formules qui permettent de trouver le point centre outil à partir des points extrémités.

Par ailleurs, il faut faire un bon choix de la discrétisation de la surface et l'échantillonnage de la trajectoire pour garantir plus de précision dans le mapping. Pour cela, il faut qu'il y ait suffisamment de points de la trajectoire en face de chaque point du maillage. Il faut s'assurer également de lier chaque sommet du maillage au point de la trajectoire qui l'a usiné, sous hypothèse qu'un point de la surface pièce finie n'est pas usiné deux fois. Ayant ces deux ensembles de points prétraités, la mise en correspondance consiste à lier chaque point du maillage au point de la trajectoire le plus proche en terme de distance Euclidienne calculée point à point. Pour assurer une bonne mise en correspondance, cette distance ne doit pas dépasser un certain seuil défini à partir du rayon de l'outil (cf. figure 37).

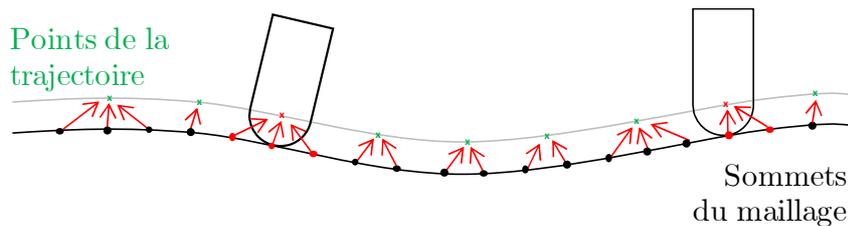


Figure 37 — Mise en correspondance entre le maillage et la trajectoire

Après cette mise en correspondance entre les deux nuages de points, chaque point du maillage est associé à un point de la trajectoire. De ce fait, le point du maillage, en plus de ses coordonnées spatiales (XYZ), possède plusieurs attributs géométriques, calculés à l'aide de la géométrie différentielle discrète, et est enrichi par plusieurs paramètres technologiques issus de la simulation d'usinage.

En effet, cette mise en correspondance a permis d'associer les données technologiques aux sommets du maillage. Afin de visualiser la distribution des différents paramètres de coupe, différentes cartographies peuvent être réalisées par une visualisation à base de couleurs des faces de la représentation triangulaire de la pièce. La figure 38 présente des cartographies de quelques paramètres de coupe, par exemple : l'aire usinée (A_d), le volume de matière enlevée, le débit copeaux, la vitesse de coupe (V_c), l'épaisseur de coupe (A_e), etc. Ces cartographies permettent de donner une idée sur la variation de ces différents paramètres sur la surface tout au long de son usinage.

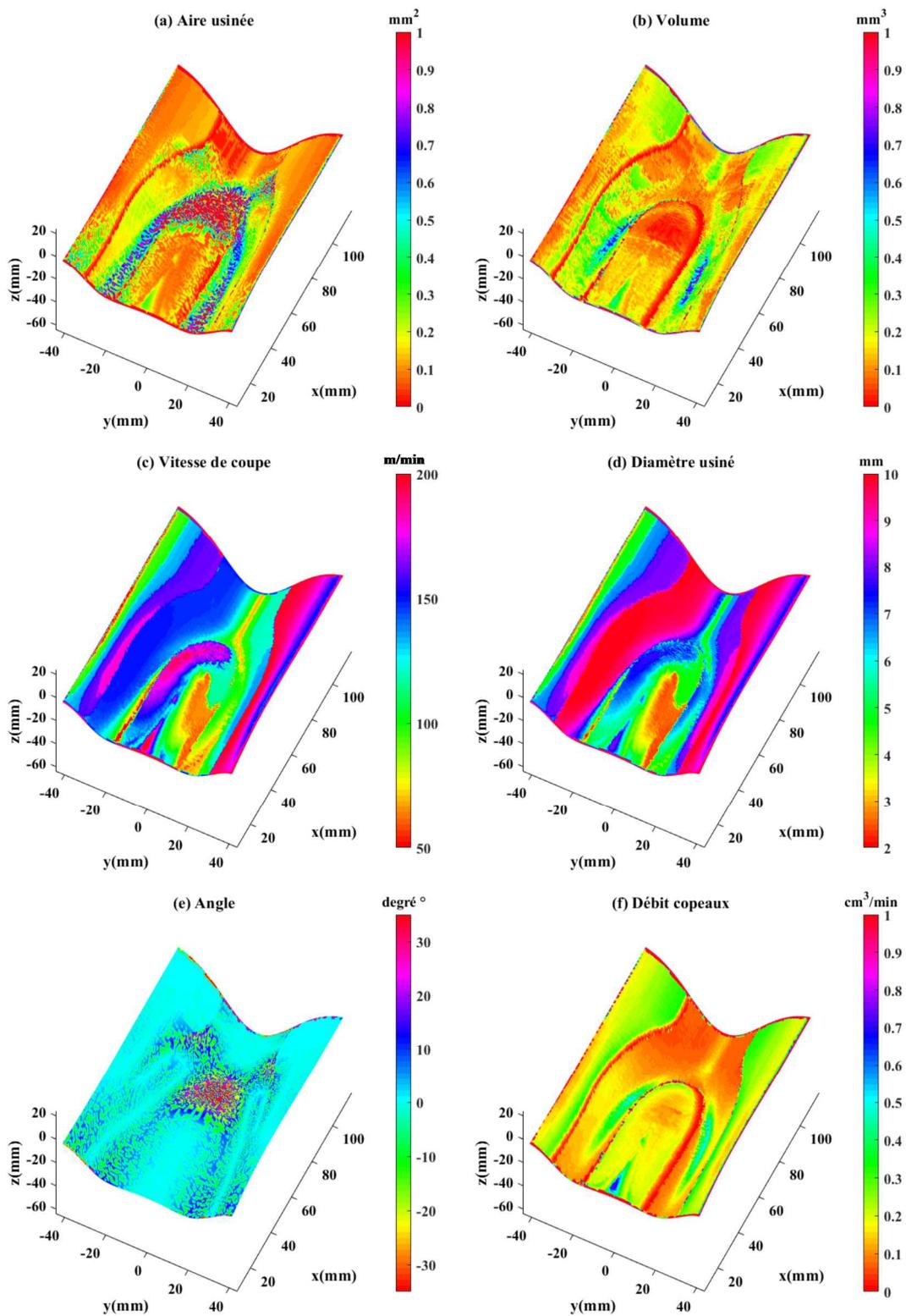


Figure 38 — Cartographies des paramètres de coupe

Cependant, l'information visuelle n'est pas suffisante. Il est essentiel de passer à des outils d'analyse des données pour analyser et traiter ces paramètres. Une analyse plus fine des données va permettre d'extraire les données pertinentes qui contribueront à la caractérisation de la forme complexe. Dans ce qui suit, les méthodes et les techniques qui peuvent être utilisées pour cette analyse sont abordées.

3 Analyse des données de la simulation d'usinage

Cette partie présente notre démarche pour analyser les données technologiques dont nous disposons afin d'extraire des connaissances utiles et des informations pertinentes pour la caractérisation de la forme complexe. Notre démarche s'inspire du processus d'analyse des données « *Knowledge Discovery Process* » [Abonyi et Feil, 2007] et se base sur quatre étapes essentielles : sélection, prétraitement, transformation et partitionnement des données.

En résumé, la phase initiale de notre analyse se concentre sur la compréhension de l'objectif de l'application et la familiarisation avec les données pour pouvoir sélectionner correctement les données les plus importantes sur lesquelles l'analyse doit être effectuée. Or, comme il s'agit des données issues d'une simulation d'usinage, il se peut que les données soient bruitées, inexactes ou manquantes. Une phase de préparation des données est alors nécessaire. Par la suite, une phase de transformation est mise en place afin de réduire le nombre de dimensions des données par extraction d'un certain nombre de facteurs qui reflètent mieux le problème sans information redondante. Enfin, une des techniques de partitionnement des données « *clustering* » est appliquée sur les données d'usinage. Le traitement de l'ensemble de ces données associées à chaque point de la trajectoire permet d'extraire des données pertinentes qui contribueront à la caractérisation de la forme complexe.

3.1 Sélection des données

L'objectif de cette étape est de définir les données de départ et de ne garder que les données pertinentes pour l'étude à réaliser. Comme cité précédemment, nous disposons d'un ensemble de données générées par les différentes phases de la chaîne numérique. Il s'agit des données géométriques ainsi que des données d'usinage associées à la trajectoire de l'outil après la simulation d'usinage (cf. Chapitre 2).

Nous nous intéressons ici qu'aux données d'usinage (cf. Chapitre 2) que nous cherchons à analyser pour la caractérisation de la forme complexe. Comme cité

précédemment, dans notre cas, nous n'avons pas la gamme complète de la pièce avec tous les paramètres explicites, saisis par l'utilisateur et nous ne disposons que des données récupérées du fichier résultant de la simulation (machine, outils, séquences, S, F, position et orientation d'outils, etc.). Par ailleurs, l'analyse de coupe effectuée lors de la simulation d'usinage a permis aussi de générer plusieurs paramètres. Parmi toutes ces données, il faut sélectionner correctement les paramètres les plus importants pour l'analyse.

En nous référant à notre objectif de partition, nous avons fait le choix de se focaliser sur un niveau de détail plus fin. De ce fait, les paramètres de coupe sont choisis pour la suite des traitements. Il s'agit principalement de : Vc (vitesse de coupe), Fz (avance par dent), h (épaisseur de copeaux), Ap (profondeur de passe), Ae (épaisseur de passe), Ad (aire usinée), débit copeaux, diamètre usiné, volume et angle.

L'orientation de l'outil représente un élément important dans la génération de trajectoire dans le cas des formes complexes. Cependant, il n'est pas pris en considération dans cette analyse puisqu'il n'apporte pas une information supplémentaire dans les applications traitées dans ce travail. Par ailleurs, son influence est partiellement traduite dans la variation des deux paramètres de coupe : l'angle et le diamètre effectif de l'outil usinant (diamètre usiné).

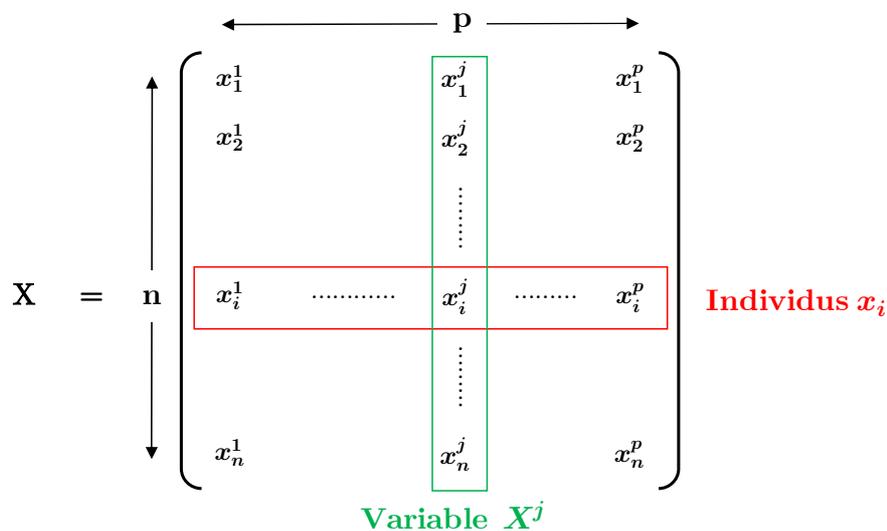


Figure 39 — Matrice des données

Les paramètres choisis sont stockés dans une matrice X à n lignes et p colonnes (cf. figure 39). Les lignes représentent les individus (les points de la trajectoire) et les colonnes représentent les variables (les données d'usinage).

3.2 Prétraitement des données

Cette étape consiste à prétraiter les données à travers différentes opérations (nettoyage, lissage, etc.) afin de faciliter leur exploration et extraire des informations significatives. Comme les données que nous souhaitons traiter proviennent de la simulation d'usinage, il est possible qu'elles contiennent du bruit avec des données manquantes. De ce fait, une opération de nettoyage est nécessaire. En se basant sur l'expertise de l'utilisateur, les valeurs inadmissibles pour les différents paramètres sont supprimées. Il s'agit principalement des points isolés avec des valeurs très élevées par rapport à la moyenne aux alentours, considérés par l'utilisateur comme points aberrants non pertinents.

Par ailleurs, une autre opération d'homogénéisation des variables est indispensable. Comme les données de coupe que nous analysons sont des variables non homogènes, de différents types, dans différentes unités, il n'est pas possible de les utiliser directement. Il est nécessaire de les homogénéiser et les redimensionner pour ne pas privilégier les données ayant les plus grands domaines de variation et pouvoir ainsi mieux les interpréter, les analyser et les comparer conjointement. Il s'agit des vitesses de coupe en m/min qui peuvent atteindre les 200 m/min, des avances par dent en mm/dent qui varient dans des petites plages, des angles en degré qui prennent des valeurs positives et négatives. Cette incompatibilité entre les données peut affecter les résultats du traitement et fausser l'analyse sans apporter d'interprétations claires si les données sont utilisées dans leurs états bruts.

Dans la littérature, il existe différentes méthodes pour normaliser les données non homogènes [Gan et al., 2007]. La plus utilisée est la standardisation (*standardization* ou *Z-score normalization*). Elle redimensionne les variables en soustrayant à chaque valeur une valeur de référence (classiquement la moyenne) et en la divisant par l'écart-type. Le fait de « *centrer et réduire* » rend les variables résultantes entièrement indépendantes de l'étendue des valeurs ou des unités de mesure initiales, avec une moyenne nulle et un écart-type qui vaut un à travers la formule suivante :

$$x_i^j = \frac{x_i^j - \mu^j}{\sigma^j} \quad (3.1)$$

où: μ^j et σ^j sont respectivement la moyenne et l'écart type de la variable X^j .

Après ces opérations de prétraitement, un ensemble de données finales prêt aux traitements ultérieurs est défini. Néanmoins, il a à noter ici que l'utilisateur se base sur les valeurs initiales lors de l'interprétation des résultats des traitements réalisés sur ces données. Les valeurs initiales permettent de définir la notion de plage admissible et de donner ainsi un sens d'usinage au traitement et à l'interprétation. Cette normalisation automatique des données n'est pas en effet

adaptée à la fabrication. Une prise en considération de l'approche métier, adoptée dans le choix des différents paramètres pourrait l'améliorer afin de ne pas perdre le sens physique de l'usinage.

3.3 Transformation des données

L'étape de transformation des données est mise en place afin de trouver les variables les plus pertinentes qui reflètent au mieux le problème, éliminer l'information redondante et réduire ainsi la dimension en utilisant des techniques de réduction de données.

La réduction des données est appliquée sur les paramètres de coupe de la matrice de données afin d'extraire les variables, dimensions, qui expliquent mieux la dispersion des données. Les méthodes de réduction des données sont variées et regroupent les tableaux croisés, les agrégations, la classification, l'analyse en composantes principales, etc. [Izenman, 2008]. Dans ce travail, nous proposons de réaliser une étude de corrélation accompagnée d'une analyse en composante principale (ACP) pour analyser la matrice des données de coupe.

3.3.1. Etude de corrélation

La corrélation décrit la relation entre deux variables ou plus. Elle se mesure par des coefficients de corrélation, compris entre -1 et +1, qui définissent l'intensité et le sens de cette relation. Plus le coefficient est proche des valeurs extrêmes -1 et 1, plus la corrélation entre les variables est forte. Le signe du coefficient indique le sens de la relation. Une corrélation positive indique que les valeurs de l'une des variables tendent à augmenter lorsque celles de l'autre variable augmentent. Elle est négative dans le cas contraire. Une corrélation égale à 0 signifie que les variables ne sont pas corrélées, donc indépendantes.

Variables	Vc	Volume	Ad	Ap	Ae	Diamètre usiné	Débit copeaux	Angle	Fz	h
Vc	1.0	0.141	0.131	0.678	-0.141	1.0	0.131	0.577	0.028	0.028
Volume	0.141	1.0	0.947	0.257	0.554	0.141	0.946	-0.150	-0.017	-0.017
Ad	0.131	0.947	1.0	0.208	0.605	0.131	1.0	-0.146	-0.012	-0.012
Ap	0.678	0.257	0.208	1.0	-0.324	0.678	0.206	0.064	0.015	0.015
Ae	-0.141	0.554	0.605	-0.324	1.0	-0.141	0.603	-0.045	-0.003	-0.003
Diamètre usiné	1.0	0.141	0.131	0.678	-0.141	1.0	0.131	0.577	0.028	0.028
Débit copeaux	0.131	0.946	1.0	0.206	0.603	0.131	1.0	-0.145	-0.010	-0.010
Angle	0.577	-0.150	-0.146	0.064	-0.045	0.577	-0.145	1.0	0.012	0.012
Fz	0.028	-0.017	-0.012	0.015	-0.003	0.028	-0.010	0.012	1.0	1.0
h	0.028	-0.017	-0.012	0.015	-0.003	0.028	-0.010	0.012	1.0	1.0

Tableau 4 — Matrice de corrélation

L'analyse de corrélation réalisée sur la matrice initiale des dix variables de coupe, relatives à la pièce test, a permis de caractériser la relation entre ces variables et évaluer ainsi les différentes dépendances entre elles. Les résultats se présentent sous forme d'une matrice de corrélation (cf. tableau 4) qui donne les coefficients de corrélation permettant d'examiner l'intensité et la direction de la relation linéaire entre les différentes paires possibles de variables. Nous supposons ici que deux variables sont considérées comme corrélées si le coefficient de corrélation dépasse la valeur de 0.8.

D'après ces résultats, plusieurs corrélations traduites par des coefficients de corrélation élevés peuvent être identifiées. Par exemple, une relation linéaire positive existe entre les variables V_c et le diamètre usiné. Cette relation positive indique que plus la vitesse de coupe (V_c) augmente, plus le diamètre usiné augmente. Cette dépendance peut être schématisée par la figure 40.

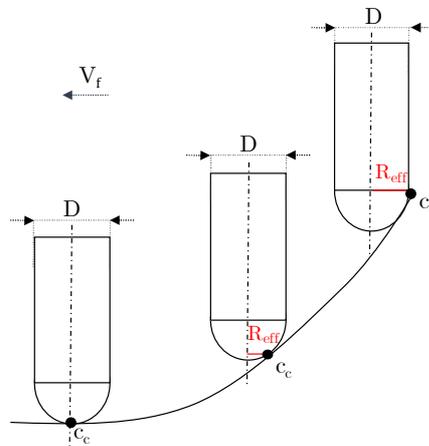


Figure 40 — Variation de la vitesse de coupe et le rayon effectif

Dans la génération de trajectoire, les deux vitesses nécessaires pour définir l'usinage d'une surface sont : la vitesse d'avance et la vitesse de la broche. La vitesse de la broche est une valeur orientée machine, calculée à partir de la valeur de la vitesse de coupe recommandée suivant la formule :

$$S = \frac{V_{c_{nominale}} \times 1000}{\pi \times D} \quad (3.2)$$

où: $V_{c_{nominale}}$ est la vitesse de coupe recommandée, D est le diamètre outil nominal.

Comme le montre la figure 40, la valeur du rayon effectif (diamètre usiné) varie en fonction du point de contact C_c et de l'évolution de la normale locale à la surface par rapport à l'axe de l'outil fixe (usinage 3 axes). De ce fait, la vitesse de coupe de chacun de ces points est différente puisque la vitesse de rotation de

la broche reste constante. Nous parlons ainsi d'une vitesse de coupe effective qui dépend essentiellement du diamètre effectif (cf. Equation (3.3)), d'où la forte corrélation positive trouvée dans la matrice de corrélation (cf. tableau 4).

$$V_{C_{effective}} = \frac{D_{effectif} \times S \times \pi}{1000} \quad (3.3)$$

Par ailleurs, des « *cercles de corrélations* » tracés sur un plan factoriel défini par les deux premières composantes principales permet aussi de visualiser les liaisons entre les variables. Pour rappel, les composantes principales représentent les variables résultantes de l'analyse en composantes principales (ACP). Ce sont des variables artificielles définies comme une combinaison linéaire des variables initiales, formant ainsi une nouvelle base orthogonale non corrélée. Ces nouvelles variables sont ordonnées de façon à ce que les premières composantes soient les plus importantes à étudier et présentent la plus grande variance des variables initiales, d'où le choix de projeter les variables sur les deux premières composantes principales. Comme nous avons fait le choix de garder le sens physique des différents paramètres, les résultats de l'ACP ne sont exploités ici que pour l'interprétation des corrélations entre les variables (cf. Annexe A).

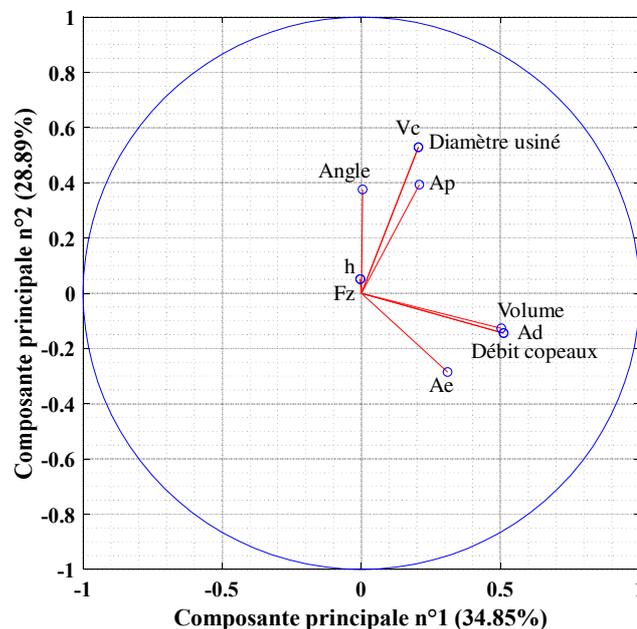


Figure 41 — Cercle de corrélation

La figure 41 présentant la projection de l'ensemble des variables sur le premier plan factoriel, donne une vision synthétique des différentes dépendances qui

existent entre les variables. Cette dépendance est évaluée en se basant sur la position angulaire des variables les unes par rapport aux autres. Plus les variables sont proches, plus elles sont corrélées positivement. Deux variables opposées formant ainsi un angle de 180° sont corrélées négativement. Deux variables positionnées à angle droit ne sont pas corrélées. La figure 41 permet de visualiser ainsi les corrélations déduites précédemment avec les coefficients de la matrice de corrélation. Les variables corrélées, c'est à la dire le volume, le débit copeaux et Ad ; le diamètre usiné et Vc ; Fz et h sont aussi confondus.

Le but de cette étape étant de réduire l'ensemble initial des variables, l'analyse de tous ces résultats permet d'identifier leurs dépendances, d'éliminer les variables redondantes et de ne garder que les variables non corrélées, les plus pertinentes pour mieux présenter le problème. De ce fait, les variables retenues pour le reste de notre travail sont :

- **La vitesse de coupe (Vc)** : le diamètre usiné est ainsi éliminé.
- **L'avance par dent (Fz)** : l'épaisseur de copeaux (h) est ainsi éliminée.
- **L'aire usinée (Ad)** : le volume et le débit copeaux sont ainsi éliminés. Comme Ad est calculé à base Ap et Ae , ces deux variables sont aussi éliminées.
- **L'angle.**

3.4 Clustering des données

Le clustering des données est l'un des problèmes les plus connus dans le domaine du data mining, utilisé pour la première fois par Tryon [Tryon, 1939]. C'est une des techniques de l'apprentissage non-supervisé qui cherche à décomposer un ensemble de données en plusieurs sous-ensembles les plus homogènes possible de telle sorte que les données au sein d'un même groupe soient similaires et partagent les mêmes caractéristiques. Afin de garantir un bon partitionnement des données, il est essentiel d'avoir une grande similarité intra-groupe et une faible similarité inter-groupe. Dans la littérature, différents algorithmes sont proposés [Abonyi et Feil, 2007]. Dans ce travail, le partitionnement des données est utilisé afin de diviser l'ensemble des points de la trajectoire en différents paquets homogènes, tel que les points de chaque sous-ensemble partagent des caractéristiques communes en termes de paramètres de coupe. Pour cela, l'algorithme k-means est utilisé (cf. Annexe B).

Le k-means [MacQueen, 1967] est un algorithme non supervisé de clustering non hiérarchique permettant de regrouper un ensemble d'individus en K clusters tel que les individus similaires se trouvent dans le même cluster. Pour pouvoir regrouper les points en différents clusters, il est nécessaire de définir le moyen pour comparer le degré de ressemblance entre eux. La notion de similarité, qui

peut être mesurée grâce à la distance qui sépare deux individus, est ainsi introduite. Ainsi, deux individus sont très similaires s'ils sont très proches selon une distance donnée. Dans la littérature mathématique et statistique, plusieurs définitions de distances se distinguent, telles que : la distance Euclidienne, la distance City-block, la distance de Chebyshev, etc. [Gan et al., 2007]. Pour que l'ensemble des variables aient une contribution équivalente au calcul des distances et éviter ainsi tout effet d'échelle, il faut s'assurer que les variables ont été normalisées auparavant (phase de prétraitement).

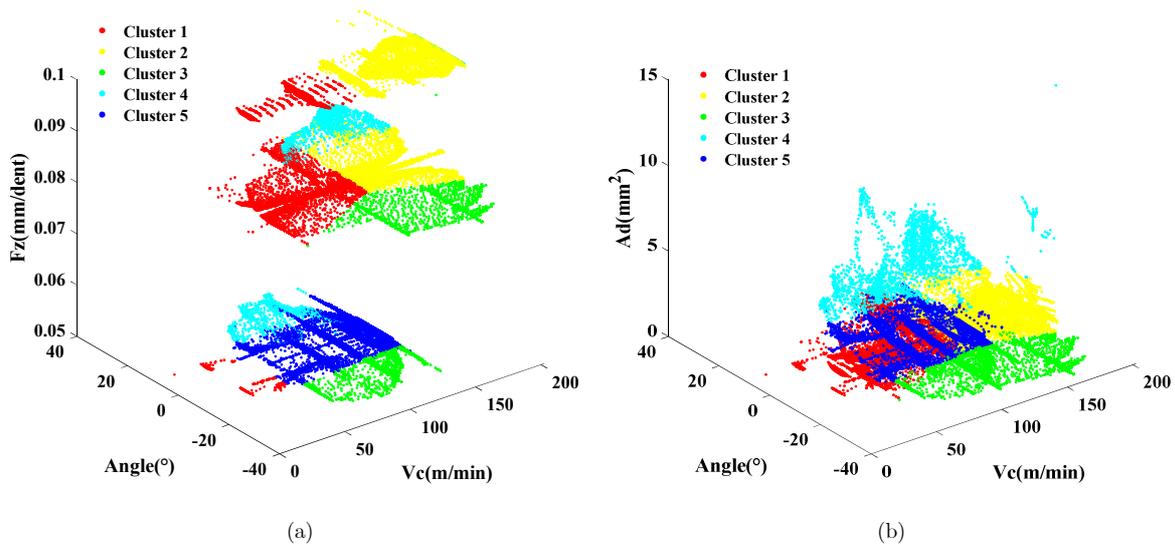


Figure 42 — Résultats du k-means dans l'espace des paramètres de coupe

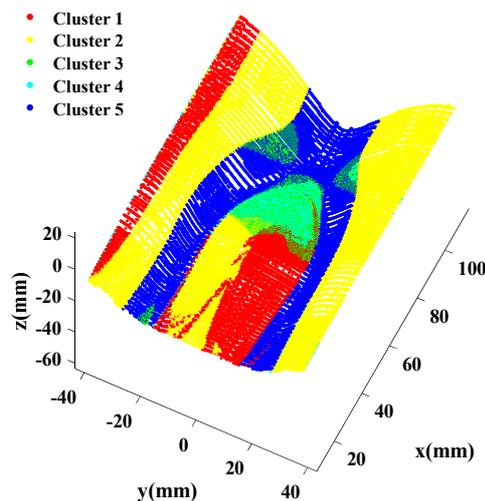


Figure 43 — Résultats du k-means projetés sur la trajectoire de l'outil

Par ailleurs, l'algorithme k-means laisse un paramètre libre : le nombre de clusters (K) qu'il faut préciser avant de lancer l'algorithme. Le choix n'est pas forcément intuitif notamment quand il s'agit d'un ensemble de points d'une dimension supérieure à trois. Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes pour choisir le nombre de clusters, telles que l'algorithme Elbow, l'indice de silhouette, etc. [Kodinariya et Makwana, 2013].

L'application du k-means sur les données de coupe déduites de l'étude de corrélation (la vitesse de coupe (V_c), l'avance par dent (F_z), l'aire usinée (A_d) et l'angle) permet de définir différents sous-ensembles de points tels que les points de chaque sous-ensemble partagent les mêmes paramètres de coupe. Les résultats de ce partitionnement sont présentés dans la figure 42 suivant les axes (V_c , angle et F_z) et (V_c , angle et A_d) respectivement. Par ailleurs, la figure 43 permet de visualiser les résultats sur l'ensemble des points de la trajectoire afin de mieux analyser les clusters. Un cluster regroupe un ensemble de points de la trajectoire ayant des paramètres de coupe similaires.

Cependant, la représentation des points de la trajectoire dans l'espace des paramètres de coupe ne permet pas de prendre en compte le voisinage des points. Ce voisinage est défini par l'enchaînement des positions de l'outil sur la pièce. En effet, la représentation des paramètres de coupe en fonction du temps montre cet enchaînement et permet de nous familiariser avec les données et de voir les plages de variation pour chaque paramètre au cours de l'usinage (cf. figure 44). Ces informations seront exploitées par la suite dans le cadre de la segmentation.

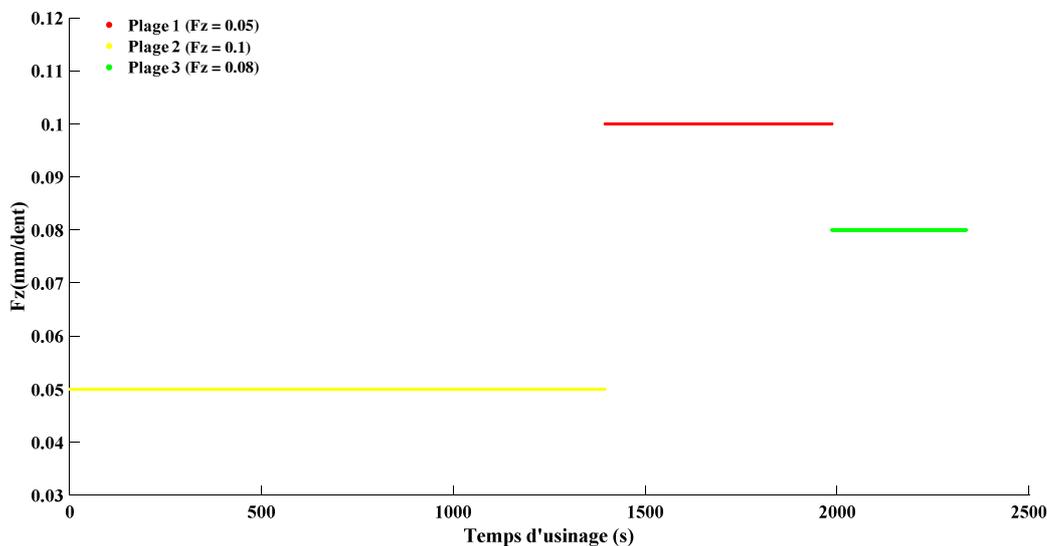


Figure 44 — Variation de F_z au cours du temps

4 Découpage de la forme complexe

4.1 Segmentation à base de la courbure

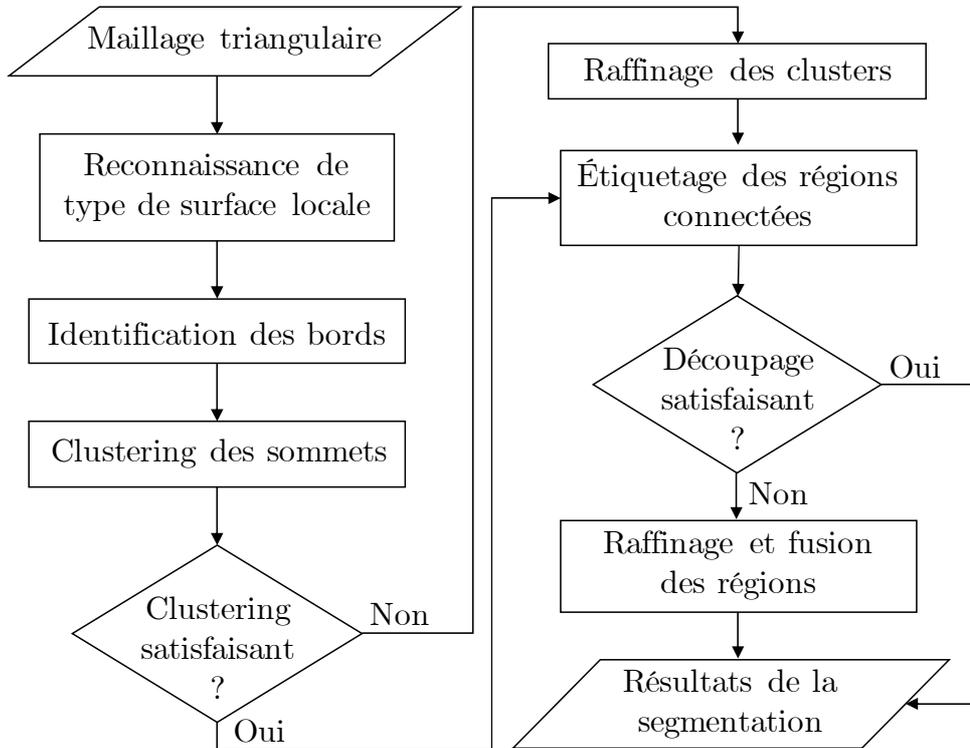


Figure 45 — Procédure de segmentation à base de la courbure

La segmentation est considérée comme l'une des problématiques les plus critiques dans le traitement de géométries discrètes [Zhao et al., 2013]. C'est une phase qui permet de décomposer la surface de la pièce en un ensemble de régions significatives en se basant sur différents critères. Dans la littérature, il existe plusieurs techniques qui se basent principalement sur trois approches [Mangan et al., 1999; Srinark et Kambhamettu, 2003; Vieira et Shimada, 2005; Chen et Georganas, 2006]. Les techniques basées sur une approche « *contour* » détectent en premier les bords (les frontières) du modèle discret et les régions sont déduites par la suite [Demarsin et al., 2007]. L'approche « *région* » regroupe les techniques qui commencent à regrouper les points avec des propriétés similaires pour en générer des régions. Les contours sont ensuite calculés à partir de ces régions détectées [Besl et Jain, 1988]. Enfin, l'approche hybride combine les deux techniques pour faire face à leurs limites respectives [Lavoué et al., 2005; Liu et Xiong, 2008].

La méthode de Zhao qui est adoptée [Zhao, 2010] se base principalement sur deux descripteurs de forme : l'indice de forme et l'intensité de courbure. Cette technique comprend quatre étapes essentielles : l'identification du type de surface, l'identification des bords, le groupement des sommets et la génération des régions (cf. figure 45).

4.1.1. Identification du type de surface

Dans la littérature, différents indicateurs de courbure sont utilisés pour la classification des surfaces. Les courbures moyennes et gaussiennes sont les plus utilisées [Besl et Jain, 1988]. Sunil *et al.* [Sunil et Pande, 2008] combinent la courbure moyenne et la courbure gaussienne pour définir huit classes de surfaces (cf. figure 46). Van Tuong *et al.* [Van Tuong et Pokorný, 2010] caractérisent la surface complexe en surface convexe, concave et surface selle de cheval (*saddle*). De même, Zhang *et al.* [Zhang et Li, 2016] définissent des régions concaves, convexes et mixtes en fonction de la concavité des faces. Par ailleurs, Giri *et al.* [Giri et al., 2005] exploitent la courbure minimale et maximale pour la caractérisation de la surface.

	$K > 0$	$K = 0$	$K < 0$
$H < 0$	Peak	Ridge	Saddle Ridge
$H = 0$	---	Flat	Minimal surface
$H > 0$	Pit	Valley	Saddle valley

Figure 46 — Classification des surfaces basée sur la courbure moyenne et gaussienne

Dans ce travail, le descripteur de forme proposé par Koenderink et Van Doorn [Koenderink et Van Doorn, 1992] est utilisé comme critère de caractérisation de type de surface. Il s'agit de l'indice de forme (*shape index*) défini précédemment (cf. Chapitre 2).

L'indice de forme est un indicateur quantitatif qui se base sur les courbures principales. Il permet de spécifier le type de la surface locale pour chaque point donné. Sur l'intervalle $[-1, +1]$, l'indice de forme définit neuf types de surface (cf. figure 47). Toutefois, les surfaces planes ne sont pas définies avec cet indice comme leurs courbures principales sont nulles. Pour cela, la valeur $s = 2$ est attribuée aux surfaces planes. Pour la visualisation de ces types de surfaces, une carte de couleur pour l'indice de forme est introduite. Une couleur est attribuée

à chaque intervalle de valeurs correspondant à un type de surface. La couleur noire est ajoutée pour désigner les surfaces planes (cf. figure 47).

En effet, l'indice de forme permet d'attribuer à chaque point de la représentation discrète un type de surface parmi les dix types de surfaces prédéfinis. Par ailleurs, un autre indicateur de courbure, caractérisant l'amplitude de courbure, est aussi introduit. Il s'agit de l'intensité de courbure (*curvedness*) définie précédemment (cf. Chapitre 2). La combinaison d'indice de forme et d'intensité de courbure donne ainsi une information complète sur la forme pour chaque point de la pièce, ce qui représente un moyen simple et efficace pour la caractérisation des propriétés différentielles des formes discrètes.

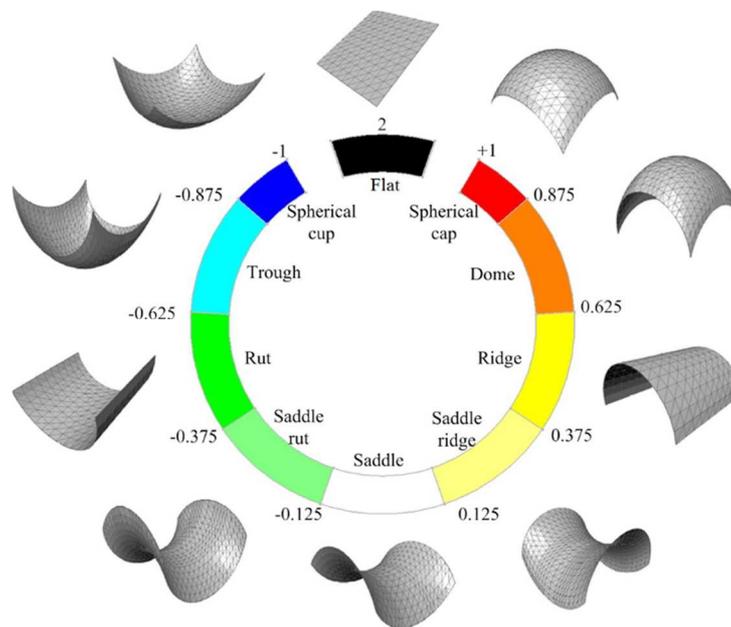


Figure 47 — Carte de l'indice de forme (couleur et intervalle par type de surface) [Zhao et al., 2013]

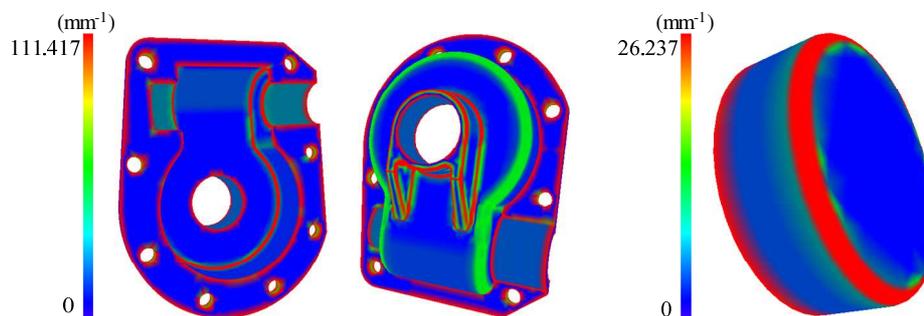


Figure 48 — Carte de l'intensité de courbure [Zhao, 2010]

4.1.2. Identification des bords

Les points de bords de surfaces représentent les points des arêtes qui séparent les différentes régions. Ce sont des points qui définissent des discontinuités d'ordre 1 ou d'ordre 2. En fait, des critères comme le vecteur normal ou la courbure sont généralement utilisés pour détecter ces points [Benkő et Várady, 2004]. Ici, notre méthode se base sur l'intensité de courbure pour identifier les bords et les frontières.

La figure 48 donne un exemple de carte d'intensité de courbure. D'après la carte, nous constatons que les points des bords ont généralement les valeurs d'intensité de courbure les plus élevées contrairement aux points appartenant aux autres régions. Les points des bords peuvent alors être identifiés comme les points dont la valeur de l'intensité de courbure est supérieure à un seuil donné. De ce fait, une arête vive est définie comme une arête partagée par deux triangles tels que les deux sommets partagés ont des valeurs d'intensité de courbure de grande amplitude.

4.1.3. Regroupement des points

Les arêtes et les points des bords sont détectés en se basant sur leurs valeurs d'intensité de courbure élevées. Comme ces points ne définissent aucune région mais seulement des bords, les sommets restants sont ensuite classés initialement en 10 différents groupes (clusters) en fonction de leur type de surface locale. De ce fait, les sommets du même groupe ont les mêmes étiquettes de type de surface. Les étiquettes sont utilisées pour indexer les différents groupes de surfaces. Comme le résultat initial de ce regroupement n'est généralement pas satisfaisant dû aux erreurs de calcul (maillage, estimation des normales, estimation des courbures, etc.), une procédure de raffinement est effectuée pour améliorer la qualité des résultats en affectant les sommets aux bons groupes tout en éliminant ainsi les sommets isolés.

L'algorithme de raffinement des clusters [Zhao, 2010] est basé sur un processus itératif. À chaque itération, il s'agit de chercher pour chaque point les types de surface de tous ses points voisins. Ensuite, il faut calculer la possibilité de raffinement de chaque type de surface voisine détectée. Le point appartiendra alors au cluster dont le type de surface a la plus grande possibilité de raffinement. L'itération se termine lorsque le type de surface de chaque sommet ne change pas ou que la condition de convergence définie par l'utilisateur est atteinte.

Dans l'algorithme de raffinement, la distance des clusters est utilisée pour mesurer la similarité des types de surface entre deux sommets. Une petite distance implique que la similarité entre les types de surface des deux sommets est

grande et que les deux sommets ont une plus grande possibilité d'être raffinés dans le même cluster.

4.1.4. Génération des régions

Après le regroupement des sommets, nous avons un ensemble de groupes de sommets (les sommets du même groupe appartiennent au même type de surface) et chaque groupe de sommets comprend plusieurs régions connectées. Dans cette phase, l'idée est de segmenter correctement les régions connectées dans chaque cluster et de générer ainsi le résultat final de la segmentation en découpant la forme discrète en différentes zones avec les méthodes de croissance et étiquetage de régions (*Connected region labeling and growing*) [He et al., 2009].

Il faut d'abord, identifier les sommets restants après le regroupement des sommets effectué à l'étape précédente. Chaque sommet est par la suite labélisé avec un type de surface qui dépend des groupes de sommets voisins et d'un seuil de voisinage prédéfini. Avec cette étiquette, ce sommet sera soit intégré à une région voisine existante, soit créera une nouvelle région. L'opération se termine lorsqu'il n'y a plus de sommets libres dans le maillage.

Le raffinement des régions est par la suite nécessaire lorsque le résultat de la croissance de région connectée n'est pas satisfaisant. Ceci est effectué à travers un processus itératif. Un ensemble de paires de régions adjacentes est généré en fonction des distances entre les régions. Les paires de régions adjacentes avec une distance maximale sont fusionnées en une seule région. L'ensemble de paires est ensuite mis à jour en conséquence. Le type de surface et l'étiquette de la région avec la plus grande superficie sont affectés à la nouvelle région générée. L'algorithme se termine lorsque le nombre de régions finales ou la distance entre régions adjacentes atteint une valeur prédéfinie.

La figure 49 présente un exemple de fusion et de génération de régions après l'algorithme de raffinement et de croissance de région appliqué sur les résultats de segmentation initiaux. Sur la figure 49-b, nous remarquons quelques petites régions générées après l'étiquetage des régions qui doivent être fusionnées à des régions adjacentes plus grandes. En effet, la fusion de ces régions donne le résultat final de la segmentation présenté sur la figure 49-c. Dans cet exemple, initialement, la surface complexe a été découpée en 55 régions. Or, le résultat final donne 24 régions. A travers cet exemple, nous pouvons constater que la qualité des résultats s'est améliorée après l'algorithme de raffinement.

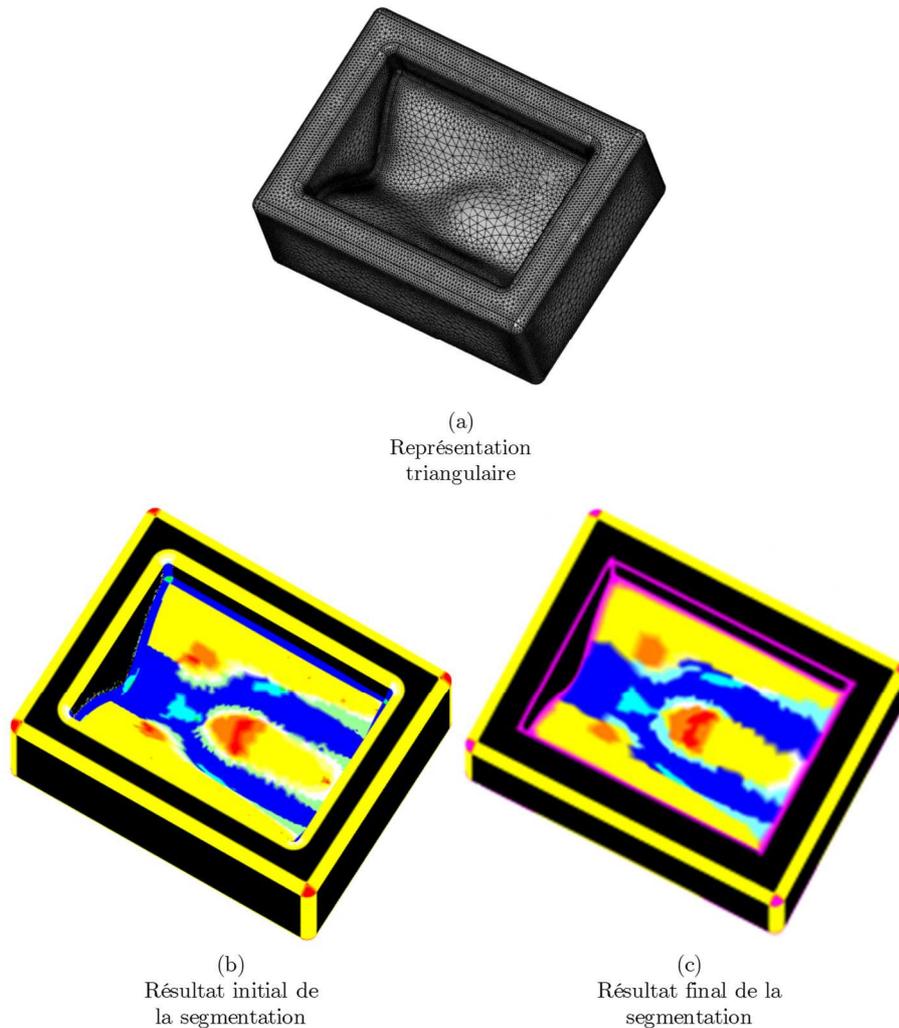


Figure 49 — Résultats de la segmentation à base de la courbure

En résumé, cette technique de segmentation qui se base sur la combinaison de ces deux descripteurs de forme (l'indice de forme et l'intensité de courbure) se montre plus pratique que les techniques qui utilisent les courbures traditionnelles dans le contexte de la segmentation et la reconnaissance. L'intensité de courbure permet d'identifier les bords et l'indice de forme attribue à chaque sommet un type de surface spécifique. Le clustering des sommets et la technique de croissance de régions définissent les différentes régions qui permettent de découper ainsi la surface complexe. Toutefois, cette technique ne se base que sur des critères purement géométriques. Les types de surfaces définis avec l'indice de forme sont purement géométriques et n'ont pas forcément des significations en usinage. Dans le contexte de notre travail, il est nécessaire de prendre en compte un aspect technologique et métier dans le découpage de la surface complexe et la définition des régions afin de mieux appréhender la notion d'entité d'usinage complexe. Pour cela, nous proposons, dans la partie suivante, de rajouter un

degré de raffinement à travers une analyse de visibilité qui permettra d'agréments cette segmentation avec un critère géométrique lié à l'usinage sans disposer, à ce stade, d'une gamme complète de la pièce ou de son programme d'usinage.

4.2 Segmentation à base de la courbure et de la visibilité

4.2.1. Analyse de visibilité

Comme les formes complexes sont de plus en plus utilisées dans différentes applications, plusieurs travaux ont porté sur leur fabrication par usinage. Ces travaux traitent principalement des problématiques liées à la génération de trajectoires, l'identification des orientations d'outils et le choix d'outil notamment dans le cas des machines 5 axes [Lasemi et al., 2010]. L'usinage 5 axes permet la réalisation des régions « *complexes* » non réalisables avec l'usinage 3 axes. Cependant, la gestion et le choix des orientations d'outil deviennent plus compliqués que dans le cas des machines 3 axes. De ce fait, une analyse d'usinabilité devient alors nécessaire pour préparer l'usinage de telles formes. Cette analyse permet aux concepteurs d'incorporer des aspects d'usinage lors de la conception et d'identifier ainsi les contraintes géométriques et d'usinage et les problèmes potentiels de fabrication [Madan et al., 2007].

Une des problématiques liées à la génération de trajectoires, dans le cas des formes complexes, est l'orientation de l'outil. Cette étape d'identification des orientations de l'outil a pour but de sélectionner les paramètres d'orientation pour chaque point de la surface, permettant ainsi de minimiser le temps d'usinage de la surface et d'assurer une meilleure qualité. Dans ce cas, une analyse de visibilité peut être utilisée comme un outil efficace pour l'analyse de l'usinabilité de ces surfaces complexes [Yang et al., 1999].

L'analyse de visibilité d'un outil par rapport à une pièce, définie par un modèle CAO, est importante pour un positionnement et une orientation optimale de la pièce sur une machine-outil multi-axes [Xu et al., 2002]. De ce fait, Yang *et al.* [Yang et al., 1999] présentent une analyse de l'usinabilité pour l'usinage d'une surface complexe basée sur une analyse de visibilité. Cette analyse permet d'obtenir un cône de visibilité qui représente l'ensemble des orientations possible de l'outil pour chaque position de la surface. Après la détermination du cône de visibilité, l'orientation de l'outil peut être ajustée pour s'adapter à la géométrie locale de la surface à chaque point de contact. Par ailleurs, Xu *et al.* [Xu et al.,

2002] effectuent une analyse d'accessibilité, en prenant en considération la géométrie de l'outil, afin de générer la trajectoire d'outil pour les surfaces complexes. La trajectoire d'outil est ainsi générée en prenant en compte quelques contraintes géométriques liées aux limites des axes des machines, l'over-cut et les collisions de l'outil avec la pièce, la machine et les posages. En effet, le choix des posages optimaux ainsi que les différentes orientations des outils sont généralement basés sur une étude de visibilité. De ce fait, la surface complexe est souvent découpée en différentes régions, de telle sorte que chaque région soit usinée dans un posage précis et avec des paramètres d'orientations spécifiques [Chen et al., 2003; Vafaeseefat et El Maraghy, 2000].

Plusieurs méthodes et techniques existent dans la littérature permettant d'étudier la visibilité de l'outil et de définir ainsi ses différentes orientations sur les surfaces complexes. Ces techniques peuvent être classées en trois grandes approches :

— L'approche continue qui ne s'appuie pas sur la discrétisation de l'espace et qui utilise la carte Gaussienne (G-map) pour le calcul de la visibilité [Tang et al., 1989].

— L'approche qui se base sur un calcul de type Z-Buffer qui permet de calculer pour une scène les éléments non visibles à partir de différents points d'observation donnés et arrangés autour de la sphère gaussienne [Balasubramanian et al. 2000].

— L'approche basée sur la discrétisation de l'espace et l'approximation polyédrique de la surface à usiner [Kang et Suh, 1997].

Nous présentons ici l'un des outils les plus utilisés : la carte Gaussienne (G-map). Le concept de la carte Gaussienne trouve ses origines en géométrie différentielle [Do Carmo, 1976]. Il s'agit de représenter la normale de chaque point de la surface par un autre point sur la surface d'une sphère unitaire. Ce point est le résultat de l'intersection entre la normale unitaire considérée et la surface de la sphère unitaire. De ce fait, chaque forme géométrique possède sa propre carte Gaussienne (cf. figure 50).

Afin de matérialiser l'outil et définir ainsi son accessibilité sur la pièce, la carte Gaussienne est enrichie pour définir une carte de visibilité (V-map) [Woo, 1994]. La visibilité permet de déterminer si un point de la surface est visible à partir d'un point de l'espace ou non. Comme une carte Gaussienne, la carte de visibilité d'une surface est définie sur une sphère unitaire par l'intégration du champ de visibilité de chaque point de la G-map telle que la visibilité d'un point sur la G-map est une demi-sphère. De ce fait, la V-map de toute la surface est le résultat de l'intersection entre l'ensemble des hémisphères associés aux points de la G-map (cf. figure 50).

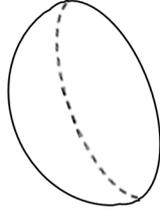
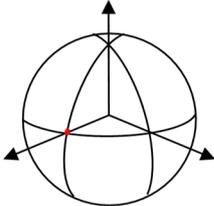
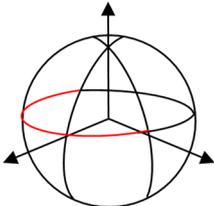
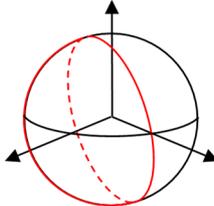
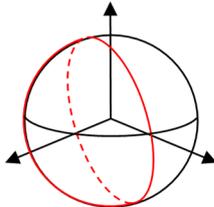
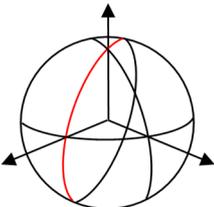
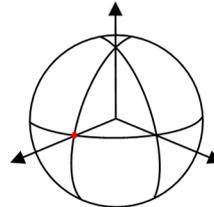
Type de surface	 Plan	 $1/2$ Cylindre	 Demi sphère
Carte Gaussienne	 Point	 Demi cercle	 Demi sphère
Carte de visibilité	 Demi sphère	 Demi cercle	 Point

Figure 50 — Exemples de G-map et de V-map

Woo [Woo, 1994] définit la carte de visibilité afin d'étudier l'accessibilité des pièces. Par la suite, d'autres recherches ont approfondi son travail et l'ont appliqué dans différents domaines. Tang *et al.* [Tang et al., 1989] proposent une méthode de posage optimal d'une pièce (composée de surfaces paramétriques) dans l'espace de la machine dans l'objectif d'assurer une visibilité maximale de la pièce dans un seul posage. En effet, le posage de la pièce est défini/déterminé à travers l'intersection entre l'ensemble des polygones sur la sphère de la carte de visibilité de l'ensemble des surfaces paramétriques de la pièce et la visibilité de la machine concernée (un grand cercle (*eigen cercle*) dans le cas des machines 4 axes et une bande surfacique (*eigen bande*) dans le cas des machines 5 axes). Le posage optimal est ainsi défini par la recherche de l'intersection maximale.

En outre, Makki [Makki, 2009] propose une méthode de calcul de la visibilité d'un nuage de points basée sur la carte Gaussienne. Cette méthode permet de partitionner le nuage de points en différents paquets afin d'assurer le copiage

direct de la forme par usinage 5 axes positionné. Cependant, la visibilité d'un point ne signifie pas qu'il est physiquement accessible. La visibilité est une condition nécessaire et non pas suffisante. Pour la génération de trajectoire, l'outil ne peut pas être modélisé par une ligne droite. Sa géométrie et ses dimensions doivent être prises en compte pour calculer son accessibilité. Pour ce faire, la visibilité est définie en trois étapes successives, en prenant en compte la géométrie de l'outil (la visibilité initiale), la collision avec le nuage de points (visibilité globale) et l'accessibilité machine (visibilité réelle). Ainsi, le résultat final définit une accessibilité globale de l'outil tout en évitant les collisions avec la pièce, la machine et l'environnement d'usinage.

4.2.2. Procédure de segmentation à base de la courbure et de la visibilité

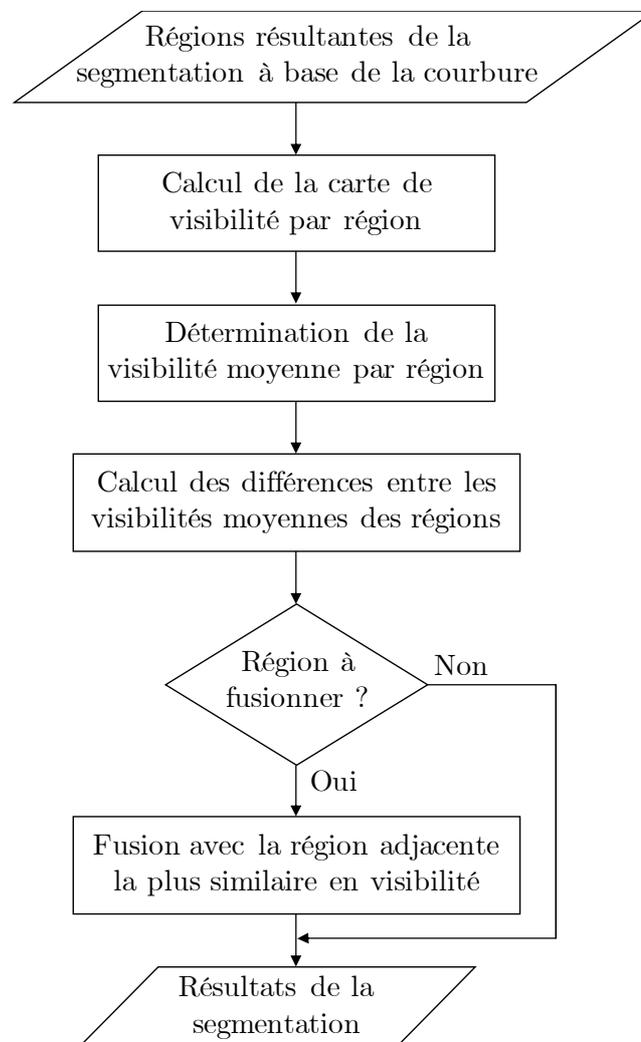


Figure 51 — Procédure de segmentation à base de la courbure et de la visibilité

Comme cité précédemment, nous proposons d'enrichir la technique de segmentation à base de la courbure en réalisant une deuxième couche d'analyse qui permet d'intégrer un nouveau critère lié à l'usinage. Cette nouvelle approche se base sur les régions résultantes de la segmentation à base de la courbure et une analyse de visibilité permettant d'étudier la faisabilité de l'usinage de la pièce. L'idée est d'intégrer l'orientation de l'outil, un des éléments essentiels du processus d'usinage des formes complexes, à travers une analyse de visibilité de chacune de ces régions géométriques initiales. Il s'agit alors d'une segmentation à base de la courbure et de la visibilité. Pour ce faire, notre approche s'appuie principalement sur deux étapes : une analyse de visibilité et un regroupement des régions (cf. figure 51).

4.2.2.1. Analyse de visibilité

Dans ce travail, la carte Gaussienne est utilisée pour l'analyse de visibilité de la surface complexe. Généralement, les méthodes utilisant la carte Gaussienne sont appliquées aux formes paramétriques [Makki, 2009]. Toutefois, la carte Gaussienne est appliquée ici sur une représentation discrète. Comme cité précédemment, la surface est discrétisée en un maillage triangulaire défini par des faces, des arêtes et des sommets.

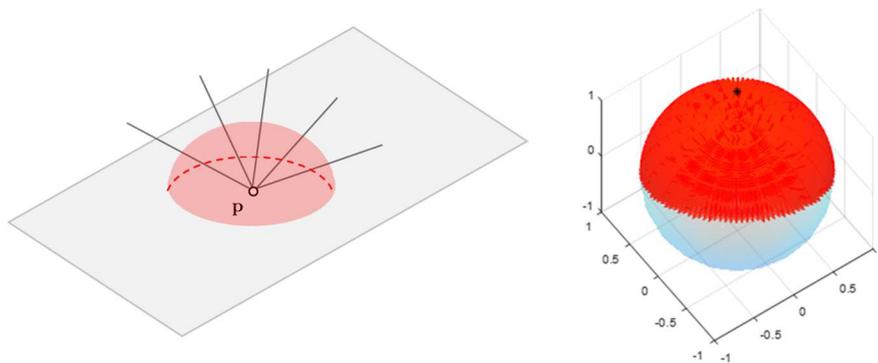


Figure 52 — Visibilité locale d'un point de la surface

En projetant les normales de l'ensemble des sommets sur la sphère unitaire, la méthode Gaussienne permet d'attribuer à chaque point de la surface un champ de visibilité. Sur la figure 52, la surface étant un plan, chaque point possède un champ de visibilité correspondant à un hémisphère. Cet hémisphère regroupe l'ensemble des orientations visibles de l'outil. Mais, la visibilité d'un point ne signifie pas qu'il est atteignable par l'outil. Il s'agit ainsi d'une « *visibilité locale* ». En effet, la géométrie des surfaces voisines à la surface à laquelle appartient le point étudié, ainsi que les surfaces considérées comme obstacles doivent être

prises en compte lors de la construction du champ de visibilité de chaque point. De ce fait, le champ de visibilité initial pour chaque point est réduit d'un hémisphère à un cône de visibilité. Ce cône de visibilité final, définissant la « *visibilité globale* », représente donc l'ensemble des orientations possibles de l'axe de l'outil au point considéré (cf. figure 53).

Contrairement aux autres travaux dans la littérature, notre calcul de visibilité n'inclut pas les dimensions et la géométrie de l'outil. Ici, l'outil n'est pas pris en compte car il ne peut à ce stade pas être fixé, ni la machine et les volumes encombrants dans l'environnement. Néanmoins, notre visibilité globale permet de contrôler les collisions possibles entre les orientations d'axe d'outil visibles et l'ensemble de la surface étudiée ainsi que les surfaces adjacentes. Une fois l'outil choisi, cette visibilité pourrait être complétée en prenant en compte les caractéristiques géométriques de l'outil dans le calcul.

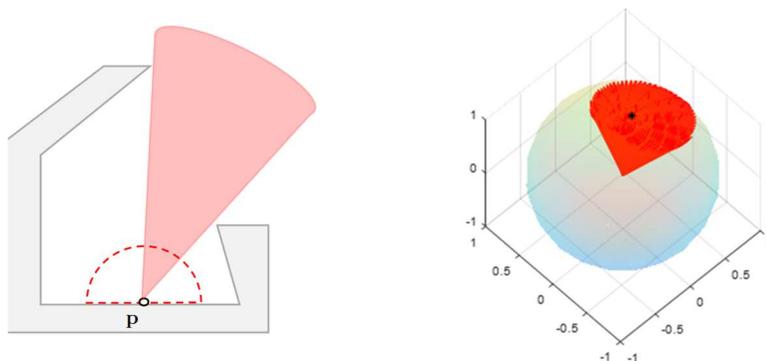


Figure 53 — Visibilité globale d'un point de la surface

Après avoir construit la carte de visibilité de chaque point de la surface complexe, la visibilité de chaque région, issue de la segmentation à base de la courbure est ensuite déterminée. La visibilité d'une région n'est que l'intersection de toutes les cartes de visibilité de tous les points qui la définissent. Par la suite, un champ de visibilité globale est associé à chaque région géométrique.

4.2.2.2. Regroupement des régions

Etant donné le nombre et la taille des régions résultantes de la segmentation de la surface complexe à base de la courbure, cette étape consiste à se baser sur le critère de visibilité pour fusionner ces régions et en créer des nouvelles qui intègrent l'aspect technologique. Les régions adjacentes partageant les mêmes propriétés de visibilité et des types de surfaces proches sont regroupées dans le même paquet. Ainsi, les petites régions peuvent être fusionnées pour créer une nouvelle région, ou être regroupées avec une autre région voisine plus conséquente.

Pour ce faire, une orientation moyenne de l'outil est calculée pour chaque région. Cette orientation n'est que la moyenne du champ de visibilité global associé à la région. Elle représente le critère de comparaison entre les régions pour pouvoir les fusionner. Comme les régions sont aussi petites, la différence de l'orientation de l'outil de telles régions adjacentes est en général faible. De ce fait, ces régions peuvent être usinées avec la même orientation d'outil. Ceci explique leur regroupement dans le même paquet.

Comme le montre la figure 54, ce nouveau critère défini à travers la notion de visibilité a permis d'apporter de la cohérence technologique au découpage initial à base de la courbure. Les petites régions ayant des orientations moyennes similaires sont combinées pour définir des nouvelles régions. Lors de la fusion de ces régions, il faut s'assurer de ne pas regrouper des régions de types de surfaces très différents. Dans cet exemple, des régions de type « *spherical cap* » et « *dome* », par exemple, sont fusionnées comme ces deux types de surfaces sont proches sur l'intervalle global de l'indice de forme. En prenant en compte les types de surfaces et les directions d'orientations, le découpage initial de la surface complexe en 24 régions a été raffiné pour définir 4 régions finales.

Sans connaissance préalable du processus d'usinage, les résultats de cette approche nous semblent satisfaisants. Néanmoins, la segmentation peut être encore améliorée si la gamme complète de la pièce est disponible. Dans ce cas, différentes données relatives à la gamme, et de l'usinage (opérations, outils, paramètres de coupe, etc.), donnant une information plus détaillée sur le processus d'usinage de la pièce, peuvent être prises en compte.

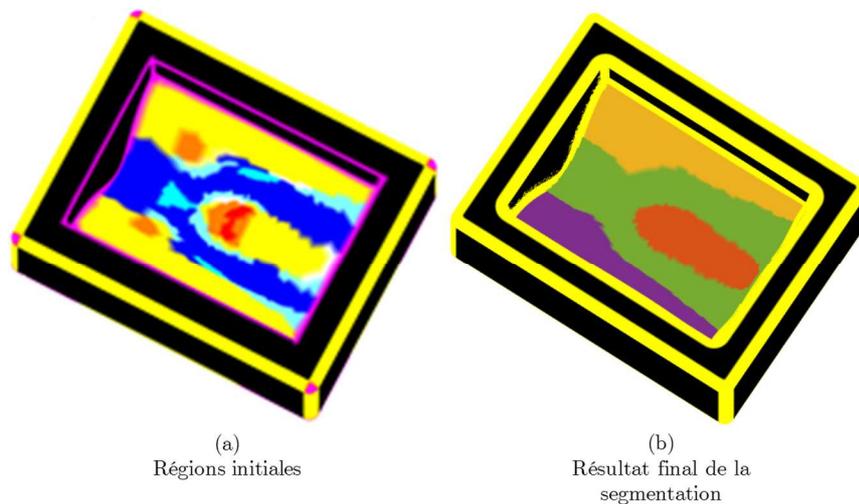


Figure 54 — Résultats de la segmentation à base de la courbure et de la visibilité

4.3 Segmentation technologique orientée région

L'application du k -means sur les données de coupe a permis de découper les points de la trajectoire en différents clusters. Malgré la validation statistique qui montre, en mesurant des distances intra et inter clusters, que les points sont bien répartis dans les différents clusters, les résultats donnent des clusters avec des points appartenant à des plages de variation différentes (cf. Section 3.4).

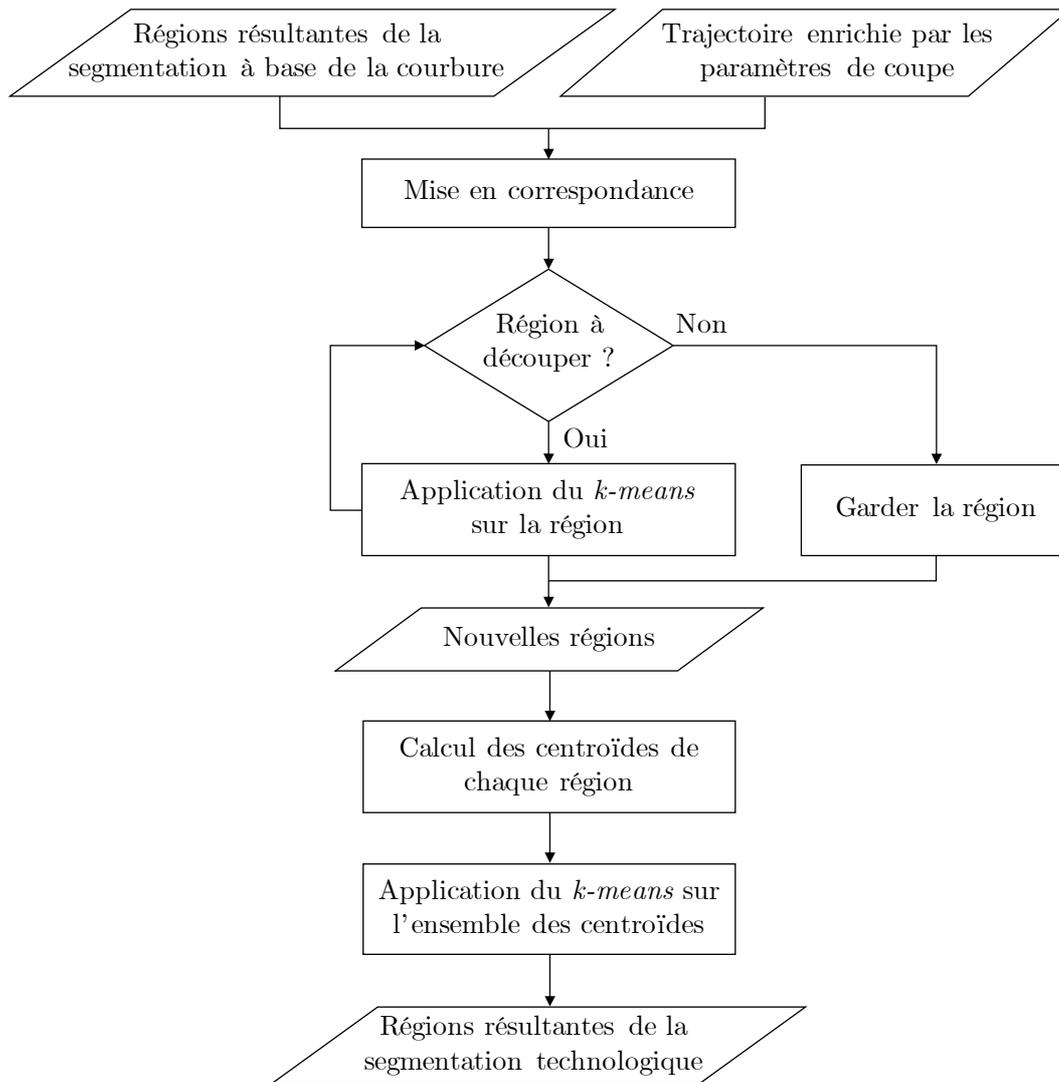


Figure 55 — Procédure de la segmentation technologique orientée région

La notion de voisinage perdue dans l'espace paramétrique ainsi que les données bruitées avec des fluctuations aussi importantes compliquent le problème de segmentation avec l'algorithme du k -means. Pour pallier ces problèmes, une démarche de segmentation qui se base sur une approche composition/décomposition avec l'application du k -means en deux temps, est appliquée. Au lieu d'appliquer

directement le k-means sur les données de coupe des points de la trajectoire, l'idée est de se baser sur les régions résultantes de la segmentation géométrique pour appliquer le k-means séparément sur ces régions permettant ainsi de les découper par rapport aux paramètres de coupe. L'ensemble des régions résultantes feront l'objet d'un deuxième k-means afin de regrouper les régions similaires. La procédure de segmentation est présentée sur la figure 55.

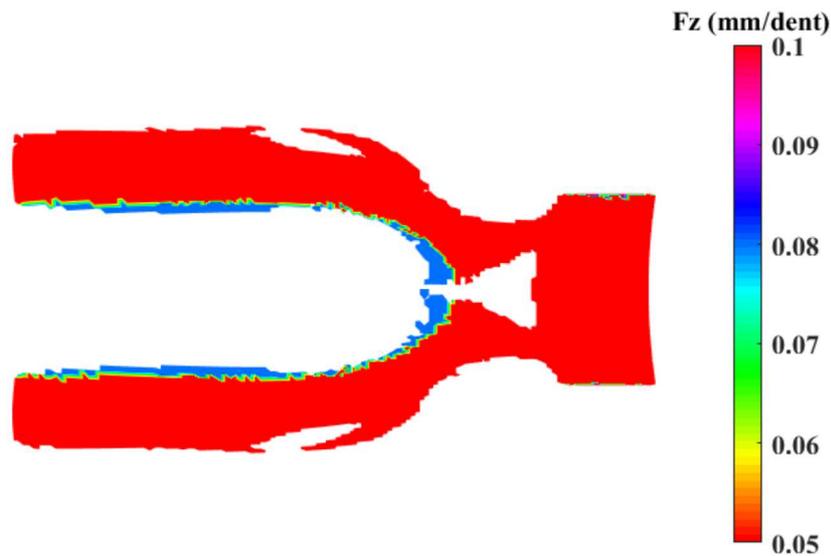


Figure 56 — Variation de paramètres de coupe (F_z) sur une région géométrique

La mise en correspondance entre la géométrie et la trajectoire permet d'enrichir chaque région avec un ensemble de paramètres de coupe. L'idée alors est d'analyser la variation de ces différents paramètres sur chacune de ces régions à travers des cartographies et des histogrammes. La visualisation de la distribution des paramètres sur la surface donne une idée sur les configurations utilisées lors de l'usinage de chaque région (cf. figure 56).

Si les paramètres de coupe de la région varient dans la même plage de fonctionnement, la région est gardée telle qu'elle. Sinon, un algorithme de k-means est appliqué sur les points de la région afin de définir des nouvelles régions usinées séparément (cf. figure 56). Le choix de garder ou de découper la région géométrique initiale dépendra de l'utilisateur qui peut estimer les plages de variation des paramètres. L'application du k-means dans un espace plus restreint, par région, donne des meilleurs résultats.

L'étape suivante consiste à combiner les régions adjacentes ayant les mêmes propriétés d'usinage. Pour ce faire, un deuxième k-means est appliqué sur les régions résultantes de l'étape précédente. Chaque région est désormais représentée par un point dans l'espace paramétrique. Ce point est centroïde de tous les

paramètres process utilisés dans l'analyse (Vc, Fz, Ad et angle). De ce fait, chaque cluster représente un regroupement de régions similaires en termes de données d'usinage.

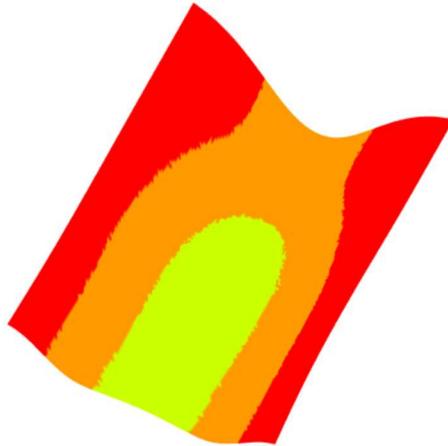


Figure 57 — Résultats de la segmentation technologique orientée région

Lors de la création du programme d'usinage, la logique du programmeur FAO ne se base pas sur des points de la pièce, mais plutôt sur des régions. Le programmeur FAO applique ses stratégies d'usinage sur des régions et non pas sur des points. C'est pour cette raison que les résultats obtenus avec cette nouvelle approche basée sur les régions géométriques sont plus significatifs et reflètent au mieux la logique de découpage du programmeur FAO (cf. figure 57).

5 Caractérisation et classification de l'entité d'usinage complexe multi-niveaux

5.1 Caractérisation de l'entité d'usinage

En combinant les données géométriques et les données technologiques générées lors de la simulation d'usinage, la surface de la pièce est découpée en différentes régions à l'aide de la segmentation technologique orientée région. L'idée est de s'appuyer sur les règles de la théorie des graphes (cf. Annexe C) pour pouvoir regrouper les régions résultantes de cette segmentation afin d'arriver à caractériser l'entité d'usinage multi-niveaux.

Dans cette partie, le graphe d'adjacence valué (G) est généré à partir d'une matrice d'adjacence basée sur la convexité et la concavité des arêtes [Anwer, 2000]. Ce graphe est représenté par des sommets et des arcs valués définissant

les liens d'adjacence entre les régions connexes (cf. figure 58). Les sommets représentent les régions de l'entité et les arcs représentent l'ensemble des arêtes communes entre deux régions, en précisant la valeur de la convexité ou concavité des arêtes sur les arcs.

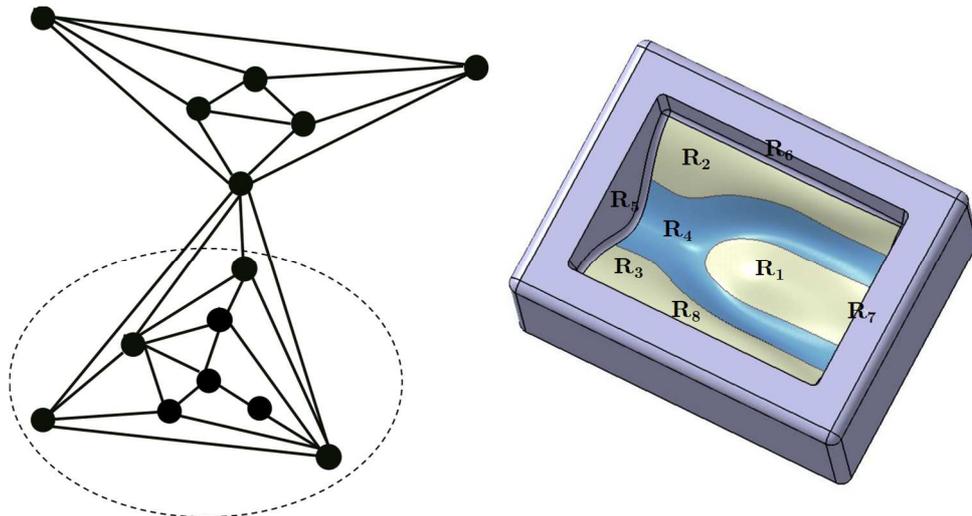


Figure 58 — Graphe d'adjacence

Une matrice de conditionnement est par la suite extraite à partir de la matrice d'adjacence en s'intéressant aux arêtes concaves entre les régions. Cette matrice définit un graphe de conditionnement (G^+) qui peut être déduit à partir de (G) en supprimant les arcs convexes, et les nœuds isolés.

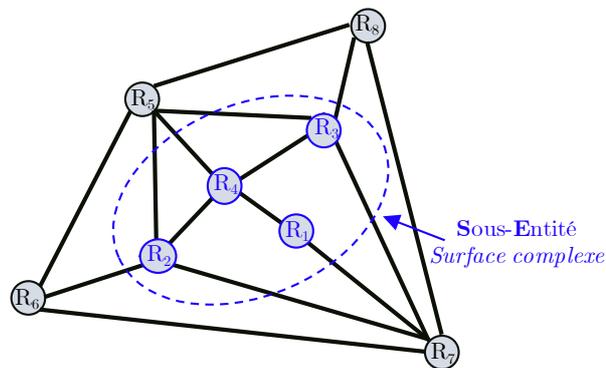


Figure 59 — Graphe d'adjacence de l'entité

Ensuite, une analyse de ce graphe permet d'extraire des sous-graphes en s'appuyant sur la propriété de fermeture transitive qui correspond à la propagation de la contrainte de concavité dans le graphe (G^+). La figure 59 présente un sous-graphe défini par huit régions. Chaque région regroupe un ensemble de som-

mets ayant des propriétés similaires. Étant usinées dans la même séquence d'usinage, les régions adjacentes $\{R_1, R_2, R_3$ et $R_4\}$ sont fusionnées pour définir une sous-entité. Cette dernière représente la surface complexe du fond. De même pour l'ensemble de régions $\{R_5, R_6, R_7$ et $R_8\}$ qui définissent une autre sous-entité. Ces deux sous-entités adjacentes usinées dans le même processus d'usinage sont regroupées pour définir ainsi une entité d'usinage. Comme expliqué précédemment, cette nouvelle caractérisation hiérarchique (entité, sous-entité et région) définit ainsi une entité d'usinage multi-niveaux.

5.2 Classification des entités d'usinage complexes

Afin d'assurer une meilleure exploitation de l'entité d'usinage, il est nécessaire de se baser sur des classes de types bien définis. Pour cela, les entités sont généralement définies avec différentes classes groupées dans une structure hiérarchique appelée taxonomie, telle que chaque classe regroupe les entités ayant des propriétés communes.

Comme évoqué dans le premier chapitre, la plupart des classifications proposées dans la littérature se sont limitées aux formes simples obtenues par usinage 2 axes et demi et 3 axes. Peu de travaux traitent les formes complexes. En outre, les classifications proposées dans le domaine de l'aéronautique se basent essentiellement sur des pratiques industrielles. Par ailleurs, la norme STEP-NC définit la forme complexe à travers la classe région. Cette classe regroupant toutes les formes gauches obtenues par usinage 5 axes, n'a pas été encore bien exploitée. Pour cela, nous adoptons ici la classification proposée par Anwer [Anwer, 2000a] à travers une analyse de graphe et en se basant sur les résultats du découpage topologique.

Il s'agit de cinq classes d'entités qui viennent raffiner la classification STEP-NC destinée aux formes gauches (cf. figure 60). Chaque classe d'entité est définie par des règles de caractérisation exploitant uniquement les graphes (G et G^+) et leurs propriétés décrites dans l'Annexe C.

a) Passage Freeform : Une entité sans fond possédant plusieurs directions d'accessibilité. Elle est constituée d'un ensemble de régions, formant une paroi fermée, liées entre elles par des arêtes concaves, ou convexes. Elle est caractérisée par les propriétés suivantes :

- 1) Le graphe G^+ est un cycle et $G = G^+$;
- 2) Le graphe G^+ est une chaîne élémentaire et le graphe G est un cycle.

b) Dépression Freeform : Une entité avec fond possédant plusieurs directions d'accessibilité. Elle est constituée d'un ensemble de régions de fond ayant des arêtes concaves communes avec un ensemble de régions, formant une paroi

fermée, liées entre elles par des arêtes concaves ou convexes. Elle est caractérisée par les propriétés suivantes :

- 1) Le graphe G^+ contient un seul sommet v tel que $deg(v) = \lambda(G^+)$;
- 2) Le graphe $G-v$ est un cycle avec $|E^+(G-v)| > |E^-(G-v)|$.

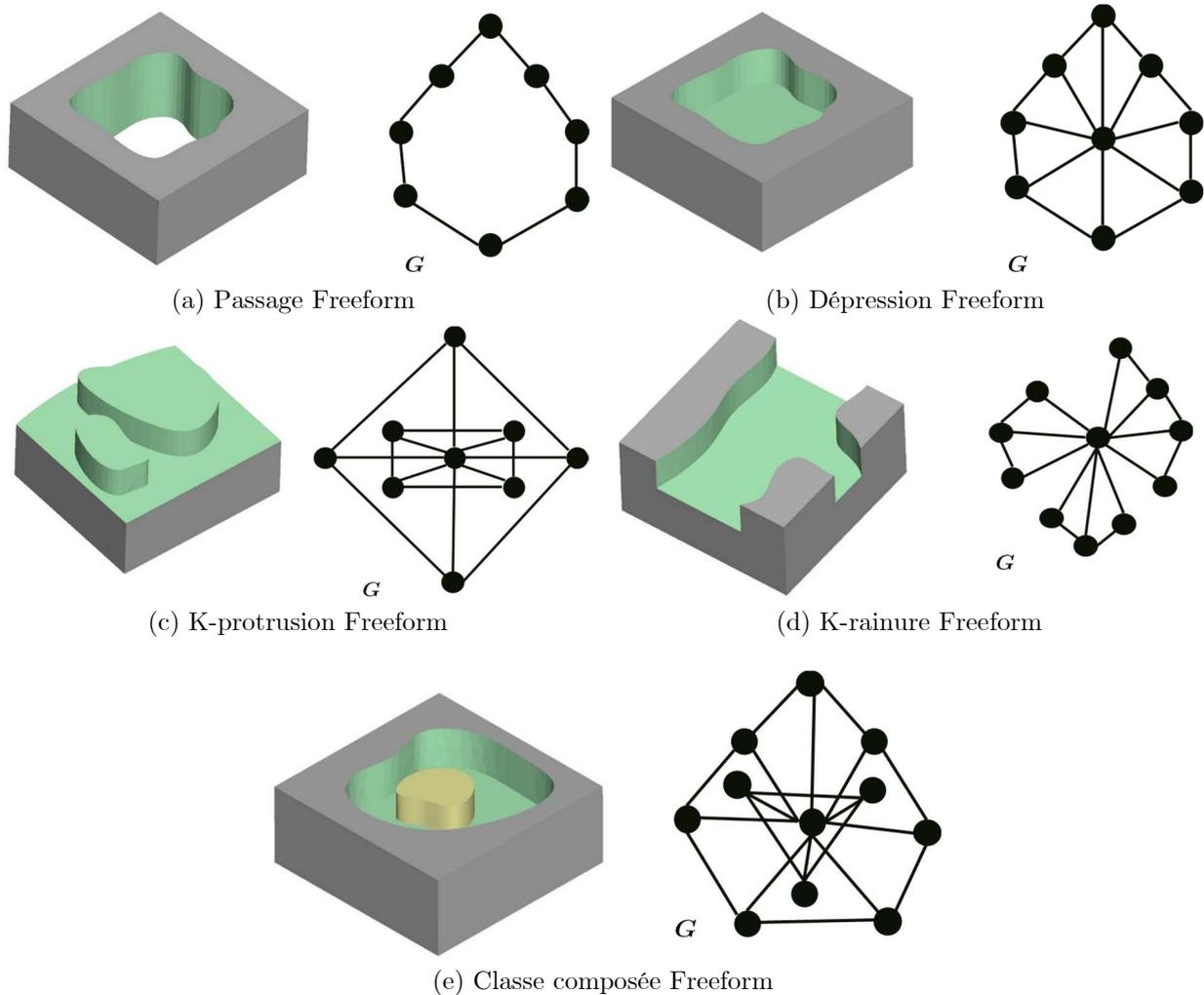


Figure 60 — Classification des entités d'usinage complexe

c) K-protrusion Freeform : Une entité possédant plusieurs directions d'accessibilité. Elle est constituée d'une région ou un ensemble de régions de base ayant des arêtes concaves communes avec des protubérances. Chaque protubérance est délimitée par une paroi fermée constituée d'un ensemble de régions liées entre elles par des arêtes concaves ou convexes. Elle possède les propriétés suivantes :

- 1) Le graphe G^+ contient un seul sommet v tel que $deg(v) = \lambda(G^+)$;

- 2) Le graphe $G-v$ contient k composantes connexes disjointes $(G-v)_1, \dots, (G-v)_k$;
- 3) Pour tout i , $(G-v)_i$ est soit un cycle avec $|E^+(G-v)_k| < |E^-(G-v)_k|$, soit il contient un cycle hamiltonien.

d) K-rainure Freeform : Une entité possédant plusieurs directions d'accessibilité. Elle est constituée d'une ou plusieurs régions(s) de base ayant des arêtes concaves communes avec une ou plusieurs paroi(s) ouverte(s). Chaque paroi est constituée d'un ensemble de régions liées entre elles par des arêtes concaves ou convexes. Elle est caractérisée par les propriétés suivantes :

- 1) Le graphe G^+ contient un seul sommet v tel que $deg(v) = \lambda(G^+)$;
- 2) Le graphe $G-v$ contient k chaînes élémentaires disjointes $(G-v)_1, \dots, (G-v)_k$ et/ou l sommets isolés s_1, s_2, \dots, s_l .

e) Classe composée Freeform : Cette classe regroupe les entités ne pouvant être décomposées en un ensemble d'entités simples définies précédemment.

Enfin, en se référant à cette classification, l'analyse des propriétés topologiques de sous-graphe extrait de la pièce test permet de définir l'entité d'usinage « *dépression freeform* ». En effet, la sous-entité $\{R_1, R_2, R_3$ et $R_4\}$ représente le fond de la dépression et l'ensemble de régions $\{R_5, R_6, R_7$ et $R_8\}$ représente la paroi de l'entité.

6 Réutilisation des données d'usinage

En se basant sur les résultats de la segmentation de la forme complexe, nous allons présenter, dans cette partie, une méthodologie pour l'exploitation de ses régions résultantes dans le contexte de la réutilisation des données d'usinage. Pour cela, deux approches dépendantes du niveau de granularité se distinguent en fonction des données dont nous disposons (cf. figure 61).

Dans le cas où seules les régions sont définies, la première approche est orientée région et se base sur une mesure de similarité basée sur la fonction de forme D2. Cette dernière permet de générer pour chaque région de la nouvelle pièce et celle de l'ancienne une signature qui sera utilisée pour comparer les régions en mesurant leur similarité. Quant à la seconde approche, elle est orientée entité d'usinage dans le cas où l'entité a été définie et validée après le regroupement de régions à l'aide de la théorie des graphes (cf. Section 5). En se référant au type de l'entité ou la région similaire, une analyse de réutilisabilité est ensuite effectuée. Qu'elle soit une réutilisation directe ou adaptée, elle permet d'associer des paramètres d'usinage à la nouvelle pièce et proposer ainsi un nouveau programme d'usinage.

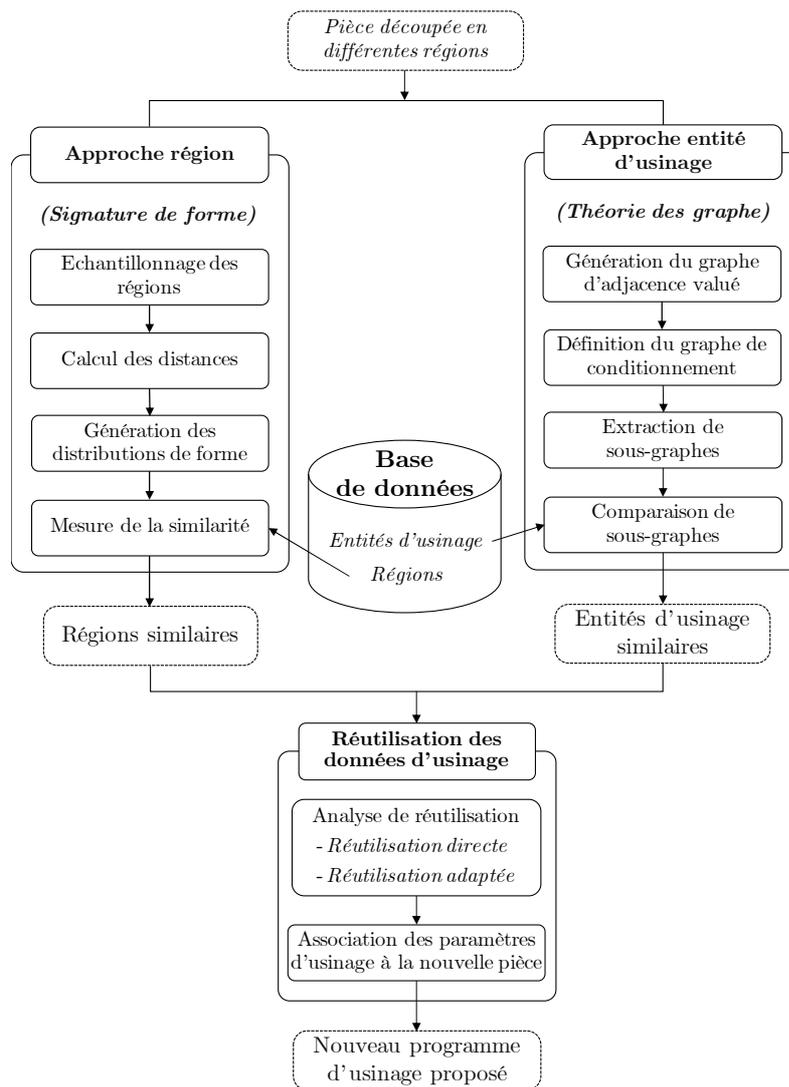


Figure 61 — Procédure de la réutilisation des données d'usinage

6.1 Approche de réutilisation orientée *région*

6.1.1. Mesure de similarité

La mesure de similarité des formes est un problème fondamental de raisonnement géométrique que l'on retrouve dans plusieurs applications de conception et de fabrication de produits. L'évaluation de la similarité est généralement effectuée en générant des signatures de formes à partir des modèles 3D et en comparant ensuite ces signatures à l'aide d'une mesure de similarité [Cardone, et al.,

2003]. Idéalement, ces signatures devraient être indépendantes de la représentation des modèles 3D et devraient décrire les caractéristiques du modèle 3D nécessaires à l'évaluation de la similarité. Une signature de forme peut être un graphique, un vecteur ou un ensemble ordonné de valeurs numériques. Après avoir identifié une signature de forme appropriée, la similarité entre les modèles 3D est exprimée par la distance entre les deux signatures. Plus la valeur de la distance est élevée, plus les modèles 3D correspondants sont différents.

La plupart des articles de la littérature soulignent que les signatures de forme et la fonction de distance devraient avoir les propriétés suivantes [Cardone, et al., 2003] :

— Positivité : La distance entre deux modèles 3D doit être une valeur non négative.

— Identité : Si la distance entre les deux signatures est nulle, les deux modèles 3D doivent être identiques. De même, si les deux modèles sont identiques, la distance doit être nulle.

— Symétrie : La symétrie garantit que la distance ne dépend pas de l'ordre de comparaison et donne le même résultat, quel que soit le sens de la comparaison.

— Inégalité triangulaire : Dans certaines applications, la fonction de distance doit également satisfaire l'inégalité triangulaire.

— Invariance : L'invariance aux transformations doit être satisfaite si la comparaison et le processus d'extraction des descripteurs de forme doivent être indépendants de la position, de l'orientation et du changement de l'échelle de l'objet dans son système de coordonnées cartésiennes.

Afin d'évaluer la similarité entre les modèles 3D, diverses techniques ont été développées. Les principales techniques peuvent être classées, en fonction du type de signatures de formes utilisées, en plusieurs familles : techniques basées sur des histogrammes, techniques basées sur les graphes, techniques basées sur les graphes topologiques, etc. [Iyer et al., 2005; Chu et Hsu, 2006; Bustos et al., 2005].

Dans ce travail, notre approche utilise une technique basée sur des histogrammes. Cette technique échantillonne la surface du modèle 3D et extrait des caractéristiques des points échantillonnés. Ces caractéristiques sont organisées sous forme d'histogrammes ou des distributions représentant leur fréquence. La similarité est déterminée par une comparaison des histogrammes au moyen d'une fonction de distance. La précision et l'efficacité des techniques basées sur les histogrammes dépendent du nombre de points échantillonnés.

Plusieurs algorithmes basés sur des histogrammes ont été développés et utilisés dans la littérature. Osada *et al.* [Osada et al., 2002] définissent des distributions de formes pour comparer des modèles 3D. Il s'agit de signatures de forme basées sur des propriétés géométriques. Cinq fonctions de forme sont définies (cf. figure 62) :

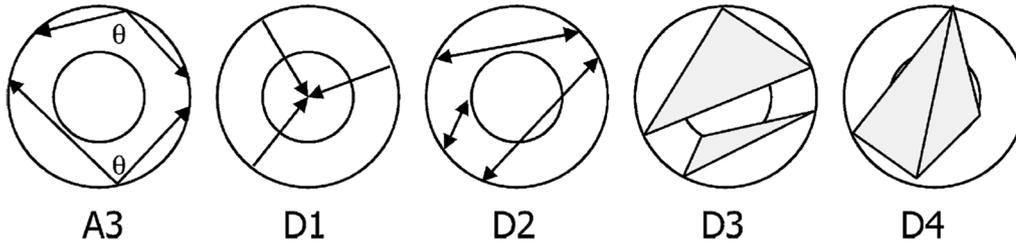


Figure 62 — Fonctions de forme de la distribution de forme

- **A3** : Mesure l'angle entre trois points aléatoires sur la surface d'un modèle 3D.
- **D1** : Mesure la distance entre un point fixe et un point aléatoire sur la surface.
- **D2** : Mesure la distance entre deux points aléatoires sur la surface.
- **D3** : Mesure la racine carrée de la surface du triangle entre trois points aléatoires de la surface.
- **D4** : Mesure la racine cubique du volume du tétraèdre défini par quatre points aléatoires de la surface.

En comparant ces fonctions, il s'est avéré que la fonction D2 est le meilleur critère de discrimination. Elle a montré son efficacité pour traiter des problèmes de bruits et d'invariance aux transformations [Lü et al., 2009].

Après avoir sélectionné la fonction de forme appropriée, les distances entre les différentes paires de points aléatoires sur le modèle 3D, sont calculées pour générer la distribution de forme. Celle-ci est représentée par une distribution de probabilité mesurant la fréquence d'occurrence des distances à l'intérieur d'une plage spécifiée de valeurs de distance. La dissimilarité entre deux modèles 3D est ensuite calculée à l'aide de différentes mesures de distance telles que les normes L_N de Minkowski entre les deux signatures de formes.

Une approche similaire a été utilisée par Ip *et al.* [Ip et al., 2002] pour comparer des modèles de pièces mécaniques. La fonction de forme D2 [Osada et al., 2002] a été utilisée et des distributions de formes sont générées. Cependant, la distribution de forme d'une pièce est divisée en trois distributions distinctes. La première distribution (IN) est calculée pour toutes les paires de points dont le segment les reliant se trouve à l'intérieur du modèle. La deuxième distribution (OUT) prend en compte les paires de points où le segment les reliant se trouve en dehors du modèle. La troisième distribution (MIXTE) est calculée pour toutes les paires de points où le segment les reliant passe à l'intérieur et à l'extérieur

du modèle. La dissimilarité entre les modèles est ensuite calculée de la même manière que dans les travaux d’Osada *et al.* [Osada et al., 2002].

Ohbuchi *et al.* [Ohbuchi et al., 2003] ont proposé une autre variante à cette technique. Deux histogrammes 2D, Angle-Distance (AD) et Absolute Angle-Distance (AAD), ont été calculés à partir de la fonction de forme D2. L’histogramme (AD) a été construit en mesurant à la fois la distance entre une paire de points et l’angle entre les surfaces sur lesquelles la paire de points est située. L’histogramme (AAD) calcule la valeur absolue du produit scalaire des normales de la paire des points pour augmenter la robustesse. Il a été constaté que les histogrammes AD et AAD surpassent la méthode proposée dans [Osada et al., 2002].

Pu *et al.* [Pu et Ramani, 2005] ont également proposé une méthode de représentation pour obtenir les signatures de formes des modèles 3D après avoir obtenu automatiquement leurs trois vues principales orthogonales. Une approche statistique représente la forme des vues 2D sous la forme d’une distribution de distance entre des paires de points échantillonnés de manière aléatoire. Les distributions de formes 2D ainsi obtenues sont utilisées pour comparer des objets 3D. La norme L_2 est ensuite utilisée pour calculer la distance entre deux distributions de forme.

Dans des travaux plus récents, Pham *et al.* [Pham et al., 2018] se sont basés sur la distribution de forme D2 combinée aux réseaux de neurones (CNN — Convolutional Neural Network) pour la reconnaissance d’objets. Par ailleurs, Cheng *et al.* [Cheng et al., 2011] décomposent le modèle 3D de la pièce en une structure hiérarchique de géométries primitives et génèrent une distribution de forme pour chaque primitive. La similarité entre les deux pièces n’est que la somme des similarités entre les primitives de chaque niveau des deux modèles.

6.1.2. Technique de mesure de similarité orientée *région*

Dans cette section, une approche de mesure de similarité orientée « *région* », basée sur les distributions de forme, est présentée. Contrairement aux applications précédentes de la technique de distribution de forme qui l’utilisent pour la comparaison des modèles 3D, elle est utilisée dans ce travail pour comparer des régions de la surface complexe. Notre approche a pour but de trouver, à l’aide de la fonction de forme D2, pour chaque région d’une nouvelle pièce une région similaire sur d’autres pièces archivées dans une base de données en suivant les étapes suivantes :

- l’échantillonnage des régions ;
- le calcul des distances entre les paires de points ;
- la génération des distributions de forme ;

— la comparaison des distributions de forme pour mesurer la similarité.

6.1.2.1. Echantillonnage des régions

Comme nous ne disposons que de la géométrie de la nouvelle pièce, une segmentation à base de la courbure est réalisée pour définir les différentes régions de la surface complexe que nous cherchons à associer avec d'autres régions similaires.

Ayant ces régions comme données d'entrée, cette étape consiste à échantillonner chaque région en définissant un ensemble de points aléatoires répartis uniformément sur la surface de la région à partir de la représentation triangulaire. En fait, la segmentation géométrique des surfaces complexes génère plusieurs petites régions qui posent problème dans le calcul de la similarité. Ce n'est pas évident de leur associer des régions similaires. Pour y faire face et arriver à trouver les bons appariements, l'analyse prend en considération le voisinage des régions et le type de surfaces des régions voisines. En effet, la région dont la taille est trop petite est fusionnée à la région adjacente tout en vérifiant que les types de surface définis par l'indice de forme sont proches.

La densité d'échantillonnage choisie ici est importante. Plus le nombre d'échantillons est élevé, meilleure est la précision. D'autre part, le temps d'échantillonnage et de comparaison est linéairement proportionnel au nombre d'échantillons. De ce fait, il faut trouver un compromis entre la précision et le temps de calcul dans le choix du nombre de points échantillonnés N . Afin d'assurer la robustesse de l'algorithme, les expériences de Osada *et al.* [Osada et al., 2002] recommandent de choisir $N = 1024^2$.

À partir de la représentation triangulaire, la génération des N points aléatoires sur la surface se base sur ces deux étapes :

- choisir une face triangulaire du maillage d'une façon aléatoire ;
- calculer pour la face identifiée, définie par les sommets (A, B, C), le point aléatoire p en générant deux valeurs aléatoires r_1 et r_2 entre $[0,1]$, selon la formule suivante :

$$p = (1 - \sqrt{r_1})A + \sqrt{r_1}(1 - r_2)B + \sqrt{r_1}r_2C \quad (4.4)$$

La racine carrée de r_1 permet d'avoir un point aléatoire uniforme par rapport à la surface (cf. figure 63).

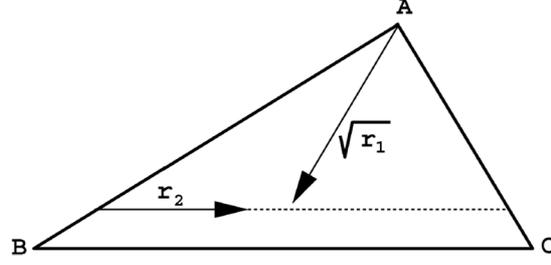


Figure 63 — Echantillonnage aléatoire des points sur une face triangulaire [Osada et al., 2002]

6.1.2.2. Calcul des distances

Cette deuxième étape concerne l'application de la fonction de forme D2 en mesurant les distances entre des paires de points échantillonnés. Pour améliorer l'efficacité de cette fonction, la courbure est intégrée dans le calcul de la distance entre les paires de points échantillonnés au lieu d'utiliser simplement la distance Euclidienne généralement utilisée pour le calcul de ces distances.

Pour cela, la distance géométrique [Zhao, 2010], définie comme une somme pondérée d'une distance Euclidienne et une distance basée sur les courbures principales, est adoptée ici.

Soit $\{p_1, p_2\}$ une paire de points choisis d'une façon aléatoire sur la surface. La distance géométrique entre ces deux points est définie suivant la formule :

$$d_g(p_1, p_2) = \alpha \cdot d_e + (1 - \alpha) \cdot k \cdot d_c \quad (4.5)$$

où : d_e est la distance Euclidienne entre la paire de points $\{p_1, p_2\}$.

$$d_e = \|p_1 - p_2\| \quad (4.6)$$

d_c est définie comme la distance de courbure entre la paire de points $\{p_1, p_2\}$.

$$d_c = \sqrt{(\rho_{1_{p_1}} - \rho_{1_{p_2}})^2 + (\rho_{2_{p_1}} - \rho_{2_{p_2}})^2} \quad (4.7)$$

$$\rho_1 = \frac{1}{K_1} \quad \rho_2 = \frac{1}{K_2} \quad (4.8)$$

où : K_1 et K_2 représentent respectivement les courbures maximale et minimale. k est une constante utilisée pour normaliser d_c et définie par :

$$k = \frac{l}{(\max(\rho_1) + \max(\rho_2))} \quad (4.9)$$

où : l est la plus grande dimension de la boîte englobante de l'ensemble des régions étudiées et $\alpha \in [0, 1]$ est un coefficient prédéfini par l'utilisateur permettant de balancer les contributions de d_e et d_c .

6.1.2.3. Génération des distributions de forme

En se basant sur les distances calculées entre l'ensemble des points aléatoires, les distributions de forme sont générées sous forme de distribution de probabilité échantillonnée. D'après Osada *et al.* [Osada et al., 2002], il est recommandé d'utiliser 1024 pour le nombre des colonnes de l'histogramme pour une meilleure précision. La figure 64 présente les distributions de forme relatives à une nouvelle et des anciennes régions sur lesquelles nous cherchons à mesurer la similarité.

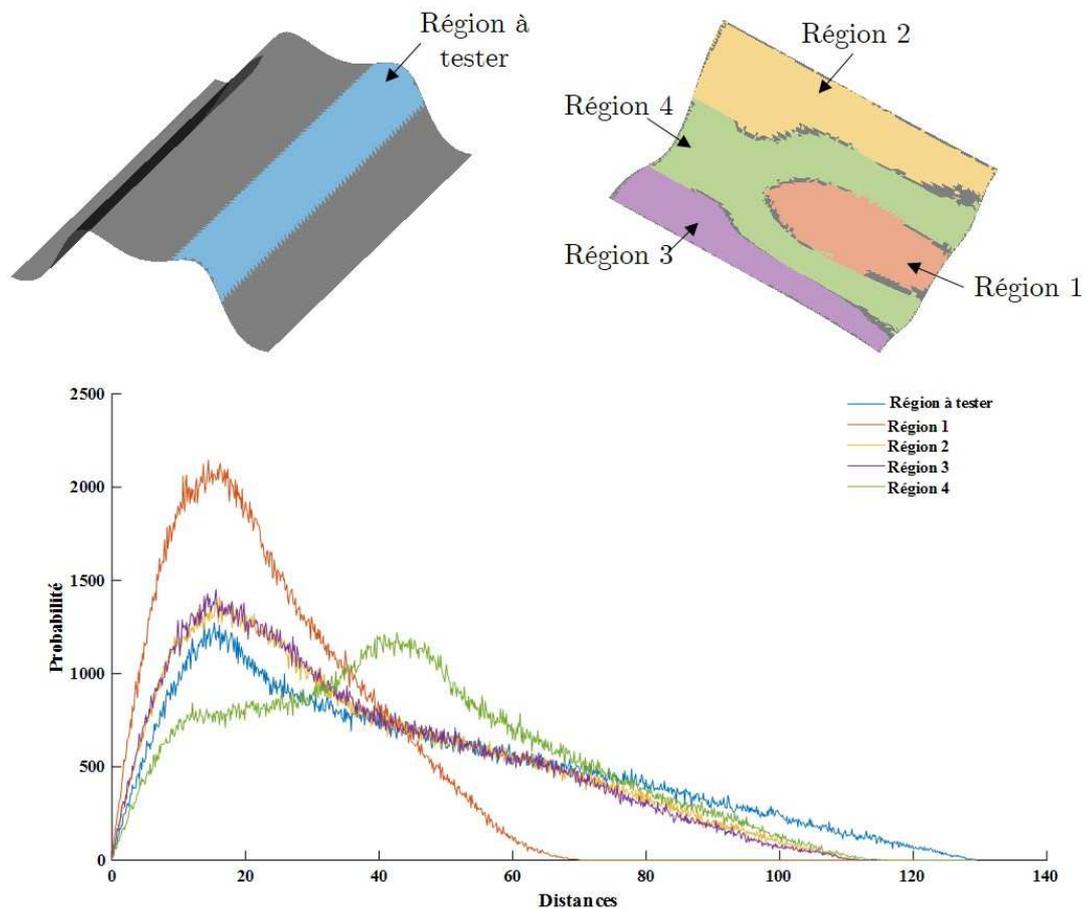


Figure 64 — Distributions de forme

6.1.2.4. Calcul de la similarité

Cette dernière étape permet de comparer les différentes régions en calculant le pourcentage de similarité entre les distributions. Ce calcul se base principalement sur le nombre d'observations dans chaque colonne des deux distributions (H^1, H^2). Ainsi, un indice de similarité en pourcentage est défini comme suit :

$$S = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n |h_i^1 - h_i^2|}{1024^2} \quad (4.10)$$

où : H^1, H^2 sont les deux histogrammes à comparer et h_i est le nombre d'observations dans la colonne i de l'histogramme.

Le tableau 5 présente les résultats d'une mesure de similarité entre une région de la nouvelle pièce avec des régions d'une ancienne pièce basée sur les distances entre les deux signatures. Dans ce cas, nous constatons que la région 2 et la région 3 sont les plus similaires car le pourcentage de similarité est le plus élevé. L'utilisateur peut fixer un seuil à partir duquel le résultat d'appariement n'est pas acceptable.

Similarité	Région 1	Région 2	Région 3	Région 4
Région à tester	92.38%	94.31%	94.22%	93.75%

Tableau 5 — Résultats de la mesure de similarité

Effectivement, cette mesure de similarité orientée région et basée sur la distribution de forme D2 permet d'associer à chaque région de la nouvelle pièce la région la plus similaire des anciennes pièces. Néanmoins, l'approche nécessite d'être améliorée. Il serait intéressant de définir d'autres critères pour fusionner les petites régions géométriques initiales qui posent problème. Par ailleurs, d'autres paramètres liés au procédé comme la visibilité, ou à la géométrie comme la normale, pourraient être intégrés dans l'évaluation de la similarité et la génération de signatures.

6.2 Approche de réutilisation orientée *entité*

Dans cette section, une approche de réutilisation orientée « *entité* », basée sur l'analyse des graphes, est présentée. Contrairement à l'approche précédente, les régions définies par le découpage topologique sont regroupées pour définir l'entité d'usinage. Ainsi, l'idée est de se baser sur ces régions pour extraire de la nouvelle pièce une entité d'usinage validée qui appartient à une des classes prédéfinies.

Comme le montre la figure 61, cette approche reprend les principales étapes permettant de caractériser l'entité d'usinage (cf. Section 5.1). A partir des régions, un graphe d'adjacence valué (G) est généré. Ensuite, en supprimant les arcs convexes et les nœuds isolés, un graphe de conditionnement (G^+) est ainsi déduit. L'analyse des propriétés des graphes permet d'extraire des sous-graphes. Ces derniers sont soumis à une comparaison avec les sous-graphes relatifs à des entités reconnues dans la base.

Cette comparaison est appelée aussi isomorphisme de sous-graphe qui a la particularité d'être NP complet c'est à dire qu'il n'y a pas d'algorithmes permettant de résoudre le problème en temps polynomial [Anwer, 2000a]. Pour résoudre ce problème, des algorithmes performants d'isomorphisme de sous-graphe peuvent être exploités dans notre cas comme l'algorithme d'Ullmann [Ullmann, 1976] ou l'algorithme VF2 [Cordella et al., 2004].

En effet, cette comparaison permet de reconnaître alors le classe de la nouvelle entité et identifier ainsi toutes les entités de la même classe stockées dans la base des données.

6.3 Réutilisation des données d'usinage

Cette dernière étape consiste à proposer des nouveaux paramètres d'usinage pour la nouvelle pièce permettant ainsi de lui créer un nouveau programme d'usinage. Les paramètres d'usinage de l'ancienne pièce peuvent être associés à la nouvelle pièce à différents niveaux de granularité.

Une fois l'entité caractérisée, une phase de réutilisation, guidée par le type de l'entité d'usinage, peut alors être effectuée. Les procédés d'usinage qui ont été utilisés pour ce type d'entité peuvent être réutilisés sur la nouvelle. Il s'agit d'une réutilisation naturelle. Sinon, au niveau de la région, après la validation des résultats de la mesure de similarité entre les régions, les paramètres de coupe définis lors de l'usinage de la région similaire identifiée pourraient être réutilisés pour la région de la nouvelle pièce.

Cependant, cela ne représente qu'une proposition. Ils peuvent ne pas être réutilisés directement. Une analyse de réutilisabilité serait à mettre en place pour vérifier et modifier le procédé d'usinage ainsi que les différents paramètres d'usinage pour la nouvelle pièce en se basant sur le savoir-faire du programmeur FAO.

En se basant sur le pourcentage de similarité et les connaissances métiers du programmeur, deux manières de réutilisation se distinguent. Une réutilisation directe des données d'usinage est effectuée dans le cas où la similarité est très

élevée. Dans le cas contraire, une réutilisation adaptée est envisageable. Elle permettrait de préciser les caractéristiques de l'outil, de choisir la stratégie d'usinage, le posage, les orientations de l'outil, etc. Dans les deux cas, une vérification finale du programmeur FAO est nécessaire afin de générer le nouveau programme d'usinage pour la nouvelle pièce. La solution finale acceptée sera, par la suite, archivée pour enrichir ainsi la base de connaissance.

7 Conclusion

Nous avons proposé, dans le chapitre précédent, une nouvelle entité d'usinage multi-niveaux caractérisée par la mise en correspondance entre les données géométriques et les données d'usinage organisées dans des structures hiérarchiques. Ainsi, les notions de sous-entité et de région qui définissent les niveaux de l'entité multi-niveaux, sont introduites. Dans ce chapitre, la procédure d'exploitation de l'ensemble de ces données dans le contexte de la caractérisation de l'entité d'usinage complexe a été présentée.

D'abord, une mise en correspondance, ou *mapping*, entre la géométrie et la trajectoire a été effectuée. Ce mapping a permis de projeter les données technologiques sur le maillage. Le point du maillage, en plus de ses coordonnées spatiales (XYZ), possède plusieurs attributs géométriques et technologiques issus de l'usinage. L'information visuelle obtenue après ce mapping avec les cartographies n'étant pas suffisante, il a été essentiel de passer à un traitement de données pour analyser et traiter ces paramètres.

En effet, la phase de l'analyse des données a permis d'extraire des données pertinentes qui ont contribué à la caractérisation de la forme complexe. Ayant les données technologiques comme données de départ, l'analyse de données a été effectuée en suivant les étapes de base de l'analyse et fouille de données (sélection, prétraitement, transformation et partitionnement des données).

Ensuite, une nouvelle approche de découpage, qui s'enrichit au fur et à mesure, en s'adaptant aux données de la chaîne numérique dont nous disposons, a été proposée. Dans un premier temps, en considérant uniquement la géométrie de la pièce, une méthode de segmentation, basée sur des descripteurs de forme, a été proposée. Cette méthode a permis de découper la surface complexe et de définir un ensemble de régions à base de courbure. Dans le contexte de l'entité d'usinage complexe, il a été essentiel de prendre en considération la notion d'usinage pour la segmentation. Pour cela, une analyse de visibilité a été effectuée pour agrémenter la segmentation avec un nouveau critère. En s'appuyant sur ce critère, les petites régions similaires sont regroupées et les résultats de la segmentation à base de la courbure sont ainsi raffinés. Enfin, une nouvelle approche de

segmentation technologique orientée région est définie en s'appuyant non seulement sur la géométrie mais également les données d'usinage issues de la simulation d'usinage. Cette approche s'appuie sur les régions résultantes de la segmentation géométrique en essayant de les raffiner en utilisant une approche de composition et de décomposition basée sur le clustering des données d'usinage par région. Contrairement aux résultats de partitionnement appliqué directement sur les données technologiques avec le k-means, les résultats de cette nouvelle approche sont plus significatifs et reflètent au mieux la logique de découpage du programmeur FAO.

L'originalité de cette nouvelle méthode de segmentation est d'avoir combiné des données purement géométriques, ainsi que des données technologiques générées lors de la simulation d'usinage dans la définition des régions en se basant sur une technique de data mining « *clustering* » pour le partitionnement des données d'usinage.

Enfin, les différentes régions obtenues par cette segmentation vont permettre de caractériser, en appliquant les techniques de reconnaissance d'entités d'usinage, une nouvelle entité multi-niveaux (région, sous-entité et entité). Une fois l'entité caractérisée, une phase de réutilisation peut alors être effectuée. Elle sera guidée par le type de l'entité d'usinage. Les procédés d'usinage qui ont été utilisés pour ce type d'entité peuvent être réadaptés et réutilisés sur la nouvelle entité. Il s'agit d'une réutilisation naturelle.

Par ailleurs, une autre approche de réutilisation basée sur les régions a été également proposée. Elle repose sur une mesure de similarité qui fait appel à une technique basée sur les histogrammes. La distribution de forme avec la fonction D2 a été adoptée pour générer la signature de la forme. Dans cette signature, la courbure a été intégrée pour la mesure des distances entre les paires de points en utilisant une distance géométrique définie comme une somme pondérée d'une distance Euclidienne et une distance à base de courbures. La similarité a été évaluée entre les régions. La fonction de forme D2 enrichie à travers la combinaison de la distance euclidienne et la distance à base de la courbure lors de calcul des distances a permis de déterminer pour chaque région de la nouvelle entité, la région la plus similaire des entités de même type archivées dans la base de données. Après la validation des résultats de la mesure de similarité par région. Une réutilisation des données peut être réalisée. Les paramètres d'usinage définis lors de l'usinage de la région similaire identifiée pourraient être réutilisés pour la région de la nouvelle pièce. Mais, une analyse de ces paramètres serait nécessaire afin de les adapter à la nouvelle région.

Chapitre

4

Étude de cas*

*Pour des raisons de confidentialité, les figures relatives à l'analyse des données d'usinage sont floutées.

1 Introduction

Ce dernier chapitre présente l'application de la démarche proposée au cours de ce manuscrit dans un contexte industriel en utilisant des pièces fournies par les partenaires du projet LUCID. Il permettra d'illustrer notre méthodologie d'exploitation des données de la chaîne numérique afin d'assurer la réutilisation des données d'usinage sur de nouveaux cas. Pour ce faire, l'analyse est réalisée en deux temps.

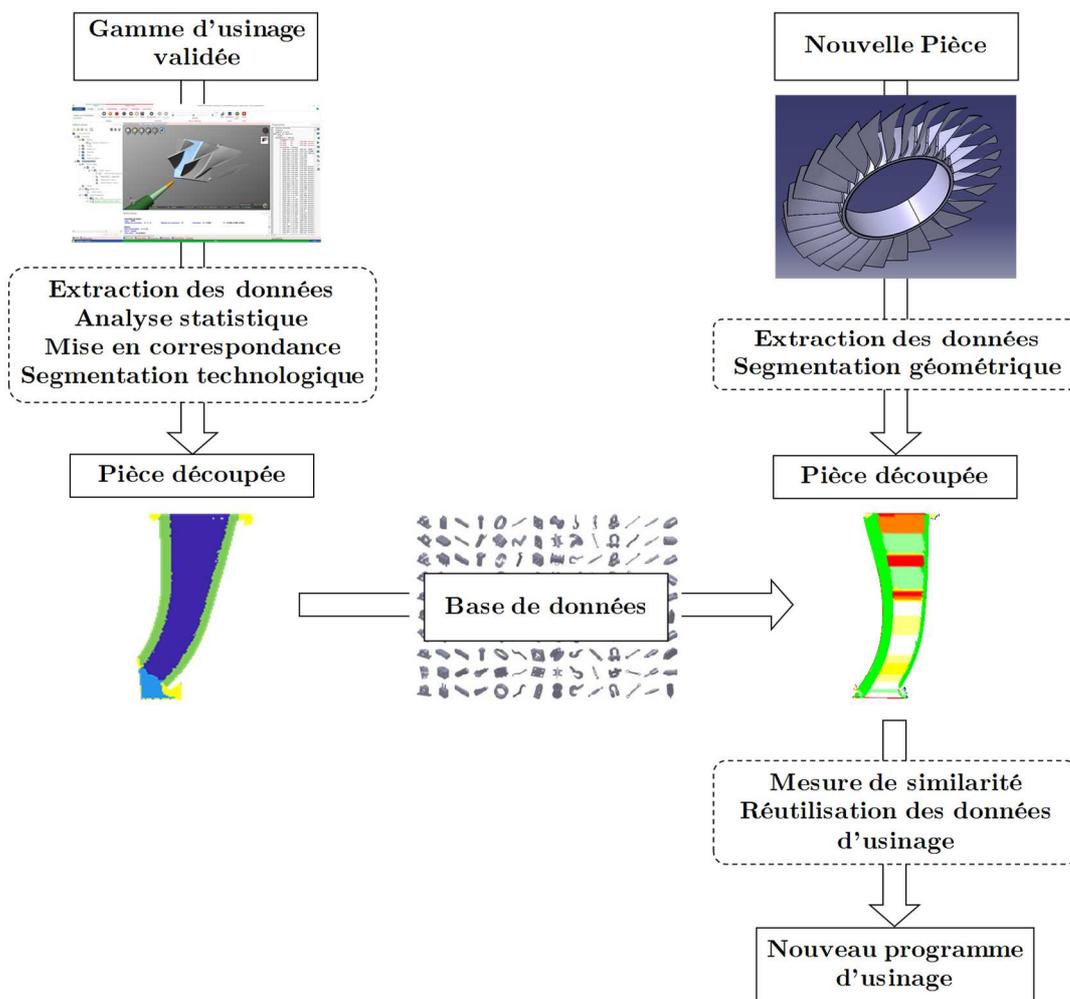


Figure 65 — Démarche de l'étude de cas

D'abord, en s'appuyant sur une pièce avec une gamme d'usinage optimisée et validée, les différentes étapes de notre approche permettant l'extraction et l'analyse des données associées à cette pièce pour assurer le découpage topologique de la forme et la définition des régions, sont présentées. Les résultats de ce

traitement sont ensuite stockés dans une base de données. Dans un deuxième temps, il s'agit de proposer une gamme d'usinage pour une nouvelle pièce. Pour ce faire, la nouvelle pièce est d'abord découpée en différentes régions. Une analyse de similarité est ensuite effectuée entre ces nouvelles régions et les régions archivées dans la base de données afin d'identifier les régions les plus similaires et assurer ainsi la réutilisation de leurs données d'usinage sur le nouveau cas (cf. figure 65).

2 Traitements de cas existants

Cette première partie présente les différentes étapes de notre méthodologie à appliquer sur les cas existants afin d'alimenter la base de données. Nous disposons ici d'une pièce aéronautique fournie par Safran Aircraft Engines avec sa gamme de simulation NCSIMUL. Il s'agit d'une pièce très présente en aéronautique : Impeller (cf. figure 66).

En se basant sur l'expertise métier et en prenant en compte la géométrie de la pièce, différentes stratégies sont utilisées pour arriver à finir la surface au plus près du modèle nominal tout en conservant des conditions de coupes validées par réalisation sur machine et en respectant ainsi les différentes contraintes liées à l'accessibilité de l'outil, aux posages, à la qualité de la surface, etc. Notre méthodologie permet ainsi de retrouver ces différentes approches métiers utilisées, en découpant la surface de la pièce en différentes régions associées chacune à une stratégie.

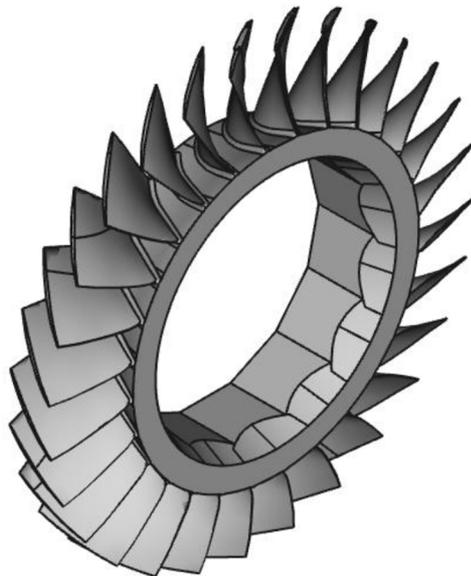


Figure 66 — Pièce « Impeller »

2.1 Extraction des données de la chaîne numérique

Les données de la chaîne numérique disponibles se présentent dans la gamme de simulation NCSIMUL. Cette dernière comporte différents éléments relatifs à la pièce, au brut, à la machine, aux outils ainsi qu'au programme d'usinage (cf. figure 67).

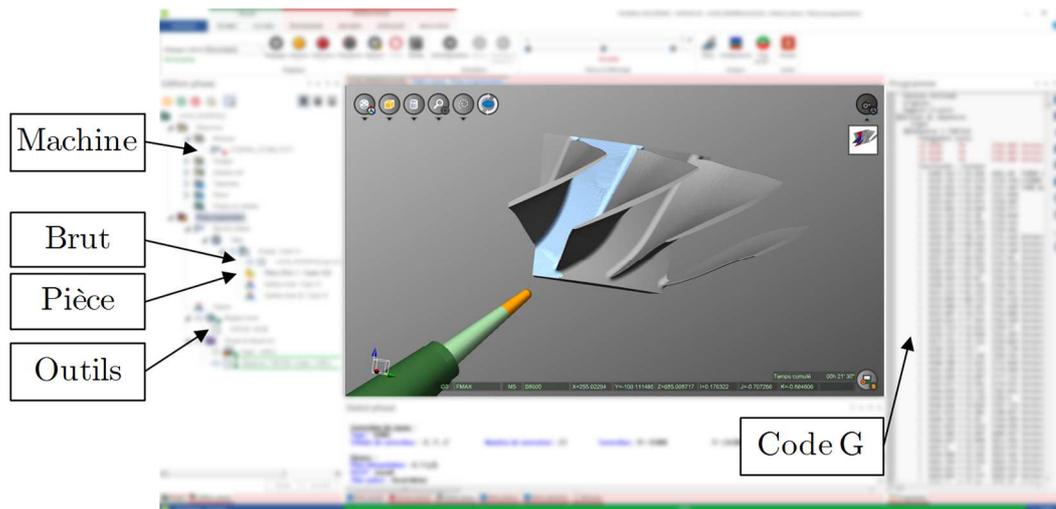


Figure 67 — Gamme d'usinage de la pièce sur NCSIMUL

2.1.1. Données géométriques

Comme nous nous basons sur la gamme de simulation de NCSIMUL, le modèle de la pièce est récupéré en format neutre STEP. Puisque la pièce est composée d'une répétition symétrique d'un motif initial, la simulation est réalisée sur un seul motif. De ce fait, le modèle géométrique récupéré ne représente qu'une partie de la pièce globale (cf. figure 68-a). Ce motif répétitif est constitué d'une surface de fond et deux pales de formes complexes (cf. figure 68-b).

Dans cette étude, nous nous focalisons sur la partie de la gamme finissant la surface de fond entre les deux pales : l'interpale. Cette surface est composée d'une surface centrale et deux congés latéraux. En se basant sur le modèle géométrique, les surfaces sont délimitées et seule la surface de notre étude est extraite (cf. figure 69-a).

Un logiciel de traitements géométriques est alors utilisé pour générer le maillage triangulaire de cette surface (cf. figure 69-b). Ce maillage vient discrétiser la surface continue en définissant des triangles dont la forme et les dimensions dépendent de la géométrie locale de la surface. Comme nous pouvons le constater sur la figure 69-b, le maillage est plus serré sur les deux congés latéraux. Cette densité permet d'assurer une approximation plus précise de la surface originale.

L'ensemble de la surface de notre étude est ainsi composé de 12 132 sommets et 23 635 faces telles que la taille des mailles varie entre 0.6 mm et 1.2 mm.

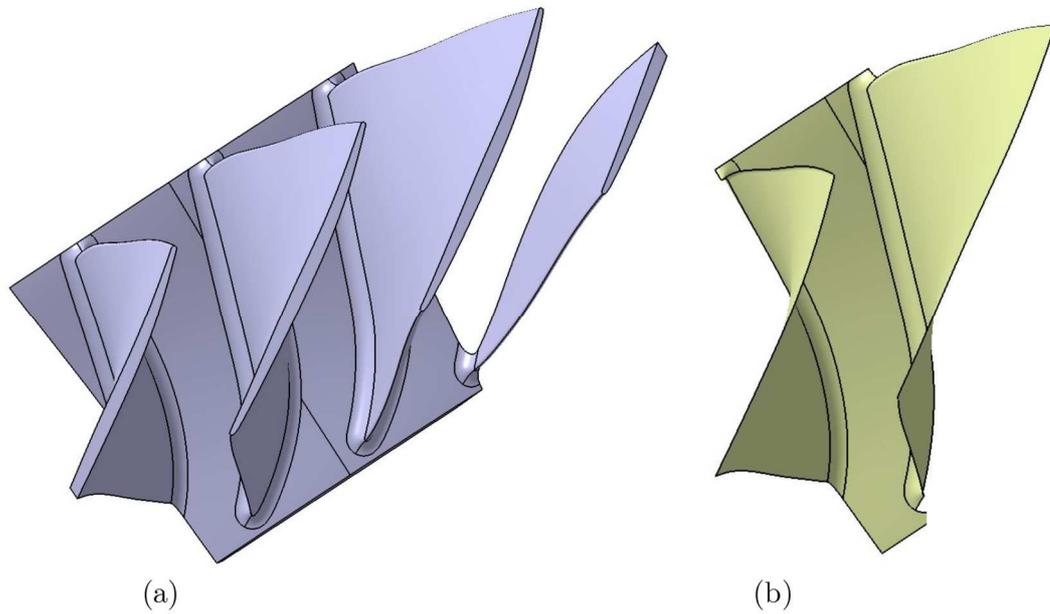


Figure 68 — (a) Modèle géométrique de la pièce (b) Motif répétitif

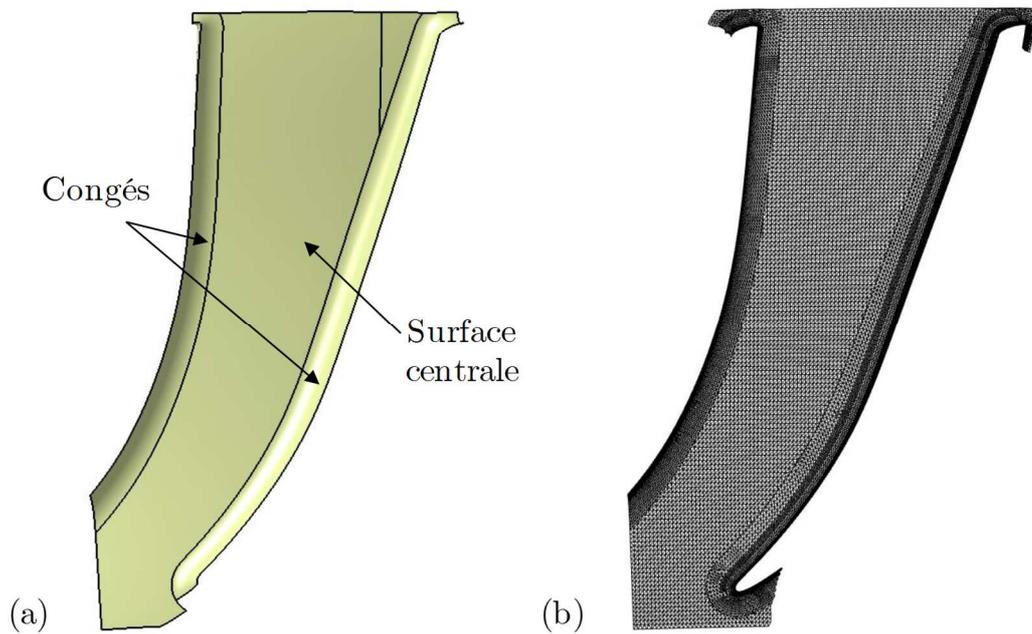


Figure 69 — (a) Modèle surfacique de l'interpale (b) Maillage de l'interpale

Ce maillage est ensuite exporté sous format STL pour pouvoir calculer les différents descripteurs de forme qui viennent enrichir la représentation triangulaire et servir au découpage topologique de la pièce.

2.1.1. Données d'usinage

Les données d'usinage dont nous disposons sont issues de la phase de simulation effectuée sur NCSIMUL. Après la FAO, cette simulation d'usinage permet de détecter les erreurs de code G, les problèmes liés à l'enlèvement de matière, aux collisions et aux déplacements rapides. La gamme d'usinage de l'interpale est constituée d'une séquence d'usinage associée à un seul outil de coupe, elle est usinée sur une seule machine avec un posage unique. Les détails relatifs à cette gamme sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 6 — Détails de la gamme d'usinage

La figure 70 présente le modèle de l'interpale avec la trajectoire de l'outil décrite dans le code G de la séquence d'usinage. La couleur rouge désigne les déplacements rapides hors matière tandis que la couleur bleue représente les déplacements avec la vitesse de travail. La simulation de cette séquence permet de reproduire virtuellement l'enlèvement de matière et de visualiser ainsi l'état fini de la pièce (cf. figure 71).

Lors de la simulation d'usinage, NCSIMUL analyse les conditions de coupe de la séquence d'usinage. Cette analyse permet d'associer à chaque point de la trajectoire, après discrétisation, un ensemble de paramètres usinage regroupé

dans un fichier « *.csv* ». Ce fichier résultant est ensuite exporté pour poursuivre le traitement de cette trajectoire enrichie par les différents paramètres d'usinage.

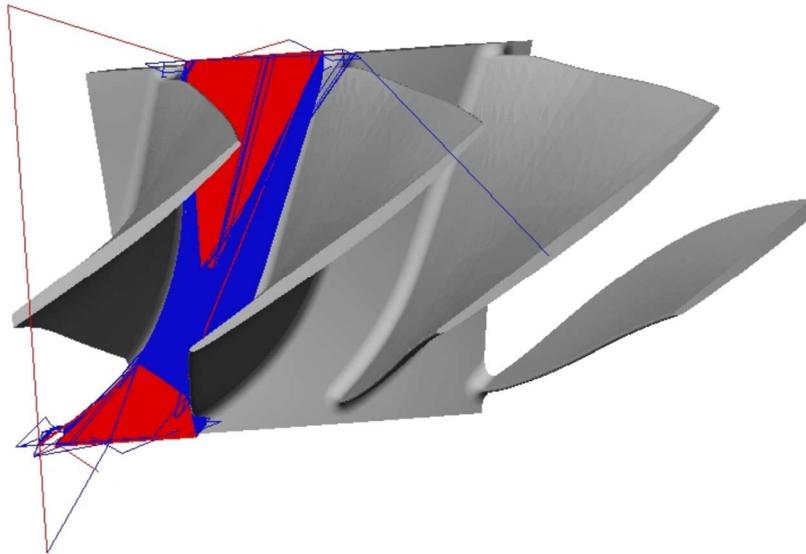


Figure 70 — Modèle de l'interpale avec la trajectoire de l'outil sur NCSIMUL

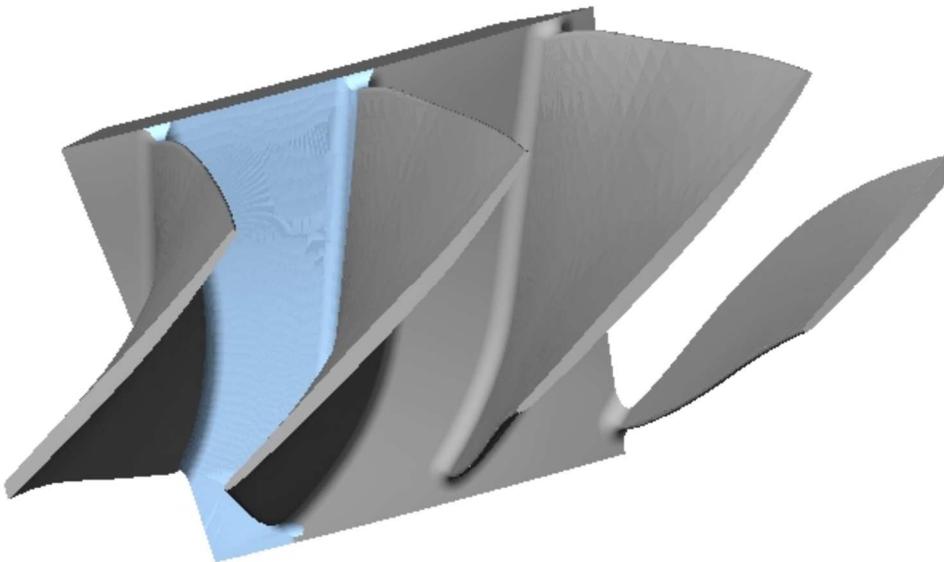


Figure 71 — Modèle de l'interpale avec la surface finie après simulation

La trajectoire récupérée de NCSIMUL représente la trajectoire de l'outil finissant la surface de l'interpale (cf. figure 72-a). Rappelons ici que ce travail se focalise sur la phase de finition. Dans cette trajectoire deux types de positions de l'outil sont distinguées : des positions de l'outil usinant la surface ainsi que des positions hors matière. L'indice d'intersection donné par NCSIMUL, précisant le

type d'intersection entre l'outil et la matière, permet de délimiter une partie de la trajectoire afin de ne garder que les positions dont l'outil est en contact avec la matière : « usinage matière brute », « usinage matière déjà usinée » et « tangent à la matière » (cf. figure 72-b).

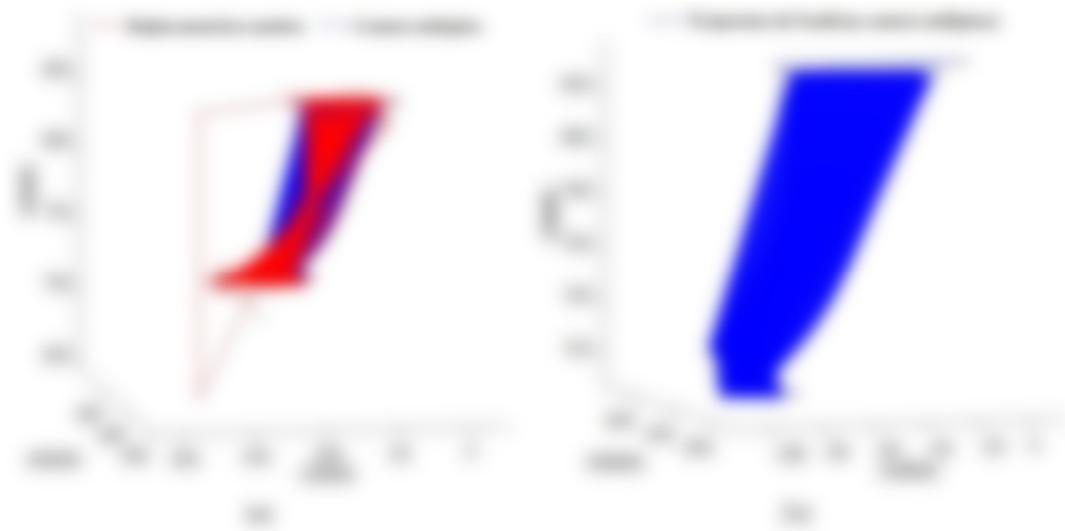


Figure 72 — Trajectoire de l'outil

2.2 Mise en correspondance

Ayant la représentation triangulaire de la pièce et la trajectoire de l'outil, la mise en correspondance consiste à associer à chaque point du maillage un point de la trajectoire. Ce mapping permet d'enrichir le maillage qui est désormais décrit par les descripteurs géométriques et les paramètres d'usinage définis sur la trajectoire.

Une première application de cette mise en correspondance est la réalisation des cartographies qui permettent de visualiser la distribution des paramètres de coupe sur la surface de la pièce. La figure 73 présente des cartographies de quelques paramètres : l'aire usinée, le volume, la vitesse de coupe, le diamètre usiné, l'angle et le débit copeaux. Ces cartographies donnent d'ores et déjà une idée de la variation de ces différents paramètres sur la surface tout au long de son usinage, comme nous pouvons le constater, par exemple, sur la cartographie de la vitesse de coupe. Sur cette cartographie, nous remarquons principalement deux nuances de couleurs qui correspondent à deux plages de variations relatives aux congés latéraux et à la surface centrale : des petites et des grandes vitesses. Pour la cartographie de l'angle, nous remarquons aussi différentes plages de variations qui se distinguent par des variations spécifiques sur les raccordements entre la surface centrale et la pale au niveau des bords d'attaque et de fuite.

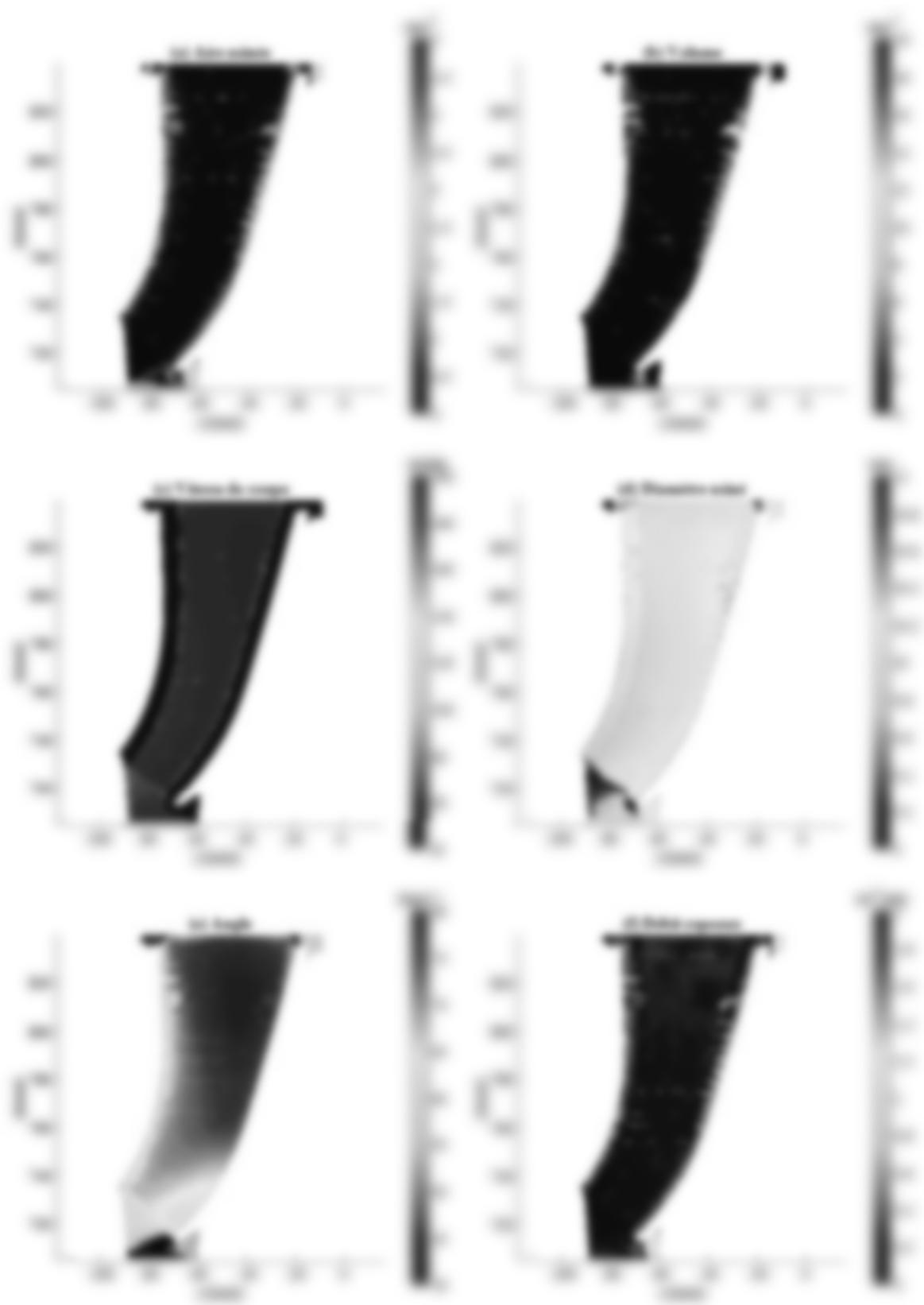


Figure 73 — Cartographies des paramètres de coupe

De même pour la surface centrale. Nous remarquons que la plage de variation de l'angle est bien différente sur le bas. Cela s'explique par le changement de l'orientation de l'outil sur les deux parties de cette surface à cause de la géométrie de l'outil et la forme de pales qui présentent des contraintes à respecter lors de la définition de l'orientation de l'outil pour éviter les collisions. Enfin, ces cartographies montrent que différentes approches traduites par différentes plages de variations des différents paramètres sont utilisées pour usiner la surface centrale et les congés latéraux. L'aspect visuel des cartographies n'étant pas suffisant, l'outil statistique est alors utilisé pour traiter et analyser l'ensemble de ces données afin d'identifier ces approches métiers et stratégies associées aux différentes régions de la surface de l'interpale.

2.3 Analyse des données

Afin de pouvoir exploiter les données d'usinage dont nous disposons, il est nécessaire de les traiter et de les analyser. Cette analyse commence par une sélection des données pertinentes. Dans notre cas, nous nous intéressons qu'aux données de la coupe (la vitesse de coupe, l'avance par dent, l'épaisseur de copeaux, la profondeur de passe, l'épaisseur de passe, l'aire usinée, le débit copeaux, le diamètre usiné, le volume et l'angle).

Comme elles sont issues de la simulation d'usinage, ces paramètres de coupe peuvent être bruités avec des données manquantes, des valeurs très élevées ou même inadmissibles. Pour y faire face, une phase de prétraitement des données est nécessaire.

La figure 74 illustre la variation de trois paramètres de coupe au cours du temps. Sur la variation de la vitesse de coupe (V_c) et de l'avance par dent (F_z), nous remarquons des points dont la valeur est nulle. Comme l'ensemble de ces points représentent seulement les positions de l'outil en contact avec la matière, ceci veut dire qu'il y a des positions de l'outil qui usinent la surface avec une vitesse de coupe et une avance par dent nulle. Ceci n'étant pas admissible, ces points doivent être supprimés. De même, nous constatons un point isolé sur la variation de la vitesse d'avance (F) et l'avance par dent (F_z). Comme sa valeur, sur les deux variations, est très élevée par rapport à la moyenne aux alentours, ce point est considéré comme aberrant et doit être supprimé pour ne pas fausser les résultats.

La figure 75 présente la variation de ces trois paramètres de coupe après cette opération de nettoyage. Les données aberrantes sont supprimées afin de ne pas fausser les résultats du traitement.

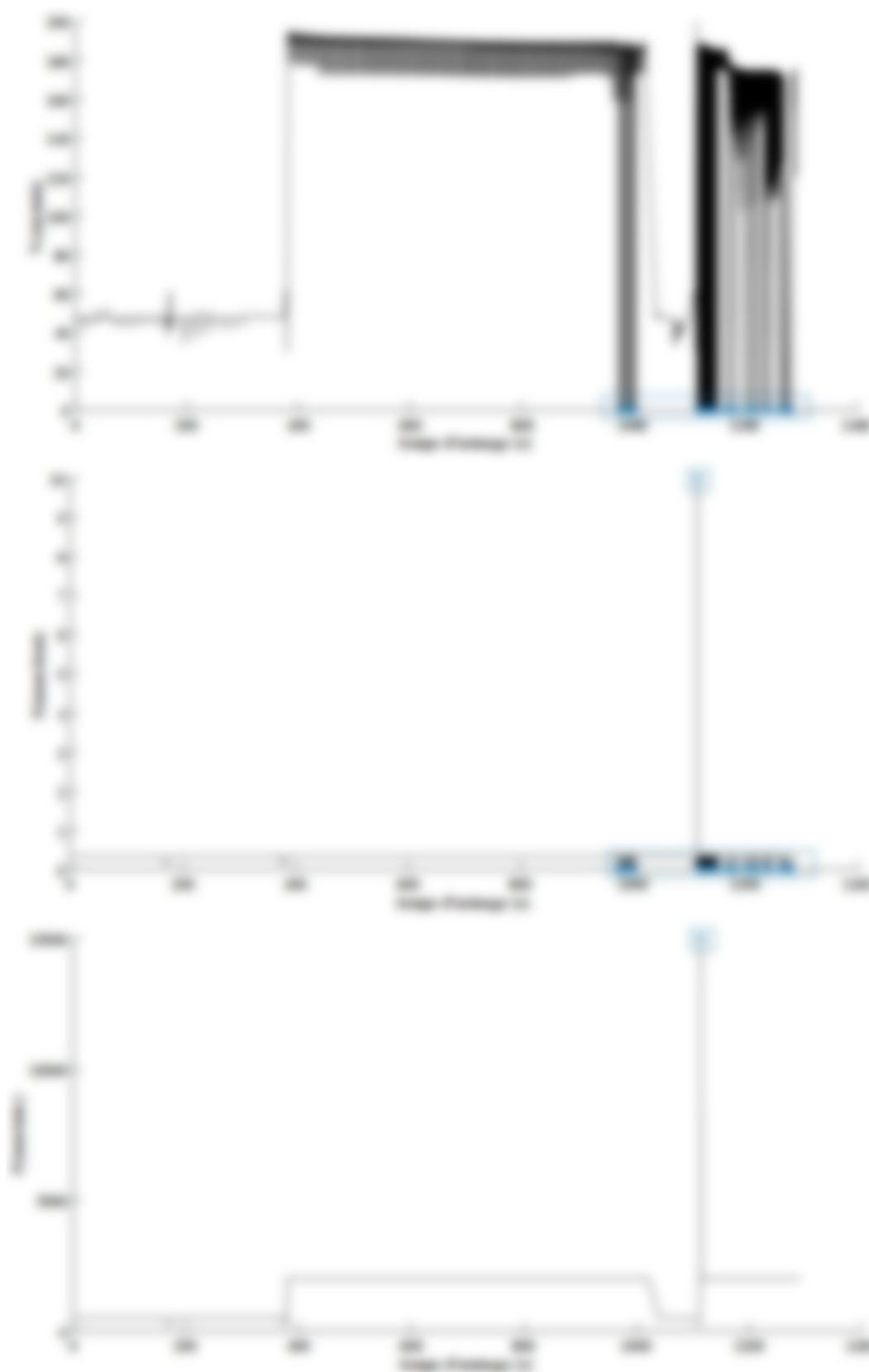


Figure 74 — Variation des paramètres de coupe

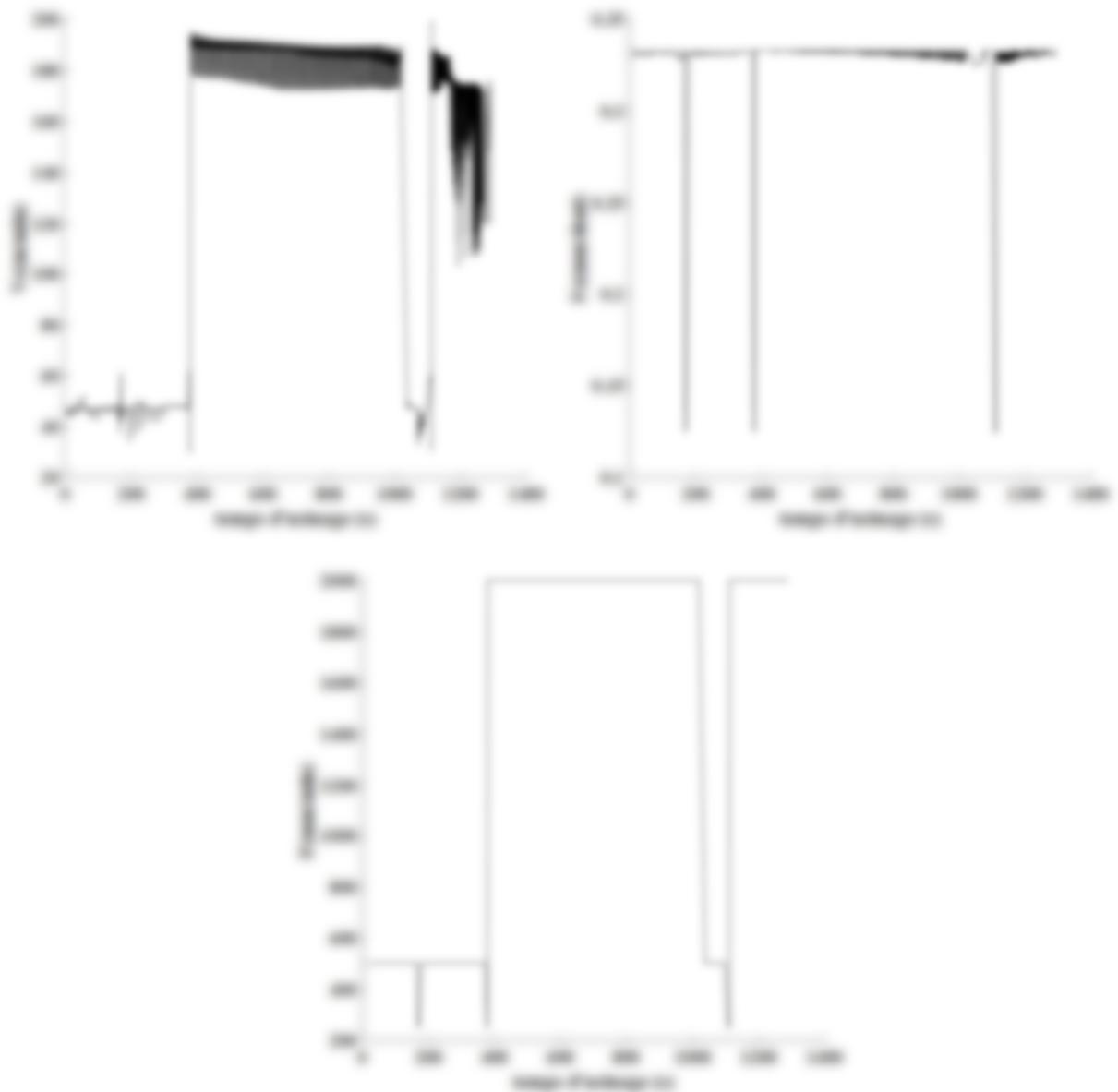


Figure 75 — Variation des paramètres de coupe après l'opération de nettoyage

Ensuite, une analyse de corrélation est appliquée sur les dix paramètres de coupe sélectionnés afin d'évaluer les dépendances entre eux à travers les coefficients de corrélation résumés dans le tableau 7. De plus, le cercle de corrélation présenté sur la figure 76 permet de visualiser ces liaisons en se basant sur les positions angulaires des différents paramètres les uns par rapport aux autres.

D'après ces résultats, une forte corrélation positive existe entre V_c et le diamètre usiné. De même, en se référant à la projection des variables sur le premier plan factoriel, les variables A_d , A_p , le volume et le débit copeaux ; h et angle sont corrélées.

Ainsi, cette étude réduit l'ensemble de paramètres de coupe initiaux à quatre paramètres :

- V_c (la vitesse de coupe) : le diamètre usiné est ainsi éliminé.
- F_z (l'avance par dent).
- A_d (l'aire usinée) : le volume et le débit copeaux sont ainsi éliminés puisqu'ils sont le résultat de choix de l'avance et l'aire usinée générée. De plus, comme A_d est calculé à partir de A_p et A_e , ces deux variables sont aussi éliminées.
- Angle : l'épaisseur de copeaux (h) est ainsi éliminée.

Tableau 7 — Matrice de corrélation des paramètres de coupe

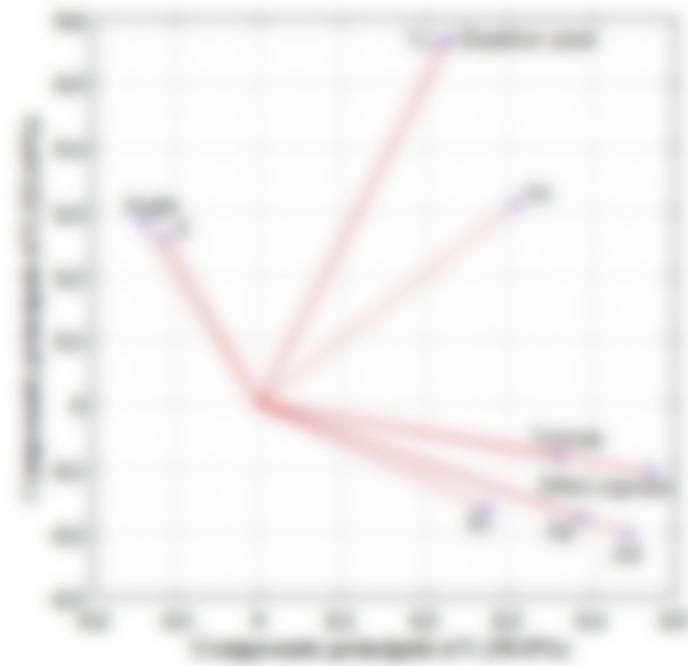


Figure 76 — Cercle de corrélation

2.4 Découpage topologique

Étant donné l'ensemble des paramètres à notre disposition, la segmentation technologique orientée région est appliquée ici pour découper la surface de l'interpale et identifier ainsi les différentes stratégies utilisées pour l'usinage de cette surface. Pour ce faire, une segmentation géométrique à base de la courbure est d'abord appliquée afin de générer les régions qui vont servir à cette segmentation technologique.

La segmentation géométrique commence par l'identification du type de surface à l'aide de l'indice de forme (*shape index*). Cet indice définit neuf types de surface, plus la surface plane. En se basant alors sur la valeur de l'indice de forme, un type de surface est attribué à chaque sommet de la représentation triangulaire de l'interpale (cf. figure 77). Ensuite, l'intensité de courbure permet d'identifier les bords de la surface qui correspondent aux sommets ayant des valeurs très élevées par rapport aux points aux alentours (cf. figure 77).

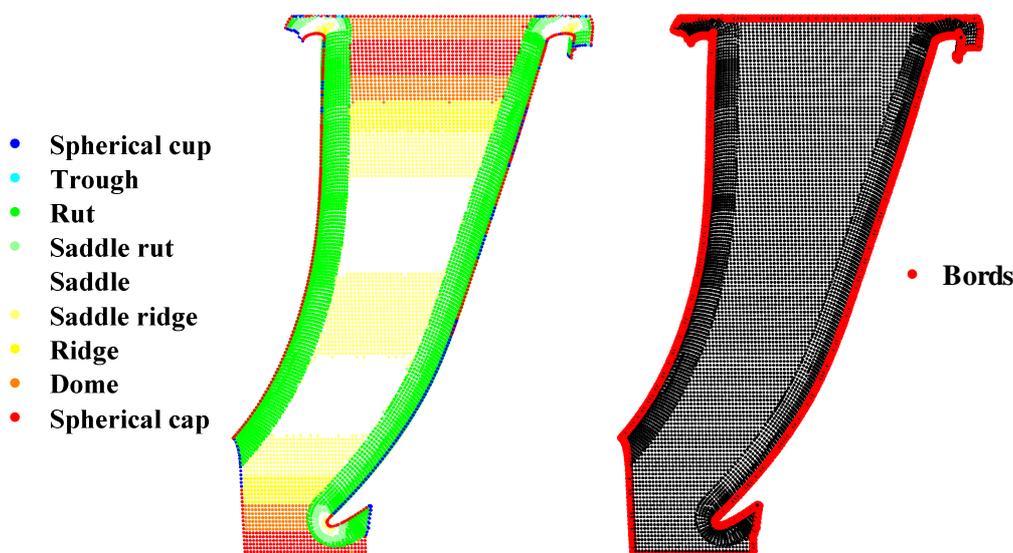


Figure 77 — Identification du type de surface et des bords

Ayant attribué à chaque sommet son type de surface, l'algorithme de regroupement de points est lancé. Cet algorithme permet de regrouper les sommets appartenant à la même classe de type de surface dans le même groupe. Les résultats initiaux de ce regroupement ne sont pas forcément satisfaisants. Des points isolés et des groupes de points dont la taille ne dépasse pas 10 points sont définis comme groupes séparés. Pour régler ce problème, un raffinement de ces groupes est nécessaire. L'algorithme de raffinement cherche pour chaque sommet de ces petits groupes le groupe adjacent dont le type de surface est le plus proche pour pouvoir le fusionner avec. À la fin de cette étape, un ensemble de groupes

de sommets, tel que chaque groupe de sommets comprend plusieurs régions connectées, est créé. La dernière étape de cette approche consiste à segmenter correctement les régions connectées dans chaque groupe afin de générer les régions finales. La figure 78 présente les résultats de cette procédure de segmentation qui génère 30 régions de différents types de surface. Sur cette figure, nous remarquons que la surface centrale est découpée en 12 régions telles que le type de surface est défini entre « *saddle* » et « *spherical cap* ». Les deux congés sont type « *rut* », tandis que les raccordements au niveau des bords d'attaque sont segmentés en régions définies entre « *saddle rut* » et « *ridge* ».

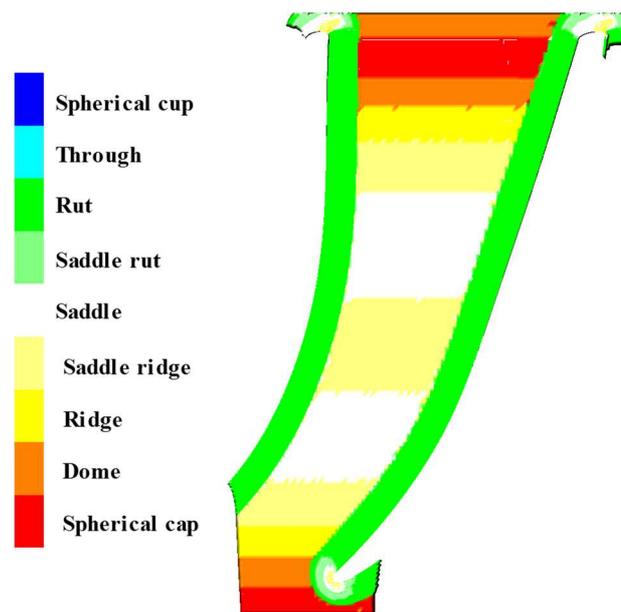


Figure 78 — Résultats de la segmentation à base de la courbure de l'interpale

Après avoir attaché des descripteurs géométriques à la représentation géométrique et après l'avoir segmentée en différentes régions à base de la courbure, sa mise en correspondance avec la trajectoire permet d'enrichir chaque région avec les différents paramètres technologiques associés à la trajectoire. En se basant sur la composition et décomposition de ces régions, la prochaine étape de la segmentation est réalisée en deux phases.

D'abord, le k-means des données de coupe est appliqué sur les régions résultantes de la segmentation géométrique. Pour ce faire, nous avons besoin d'analyser la distribution de ces paramètres sur chacune des régions pour identifier les régions qui nécessitent d'être découpées et les régions que nous devons garder telles qu'elles.

La figure 79 présente les cartographies et les histogrammes des quatre paramètres de coupe sur deux régions géométriques différentes. La visualisation de la distribution de ces paramètres sur la région et les plages de variations donnent une idée sur les stratégies utilisées lors de l'usinage de la région.

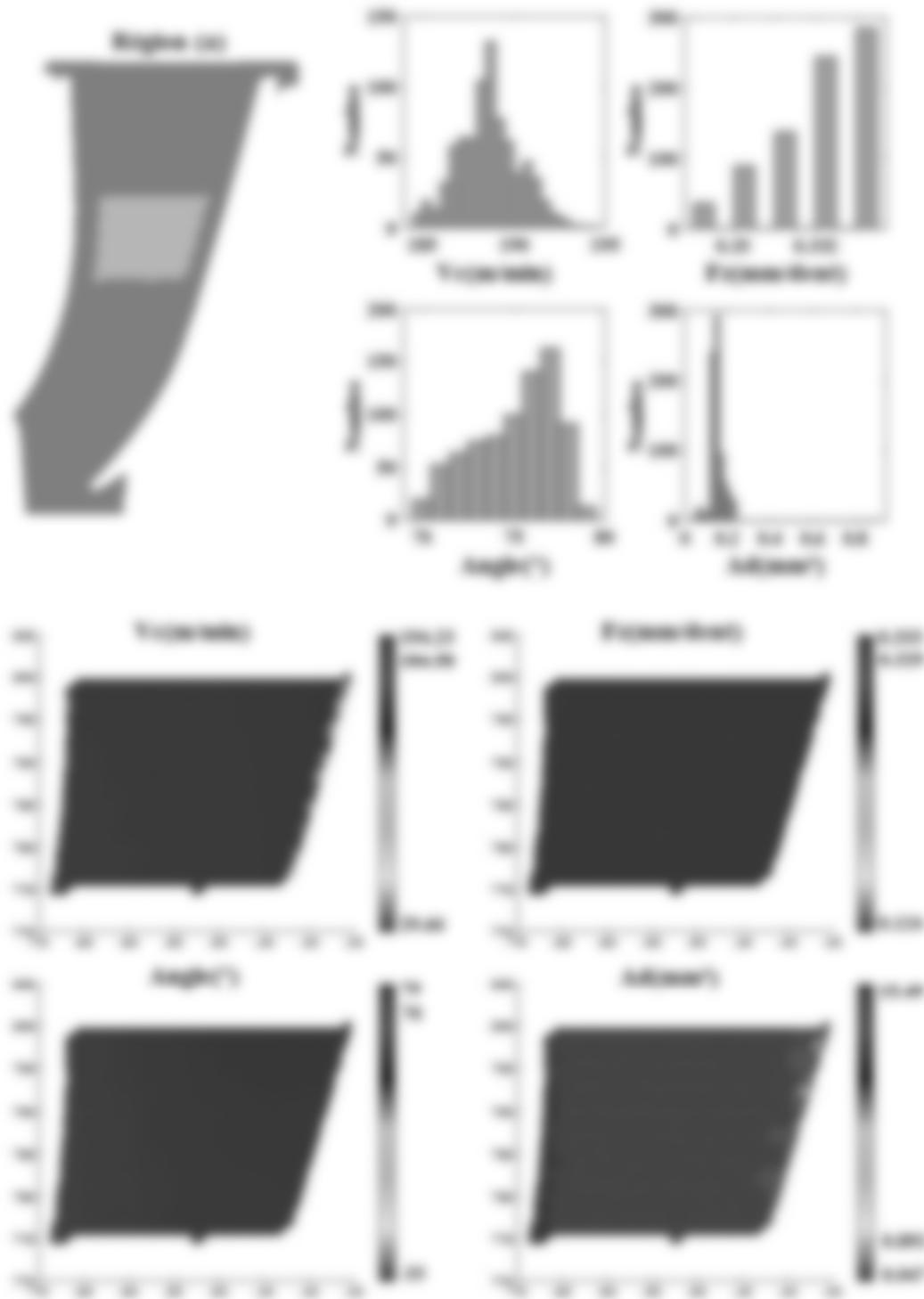


Figure 79(a) — Variation des paramètres de coupe sur la région (a)

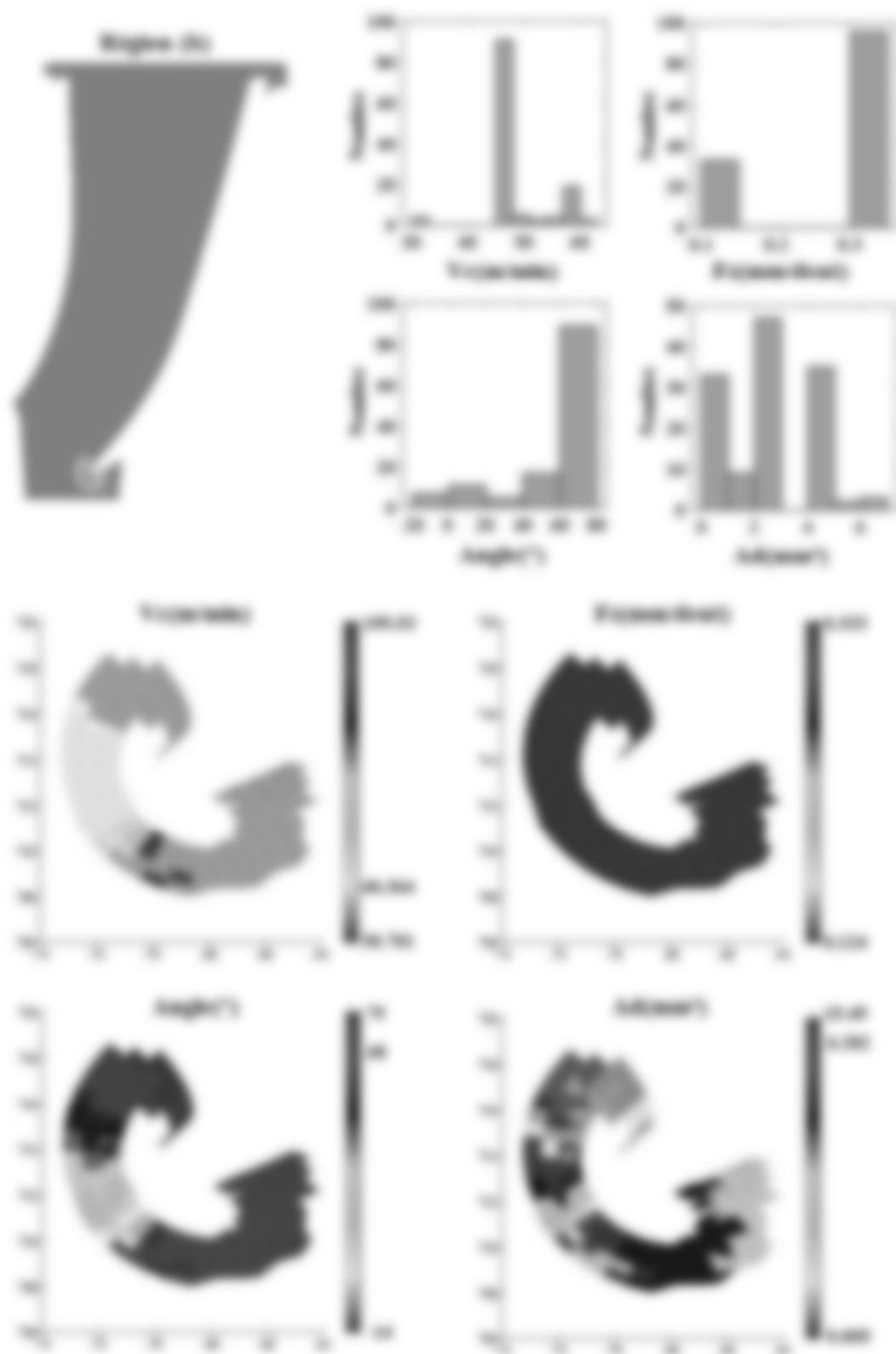


Figure 79(b) — Variation des paramètres de coupe sur la région (b)

Sur la région (a), nous constatons que les paramètres varient dans la même plage de variation comme ils ont des valeurs très proches. La vitesse de coupe par exemple varie dans la plage des grandes vitesses entre V_{c1} et V_{c2} m/min. La variation de l'avance par dent est presque nulle comme $Fz \in [Fz_1, Fz_2]$ mm/dent. Ceci montre que la région a été usinée avec la même stratégie. De ce fait, cette région n'a pas besoin d'être découpée.

Par contre, sur la région (b), nous remarquons qu'elle a été usinée par des stratégies différentes. Ceci est marqué par la répartition des nuances des couleurs sur la région. L'angle, par exemple, est défini sur une étendue large comprenant des valeurs négatives et positives. Afin de découper la région et d'identifier ainsi les deux stratégies associées, la technique de k-means est appliquée sur ses paramètres de coupe. Les résultats de ce partitionnement, pour $K=2$, sont donnés sur la figure 80.

Effectivement, sur l'espace des paramètres de coupe (cf. figure 80), deux paquets de points sont distingués, notamment sur l'axe Fz qui comprend deux groupes définis sur les deux extrémités : un groupe avec $Fz \approx Fz_{\min}$ mm/dent et l'autre avec $Fz \approx Fz_{\max}$ mm/dent. De même, les valeurs de l'angle sont bien différentes sur les deux paquets, ce que nous retrouvons sur les histogrammes et les cartographies.

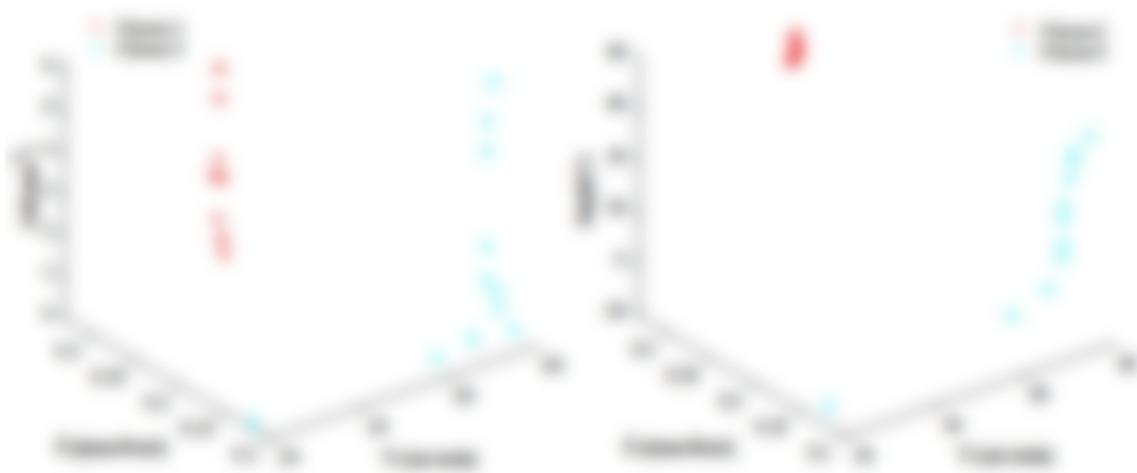


Figure 80 — Résultats de k-means dans l'espace des paramètres de coupe « région (b) »

Comme le choix de découper la région ou pas dépend de l'analyse de cartographies et d'histogrammes, le nombre de clusters requis pour chaque région est à fixer par l'utilisateur. Ce dernier, en se basant sur son expertise, peut identifier les plages de variations de paramètres de coupe qui correspondent à des stratégies différentes. L'utilisation de l'algorithme automatique pour estimer le nombre de

clusters optimal peut fausser les résultats comme il se base uniquement sur des caractéristiques statistiques sans connaissances métier.

L'indice de silhouette est utilisé ici pour valider ces résultats (cf. figure 81). Comme ses valeurs pour les deux clusters sont positives, les points sont bien placés dans leurs clusters tels que les points de chaque cluster sont bien éloignés des clusters voisins. Ainsi, la région (b) est découpée en deux nouvelles régions (cf. figure 82).

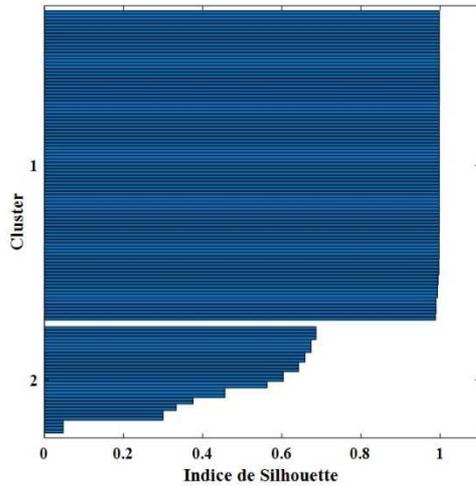


Figure 81 — Indice de silhouette



Figure 82 — Découpage de la région (b)



Figure 83 — Découpage des régions géométriques initiales

Ce partitionnement est répété pour l'ensemble des régions géométriques initiales qui nécessitent d'être découpées. Le résultat final de cette première application de k-means est présenté sur la figure 83. La surface de l'interpale est ainsi découpée en 46 régions différentes en termes de descripteurs géométriques et paramètres d'usinage.

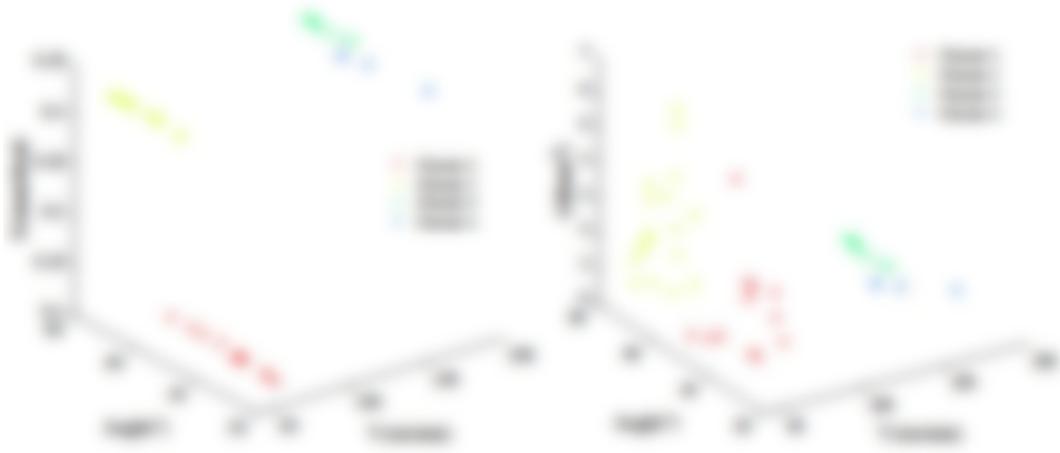


Figure 84 — Résultats de k-means dans l'espace de paramètres de coupe des régions découpées

Après avoir découpé les régions géométriques par rapport aux paramètres de coupe, la deuxième phase de notre approche consiste à appliquer un deuxième k-means tel que les individus sont désormais les régions résultantes du découpage précédent. Chaque région est représentée dans l'espace des paramètres de coupe par un centroïde. Ce point est la moyenne de tous les paramètres de coupe utilisés dans l'analyse. Les résultats de k-means avec ces nouvelles données d'entrées sont présentés sur la figure 84.

Tableau 8 — Variations des paramètres de coupe par cluster

L'application de k-means sur ces données a permis de définir quatre clusters qui correspondent à quatre approches métiers utilisées pour l'usinage de la surface de l'interpale. Le tableau 8 donne la variation des paramètres de coupe dans

chaque cluster. En comparant les valeurs de chaque cluster, nous remarquons effectivement qu'entre deux clusters, au moins un paramètre est différent.

La projection de ces résultats sur la surface de l'interpale est donnée sur la figure 85 tel que chaque cluster correspond à un ensemble de régions similaires en termes de paramètres de coupe.



Figure 85 — Résultats de k-means projetés sur la surface de l'interpale

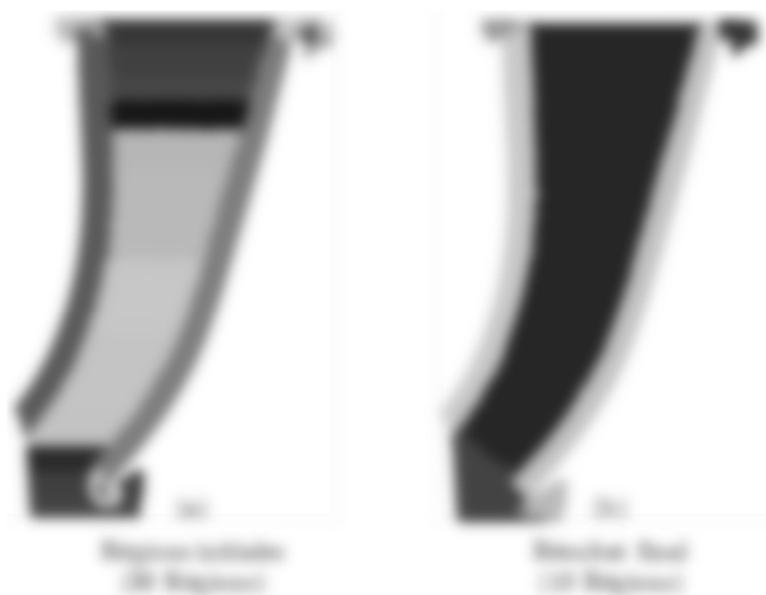


Figure 86 — Résultats de la segmentation technologique orientée région de l'interpale

En se basant sur la proximité et l'adjacence géométriques, les clusters 1 et 2 sont segmentés pour définir 3 et 5 régions non connectées respectivement. Au final, la surface de l'interpale est découpée en 10 régions définies à travers la segmentation technologique orientée région. Les résultats finaux de cette segmentation sont présentés sur la figure 86.

Enfin, cette segmentation a permis de raffiner la segmentation initiale basée sur la courbure qui comptait 30 régions. Ces 10 régions résultantes sont orientées usinage et reflètent aux mieux la logique du découpage du programmeur FAO. Ces régions résultantes associées à leurs paramètres géométriques et d'usinage sont par la suite stockées dans une base de données dans le but de les réutiliser sur des nouveaux cas similaires.

3 Traitements de nouveaux cas

Cette deuxième partie présente les différentes étapes de notre méthodologie qui assure la réutilisation des données d'usinage pour un nouveau cas en se basant sur les éléments archivés dans la base de données. Pour ce faire, nous disposons d'une deuxième pièce aéronautique : Impeller 2, de la même famille que la pièce traitée dans la première partie (cf. figure 87).

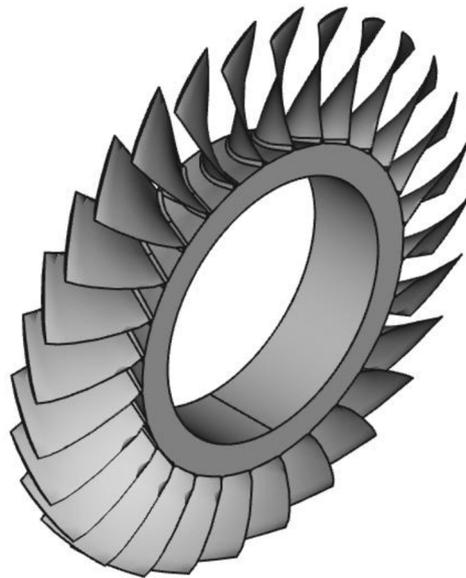


Figure 87 — Pièce « Impeller 2 »

La différence entre ces deux pièces réside dans la géométrie du motif répétitif notamment la forme des pales ce que nous pouvons le constater sur la figure 88.

Après le découpage géométrique de cette nouvelle pièce, notre approche permettra de trouver pour chacune de ses régions, une région similaire de la pièce déjà traitée pour pouvoir ainsi lui associer des paramètres d'usinage.

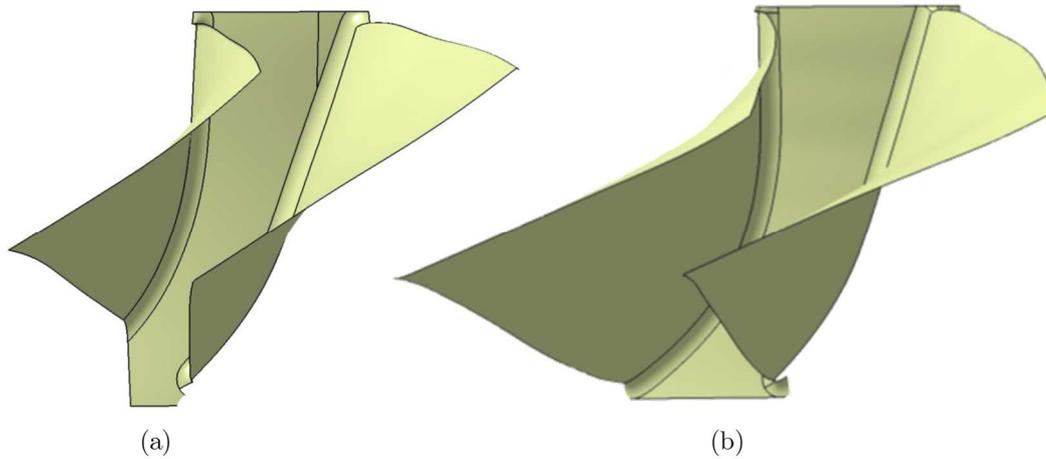


Figure 88 — Motif répétitif (a) Impeller 1 (b) Impeller 2

3.1 Extraction des données géométriques

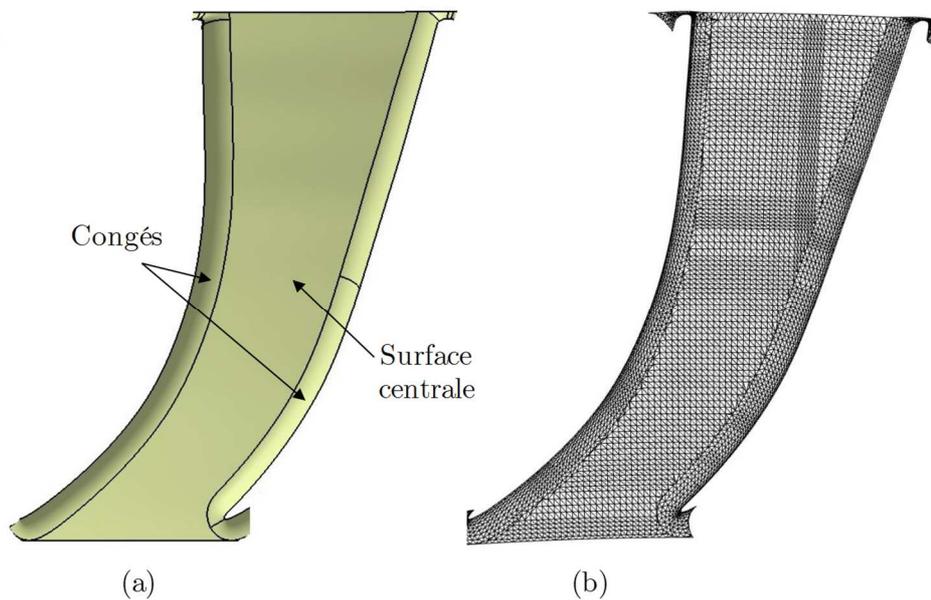


Figure 89 — Modèle géométrique de la surface « Interpale 2 »

Comme il s'agit d'une nouvelle pièce, nous ne disposons que de la géométrie dont le modèle est défini en format neutre STEP. Pour assurer la réutilisation

des données à travers l'étude de similarité avec la pièce déjà traitée, interpale 1, l'analyse de cette nouvelle pièce se focalise sur la surface de fond entre les deux pales que nous appelons, interpale 2. Pour cela, avant de procéder aux différents traitements, nous commençons par délimiter la surface de la pièce en ne gardant que la surface du fond entre les pales (cf. figure 89-a). Comme l'interpale 1, cette surface est définie avec une surface centrale et deux congés latéraux. Un logiciel de traitements géométriques est alors utilisé pour générer un maillage triangulaire comparable à celui de l'interpale 1 (cf. figure 89-b). Après l'exportation du fichier STL, différents descripteurs de forme sont calculés pour enrichir la géométrie.

3.2 Découpage topologique

Avec les données géométriques dont nous disposons, la segmentation à base de la courbure est appliquée pour découper la surface en régions de différents types de surfaces. L'indice de forme, définissant un type de surface locale pour chaque sommet, et l'intensité de courbure, permettant d'identifier les bords, sont d'abord calculés et attribués à chaque sommet (cf. figure 90).

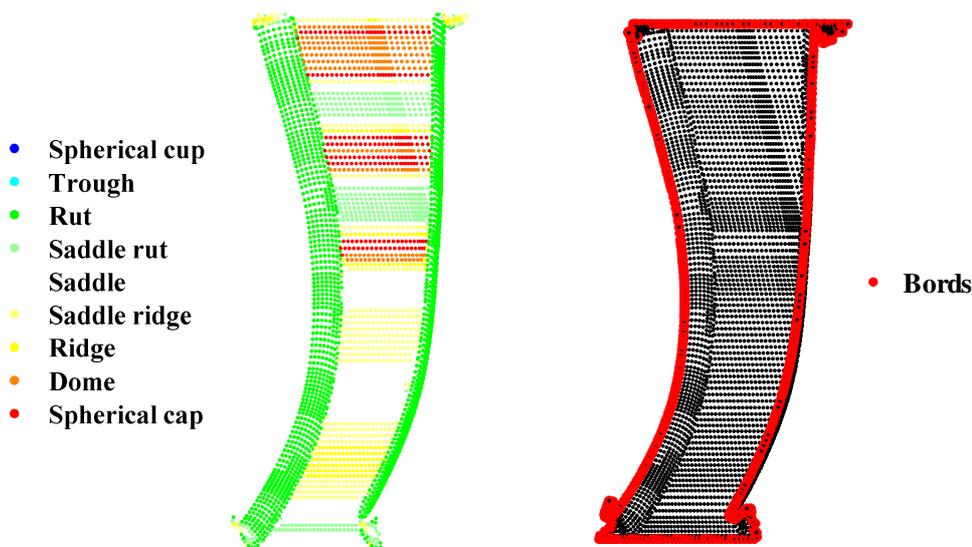


Figure 90 — Identification du type de surface et des bords

L'application de l'algorithme de segmentation permet de découper la surface de l'interpale 2 en 35 régions de différents types de surface présentées sur la figure 91. Sur cette figure, nous constatons que la surface centrale combine des surfaces de type « *rut* » et « *spherical cap* » avec des indices de forme positifs et négatifs. Les deux congés type « *rut* », tandis qu'au niveau des bords d'attaque et de fuite, les raccordements sont segmentés en régions définies entre « *saddle rut* » et « *ridge* ».

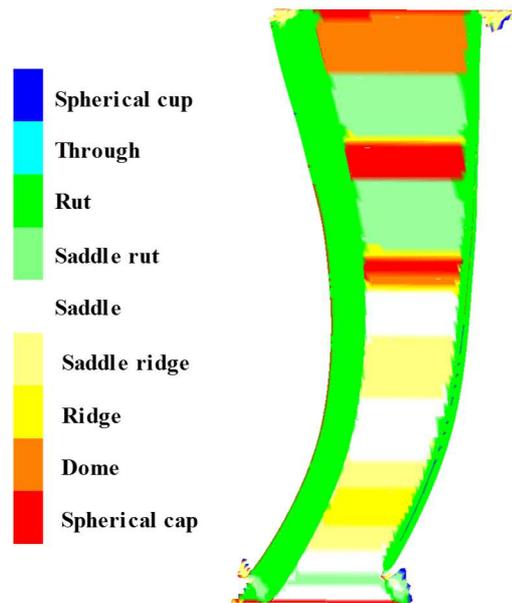


Figure 91 — Résultats de la segmentation à base de la courbure de l'interpale 2

3.3 Réutilisation des données à travers une mesure de similarité

Afin d'assurer la réutilisation des données d'usinage en se basant sur les éléments stockés dans la base de données, nous choisissons de nous baser sur l'approche orientée « région » à l'aide d'une analyse de similarité entre les régions de la nouvelle pièce interpale 2 et celles de la pièce déjà traitée interpale 1. Cette analyse commence par l'échantillonnage qui définit N points aléatoires pour chaque région des deux pièces. Des distributions de forme sont ensuite générées pour chaque région.

Comme nous pouvons le constater sur la figure 91, la segmentation à base de la courbure génère plusieurs petites régions différentes. La mesure de similarité directe sur ces régions ne donne pas des résultats cohérents à cause de la taille des régions. Pour assurer un bon appariement entre les deux pièces, l'utilisateur peut fusionner des régions en se basant sur la proximité géométrique (adjacence), tout en respectant le type de surface des régions à fusionner.

Dans cette étude, nous proposons d'illustrer notre approche avec trois régions sur chaque pièce (cf. figure 92). En effet, sur les deux pièces, les régions définissant la surface centrale de l'interpale ont été fusionnées comme elles sont adjacentes avec des indices de forme proches. Elles définissent désormais les régions 3 sur les deux pièces. De même, sur les coins, des petites régions dont la taille ne dépasse pas 20 points sont définies. Leur fusion définit les régions 1 sur les

deux pièces. A travers cette analyse, nous cherchons pour chacune des trois régions de la pièce interpale 2, une région similaire parmi les trois régions de la pièce interpale 1. Les distributions de formes relatives à ces régions sont présentées sur la figure 93.

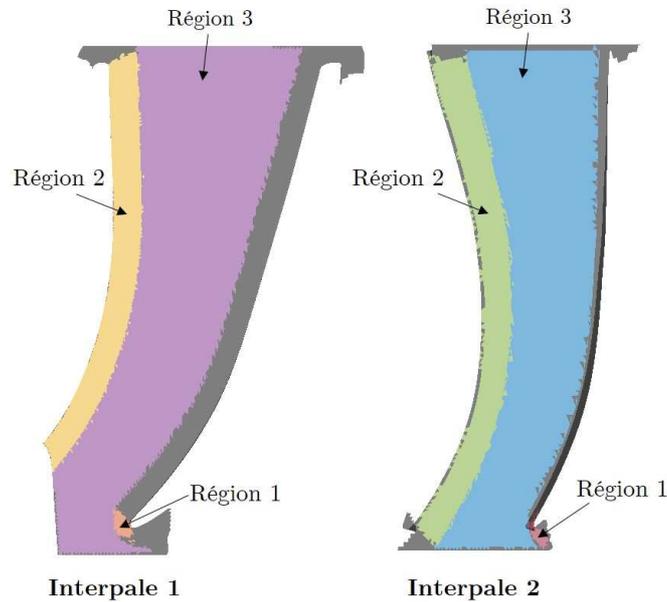


Figure 92 — Régions prises en considération dans l'analyse de similarité

Sur la figure 93, nous pouvons déjà détecter des régions similaires. Ceci se traduit par la ressemblance des allures des distributions de forme. Par exemple, la distribution de forme de la région 1 de l'interpale 2 est proche de celle de la région 1 de l'interpale 1.

En se basant sur la distance entre les distributions de forme, la similarité entre les régions est calculée (cf. tableau 9). D'après ces résultats, nous confirmons que la région 1 de l'interpale 1 est la plus similaire à la région 1 de l'interpale 2 comme le pourcentage de similarité est le plus élevé. Ainsi, en appliquant la mesure sur les régions restantes (congé gauche et les raccordements), nous pouvons leur associer les régions les plus similaires sur l'interpale 1. L'utilisateur peut fixer un seuil à partir duquel le résultat d'appariement n'est pas acceptable.

Une fois que toutes les régions de l'interpale 2 sont liées à des régions similaires de l'interpale 1, une réutilisation des données d'usinage peut être effectuée. Cette réutilisation se base principalement sur cette mesure de similarité et les paramètres d'usinage de l'interpale 1 analysés précédemment.

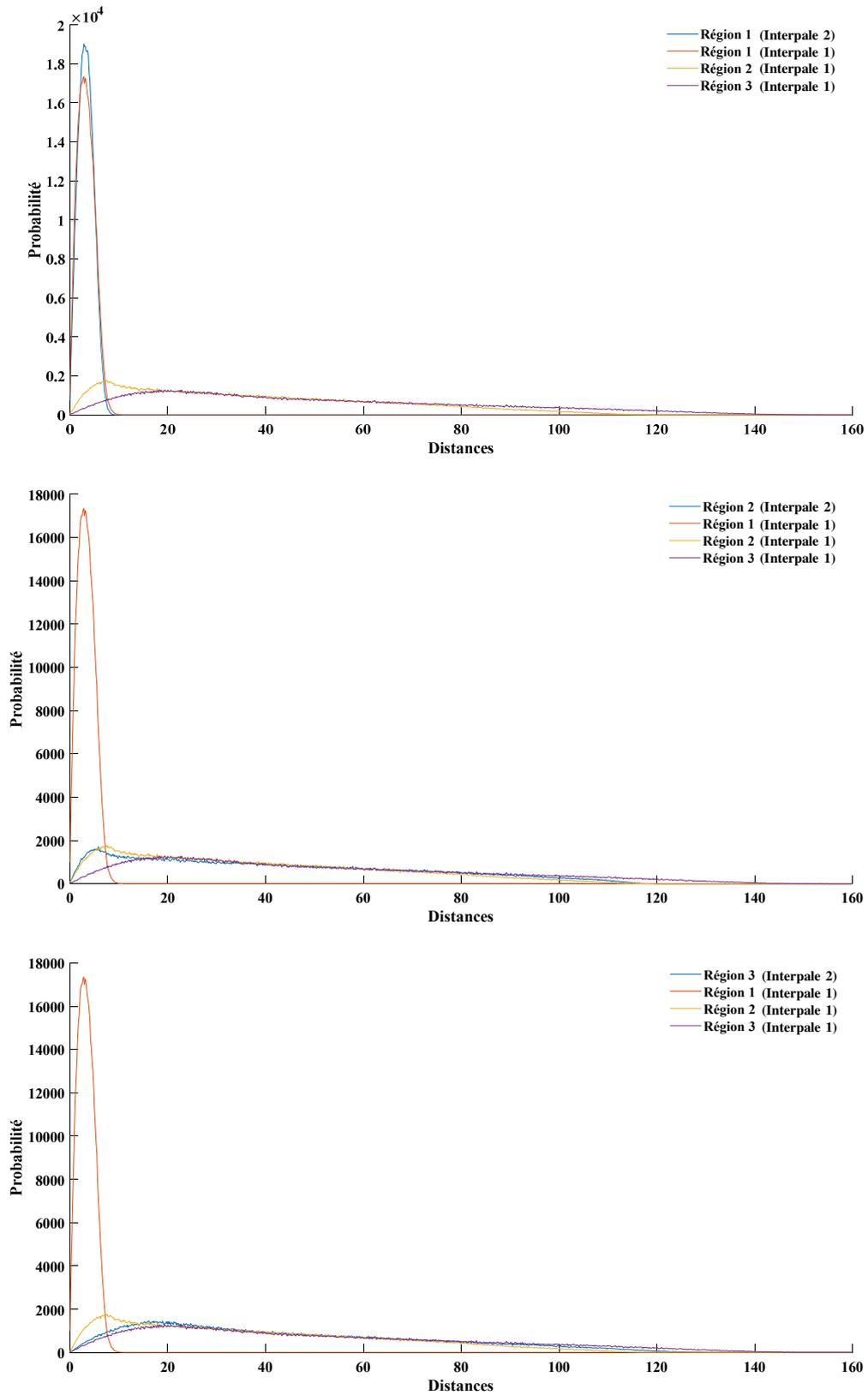


Figure 93 — Distributions de formes pour les régions des deux pièces

		Interpale 1		
		Région 1	Région 2	Région 3
Interpale 2	Similarité			
	Région 1	93.42%	76.13%	73.38%
	Région 2	74.96%	94.44%	90.72%
	Région 3	76.06%	90.89%	96.43%

Tableau 9 — Résultats de la mesure de similarité

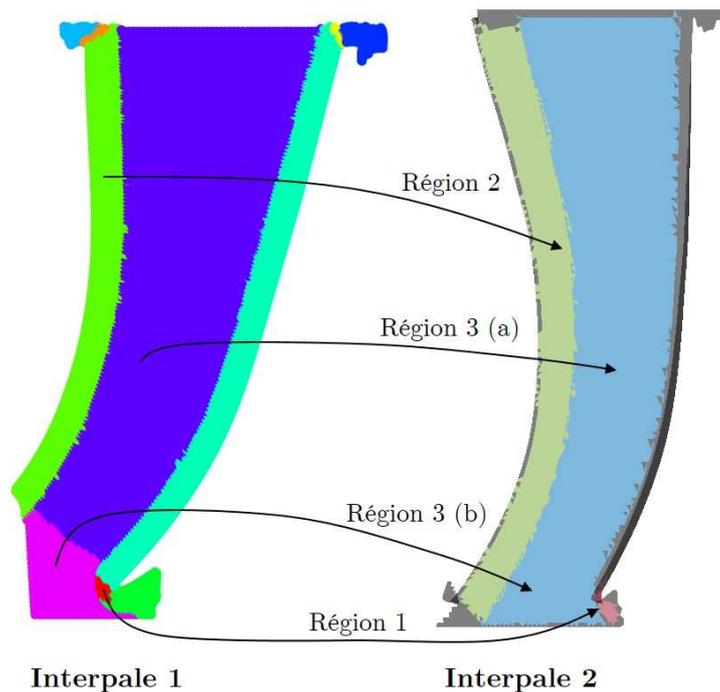


Figure 94 — Appariement des régions similaires sur les deux pièces

Dans le cas des régions illustrées, les paramètres d'usinage de la région 1 de l'interpale 1 peuvent être attribués à la région 1 de l'interpale 2. De même pour les régions 2 sur les deux pièces. Par contre, nous remarquons sur les résultats du découpage technologique que la surface centrale a été usinée par deux approches différentes afin de respecter l'accessibilité de l'outil et éviter ainsi les collisions avec les pales. De ce fait, nous proposons de découper la région 3 de l'interpale 2 en région 3(a) et région 3(b), en se basant sur l'accessibilité de l'outil, de façon similaire à la région 3 sur l'interpale 1. Une approximation de cet appariement est donnée sur la figure 94.

Néanmoins, les paramètres d'usinage de l'interpale 1 ne sont qu'une proposition. Une analyse de réutilisabilité devient alors nécessaire afin d'adapter l'outil (type, dimension, etc.), la stratégie d'usinage, le posage aux spécificités de la nouvelle pièce.

4 Conclusion

Ce chapitre a présenté les différentes étapes développées dans ce travail à travers une étude sur des cas industriels. Les données de la chaîne numérique de la pièce interpale 1 ont été traitées dans le but de définir des régions qui vont alimenter une base de données de cas. De plus, un nouveau cas interpale 2 a été exploité pour illustrer la phase de réutilisation des données d'usinage en se basant sur une analyse de similarité avec une pièce déjà traitée.

Les résultats obtenus dans les différentes phases de notre méthodologie sont satisfaisants même si la technique de mesure de similarité proposée nécessite des améliorations. Par ailleurs, il est souhaitable de tester cette approche sur d'autres pièces industrielles présentant des complexités de forme assez importantes. En fait, le manque de géométries complexes caractérisées par des surfaces de grandes variations de courbure dans les pièces aéronautiques ne nous a pas permis de tester l'approche sur plusieurs cas industriels. Une application sur des pièces de forgeage dont les surfaces sont assez complexes, serait envisageable pour améliorer et valider l'approche sur un cas différent.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Dans un environnement industriel dynamique et concurrentiel en constante évolution, les entreprises cherchent à gagner en productivité, compétitivité et efficacité. Pour ce faire, elles ont toujours besoin de s'orienter vers de nouveaux paradigmes pour le développement de produits complexes, la maîtrise des procédés de fabrication et l'intégration produit-process. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à développer une méthodologie d'exploitation des données de la chaîne numérique, en nous basant sur une approche orientée entité, afin d'assurer une réutilisation efficace des programmes d'usinage.

Dans la littérature, plusieurs travaux ont porté sur la notion d'entité d'usinage en raison de sa capacité à faciliter la représentation de divers types de données de pièces sous une forme significative, nécessaire pour piloter la génération de gammes d'usinage. Néanmoins, la plupart de ces travaux se limitent aux formes régulières. Les formes complexes sont peu impliquées bien qu'elles définissent une grande partie des pièces dans l'industrie. Ceci est dû au fait que les entités d'usinage complexes ne sont pas encore bien formalisées à cause de la complexité de leur caractérisation qui se mesure par la variété et la variabilité des zones des composants et des processus d'usinage nécessaires à leur obtention.

En effet, en analysant l'état de l'art présenté dans le chapitre 1 autour de la modélisation par entités, la caractérisation et la classification des entités d'usinage de formes complexes, nous avons pu dégager trois verrous scientifiques pour lesquels nous avons proposé des solutions dans les différents chapitres afin de répondre à la problématique de la thèse.

Une première contribution de ces travaux, présentée dans le chapitre 2, consiste à reformuler la notion d'entité d'usinage complexe en profitant du développement de la chaîne numérique. En combinant les paramètres géométriques et non géométriques dans la définition de l'entité d'usinage, nous avons identifié un ensemble de paramètres qui proviennent des différentes phases de la chaîne numérique et à différents niveaux de granularité. Comme ce sont des paramètres variés et hétérogènes, ils ont été organisés dans des structures hiérarchiques pour pouvoir les manipuler. L'entité d'usinage a été définie à l'aide de sous-entités, des régions et un maillage. Le processus d'usinage lié à l'entité est défini par des séquences et des opérations d'usinage et une trajectoire de l'outil. Une mise en correspondance entre ces deux types de données est alors établie par niveau. Ainsi, nous proposons une entité d'usinage complexe multi-niveaux et riches en termes de données de la chaîne numérique.

Une part importante de nos travaux exposée au chapitre 3 a été la méthodologie de l'exploitation des données extraites de la chaîne numérique pour la caractérisation de l'entité d'usinage. Un enrichissement de la géométrie avec les données d'usinage générées lors de la simulation d'usinage a été effectué. Cet enrichissement a été assuré à travers une mise en correspondance, ou *mapping*, point à point entre la trajectoire et la géométrie. Chaque point de la trajectoire est lié à un point du maillage, de telle sorte que ce dernier est enrichi par tous les paramètres d'usinage associés à la trajectoire.

Pour pouvoir extraire des informations significatives de cette géométrie enrichie pour le découpage de la surface complexe et ainsi pour la caractérisation de l'entité, une analyse statistique des données a été réalisée. Après quelques opérations de sélection, transformation et prétraitements des données, une des techniques de fouille de données, le clustering, a été appliquée. Le clustering permet de diviser un ensemble de données en différents paquets homogènes, tel que les données de chaque sous-ensemble partagent des caractéristiques communes. Dans ce travail, le clustering est utilisé sur l'ensemble des données d'usinage afin de retrouver des sous-ensembles cohérents permettant ainsi de découper la surface complexe en différentes régions.

En se basant sur l'ensemble des données de la chaîne numérique, une méthodologie de décomposition de la géométrie complexe en différentes régions topologiques a été proposée. Il s'agit d'un processus évolutif qui dépend principalement des données d'entrées.

Ayant la géométrie de la pièce décrite par les descripteurs de forme, une segmentation géométrique à base de la courbure est présentée. Étant basée sur des paramètres purement géométriques, cette méthode n'est pas adaptée à la définition des régions qui caractérisent une entité d'usinage. Il nous semblait indispensable d'intégrer des paramètres liés à l'usinage. Pour cela, un élément essentiel dans la génération de trajectoire en usinage 5 axes : la visibilité de l'outil, a été pris en considération. L'analyse de visibilité a permis d'ajouter un aspect d'usinage et de raffiner ainsi la segmentation initiale en regroupant les petites régions adjacentes ayant des orientations de visibilité similaires. Il s'agit d'une segmentation à base de la courbure et de l'usinabilité.

En se basant sur la mise en correspondance entre la géométrie et la trajectoire, une nouvelle approche de segmentation technologique orientée région est définie. Cette approche se base sur la décomposition et la composition des régions résultantes de la segmentation à base de la courbure. En effet, un clustering est appliqué sur chacune des régions pour pouvoir les découper par rapport aux variations des différents paramètres d'usinage. Un deuxième clustering est alors appliqué sur le nouvel ensemble des régions pour combiner les régions associées aux mêmes paramètres d'usinage.

Les régions résultantes de ce découpage ont permis de caractériser, en se basant sur la théorie des graphes, l'entité d'usinage complexe multi-niveaux (région, sous-entité, entité). Ceci va permettre de construire une base qui structure les données de la chaîne numérique. En se basant sur cette structuration, les données associées à chaque niveau de l'entité peuvent être exploitées dans un processus de réutilisation de données d'usinage pour la génération de nouveaux processus d'usinage. Tout dépend du niveau de besoin, une approche de réutilisation peut être utilisée : une réutilisation au niveau de la région, ou en considérant le type de l'entité après l'avoir caractérisée.

En effet, la troisième contribution de ces travaux est la mesure de similarité entre les régions pour assurer la réutilisation des données d'usinage. L'idée est de pouvoir réutiliser les données d'usinage et les connaissances métier dans des nouveaux cas présentant des similitudes avec des pièces déjà traitées et archivées dans la base de connaissance.

En nous référant aux travaux de recherche existants, une approche qui fait appel à une technique de mesure de similarité basée sur les histogrammes a été proposée. La distribution de forme avec la fonction D2 a été adoptée pour générer la signature de la forme et une distance géométrique, définie comme une somme pondérée d'une distance euclidienne et une distance à base de courbures, a été utilisée pour mesurer les distances entre les paires de points. Ainsi, une mesure de similarité peut être effectuée entre les régions. Alors, les paramètres d'usinage de la région la plus similaire peuvent être associés à la nouvelle région. Ici, c'est à l'utilisateur d'estimer la validité de la solution proposée. Il peut la refuser si le pourcentage de similarité est inférieur à un seuil, ou bien si les paramètres d'usinage doivent être adaptés à la nouvelle pièce. Au terme de ces travaux, l'approche développée nous permet d'ores et déjà de proposer une première solution de réutilisation des données d'usinage à l'utilisateur.

Enfin, le dernier chapitre a permis de valider la méthodologie proposée dans ces travaux sur une étude de cas industriel en reprenant les différents développements relatifs à chaque étape. Ceci a donné une image globale de la démarche de l'exploitation des données de la chaîne numérique basée sur l'entité d'usinage complexe et a mis en avant nos contributions.

Perspectives

Après avoir synthétisé nos principales contributions, nous dégagons quelques perspectives et pistes de travaux futurs.

Dans la nouvelle définition de l'entité d'usinage complexe que nous proposons, les données d'usinage que nous considérons sont relatives à la phase de finition. Les phases d'ébauche et de demi-finition pourraient être intégrées dans la définition. La mise en correspondance avec la géométrie se ferait alors avec les bruts intermédiaires de chaque phase. Ceci nous permettrait de suivre l'évolution de l'entité dans le temps, du brut initial à la phase de finition, et dans l'espace, de la région, la sous-entité à l'entité finie.

En ce sens, des données issues du monde réel, telles que la rugosité, les tolérances géométriques et dimensionnelles, les résultats de la mesure 3D, représenteraient un enrichissement important à la définition de l'entité d'usinage. Ces données permettraient d'avoir une chaîne numérique enrichie et une entité dynamique qui s'actualise par rapport aux variations de l'usinage, en prenant en considération le comportement de la machine, l'usure de l'outil, etc. Aujourd'hui, le suivi des pièces ne s'arrête pas à leurs sorties de l'usine. Grâce à l'internet des objets (*Internet of Things*), il est possible aussi de suivre la pièce, d'en connaître son utilisation, ses performances et pouvoir ainsi l'améliorer au fil du temps. Ce nouveau concept pourrait contribuer dans le développement du jumeau numérique avec une chaîne numérique plus intelligente, un service plus efficace et des équipements plus performants.

En revanche, la segmentation à base de la courbure utilise l'indice de forme comme paramètre principal pour désigner le type de surface. Dans un intervalle de $[-1, +1]$, dix types de surfaces sont définies. Ces types de surfaces et les bornes relatives à chaque type ont été définis initialement dans un environnement purement géométrique. C'est pour cette raison que les régions résultantes de cette segmentation ne reflètent pas la logique de l'usineur lors du découpage. Dans le contexte de l'entité d'usinage, les types de surfaces devraient être adaptés à l'usinage. L'analyse des résultats de clustering pourrait aider à définir des nouvelles bornes et des nouveaux types de surfaces qui se caractérisent non seulement par la courbure, mais aussi avec des paramètres d'usinage.

Dans la partie de clustering des données d'usinage, la notion d'enchaînement des points de la trajectoire a été abordée pour montrer l'importance de voisinage dans le partitionnement. Pour cela, nous proposons d'utiliser des techniques de segmentation de séries chronologiques afin d'identifier des modes de variation de l'outil. En fait, quelques techniques ont été testées, mais les résultats ne sont pas toujours satisfaisants. Ces techniques pourraient être améliorés en les adaptant aux données de l'usinage, et en définissant un niveau d'étude plus fin : la passe.

Le type d'intersection entre l'outil et la pièce généré par NCSIMUL permettrait de segmenter la trajectoire de l'outil en différentes passes. En considérant chaque passe comme une série chronologique, l'idée est d'utiliser le clustering des séries chronologiques pour regrouper les passes similaires. La technique de déformation temporelle dynamique (DWT: *Dynamic Time Warping*) pourrait être utilisée pour comparer les passes. Les passes ayant les mêmes allures et les mêmes modes de variations sont relatives à des régions et des comportements spécifiques de l'outil. Par ailleurs, les paramètres d'usinage saisis au niveau de la FAO, perdus après le PP (par exemple, la stratégie d'usinage, le mode de parcours, etc.), pourraient aider l'utilisateur lors de l'application de clustering et donner une information significative par rapport à la logique de découpage du programmeur.

Notre méthodologie de l'exploitation des données de la chaîne numérique nous a permis de proposer une structuration de la base de données de formes géométriques liées à leurs procédés d'usinage définis en plusieurs niveaux de granularité, tel que chaque entité d'usinage est liée à une ou à plusieurs approches métiers. Cette base de données est interrogée lors de l'analyse de similarité pour proposer des paramètres d'usinage qui conviennent le plus à la nouvelle entité. Cette analyse de similarité, en plus de la fonction de forme D2, pourrait utiliser d'autres descripteurs liés à la topologie, le voisinage, l'accessibilité, etc.

Cette nouvelle approche de caractérisation de l'entité d'usinage complexe vient enrichir la classe région de l'entité STEP-NC. Néanmoins, elle nécessite une confrontation industrielle avec les usineurs experts afin de lui donner un aspect « *métier* » et avoir ainsi une entité d'usinage orientée « *aéronautique* ». Par ailleurs, la classification que nous proposons ne concerne que les pièces de fraisage. Une adaptation de la méthodologie pourrait être appliquée sur les pièces de tournage.

Bibliographie

- [Abonyi et Feil, 2007] Abonyi, J. et Feil, B. (2007). *Cluster analysis for data mining and system identification*. Springer Science & Business Media.
- [Amaitik et Kilic, 2005] Amaitik, S. M. et Kilic, S. E. (2005). STEP-based feature modeller for computer-aided process planning. *International Journal of Production Research*, 43(15):3087–3101.
- [Anwer, 2000a] Anwer, N. (2000). *Méthodologie d'analyse de raisonnement pour la génération automatique des gammes d'usinage en fraisage*. Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Anwer, 2000b] Anwer, N. (2000). Spécification et développement d'un outil de génération de macro-gammes en fraisage – Projet USIQUICK. *Contrat de recherche LURPA/ENS Cachan - Dassault Systèmes*, Décembre 2000.
- [Balasubramaniam et al., 2000] Balasubramaniam, M., Laxmiprasad, P., Sarma, S. et Shaikh, Z. (2000). Generating 5-axis NC roughing paths directly from a tessellated representation, *Computer-Aided Design*, 32(4):261–277.
- [Benkő et Várady, 2004] Benkő, P. et Várady, T. (2004). Segmentation methods for smooth point regions of conventional engineering objects. *Computer-Aided Design*, 36(6):511–523.
- [Bernard, 2000] Bernard, A. (2000). Modèles et approches pour la conception et la production intégrées. *Journal européen des systèmes automatisés*, 34(2-3):163–193.
- [Besl et Jain, 1988] Besl, P. J. et Jain, R. C. (1988). Segmentation through variable-order surface fitting. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(2):167–192.
- [Bouaziz et al., 2006] Bouaziz, Z., Ben Younes, J. et Zghal, A. (2006). Cost estimation system of dies manufacturing based on the complex machining features. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(3-4):262–271.
- [Bourdet et al., 1990] Bourdet, P., Villeneuve, F. et Groupe, G.A.M.A (1990). *La gamme automatique en usinage*. Hermès.
- [Bronsvoort et al., 2006] Bronsvoort, W. F., Bidarra, R. et Nyirenda, P. J. (2006). Developments in feature modelling. *Computer-Aided Design and Applications*, 3(5):655–664.

- [Bustos et al., 2005] Bustos, B., Keim, D. A., Saupe, D., Schreck, T. et Vranić, D. V. (2005). Feature-based similarity search in 3D object databases. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 37(4):345–387.
- [Cardone et al., 2003] Cardone, A., Gupta, S. K. et Karnik, M. (2003). A survey of shape similarity assessment algorithms for product design and manufacturing applications. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 3(2):109–118.
- [Cardone et al., 2006] Cardone, A., Gupta, S. K., Deshmukh, A. et Karnik, M. (2006). Machining feature-based similarity assessment algorithms for prismatic machined parts. *Computer-Aided Design*, 38(9):954–972.
- [Chen et Georganas, 2006] Chen, L. et Georganas, N. D. (2006). An efficient and robust algorithm for 3D mesh segmentation. *Multimedia tools and Applications*, 29(2):109–125.
- [Chen et al., 2003] Chen, Z. C., Dong, Z. et Vickers, G. W. (2003). Automated surface subdivision and tool path generation for $3\frac{1}{2}$ -axis CNC machining of sculptured parts. *Computers in Industry*, 50(3):319–331.
- [Cheng et al., 2011] Cheng, H. C., Lo, C. H., Chu, C. H. et Kim, Y. S. (2011). Shape similarity measurement for 3D mechanical part using D2 shape distribution and negative feature decomposition. *Computers in Industry*, 62(3):269–280.
- [Chu et Hsu, 2006] Chu, C. H. et Hsu, Y. C. (2006). Similarity assessment of 3D mechanical components for design reuse. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(4):332–341.
- [Chu et al., 2016] Chu, W., Li, Y., Liu, C., Mou, W. et Tang, L. (2016). Collaborative manufacturing of aircraft structural parts based on machining features and software agents. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(5-8):1421–1434.
- [Chu et al., 2012] Chu, X., Tang, C., Xue, D., Su, Y. et Sun, X. (2012). Identification of machining features based on available resources of cutting tools. *International Journal of Production Research*, 50(15):4141–4157.
- [Cicirello et Regli, 2001] Cicirello, V. et Regli, W. C. (2001). Machining feature-based comparisons of mechanical parts. *International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 176–185.
- [Cordella et al., 2004] Cordella, L. P., Foggia, P., Sansone, C. et Vento, M. (2004). A sub-graph isomorphism algorithm for matching large graphs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(10):1367–1372, 2004.

- [Danjou, 2015] Danjou, C. (2015). *Ingénierie de la chaîne numérique d'industrialisation : proposition d'un modèle d'interopérabilité pour la conception-fabrication intégrées*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne.
- [Demarsin et al., 2007] Demarsin, K., Vanderstraeten, D., Volodine, T. et Roose, D. (2007). Detection of closed sharp edges in point clouds using normal estimation and graph theory. *Computer-Aided Design*, 39(4):276–283.
- [Di Stefano et al., 2004] Di Stefano, P., Bianconi, F. et Di Angelo, L. (2004). An approach for feature semantics recognition in geometric models. *Computer-Aided Design*, 36(10):993–1009.
- [Do Carmo, 1976] Do Carmo, M. P. (1976). *Differential Geometry of Curves and Surfaces*. Prentice-Hall.
- [Duc, 1998] Duc, E. (1998). *Usinage de formes gauches Contribution à l'amélioration de la qualité des trajectoires d'usinage*. Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [El-Hayek, 2014] El-Hayek, N. (2014). *Contribution to complex surfaces reconstruction from large and unorganized datasets for 3D metrology*. Thèse de doctorat, École nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM.
- [Elmesbahi, 2009] Elmesbahi, A. (2009). A new methodology for recognition of interacting features using Frontier Faces of Base Face. *6th International Conference of Integrated Design and manufacturing*.
- [Fontana et al., 1999] Fontana, M., Giannini, F. et Meirana, M. (1999). A free form feature taxonomy. *Computer Graphics Forum*, 18(3):107–118.
- [Fu et al., 2003] Fu, M. W., Ong, S. K., Lu, W. F., Lee, I. B. et Nee, A. Y. (2003). An approach to identify design and manufacturing features from a data exchanged part model. *Computer-Aided Design*, 35(11):979–993.
- [Gan et al., 2007] Gan, G., Ma, C. et Wu, J. (2007). *Data clustering: theory, algorithms, and applications*. Siam.
- [Gao et Shah, 1998] Gao, S. et Shah, J. J. (1998). Automatic recognition of interacting machining features based on minimal condition subgraph. *Computer-Aided Design*, 30(9):727–739.
- [Gardarin, 2003] Gardarin, G. (2003). *Bases de données*. Editions Eyrolles.
- [Gindy, 1989] Gindy, N. N. (1989). A hierarchical structure for form features. *International Journal of Production Research*, 27(12):2089–2103.

- [Giri et al., 2005] Giri, V., Bezbaruah, D., Bubna, P. et Choudhury, A. R. (2005). Selection of master cutter paths in sculptured surface machining by employing curvature principle. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(10):1202–1209.
- [Gupta et Gurumoorthy, 2012] Gupta, R. K. et Gurumoorthy, B. (2012). Automatic extraction of free-form surface features (FFSFs). *Computer-Aided Design*, 44(2):99–112.
- [Gupta et Gurumoorthy, 2013] Gupta, R. K. et Gurumoorthy, B. (2013). Unified Taxonomy for Reference Ontology of Shape Features in Product Model. *International Conference on Product Lifecycle Management*, pages 295–307.
- [Han et al., 2000] Han, J. H., Pratt, M. et Regli, W. C. (2000). Manufacturing feature recognition from solid models: a status report. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(6):782–796.
- [Harik, 2007] Harik, R. (2007). *Spécifications de fonctions pour un système d'aide à la génération automatique de gamme d'usinage: application aux pièces aéronautiques de structure, prototype logiciel dans le cadre du projet RNTL USIQUICK*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy I.
- [Harik et al., 2008] Harik, R. F., Derigent, W. J. et Ris, G. (2008). Computer aided process planning in aircraft manufacturing. *Computer-Aided Design and Applications*, 5(6):953–962.
- [He et al., 2009] He, L., Chao, Y., Suzuki, K. et Wu, K. (2009). Fast connected-component labeling. *Pattern Recognition*, 42(9):1977–1987.
- [Huang et al., 2019a] Huang, B., Zhang, S., Huang, R., Li, X. et Zhang, Y. (2019). An effective retrieval approach of 3D CAD models for macro process reuse. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5-8):1067–1089.
- [Huang et al., 2019b] Huang, R., Jiang, J., Huang, B. et Zhang, S. (2019). Multilevel structured NC machining process model based on dynamic machining feature for process reuse. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 1–16.
- [Huang et al., 2015] Huang, R., Zhang, S., Bai, X., Xu, C. et Huang, B. (2015). An effective numerical control machining process reuse approach by merging feature similarity assessment and data mining for computer-aided manufacturing models. *Journal of Engineering Manufacture: Institution of Mechanical Engineers*, 229(7):1229–1242.
- [Ip et al., 2002] Ip, C. Y., Lapadat, D., Sieger, L. et Regli, W. C. (2002). Using shape distributions to compare solid models. *7th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pages 273–280.

- [ISO 14649–10:2002] International Standards Organization, ISO 14649–10 (2002). Industrial automation systems and integration – Physical device control – Data model for computerized numerical controllers – Part 10: General process data.
- [ISO 14649–11:2002] International Standards Organization, ISO 14649–11 (2002). Industrial automation systems and integration – Physical device control – Data model for computerized numerical controllers – Part 11: Process data for milling.
- [Iyer et al., 2005] Iyer, N., Jayanti, S., Lou, K., Kalyanaraman, Y. et Ramani, K. (2005). Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends. *Computer-Aided Design*, 37(5):509–530.
- [Izenman, 2008] Izenman, A. J. (2008). *Modern Multivariate Statistical Techniques: Regression, Classification, and Manifold Learning*. Springer.
- [Ji et al., 2018] Ji, W., Wang, L., Haghghi, A., Givehchi, M. et Liu, X. (2018). An enriched machining feature based approach to cutting tool selection. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(1):1–10.
- [Kang et Suh, 1997] Kang, J. K. et Suh, S. H. (1997). Machinability and set-up orientation for five-axis numerically controlled machining of free surfaces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13(5):311–325.
- [Kodinariya et Makwana, 2013] Kodinariya, T. M. et Makwana, P. R. (2013). Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering. *International Journal*, 1(6):90–95.
- [Koenderink et Van Doorn, 1992] Koenderink, J. J. et Van Doorn, A. J. (1992). Surface shape and curvature scales. *Image and vision computing*, 10(8):557–564.
- [Laguionie et al., 2009] Laguionie, R., Rauch, M. et Hascoët, J.-Y. (2009). Toolpaths programming in an intelligent STEP-NC manufacturing context. *Journal of Machine Engineering*, 8(1):33–43.
- [Lasemi et al., 2010] Lasemi, A., Xue, D. et Gu, P. (2010). Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. *Computer-Aided Design*, 42(7):641–654.
- [Lavoué et al., 2005] Lavoué, G., Dupont, F. et Baskurt, A. (2005). A new CAD mesh segmentation method, based on curvature tensor analysis. *Computer-Aided Design*, 37(10):975–987.
- [Liu et al., 2015] Liu, J., Liu, X., Cheng, Y. et Ni, Z. (2015). An approach to mapping machining feature to manufacturing feature volume based

- on geometric reasoning for process planning. *Journal of Engineering Manufacture, Institution of Mechanical Engineers*, 231(7):1204–1216.
- [Liu et Li, 2019] Liu, X. et Li, Y. (2019). Feature-based adaptive machining for complex freeform surfaces under cloud environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 56:254–263.
- [Liu et al., 2016] Liu, X., Li, Y. et Gao, J. (2016). A multi-perspective dynamic feature concept in adaptive NC machining of complex freeform surfaces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(5-8):1259–1268.
- [Liu et Xiong, 2008] Liu, Y. et Xiong, Y. (2008). Automatic segmentation of unorganized noisy point clouds based on the Gaussian map. *Computer-Aided Design*, 40(5):576–594.
- [Liu et Wang, 2007] Liu, Z. et Wang, L. (2007). Sequencing of interacting prismatic machining features for process planning. *Computers in Industry*, 58(4):295–303.
- [Louati et al., 2005] Louati, J., Barkallah, M., Masmoudi, F. et Haddar, M. (2005). Développement automatique des groupements en phases par le concept d’entités d’usinage. 1^{er} *Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques*.
- [Lü et al., 2009] Lü, K., He, N. et Xue, J. (2009). Content-based similarity for 3D model retrieval and classification. *Progress in Natural Science*, 19(4):495–499.
- [MacQueen, 1967] MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. 5th *Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1(14):281–297.
- [Madan et al., 2007] Madan, J., Rao, P. V. et Kundra, T. K. (2007). Computer aided manufacturability analysis of die-cast parts. *Computer-Aided Design and Applications*, 4(1-4):147–158.
- [Makki, 2009] Makki, A. (2009). *Copiage rapide de formes sur machine outil à commande numérique en fraisage 5 axes positionné*. Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Manafi et al., 2017] Manafi, D., Nategh, M. J. et Parvaz, H. (2017). Extracting the manufacturing information of machining features for computer-aided process planning systems. *Journal of Engineering Manufacture, Institution of Mechanical Engineers*, 231(12):2072–2083.
- [Mangan et al., 1999] Mangan, A. P. et Whitaker, R. T. (1999). Partitioning 3D surface meshes using watershed segmentation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(4):308–321.

- [Mawussi et Bernard, 1995] Mawussi, K. et Bernard, A. (1995). Représentation et aide à la définition d'outillages de forme complexe basée sur un modèle d'entités complexes. *Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique*, 10(5):465–484.
- [Mokhtar et al., 2009] Mokhtar, A., Xu, X. et Lazcanotegui, L. (2009). Dealing with feature interactions for prismatic parts in STEP-NC. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(4):431.
- [Mony et al., 1991] Mony, C., Dupinet, E. et Bernard, A. (1991). Un modèle intégré de définition de produit mécanique pour l'usinage et l'obtention des brut préformés. 23^{ème} CIRP, *Séminaire International sur les Systèmes de Production, CIM Conception Intégrée en Production Automatisée*.
- [Nagarajan et Reddy, 2010] Nagarajan, S. et Reddy, N. V. (2010). Step-based automatic system for recognising design and manufacturing features. *Molecular Physics*, 48(1):117–144.
- [Newman et al., 2008] Newman, S. T., Nassehi, A., Xu, X. W., Rosso, R. S., Wang, L., Yusof, Y., Ali L., Liu R., Zheng L. Y., Kumar S. et Vichare P. (2008). Strategic advantages of interoperability for global manufacturing using CNC technology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(6):699–708.
- [Nyirenda et Bronsvoort, 2008] Nyirenda, P. J. et Bronsvoort, W. F. (2008). Numeric and curve parameters for freeform surface feature models. *Computer-Aided Design*, 40(8):839–851.
- [Nyirenda et al., 2005] Nyirenda, P. J., Bronsvoort, W. F., Langerak, T. R., Song, Y. et Vergeest, J. S. (2005). A generic taxonomy for defining freeform feature classes. *Computer-Aided Design and Applications*, 2(1-4):497–506.
- [Ohbuchi et al., 2003] Ohbuchi, R., Minamitani, T. et Takei, T. (2003). Shape-similarity search of 3D models by using enhanced shape functions. *Theory and Practice of Computer Graphics*, pages 97–104.
- [Osada et al., 2002] Osada, R., Funkhouser, T., Chazelle, B. et Dobkin, D. (2002). Shape distributions. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 21(4):807–832.
- [Peng et al., 2017] Peng, C., Du, H. et Liao, T. W. (2017). A research on the cutting database system based on machining features and TOPSIS. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 43:96–104.
- [Pernot et al., 2003] Pernot, J. P., Falcidieno, B., Giannini, F., Guillet, S. et Léon, J. C. (2003). Modelling free-form surfaces using a feature-based approach. 8th ACM *Symposium on Solid Modeling and Applications*, pages 270–273.

- [Pham et al., 2018] Pham, G., Lee, S. H., Kwon, O. H. et Kwon, K. R. (2018). Anti-3D weapon model detection for safe 3D printing based on convolutional neural networks and D2 shape distribution. *Symmetry*, 10(4):90–105.
- [Poldermann et Horváth, 1996] Poldermann, B. et Horváth, I. (1996). Surface design based on parametrized surface features. *Symposium on Tools and Methods for Concurrent Engineering, Institute of Machine Design*, pages 432–446.
- [Pu et Ramani, 2005] Pu, J. et Ramani, K. (2005). A 3D model retrieval method using 2D freehand sketches. *International Conference on Computational Science*, pages 343–346.
- [Rauch et al., 2009] Rauch, M., Laguionie, R., Hascoët, J.-Y. et Xu, X. (2009). Enhancing CNC manufacturing interoperability with STEP-NC. *Journal of Machine Engineering*, 9(4):26–37.
- [Ray et Jones, 2006] Ray, S. R. et Jones, A. T. (2006). Manufacturing interoperability. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17(6):681–688.
- [Riesbeck et Schank, 2013] Riesbeck, C. K. et Schank, R. C. (2013). *Inside case-based reasoning*. Psychology Press.
- [Rousseeuw, 1987] Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20:53–65.
- [Salomons et al., 1993] Salomons, O. W., Houten, F. J. et Kals, H. J. (1993). Review of research in feature-based design. *Journal of manufacturing systems*, 12(2):113–132.
- [Sanfilippo et Borgo, 2016] Sanfilippo, E. M. et Borgo, S. (2016). What are features? An ontology-based review of the literature. *Computer-Aided Design*, 80:9–18.
- [Scott et Jiang, 2014] Scott, P. J. et Jiang, X. (2014). Freeform surface characterisation: theory and practice. *Journal of Physics: Conference Series*, 483(1):20–25.
- [Shah et Mäntylä, 1995] Shah, J. J. et Mäntylä, M. (1995). *Parametric and feature-based CAD/CAM: concepts, techniques, and applications*. John Wiley & Sons.
- [SmartEmma, 2019] Smart machine-tool and HSM process with Emma. <http://smartemma.ls2n.fr>. Accédé le 12/12/2019.
- [Srinark et Kambhamettu, 2003] Srinark, T. et Kambhamettu, C. (2003). A Novel Method for 3D Surface Mesh Segmentation. *Computer Graphics and Imaging*, pages 212–217.

- [Sun et al., 2001] Sun, G., Sequin, C. H. et Wright, P. K. (2001). Operation decomposition for freeform surface features in process planning. *Computer-Aided Design*, 33(9):621–636.
- [Sundararajan et Wright, 2004] Sundararajan, V. et Wright, P. K. (2004). Volumetric feature recognition for machining components with freeform surfaces. *Computer-Aided Design*, 36(1):11–25.
- [Sunil et Pande, 2008] Sunil, V. B. et Pande, S. S. (2008). Automatic recognition of features from freeform surface CAD models. *Computer-Aided Design*, 40(4):502–517.
- [Tang et al., 1989] Tang, K., Woo, A. C. et Gan, J. G. K. (1989). Maximum intersection of spherical polygons and workpiece orientation for 4-and 5-axis machining. *ASME Journal of Mechanical Design*, 114(3):477–485.
- [Tapie, 2007] Tapie, L. (2007). *Décomposition topologiques des outillages de forge pour la génération de trajectoires UGV*. Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Tapie et al., 2009] Tapie, L., Mawussi, K. et Anselmetti, B. (2009). Decomposition of forging dies for machining planning. *15th International Conference on Manufacturing Systems – ICMaS*, pages 485–488.
- [Tollenaere et al., 1998] Tollenaere, M., Aoussat, A. et Le Coq, M. (1998). *Conception de produits mécaniques: méthodes, modèles et outils*. Hermès.
- [Tryon, 1939] Tryon, R. C. (1939). *Cluster analysis*. Edwards Brothers, Ann Arbor, Michigan.
- [Ullmann, 1976] Ullmann, J. R. (1976). An algorithm for subgraph isomorphism. *Journal of the ACM*, 23(1):31–42.
- [Vafaesefat et El Maraghy, 2000] Vafaesefat, A. et ElMaraghy, H. A. (2000). Optimal workpiece orientations for machining of sculptured surfaces. *Journal of Engineering Manufacture, Institution of Mechanical Engineers*, 214(8):671–681.
- [Van Den Berg et al., 2003] Van Den Berg, E., Van Der Meiden, H. A. et Bronsvort, W. F. (2003). Specification of freeform features. *8th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pages 56–64.
- [Van Tuong et Pokorný, 2010] Van Tuong N. et Pokorný, P. (2010). A practical approach for partitioning free-form surfaces. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(11):992–1001.

- [Verma et Rajotia, 2010] Verma, A. K. et Rajotia, S. (2010). A review of machining feature recognition methodologies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(4):353–368.
- [Vieira et Shimada, 2005] Vieira, M. et Shimada, K. (2005). Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing. *Computer-aided Geometric Design*, 22(8):771–792.
- [Wang et al., 2010] Wang, J., Wang, Z., Zhu, W. et Ji, Y. (2010). Recognition of freeform surface machining features. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 10(4):041006(1–7).
- [Wang et al., 2006] Wang, L., Cai, N., Feng, H. Y. et Liu, Z. (2006). Enriched machining feature-based reasoning for generic machining process sequencing. *International Journal of Production Research*, 44(8):1479–1501.
- [Wang et al., 2017] Wang, L., Wang, W. et Liu, D. (2017). Dynamic feature based adaptive process planning for energy-efficient NC machining. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 66(1):441–444.
- [Wang et al., 2018] Wang, W., Li, Y. et Huang, L. (2018). Rule and branch-and-bound algorithm based sequencing of machining features for process planning of complex parts. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(6):1329–1336.
- [Wang et al., 2019] Wang, Z., Ritou, M., Da Cunha, C. et Furet, B. (2019). Classification contextuelle pour système d’aide à la décision pour machines-outils. 16^{ème} Colloque National AIP-PRIMECA.
- [Wilson et Pratt, 1988] Wilson, P. R. et Pratt, M. J. (1988). A taxonomy of features for solid modeling. *Geometric modeling for CAD applications*, pages 125–136.
- [Wilson et Pratt, 1985] Wilson, P. W. et Pratt, M. (1985). Requirements for support of form features in a solid modelling system. *Computer Aided Manufacturing International*.
- [Woo, 1994] Woo, T. C. (1994). Visibility maps and spherical algorithms. *Computer-Aided Design*, 26(1):6–16.
- [Xú et al., 2016] Xú, S., Anwer, N. et Lavernhe, S. (2016). Conversion of G-code programs for milling into STEP-NC. *Joint Conference on Mechanical, Design Engineering & Advanced Manufacturing*, pages 495–507.
- [Xu et al., 2002] Xu, X. J., Bradley, C., Zhang, Y. F., Loh, H. T. et Wong, Y. S. (2002). Tool-path generation for five-axis machining of free-form surfaces based on accessibility analysis. *International Journal of Production Research*, 40(14):3253–3274.

- [Xu et al., 2005] Xu, X. W., Wang, H., Mao, J., Newman, S. T., Kramer, T. R., Proctor, F. M. et Michaloski, J. L. (2005). STEP-compliant NC research: the search for intelligent CAD/CAPP/CAM/CNC integration. *International Journal of Production Research*, 43(17):3703–3743.
- [Xu et Hinduja, 1998] Xu, X. et Hinduja, S. (1998). Recognition of rough machining features in $2\frac{1}{2}$ D components. *Computer-Aided Design*, 30(7):503–516.
- [Xu et al., 2011] Xu, X., Wang, L. et Newman, S. T. (2011). Computer-aided process planning: A critical review of recent developments and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(1):1–31.
- [Yan et al., 2000] Yan, X., Yamazaki, K. et Liu, J. (2000). Recognition of machining features and feature topologies from NC programs. *Computer-Aided Design*, 32(10):605–616.
- [Yang et al., 1999] Yang, W., Ding, H. et Xiong, Y. (1999). Manufacturability analysis for a sculptured surface using visibility cone computation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(5):317–321.
- [Zhang et Li, 2016] Zhang, J. et Li, Y. (2016). Region segmentation and shape characterisation for tessellated CAD models. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(8):907–915.
- [Zhang, 2014] Zhang, L. Y. (2014). Machining Feature-Based CAD/CAPP for STEP-NC. *Applied Mechanics and Materials*, 598:591–594.
- [Zhang et al., 2013] Zhang, X., Liang, C., Si, T. et Ding, D. (2013). Machining Feature Modeling and Process Intermediate Model Generation in Process Planning. *ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*.
- [Zhao, 2010] Zhao, H. (2010). *Multisensor integration and discrete geometry processing for coordinate metrology*. Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Zhao et al., 2013] Zhao, H., Anwer, N. et Bourdet, P. (2013). Curvature-based registration and segmentation for multisensor coordinate metrology. *Procedia CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, 10:112–118.
- [Zhao et al., 2016] Zhao, W., Li, Y., Liu, C. et Shen, W. (2016). A cutting parameter optimization method based on dynamic machining features for complex structural parts. *IEEE 20th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*, pages 85–90.

- [Zirmi, 2006] Zirmi, O. (2006). *Analyse de fabricabilité en conception de gammes d'usinage pour l'aéronautique*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.
- [Zirmi et Paris, 2005] Zirmi, O. et Paris, H. (2005). Modélisation de l'usinabilité des pièces aéronautiques dans un contexte de conception de gamme d'usinage. 9^{ème} *Colloque National AIP-PRIMECA, Méthodes et modèles innovants pour la conception de systèmes industriels*.

Annexe

A

Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique de réduction des variables très utile lorsque nous sommes en présence d'une somme importante de données quantitatives à traiter et interpréter [Izenman, 2008]. Elle permet de transformer un ensemble de données de grande dimension composé de nombreuses variables corrélées en un plus petit ensemble de variables artificielles, appelées composantes principales (PC), en conservant la variation présente dans l'ensemble de données original. Les PC, définis comme une combinaison linéaire des variables initiales, forment une nouvelle base orthogonale non corrélée. Ces nouvelles variables sont ordonnées de façon à ce que les premières composantes soient les plus importantes à étudier et présentent la plus grande variance possible dans les variables initiales. L'ACP permet de structurer le phénomène étudié et de le représenter dans des espaces de faible dimension de variables.

Dans notre étude, la difficulté vient du fait que les individus (les points) étudiés ne sont plus représentés dans un plan, ou un espace de dimension 3, mais dans un espace de dimension plus importante (dimension 10). L'ACP est ainsi appliquée sur l'ensemble des variables de coupe issues de la simulation d'usinage (V_c , F_z , h , A_p , A_e , A_d , débit copeaux, diamètre usiné, volume et angle) afin de revenir à un espace de dimension réduite (par exemple 2 ou 3) en déformant le moins possible la réalité. Il s'agit donc d'obtenir le résumé le plus pertinent possible des données initiales. Cependant, avant d'appliquer l'ACP, il est important de s'assurer que les données sont normalisées dans la phase de prétraitement. L'utilisation des données brutes créera des complications dans la comparaison des données et l'interprétation des résultats.

Variables	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
Vc	0.205	0.529	-0.033	0.078	0.238	-0.335	0.046	0.000	0.707	0.000
Volume	0.503	-0.127	0.006	-0.082	-0.243	0.027	0.815	-0.007	0.000	0.000
Ad	0.512	-0.145	0.011	-0.032	-0.202	-0.121	-0.392	0.712	0.000	0.000
Ap	0.209	0.393	-0.031	-0.542	0.119	0.694	-0.109	-0.002	0.000	0.000
Ae	0.310	-0.285	0.035	0.489	0.685	0.336	0.006	-0.004	0.000	0.000
Diamètre usiné	0.205	0.529	-0.033	0.078	0.238	-0.335	0.046	0.000	-0.707	0.000
Débit copeaux	0.511	-0.145	0.013	-0.032	-0.208	-0.126	-0.405	-0.702	0.000	0.000
Angle	0.005	0.376	-0.029	0.668	-0.510	0.387	-0.042	0.001	0.000	0.000
Fz	-0.004	0.051	0.705	-0.006	-0.009	0.001	0.002	0.001	0.000	0.707
h	-0.004	0.051	0.705	-0.006	-0.009	0.001	0.002	0.001	0.000	-0.707

Tableau A.1 — Coefficients de définition des composantes principales

L'interprétation des résultats de l'ACP passe par deux étapes :

a) Choisir le nombre d'axes à retenir

Ayant les dix variables de la matrice de données initiales centrées et réduites, l'application de l'ACP permet de définir dix composantes principales. Ces dernières ne sont que des combinaisons linéaires des variables initiales, indépendantes les unes des autres. Le tableau A.1 présente les contributions de chaque variable dans la définition des composantes principales hiérarchisées par ordre d'importance.

Choisir le nombre d'axes (composantes principales) à retenir revient à déterminer le nombre minimal de composantes principales qui expliquent la plus grande partie de la variation des données initiales. Pour ce faire, deux critères empiriques peuvent être utilisés :

- *Critère du coude* : En se basant sur la représentation de la variance expliquée des composantes principales (cf. figure A.1), le critère de coude consiste à repérer l'endroit à partir duquel le pourcentage de la variance diminue beaucoup plus lentement. La variance expliquée étant la portion de variabilité d'un ensemble de données d'un modèle.
- *Critère de Kaiser* : Ce critère utilise les valeurs propres (cf. tableau A.2). Il consiste à retenir les axes associés à des valeurs propres supérieures à 1.

La figure A.1 montre que la variance expliquée commence à former une ligne droite après la quatrième composante principale. De plus, d'après les résultats du tableau A.2, qui regroupe les valeurs propres classées de façon décroissante, la variance de chaque axe ainsi que la variance cumulée des dix composantes principales, les quatre premières composantes principales ont des valeurs propres supérieures à 1. De ce fait, les quatre premières composantes principales, conservant 95.12% de la variation des données initiales, sont retenues.

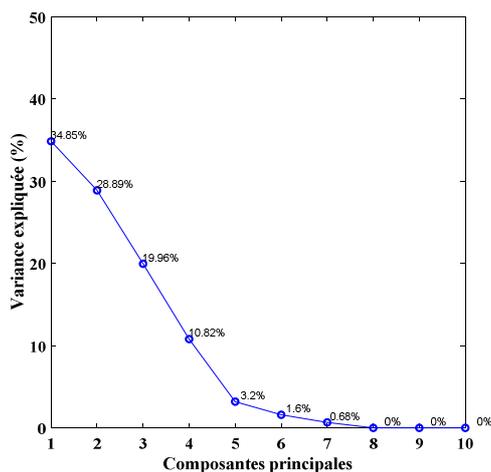


Figure A.1 — Représentation de la variance expliquée en (%)

	Valeurs propres	Variance expliquée (%)	Somme
PC1	3.4853	34.855	34.85
PC2	2.8893	28.895	63.75
PC3	1.9955	19.956	83.71
PC4	1.0814	10.815	95.12
PC5	0.3203	3.203	97.72
PC6	0.1597	1.597	99.32
PC7	0.0676	0.676	100
PC8	0.0003	0.003	100
PC9	5.08E-08	5.08E-07	100
PC10	1.34E-33	1.34E-32	100

Tableau A.2 — Valeurs propres et variance expliquée en (%)

b) Interpréter chaque composante principale en fonction des variables initiales

Pour interpréter chaque composante principale, il faut examiner la valeur et le signe des coefficients des variables initiales qui spécifient la corrélation entre chaque PC et les variables qui la définissent (cf. tableau A.1). Plus la valeur absolue du coefficient est élevée, plus la variable correspondante est importante dans le calcul de la composante. De ce fait, les variables corrélées avec les quatre premières PC conservées sont les plus importantes pour expliquer la variabilité de l'ensemble de données initiales. Les variables qui ne sont pas corrélées avec aucune des PC ou corrélées avec les dernières PC sont des variables à faible contribution et peuvent être supprimées pour simplifier l'analyse globale.

Pour mieux comprendre la contribution de chaque variable dans les quatre premières PC, les variables initiales sont projetées sur des plans factoriels : un plan factoriel est un plan défini par deux des quatre PC retenues (cf. figure A.2).

Les dix variables initiales sont représentées dans ce graphique par des vecteurs tels que la direction et la longueur indiquent comment elles contribuent aux deux PC du graphique. En se basant sur ce graphique, deux types de positions sont définis. Les positions des variables par rapport aux axes permettent de déterminer quelles sont les variables qui « *font les axes* ». Prenons, par exemple, le premier plan factoriel (formé par les deux premiers axes PC1 et PC2). Nous remarquons que la première PC présente des fortes associations avec le volume, Ad, et le débit copeaux et moins fortes avec Ae, Ap, Vc et le diamètre usiné. Les variables Fz, h et angle sont négligeables et ne contribuent pas dans la définition de cet axe. La deuxième composante présente des associations positives avec le diamètre usiné, Vc, Ap et angle ainsi que Fz et h avec une contribution moins importante. Ce deuxième axe est aussi défini par des associations

négatives avec Ae, le volume, le débit copeaux et Ad. Par ailleurs, les positions des variables les unes par rapport aux autres permettent d'expliquer la liaison entre elles. Sur les différents plans factoriels, nous remarquons des regroupements de variables qui correspondent à des variables corrélées. Il s'agit des corrélations entre le débit copeaux, le volume et Ad ; Vc et le diamètre usiné ; h et Fz. La corrélation entre l'ensemble de ces variables est détaillée dans la section suivante.

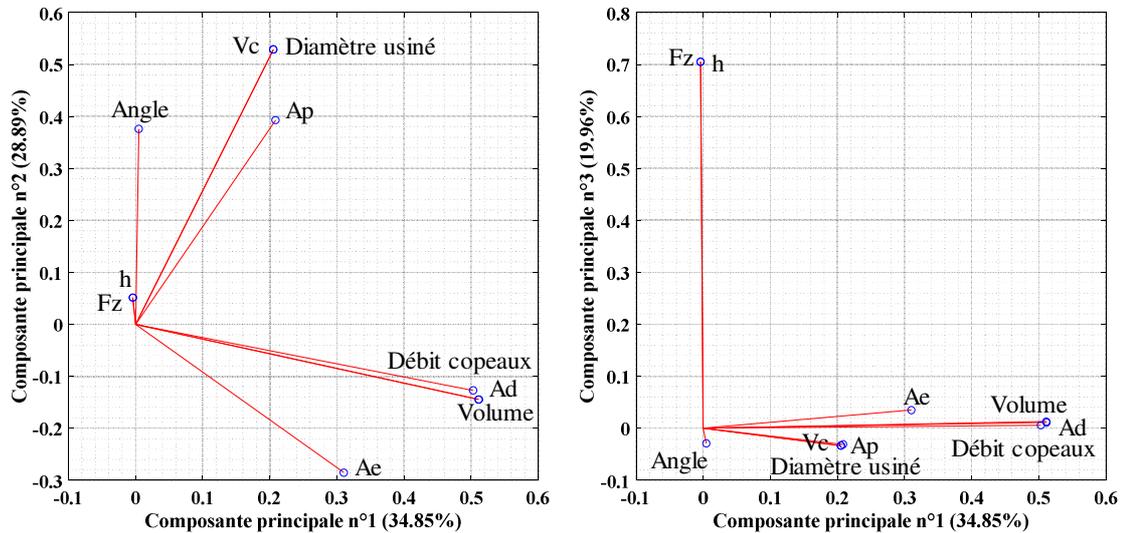


Figure A.2 — Représentation des variables sur le plan factoriel

En effet, l'ACP nous a permis de réduire la complexité de la matrice initiale en gardant que les quatre premières PC qui expliquent la plus grande partie de la variance des variables initiales et présentent ainsi le problème sous une autre forme. Cependant, nous avons fait le choix de ne pas utiliser ces nouvelles variables (PC). L'utilisateur ne peut pas manipuler un vecteur abstrait défini dans une nouvelle base mathématique avec des combinaisons linéaires des variables initiales. Il est obligé d'être raccordé aux paramètres initiaux, ayant un sens physique, puisque les stratégies d'usinage qu'il utilise sont décrites par ces paramètres élémentaires et non pas par les variables de la nouvelle base de l'ACP qui ne définissent pas le process d'usinage. En fait, l'ACP a servi à mieux connaître les données sur lesquelles nous travaillons et comprendre les corrélations qui existent entre elles.

Annexe

B

K-means

Le k-means [MacQueen, 1967] est l'un des algorithmes de clustering non hiérarchiques les plus répandus [Abonyi et al., 2007]. Il permet d'analyser un ensemble d'individus caractérisé par différentes variables afin de regrouper les individus similaires en groupes (ou clusters) tout en cherchant à minimiser la variabilité dans le même cluster et maximiser la variabilité entre les clusters. Chacun de ces individus appartient à un seul et unique cluster et ne peut se trouver dans deux clusters différents au même temps (exclusivité d'appartenance). Cette similarité entre les individus se traduit par la « *distance* » qui sépare leurs variables. Ainsi, deux individus sont similaires si leurs variables sont très proches avec une distance minimale. La littérature mathématique et statistique propose plusieurs définitions de distances [Gan et al., 2007]. Nous citons ici les plus utilisées dans le cas de clustering :

— **Distance Euclidienne** : C'est probablement le type de distance le plus couramment utilisé. Il s'agit simplement d'une distance géométrique dans un espace multidimensionnel. Elle se calcule comme suit :

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (\text{B.1})$$

Parfois, on peut définir aussi la distance Euclidienne au carré qui est simplement le carré de la distance euclidienne.

— **Distance de Manhattan (City-block)** : Cette distance est simplement la somme des différences entre les différentes dimensions et se calcule ainsi :

$$d_{i,j} = \sum_{k=1}^n |x_{i,k} - x_{j,k}| \quad (\text{B.2})$$

— **Distance de Minkowski** : Paramétrée avec l'ordre m , la distance de Minkowski est une forme généralisée de différentes distances comme la distance euclidienne ou la distance de Manhattan... etc. Elle est définie comme:

$$d_{i,j} = \sqrt[m]{\sum_{k=1}^n |x_{i,k} - x_{j,k}|^m} \quad (\text{B.3})$$

— **Distance de Chebyshev** : Appelée aussi la distance maximale, la distance de Chebyshev est définie comme étant la plus grande différence sur les différentes dimensions. C'est un cas de la distance de Minkowski où $m = \infty$.

$$d_{i,j} = \max |x_{i,k} - x_{j,k}| \quad (\text{B.4})$$

Le choix de la distance reste une question primordiale dans les méthodes multivariées. Dans le cas du clustering, l'utilisateur doit utiliser ses connaissances préalables sur les données dont il dispose pour proposer une mesure de similarité pertinente, car ce choix a une forte influence sur les résultats. Dans la plupart des logiciels de clustering, c'est la distance euclidienne qui est la plus utilisée.

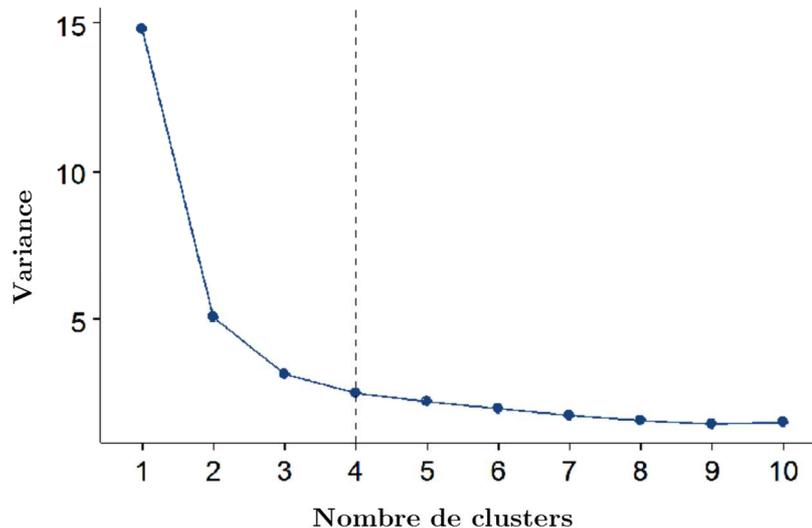


Figure B.1 — Algorithme « *Elbow* »

Par ailleurs, un deuxième paramètre important dans le k-means est le choix du nombre de clusters K . La valeur de K doit être spécifiée avant de lancer l'algorithme. Cependant, le choix n'est pas forcément intuitif notamment quand il s'agit d'un ensemble de données d'une dimension supérieure à trois. La méthode la plus usuelle pour choisir le nombre de clusters se base sur l'algorithme « *Elbow* » qui consiste à lancer le

k-means avec différentes valeurs de K et de calculer la variance des différents clusters [Kodinariya et Makwana, 2013]. La variance est la somme des distances entre chaque *centroïde* d'un cluster et les différentes observations incluses dans le même cluster. Ainsi, on cherche à trouver le nombre de clusters qui minimise cette variance et ainsi la distance intra-classe. Sur le graphe (cf. figure B.1), la valeur de K choisie représente le point du graphe à partir duquel la variance ne se réduit plus significativement.

L'idée principale de l'algorithme, après avoir choisi la valeur de K , le nombre de clusters, ainsi que la distance à utiliser, est de partitionner un ensemble de n points (x_1, x_2, \dots, x_n) en K classes $C = \{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ et associe un centre de cluster (centroïde) μ_i pour chaque classe, en minimisant, suivant un processus itératif (cf. figure B.2), une fonction objectif. Cette fonction est définie comme une somme carrée des distances entre chaque point et le centroïde de sa classe :

$$E = \sum_{i=1}^K \sum_{x_j \in C_i} \|x_j - \mu_i\|^2 \quad (\text{B.5})$$

ou: μ_i est le barycentre (centroïde) des points dans la classe C_i .

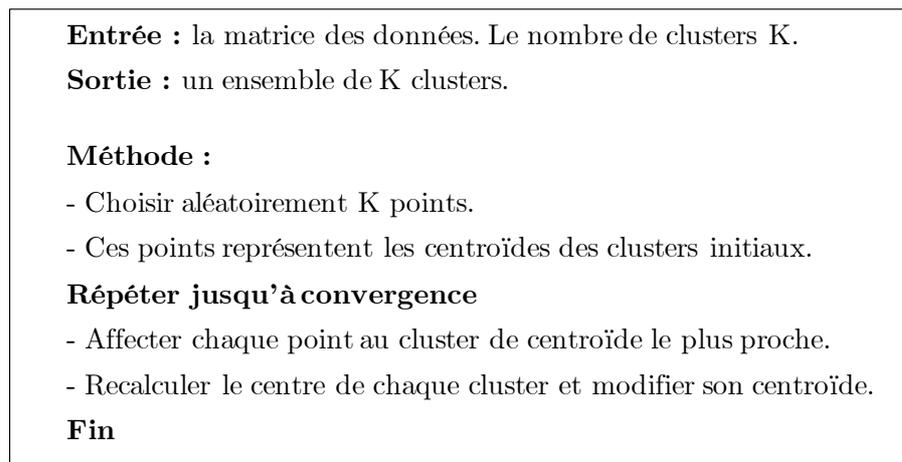


Figure B.2 — Algorithme de K-means

La condition de convergence de l'algorithme peut-être :

- *Un nombre d'itérations fixé à l'avance* : L'algorithme s'arrêtera, quelle que soit la forme des clusters résultants.
- *Stabilisation des clusters* : Les points ne changent plus de cluster lors des itérations.

L'algorithme de k-means est très populaire du fait qu'il est simple, rapide et facile à implémenter. De plus, il est efficace dans le cas des grands ensembles de données puisque sa complexité de calcul ne croît que de façon linéaire avec le nombre de points. Cependant, il est important de noter que les résultats de k-means ne sont pas uniques

vu qu'ils sont conditionnés par le choix des centroïdes initiaux. L'algorithme lancé avec des centroïdes aléatoires trouve à chaque fois des clusters différents. Cette instabilité dans la composition des classes en fonction de l'initialisation est l'inconvénient majeur de la méthode. L'algorithme ne permet donc pas de trouver la partition optimale, mais converge plutôt vers une partition localement optimale (minima locaux). De ce fait, plusieurs techniques ont été développées pour améliorer l'initialisation des centroïdes. Le *k-means*⁺⁺ est une des techniques d'initialisation les plus utilisées. Elle consiste à choisir un point aléatoire comme premier centroïde. Puis, les autres centroïdes sont calculés en se basant sur la probabilité de distances entre les nouveaux centroïdes et les centroïdes existants.

Enfin, comme les algorithmes de clustering, y compris le k-means, définissent des clusters qui ne sont pas connus a priori, le résultat final nécessite une certaine forme d'évaluation dans la plupart des applications. L'exactitude des résultats obtenus est évaluée et vérifiée à l'aide de critères et de techniques appropriés comme par exemple l'indice de silhouette. L'indice de silhouette [Rousseeuw, 1987] tient compte de la répartition des données dans les clusters et se calcule en fonction des distances intra et inter clusters. En effet, la répartition ayant la meilleure valeur moyenne de silhouette est la meilleure répartition, autrement dit, les clusters résultants sont bien séparés.

Annexe C

Théorie des graphes

Un graphe d'adjacence (G) est une structure modélisée par des sommets, reliés par des arcs. Les sommets représentent les faces, et les arcs représentent les arêtes. Le graphe (G) est obtenu à partir d'une matrice d'adjacence $A(G)$. Nous citons dans cette partie les différents paramètres et propriétés des graphes pour pouvoir les manipuler et les exploiter dans notre contexte [Anwer, 2000a].

■ Notations :

$A(G)$: Matrice d'adjacence du graphe G .

$V(G)$: Ensemble des sommets du graphe G .

$E(G)$: Ensemble des arcs du graphe G .

$m(G)$: Nombre d'arcs du graphe G .

$n(G)$: Nombre de sommets du graphe G .

$p(G)$: Nombre de composantes connexes du graphe G .

$\lambda(G)$: Nombre Cocyclomatique du graphe G .

$\vartheta(G)$: Nombre Cyclomatique du graphe G .

$deg(v)$: Degré du sommet v .

$\delta(G)$: Degré minimal du graphe G .

$\Delta(G)$: Degré maximal du graphe G .

■ **Définitions :**

— **Le degré :** Le degré d'un sommet est le nombre d'arêtes ayant pour extrémité ce sommet.

Soit :

$$\delta(G) = \min \{ \deg(v) \mid (v \in V(G)) \}$$

$$\Delta(G) = \max \{ \deg(v) \mid (v \in V(G)) \}$$

Si $\delta(G) = \Delta(G) = k$, le graphe est dit k -régulier.

— **Le nombre cyclomatique :** Le nombre cyclomatique est le nombre de cycles élémentaires de G . Il est défini par:

$$\vartheta(G) = m(G) - n(G) + p(G)$$

— **Le nombre cocyclomatique :** Le nombre cocyclomatique est le nombre de cocycles élémentaires de G . Il est défini par:

$$\lambda(G) = n(G) - p(G)$$

— **Une chaîne élémentaire :** Une chaîne élémentaire est une séquence alternée de sommets et d'arcs dont tous les sommets sont distincts (on ne traverse jamais deux fois le même sommet). Une chaîne élémentaire possède deux extrémités distinctes. Un graphe G est une chaîne élémentaire si et seulement si :

$$G \text{ est connexe avec } \delta(G) = 1 \text{ et } \Delta(G) = 2$$

— **Un cycle :** Un cycle est une chaîne fermée (les deux extrémités coïncident) simple (on ne traverse jamais deux fois une même arête). Un graphe G est un cycle si et seulement si :

$$G \text{ est connexe avec } \delta(G) = \Delta(G) = 2$$

— **Un cycle hamiltonien :** Un cycle hamiltonien est un cycle qui passe par tous les sommets du graphe. Un graphe simple G à n sommets et m arêtes admet un cycle hamiltonien s'il vérifie :

$$m(G) \geq ((n(G) - 1)(n(G) - 2))/2 + 2$$

— **Une arête pendante :** Une arête pendante est une arête incidente à un sommet de degré égal à 1.

Titre : Traitements géométriques et fouille de données pour la reconnaissance d'entités d'usinage complexes

Mots clés : Entité d'usinage, Formes complexes, STEP-NC, Fouille de données, Chaîne numérique, Mesure de similarités

Résumé :

Face à la concurrence et aux nouveaux enjeux industriels, la maîtrise du savoir-faire industriel de la chaîne numérique support des activités de développement de produits de l'entreprise deviennent alors une nécessité pour raccourcir le temps d'industrialisation des produits tout en en assurant une meilleure qualité.

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés dans cette thèse à la valorisation des données générées par la chaîne numérique pour la capitalisation des bonnes pratiques de conception de programmes d'usinage suivant une approche orientée entité. Nous avons ainsi identifié plusieurs problématiques liées à la caractérisation de l'entité d'usinage et l'exploitation des données de la chaîne numérique pour la structuration et réutilisation des données d'usinage dans le cas des formes complexes.

Pour répondre à ces problématiques, une nouvelle caractérisation de l'entité d'usinage complexe multi-niveaux a été proposée. Cette approche se distingue par une structuration hiérarchique des données de la chaîne numérique et une mise en correspondance par niveau entre les données géométriques et les données d'usinage. Une analyse statistique est ensuite effectuée pour traiter et exploiter ces données. Une segmentation à base de la courbure et un clustering statistique des données d'usinage ont été combinés pour définir une nouvelle approche de segmentation technologique orientée région. Ces régions ont servi à caractériser l'entité d'usinage et assurer ainsi la réutilisation des données d'usinage entre les pièces similaires à travers une approche orientée entité et une autre orientée région basée sur la mesure de similarité. Enfin, une application de la démarche globale a été réalisée sur un cas industriel de pièce en aéronautique.

Title : Geometric processing and data mining for freeform machining features recognition

Keywords : Machining feature, Free form, STEP-NC, Data mining, Digital chain, Similarity assessment

Abstract :

In response to competition and new industrial challenges, companies are forced to be more and more efficient, productive and competitive. Managing industrial know-how and the data flow of the manufacturing digital chain must be explored in order to shorten the industrialisation time while ensuring better quality.

In this context, this thesis focuses on digital chain data exploration for the capture of good practices in NC machining using a feature-based approach. Several issues related to machining feature characterisation and digital chain data exploitation for machining process knowledge reuse have been identified.

To address these issues, a new characterization of multi-level complex machining feature has been proposed. The proposed approach is characterized by a hierarchical structuring of digital chain data and a mapping between the geometrical and machining data. A statistical analysis is then carried out to analyse and exploit this data. Curvature-based segmentation and statistical clustering of machining data were combined to define new machining regions based technological segmentation approach. These regions were then used to characterize the machining feature and thus ensure the reuse of machining data through a feature based and a region based approach exploiting similarity measures a similarity measure. Finally, the developed approach was applied on an industrial case in aeronautics.