Université de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :
Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Génie mécanique, mécanique des matériaux

Présentée et soutenue par :
Sébastien MANDRILE

le : 14 novembre 2013 à Tarbes

Titre :

Optimisation du brochage des alvéoles de disque de turbine

Ecole doctorale :
Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés (MEGeP)

Unité de recherche :
Laboratoire Génie de Production de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes

Directeur(s) de Thèse :
Gilles DESSEIN, Professeur des Universités, LGP, ENIT
Jean DENAPE, Professeur des universités, LGP,ENIT

Rapporteurs :

Claire LARTIGUE, Professeur des universités, IUT de Cachan
Pascal MOGNOL, Professeur des universités,ENS Cachan

Membre(s) du jury :
Walter RUBIO, Professeur des universités, Université Paul Sabatier, Président
Raynald LAHEURTE, Maitre de conférences, IUT Bordeaux 1
Jean-Yves PARIS, Maitre de conférences, LGP, ENIT,Invité
Christophe LASSUS, Ingénieur, Turbomeca, Invité
Cyril VERNAULT, Docteur-Ingénieur, Turbomeca,Invité
Vincent DUTILH, Docteur-Ingénieur, Turbomeca,Invité

A mes parents,
à ma sœur,
à Francine.

"Il faut à l'ingénieur une certaine dose de courage ou d'audace pour aller à contre-courant,
laissant les gens trop sages nommer cela imprudence, témérité, inconscience ou folie.
Mais le but d'une existence d'homme n'est pas de recueillir l'appui de gens trop sages.
C'est d'avoir porté et transmit le relais."

Pierre Bézier

Remerciements

Je remercie Walter RUBIO, professeur des universités à l'Université Paul Sabatier, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse. Je remercie aussi les rapporteurs de cette dernière, Claire LARTIGUE, professeur des universités à l'IUT de Cachan, et Pascal MOGNOL, professeur des universités à l'ENS de Cachan, ainsi que Raynald LAHEURTE, maître de conférences à l'IUT de Bordeaux, pour leur lecture attentive, commentaires et questions pertinentes.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude envers mes encadrants de thèse du LGP de Tarbes, Gilles DESSEIN, professeur des universités, Jean DENAPE, professeur des universités, et Jean-Yves PARIS, maître de conférences, pour m'avoir toujours soutenu et avoir exigé de moi le meilleur pendant ces trois dernières années.

Je n'oublie pas Gilles CAZENAVE-LARROCHE, ingénieur chef de service ingénierie chez Turbomeca, sans qui ces travaux n'auraient pas vu le jour puisqu'il est à l'origine de ce projet. Je le remercie aussi pour la confiance qu'il m'a accordée durant cette thèse, même lorsque je lui ai proposé d'aller à l'encontre des normes de conception pour améliorer les outils de brochage, ainsi que pour les responsabilités qu'il a su m'accorder par la suite.

Je voudrais remercier Cyril VERNAULT et Vincent DUTILH, docteurs ingénieurs au département matériaux procédés chez Turbomeca, pour avoir suivi de près les questions d'intégrité de surface et de surveillance durant cette thèse et pour leur soutien et nombreux conseils d'anciens doctorants.

Mes remerciements se dirigent aussi vers Christophe LASSUS, ingénieur chef de département des ensembles tournants chez Turbomeca, dont l'écoute et les décisions justes m'ont aidé dans l'avancement de ce projet.

Il m'est impossible de ne pas mentionner mes collègues de bureau du groupe outils coupants, Jean-Patrick LAFONTAINE, Mathieu BORDE, Julien LOUIS, Lillian COY, Jean-Paul CASABON et Philippe GARCIA que je remercie pour leur accueil chaleureux, leur bonne humeur quotidienne et nombreux coups de main, mais surtout pour avoir supporté de voir tous les jours des tableaux remplis d'équations et de calculs bizarres pendant ces trois années.

Merci à tous mes collègues doctorants du laboratoire de Tarbes, Vincent, Florent, Corentin, Malik, Andrei et Romain pour les bons moments passés ensemble et nos longues discussions sur la coupe… Ainsi qu'à Marina FASINI, maître de conférences au LGP, pour son aide précieuse pour filmer la formation du coupeau en brochage.

Je voudrais aussi remercier mes parents et ma sœur pour leur soutien sans limite ainsi que Francine qui, en plus d'avoir relu ma thèse de nombreuses fois pour en corriger l'orthographe, m'apporte de l'amour et de la tendresse au quotidien.

Table des matières

Introduction 1

Chapitre 1 Usinabilité de L'Udimet 720®, vision à l'échelle mésoscopique 5

I Objectif de ce chapitre **7**

II Utilisation et élaboration de l'Udimet720® **8**

II.1 Utilisation de l'Udimet 720® 8

II.2 Propriétés de l'Udimet 720® 10

II.2.a Caractéristiques métallurgiques 10

II.2.b Propriétés mécaniques et thermique 12

II.3 Elaboration de l'Udimet 720® 13

III L'usinage de l'Udimet 720® **16**

III.1 La coupe 17

III.1.a La modélisation de la coupe 19

III.1.b Modélisation de la coupe orthogonale 20

III.1.c Modélisation de la coupe oblique 22

III.2 L'usinage des bases nickel et de l'Udimet720® 23

III.3 Cas spécifique de l'usinage en brochage, usinabilité et vision à l'échelle mésoscopique 24

IV Essais de coupe de l'Udimet720® pour une étude à l'échelle mésoscopique dans le cas du brochage **27**

IV.1 Essais préliminaires de brochage 27

IV.1.a Plan d'expériences 27

IV.1.b Résultats expérimentaux 30

IV.1.c Bilan des essais préliminaires 35

IV.2 Deuxième campagne d'essais, pour une extension des modèles 35

IV.2.a Procédure expérimentale 36

IV.2.b Résultats expérimentaux 37

IV.2.c Modélisation empirique de la coupe 41

IV.3 Evaluation de l'influence du matériau sur les efforts de coupe 42

V Bilan **44**

Chapitre 2 Compréhension et dimensionnement des broches pied de sapin 45

I Objectif de ce chapitre 47

II Présentation industrielle et bibliographique des broches pied de sapin 48

II.1 Les alvéoles pied de sapin 48

II.2 La fabrication des alvéoles pied de sapin 48

II.2.a Usinage des alvéoles pied de sapin par fraisage 50

II.2.b Usinage des alvéoles pied de sapin par rectification 51

II.2.c Usinage des alvéoles pied de sapin par jet d'eau 51

II.2.d Usinage des alvéoles pied de sapin par électroérosion 52

II.2.e Bilan des procédés alternatifs dans le cadre de notre étude 53

II.3 Les broches et brocheuses 53

II.4 Les broches pied de sapin 55

III Bibliographie des méthodes de dimensionnement des broches 60

III.1 Méthodes métiers 60

III.2 Optimisations multicritères 62

III.3 Simulations par éléments finis 65

III.4 Bilan des méthodes de dimensionnement des broches pour optimiser le procédé 66

IV Développement d'un simulateur des efforts de coupe en brochage 67

IV.1 Bibliographie de la simulation des efforts de coupe en usinage 67

IV.2 Méthode de calcul géométrique 68

IV.3 Paramètres caractérisant la broche 70

IV.4 Lois de coupe 72

IV.5 Simulation du brochage 73

IV.5.a Algorithme de simulation 73

IV.5.b Discussion des résultats 75

IV.5.c Utilisation du simulateur 77

V Bilan 80

Chapitre 3 Application industrielle 83

I Objectifs de ce chapitre ... 85

II Essais de coupe du point de vue macroscopique ... 86

II.1 Installations expérimentales ... 86

II.2 Essais de coupe avec une broche pied de sapin ... 87

III Comparaison entre la simulation et les essais de coupe ... 88

III.1 Comparaison simulation-mesure ... 88

III.2 Simulation de défauts et mesures de broches ... 92

III.2.a Défaut de forme de l'alvéole ... 93

III.2.b Défaut d'alignement entre l'ébauche et la finition ... 94

III.2.c Défaut d'avance par dent ... 96

III.2.d Défaut de rectitude ... 98

III.3 Conclusion sur l'influence des défauts ... 102

IV Caractérisations métallurgiques et géométriques des alvéoles ... 103

IV.1 Géométrie de l'alvéole ... 103

IV.1.a Etude bibliographique de la qualité géométrique des pièces brochées ... 103

IV.1.b Mesures utilisées dans le cadre de notre étude ... 104

IV.1.c Confrontation géométrie/efforts ... 107

IV.2 Intégrité de surface ... 107

IV.2.a Etat de l'art de l'intégrité de surface des pièces brochées ... 107

IV.2.b Mesures réalisées dans le cadre de cette étude ... 109

IV.3 Essais en fonction du pas de la broche ... 110

IV.4 Conclusion sur la qualité des pièces brochées ... 112

V Proposition d'une re-conception des broches à l'aide des essais et de la simulation ... 113

V.1 Les paramètres du point de vue de la coupe ... 113

V.2 Les paramètres du point de vue de la structure de la broche ... 114

V.3 Les paramètres du point de vue de la stratégie d'usinage ... 115

V.4 La broche reconçue ... 117

V.5 Conclusion sur la conception des outils de brochage ... 118

VI Bilan ... 119

Chapitre 4 Surveillance en usinage du brochage des alvéoles pied de sapin 121

I Objectifs de ce chapitre 123

II Etude bibliographique de la surveillance en usinage, application au brochage 124

II.1 Introduction à la surveillance en usinage 124

II.2 Choix des capteurs pour de la surveillance en usinage 125

II.2.a Mesures des efforts 125

II.2.b Mesures des vibrations 126

II.2.c Mesures acoustiques 126

II.2.d Mesures des déplacements 127

II.2.e Mesures des températures 127

II.2.f Mesures des puissances et des courants 128

II.2.g Bilan et choix des capteurs pour notre étude 129

II.3 Les méthodes de diagnostic 131

II.3.a Méthodes spécifiques à la pièce 132

II.3.b Méthodes génériques 133

II.3.c Sélection des méthodes de diagnostic pour notre étude 137

III Le système installé sur la brocheuse 138

III.1 Architecture 138

III.2 Précision du capteur d'effort 140

III.3 Recalage des courbes 141

IV Etude de cas 142

IV.1 Suivi de différentes séries d'un même type de pièce 142

IV.1.a Analyse générale 142

IV.1.b Types d'incidents étudiés 144

IV.1.c Méthode de surveillance par apprentissage 147

IV.1.d Méthode de surveillance prédictive (par simulation) 149

IV.1.e Méthode de surveillance par traitement du signal 150

IV.2 Proposition de surveillance 154

V Bilan 156

Conclusions et perspectives **157**

Bibliographie **163**

Annexes **173**

A.1 Régréssions linéaires des essais de brochage 174

A.2 Régréssions linéaires des essais de tournage 184

Table des Illustrations

Introduction **1**

figure 1 Articulation des Chapitres 3

Chapitre 1 Usinabilité de L'Udimet 720®, vision à l'échelle mésoscopique **5**

figure I-1 Répartition des différents alliages constituant un turbomoteur, document Turbomeca 8

figure I-2 a) Evolutions réelles des variables P, T et V au sein d'un turbomoteur b) Modélisation des transformations thermodynamiques 9

figure I-3 Contrainte à la rupture pour 1000 heures, pour les trois types d'alliages réfractaires d'après [Bailon2000] 10

figure I-4 Schéma des principaux éléments constituant l'Udimet 720® d'après [Reed1999] 11

figure I-5 Evolution du module d'Young de l'Udimet 720® en fonction de la température 12

figure I-6 Capacité thermique massique de l'Udimet 720® en fonction de la température 12

figure I-7 Conductibilité thermique de l'Udimet 720® fonction de la température 13

figure I-8 Procédés d'élaboration de l'Udimet 720® d'après [Devaux 2004] : a) fusion sous vide b) fusion sous laitier c) refusion à l'arc sous vide 14

figure I-9 Forgeage des disques de turbine [Devaux2004] : a) par matrices fermées b) par matrices libres 15

figure I-10 Echelles d'études pour le brochage 17

figure I-11 Illustration schématique des zones sollicitées durant la coupe d'après [Perrin2007] 18

figure I-12 Historique de la modélisation de la coupe d'après [Germain2011] 19

figure I-13	Modélisation de la coupe orthogonale pour un outil ayant une acuité parfaite [Merchant1945] a) bande et angles de cisaillement b) résultantes des efforts c) odographe des vitesses	21
figure I-14	a) Modélisation par éléments finis de la déformation plastique durant une opération de brochage b) Tableau de comparaison des efforts entre essais et modélisation d'après [Ozturk2003]	26
figure I-15	a) Evolution des températures de coupe en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance par dent b) Evolution de l'usure des broches en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance par dent	26
figure I-16	Schéma du dispositif expérimental installé sur la brocheuse	28
figure I-17	Eprouvette de brochage pour essais de coupe orthogonale	29
figure I-18	Schéma d'une de brochage pour essais de coupe orthogonale	29
figure I-19	a) Evolution des efforts de coupe en fonction du temps durant les essais de coupe orthogonale b) Image extraite des vidéos par caméra rapide, quand le copeau est en régime établi (zone 5)	30
figure I-20	Evolution de l'épaisseur du copeau fonction de sa longueur	31
figure I-21	Evolution des efforts sur deux dents consécutives durant un usinage en copeau mini	32
figure I-22	Images illustrant l'usinage en copeau mini : a) raclage de l'outil sur la pièce (zone a) b) début de formation du copeau (zone b) c) production d'un copeau de morphologie atypique (zone c)	32
figure I-23	Evolution des efforts spécifiques : a) Kt en fonction de f et ? b) Kr en fonction de f et ? c) Kt en fonction de f et Vc d) Kr en fonction de f et Vc	34
figure I-24	Schéma des essais de coupe orthogonale : a) essai de coupe sur disque b) essai de coupe sur tube c) variation de contact en dépouille entre le tube et le disque	36
figure I-25	Dessin de l'éprouvette tube pour essais de coupe orthogonale en tournage	37
figure I-26	Efforts calculés à partir de la deuxième modélisation empirique en brochage et tournage	38
figure I-27	Evolution de l'effort de coupe fonction de Vc, f et γ : a) Ft b) Fr	39
figure I-28	Evolution de l'épaisseur copeau h fonction de Vc, f et γ	40

figure I-29 a) Mesure de la longueur de contact sur la face de coupe lc b) Longueur de la face de coupe sur une dent de broche 40

figure I-30 Evolution de la longueur de contact sur la face de coupe lc fonction de Vc, f et γ 41

figure I-31 Evolution de l'effort tangentiel en fonction de l'avance par dent mesurée et du cycle de traitement thermique 43

Chapitre 2 Compréhension et dimensionnement des broches pied de sapin 45

figure II-1 Assemblage pales disque 48

figure II-2 a) Schéma des alvéoles pied de sapin échelle 3 :1 b) Alvéole pied de sapin échelle 1 :1 49

figure II-3 a) Fraisage d'alvéole courbe b) Fraises pied de sapin d'après Seco® 50

figure II-4 a) Schéma de rectification des alvéoles pied de sapin b) Meule et disque en cours d'usinage d'après Makino® 51

figure II-5 Alvéole usinée au jet d'eau abrasif d'après le brevet [El-Wardany2008a] 52

figure II-6 Différents types de formes brochées d'après [Bellais 1997] : a) extérieur b) intérieur 53

figure II-7 Schéma des éléments caractérisant une broche 54

figure II-8 Classification des brocheuses, suivant [Bellais1998] 54

figure II-9 Schéma des axes de la brocheuse d'alvéoles pied de sapin, réalisé sous OpenMeca® 55

figure II-10 a) Carte de coupe b) Séquences d'usinage sur un disque 56

figure II-11 Eléments d'ébauche d'une broche pied de sapin 56

figure II-12 Eléments de finition d'une broche pied de sapin : a) broche sapin b) broche de calibrage c) broche zigzag 57

figure II-13 Vues de détail d'une broche sapin 58

figure II-14 Variation des angles de coupe pour une dent : a) d'une broche sapin b) d'une broche de calibrage 59

figure II-15	Explication de la règle de conception limitant les valeurs du pas (P) d'après [Bellais1997]	62
figure II-16	Résultat donné par l'algorithme initialement proposé par [Ozturk2003]	64
figure II-17	Méthodologie de conception des alvéoles pied de sapin par éléments finis, d'après [El-Wardany2009c]	65
figure II-18	a) Ebauche et finition de l'alvéole b) Tracé des dents de la broche	69
figure II-19	a) Tracé des vecteurs axiaux et radiaux d'un point d'une dent b) Tracé de f et b d'un point d'une dent	71
figure II-20	Tracé de l'angle d'affûtage de la chambre à copeau.	71
figure II-21	a) Vue en trois dimensions de la face de coupe d'une dent de la broche b) Variation de γ le long de l'arête	72
figure II-22	Section représentant la broche usinant le disque de turbine	74
figure II-23	a) Courbes d'efforts issues du simulateur b) Courbes d'efforts issues de mesures	75
figure II-24	Comparaison des modèles : a) deuxième modèle empirique b) modèle mécanistique	76
figure II-25	Différences d'efforts entre le deuxième modèle empirique et le modèle mécanistique	76
figure II-26	Courbes d'efforts issues du simulateur pour localiser sur la broche les pics d'effort	78
figure II-27	Représentation des cinq zones caractéristiques des efforts	78
figure II-28	Broches ébauchant l'œilleton : a) avec θaffutage =90° b) avec θaffutage =12°	79
figure II-29	Schéma récapitulatif des étapes de la simulation des efforts	81

Chapitre 3 Application industrielle 83

figure III-1	a) Montage expérimental permettant de brocher les alvéoles pied de sapin b) Alvéole pied de sapin	87
figure III-2	a) Courbes d'efforts issues du simulateur b) Courbes d'efforts issues de mesures	88

figure III-3	Corrélation simulation/mesures : a) axe x b) axe y c) axe z	89
figure III-4	Pourcentage d'erreur de la simulation par rapport à la mesure : a) axe x b) axe y c) axe z	89
figure III-5	Superposition des efforts simulation/mesure	90
figure III-6	a) Courbes d'efforts issues du simulateur b) Courbes d'efforts issues de mesures	91
figure III-7	a) Courbes d'efforts issues du simulateur b) Courbes d'efforts issues de mesures	91
figure III-8	Schéma de la reconstruction de l'alvéole par une courbe cubique polynomiale à partir du balayage MMT	93
figure III-9	a) Courbes d'efforts simulées avec la forme théorique de l'alvéole b) Courbes d'efforts simulées avec la forme mesurée	93
figure III-10	Intervalle de tolérance des efforts en fonction de l'intervalle de tolérance de la forme de pied de sapin	94
figure III-11	a) Courbes d'efforts issues du simulateur avec ébauche et finition alignées b) Courbes d'efforts issues du simulateur avec ébauche et finition désalignées de 0,05 mm	95
figure III-12	Intervalle de variation des efforts dû au décalage entre l'ébauche et la finition	95
figure III-13	Mesure de l'avance par dent : a) Schéma de principe b) Histogramme de la population de l'avance par dent c) influence de l'avance par dent sur les efforts	96
figure III-14	a) Courbes d'efforts issues du simulateur avec une progression parfaite b) Courbes d'efforts issues du simulateur avec une progression réelle implémentée	97
figure III-15	Intervalle de variation des efforts dû à l'intervalle de fabrication de l'avance par dent	97
figure III-16	Essais de rectitude de l'outil a) outil sans défaut de rectitude ajouté, b) outil avec un défaut de rectitude dans la partie haute, c) outil avec un défaut de rectitude dans la partie basse	98
figure III-17	Analyse de la rectitude sans défaut ajouté (cas a) : a) courbes d'efforts issues du simulateur b) courbes d'efforts issues de mesures	100

figure III-18 Analyse de la rectitude avec défaut ajouté sur la partie haute de la broche (cas b) : a) courbes d'efforts issues du simulateur b) courbes d'efforts issues de mesures 100

figure III-19 Analyse de la rectitude avec défaut ajouté sur la partie basse de la broche (cas c) : a) Courbes d'efforts issues du simulateur b) Courbes d'efforts issues de mesures 100

figure III-20 Intervalle de variation des efforts due au défaut de rectitude 101

figure III-21 Mesure de rectitude de l'alvéole d'après [Axinte2007] 103

figure III-22 Enveloppe de tolérance du profil d'une alvéole pied de sapin 105

figure III-23 Mesure par palpeur fibro-optique : a) schéma de principe b) photographie d'un disque en cours de mesure (document Turbomeca) 106

figure III-24 Mesure de rectitude des alvéoles : a) balayage b) côtes sur billes c) rectitude des billes 106

figure III-25 Confrontation entre les efforts suivant l'axe x et la de rectitude de l'alvéole brochée 107

figure III-26 a) Micrographie d'une éprouvette d'Udimet 720® b) Schéma de mesures de dureté 109

figure III-27 Cas d'étude 110

figure III-28 Simulation des efforts pour différentes longueurs à brocher a) 12mm, b) 16mm, c) 20mm 111

figure III-29 Mesure des efforts pour différentes longueur à brocher a) 12mm, b) 16mm, c) 20mm 112

figure III-30 Influence de l'angle d'affutage sur l'âme de la broche 115

figure III-31 a) Broche à denture décalée b) Broche à denture droite 115

figure III-32 Influence de la stratégie d'usinage, cas actuel a) carte de coupe b) efforts de coupe 116

figure III-33 Influence de la stratégie d'usinage, ébauche droite a) carte de coupe b) efforts de coupe 116

figure III-34 Influence de la stratégie d'usinage, ébauche forme a) carte de coupe b) efforts de coupe 117

figure III-35 a)Courbes d'efforts mesurées sur la broche d'ancienne conception b) Courbes d'efforts mesurées sur la broche reconçue 118

figure III-36 Mesures de rectitude des alvéoles : a) broche d'ancienne conception b) broche reconçue 118

Chapitre 4 Surveillance en usinage du brochage des alvéoles pied de sapin 121

figure IV-1 Principe de fonctionnement d'un système de surveillance en usinage d'après [Ritou2006a] 124

figure IV-2 Pourcentage d'utilisation des capteurs dans la littérature d'après [Abellan-Nebot2010] 125

figure IV-3 Schéma cinématique du coulisseau 129

figure IV-4 Récapitulatif de l'efficacité des signaux suivant le type d'incident d'après [Axinte2002] 129

figure IV-5 Capteurs utilisés pour surveiller des incidents de brochage d'après [Shi2007a] 130

figure IV-6 Classification des méthodes de diagnostic d'après [Ritou2006a] 131

figure IV-7 Méthodologie de surveillance par méthode prédictive d'après [Saturley2000] 133

figure IV-8 Répartition de l'utilisation des méthodes par intelligence artificielle d'après [Abellan-Nebot2010] 135

figure IV-9 Mesure d'effort avec le système de surveillance d'origine 138

figure IV-10 Chaîne de mesure des efforts implantés sur la brocheuse en production 139

figure IV-11 Schéma représentant l'essai de corrélation entre la platine d'effort et le capteur de la brocheuse 140

figure IV-12 a) Mesures des 2 capteurs b) Corrélation platine/capteur intégré c) Histogramme des erreurs 140

figure IV-13 Utilisation de l'algorithme de corrélation croisée a) avant recalage b) après recalage 141

figure IV-14 Analyse fréquentielle des signaux, à l'arrêt 142

figure IV-15 Analyse fréquentielle des signaux quand la broche se déplace sans usiner 143

figure IV-16 Analyse fréquentielle des signaux quand la broche coupe 143

figure IV-17 Variation de la mesure d'effort : a) sur une broche b) zoom sur une zone non usinante 144

figure IV-18 Mesure d'efforts issues du capteur sur deux séries de pièces : a) sans usure catastrophique b) avec usure catastrophique de trois dents 145

figure IV-19 Ratio d'efforts issues du capteur sur deux séries de pièces : a) sans usure catastrophique b) avec usure catastrophique de trois dents 145

figure IV-20 a) Usure en dépouille classique b) Usure catastrophique 146

figure IV-21 Mesures du profil de l'alvéole a) sans usure catastrophique b) avec usure catastrophique 147

figure IV-22 Rupture soudaine d'une broche a) vue d'ensemble b) agrandissement sur la rupture à 16,5 s 147

figure IV-23 Méthode de surveillance par apprentissage, sans détection de rupture de broche 148

figure IV-24 Développement de courbes étalons en utilisant la simulation des efforts 149

figure IV-25 Surveillance par moyenne et écart-type, détection d'usure catastrophique 151

figure IV-26 Calcul de la variance du signal a) efforts bruts b) ratio des efforts 152

figure IV-27 Calcul de la dérivée du signal 153

figure IV-28 Calcul de la dérivée du signal pour détecter un événement soudain, tel qu'une rupture d'outil 154

figure IV-29 Test logique de surveillance 155

Liste des tableaux

Chapitre 1 Usinabilité de L'Udimet 720®, vision à l'échelle mésoscopique 5

Tableau I-1 Eléments constituant l'Udimet 720® 11

Tableau I-2 Valeurs issues des essais mécaniques réalisés à 20°C durant notre étude 12

Tableau I-3 Traitements thermiques utilisés dans le cadre de cette étude 15

Tableau I-4 Plan d'expériences pour essais de coupe orthogonale 28

Tableau I-5 Plan d'expériences pour les essais de coupe orthogonale en tournage 37

Tableau I-6 Variation de *Ft* en fonction de l'avance par dent et du cycle de traitement thermique 42

Chapitre 3 Application industrielle 83

tableau III-1 Différences d'efforts suivant l'axe z pour la simulation et la mesure à partir d'un défaut de rectitude 99

tableau III-2 Configurations d'essais de la rectitude des alvéoles en fonction du pas de la broche 110

tableau III-3 Valeur d'angle d'affutage et de rayon de meule pour l'âme de la broche 115

Liste des notations

b	Largeur de copeau [mm]
f	Avance par dent [mm]
h	Epaisseur du copeau [mm]
P	Pas de la broche [mm]
ep	Epaisseur de la pièce [mm]
lp	Longueur à brocher [mm]
m	Nombre de dents en prise [mm]
$r_{goujure}$	Rayon de goujure d'une dent [mm]
c	Profondeur de la chambre à copeau [mm]
X	Rapport de remplissage de la chambre à copeau [ ]
l_b	Longueur de la broche [mm]
$T_{alvéole}$	Temps total pour usiner une alvéole [s]
T_u	Temps pour usiner une alvéole [s]
T_r	Temps de rotation de la brocheuse [s]
$\theta_{affutage}$	Angle d'affûtage de la face de coupe [°]
T, N	Efforts (tangentiel et radial) sur la face de coupe [N]
F_s, F_{ns}	Efforts dans le plan de cisaillement [N]
F_x, F_y, F_z	Efforts dans le repère $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ [N]
F_t, F_r, F_a	Efforts tangentiel, radial et axial [N]
F_{tc}, F_{rc}, F_{ac},	Efforts (tangentiel, radial et axial) de la face de coupe [N]
F_{te} , F_{re}, F_{ae}	Efforts (tangentiel, radial et axial) de l'arête de coupe [N]
K_t, K_r	Efforts spécifiques (tangentiel, et radial) [MPa]
K_{tc}, k_{rc}, K_{ac}	Efforts spécifiques (tangentiel, radial et axial) de la face de coupe [MPa]
K_{te}, k_{re}, K_{ae}	Efforts spécifiques (tangentiel, radial et axial) de l'arête de coupe [MPa]
γ_n, γ_o	Angles de coupe (normal et axial) [°]

$Y_{discrétisation_{yy\times1}}$	Vecteur de discrétisation de l'alvéole suivant l'axe y [mm]
$X_{Broche_{yy\times n}}$	Matrice des abscisses de chaque point de la broche [mm]
$f_{yy\times n}$	Matrice des avances de chaque point de la broche [mm]
$\lambda_{s_{yy\times n}}$	Matrice de l'angle d'inclinaison d'arête de chaque point de la broche [mm]
$\gamma_{n_{yy\times n}}$	Matrice de l'angle de coupe de chaque point de la broche [mm]
$b_{yy\times n}$	Matrice des largeurs de copeau de chaque point de la broche [mm]
λ_s	Angle d'inclinaison d'arête [°]
ϕ	Angle de cisaillent primaire [°]
β	Coefficient de frottement sur la face de coupe [°]
k_{ab}	Contrainte dans le plan de cisaillement primaire [MPa]
r	Rapport de compression du copeau [ ]
lc	Longueur de contact du copeau sur la face de coupe [mm]
V_c	Vitesse de coupe [m/min]
V_s	Vitesse de cisaillement [m/min]
V_{cop}	Vitesse du copeau [m/min]
γ'_p	Phase gama prime primaire de l'Udimet 720®
γ'_s	Phase gama prime secondaire de l'Udimet 720®
γ'_t	Phase gama prime tertiaire de l'Udimet 720®
C_p	Capacité thermique massique [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]
K	Conductivité thermique [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
$freq_{dent}$	Fréquence de passage des dents de la broche [Hz]
r_{ij}	Critère de corrélation croisée [ ]
d_{ij}	Déphasage de deux signaux [s]

Introduction

L'augmentation constante des performances des turbomachines impose très souvent aux motoristes aéronautiques de remettre en question les procédés de fabrication utilisés pour usiner des pièces de plus en plus complexes. La généralisation de matériaux à hautes caractéristiques mécaniques et thermiques, sollicités en fatigue dans les turbomachines, apporte aussi des difficultés supplémentaires lors de la fabrication des pièces constitutives des moteurs.

Une des avancées majeures dans le domaine des turbomachines a été de remplacer les disques de turbines monoblocs par un assemblage constitué d'un disque et de pales, pour optimiser ces deux zones de la turbine qui sont différemment sollicitées thermomécaniquement. Cet assemblage a permis l'utilisation de palles monocristallines (résistantes au fluage) et de disques de turbine possédant une microstructure très fine (résistante aux contraintes mécaniques). Les disques de turbines sont réalisés en superalliage base nickel, matériaux réputés depuis longtemps pour leur faible usinabilité.

La liaison mécanique entre la pale et le disque de turbine est opérée par une alvéole pied de sapin (sur le disque), dans laquelle vient se loger un pied de sapin (pour la palle). L'alvéole pied de sapin dans le disque de turbine est usinée en brochage, sujet de ces travaux de thèse. Le brochage est l'unique procédé utilisé par Safran Turbomeca depuis les années 1950 pour réaliser ces alvéoles très complexes où l'intégrité de surface et les tolérances dimensionnelles et géométriques sont les principales spécifications assurant la qualité de la pièce soumise à de très fortes sollicitations thermomécaniques dans un environnement vibratoire et corrosif.

La technologie de brochage est actuellement la plus employée par les motoristes aéronautiques car historiquement elle était l'unique procédé capable de réaliser avec précision ce type d'alvéole. Aujourd'hui, d'autres moyens se sont développés mais le brochage reste la technique la plus productive et la moins onéreuse grâce à des temps d'usinage jusqu'à dix fois plus court que d'autres procédés [Klocke2013]. Cependant, cette technologie de fabrication, aussi ancienne que le procédé de rabotage, n'a pas évolué aussi vite que les matériaux qui, eux, deviennent de plus en plus performants et difficiles à usiner. Devant cette évolution à deux vitesses, certains matériaux ont acquis la réputation d'être difficilement brochables, imposant aux motoristes de réduire les vitesses de coupe tout en observant une forte diminution de la durée de vie des outils allant d'un facteur 2 à 10 pour certains nouveaux matériaux.

Notre démarche se place donc dans un cadre industriel fort, elle vise à apporter une meilleure compréhension et des solutions, pour optimiser les conditions opératoires de brochage et améliorer la qualité des alvéoles brochées, ainsi qu'à proposer une surveillance du procédé de brochage afin de suivre l'usure des broches.

Pour ce faire, ce mémoire est articulé autour de quatre chapitres (figure 1).

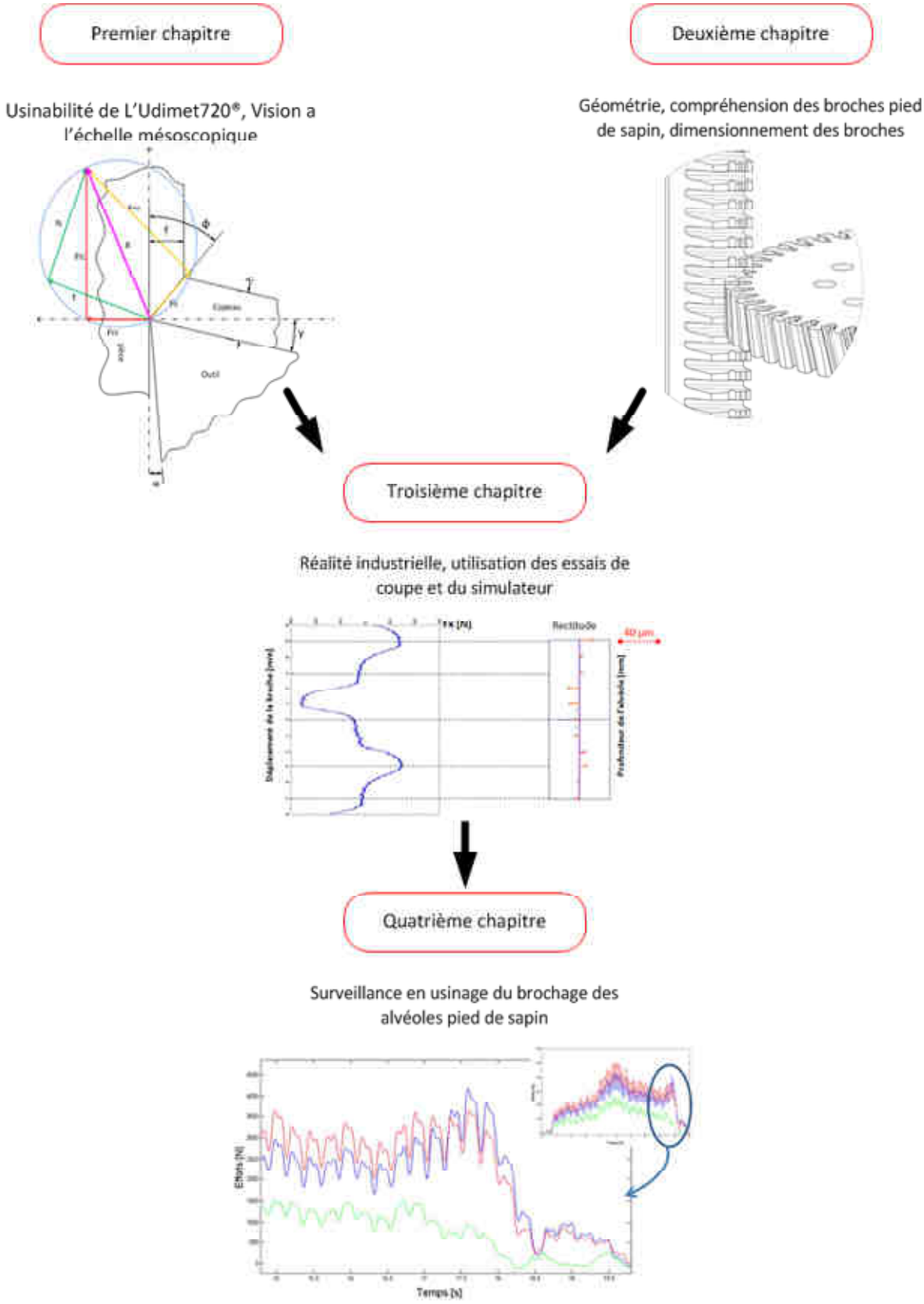


figure 1 Articulation des chapitres

Le premier chapitre (page 5) introduira les caractéristiques physiques et les phénomènes de coupe du matériau usiné, sous l'appellation commerciale Udimet 720®(NC18K15TDA). Il s'agit d'un matériau de plus en plus utilisé par les motoristes aéronautiques grâce à sa tenue mécanique à haute température. Par rapport à des matériaux base nickel comme L'Inconel 718® (NC19FeNb) où les études sur l'usinage sont nombreuses et souvent renouvelées, la coupe de l'Udimet 720® a été peu étudiée, il nous était donc nécessaire de disposer de modèles pour appréhender le brochage de ce matériau. Pour le lecteur, le brochage pied de sapin ne sera pas directement abordé, et nous nous concentrerons sur une vision mésoscopique de la coupe, c'est-à-dire à l'échelle d'une seule arête de l'outil.

Le deuxième chapitre (page 45) apportera au lecteur la définition des broches pied de sapin, progressivement en partant du cas général du brochage pour arriver au cas complexe que représentent les broches pied de sapin. Nous passerons donc à l'échelle macroscopique grâce à la simulation des efforts de coupe qui utilise la sommation des efforts élémentaires définis au chapitre précédent.

Le troisième chapitre (page 83) s'intéressera aux efforts générés par une broche pied de sapin ainsi que leurs conséquences sur la pièce usinée, avec une comparaison et analyse des résultats apportés par le simulateur. A partir de ces constatations, une re-conception des outils de brochage sera proposée afin d'améliorer la qualité des alvéoles produites.

Le quatrième chapitre (page 121) terminera cette étude par la définition et l'évaluation de plusieurs méthodes de surveillance en usinage. Celle qui sera retenue mettra sous contrôle le procédé de brochage afin de garantir la qualité des alvéoles brochées.

Une synthèse finale (page 157) de ces travaux ouvrira sur les perspectives scientifiques et industrielles associées à cette étude.

Premier chapitre

Usinabilité de l'Udimet 720®, vision à l'échelle mésoscopique

Table des matières

I Objectif de ce chapitre 7

II Utilisation et élaboration de l'Udimet720® 8

II.1 Utilisation de l'Udimet 720® 8

II.2 Propriétés de l'Udimet 720® 10

II.2.a Caractéristiques métallurgiques 10

II.2.b Propriétés mécaniques et thermique 12

II.3 Elaboration de l'Udimet 720® 13

III L'usinage de l'Udimet 720® 16

III.1 La coupe 17

III.1.a La modélisation de la coupe 19

III.1.b Modélisation de la coupe orthogonale 20

III.1.c Modélisation de la coupe oblique 22

III.2 L'usinage des bases nickel et de l'Udimet720® 23

III.3 Cas spécifique de l'usinage en brochage, usinabilité et vision à l'échelle mésoscopique 24

IV Essais de coupe de l'Udimet720® pour une étude à l'échelle mésoscopique dans le cas du brochage 27

IV.1 Essais préliminaires de brochage 27

IV.1.a Plan d'expériences 27

IV.1.b Résultats expérimentaux 30

IV.1.c Bilan des essais préliminaires 35

IV.2 Deuxième campagne d'essais, pour une extension des modèles 35

IV.2.a Procédure expérimentale 36

IV.2.b Résultats expérimentaux 37

IV.2.c Modélisation empirique de la coupe 41

IV.3 Evaluation de l'influence du matériau sur les efforts de coupe 42

V Bilan 44

I Objectif de ce chapitre

Le matériau de cette étude, le NC18K15TDA (norme AFNOR), plus couramment désigné par son appellation commerciale Udimet 720® ou PER72®, est un superalliage base nickel utilisé dans les parties chaudes des turbomachines. Il est de plus en plus employé par les motoristes aéronautiques mais le nombre de travaux sur ce matériau est faible. En outre, le brochage est un procédé utilisant des conditions de coupe particulières, avec des vitesses de coupe et des prises de copeau très faibles. Ces deux particularités (matériau et conditions de coupe) constituent l'originalité de notre étude.

Notre objectif étant d'améliorer la performance du procédé de brochage, il nous est alors nécessaire, dans un premier temps, d'étudier la coupe de ce matériau pour pouvoir modéliser les efforts et disposer d'informations de base permettant de trouver des paramètres opératoires optimaux pour nous consacrer, durant les prochains chapitres, à d'autres aspects de ce procédé. Afin de répondre à cet objectif d'optimisation et de modélisation de la coupe, ce chapitre est articulé en trois axes :

- la présentation du matériau de cette étude, de ses propriétés physiques, ainsi que de son élaboration,
- la coupe du point de vue bibliographique, principalement grâce à des études basées sur l'Inconel 718® (NC19FeNb), son comportement durant l'usinage étant proche de l'Udimet720®,
- la coupe, mais du point de vue expérimental cette fois-ci, sur l'Udimet 720®. Nous nous attacherons à modéliser les efforts de coupe mais aussi à observer d'autres phénomènes, comme la formation du copeau, qui, dans le cas du brochage, est un point critique de la conception des broches.

Finalement, ce chapitre se terminera sur un bilan des modélisations, qui sont les bases du chapitre 2 concernant la géométrie et la conception des broches pied de sapin.

II Utilisation et élaboration de l'Udimet720®

II.1 Utilisation de l'Udimet 720®

Les turbomachines aéronautiques étant des machines complexes, différents alliages sont utilisés pour répondre à la fonction que doit assurer chaque pièce constituant le moteur (figure I-1). Il est possible d'observer quatre grandes familles de matériaux constituant l'ensemble des pièces d'un turbomoteur :

- les alliages légers (pour les carters extérieurs),
- les aciers (pour les pièces de pignonerie),
- les alliages de titane (pour les pièces avant la chambre de combustion),
- les alliages réfractaires, dits superalliages (pour toutes les pièces à partir de la chambre de combustion) qui représentent les pièces dont les masses sont les plus importantes dans les turbomachines d'hélicoptères.

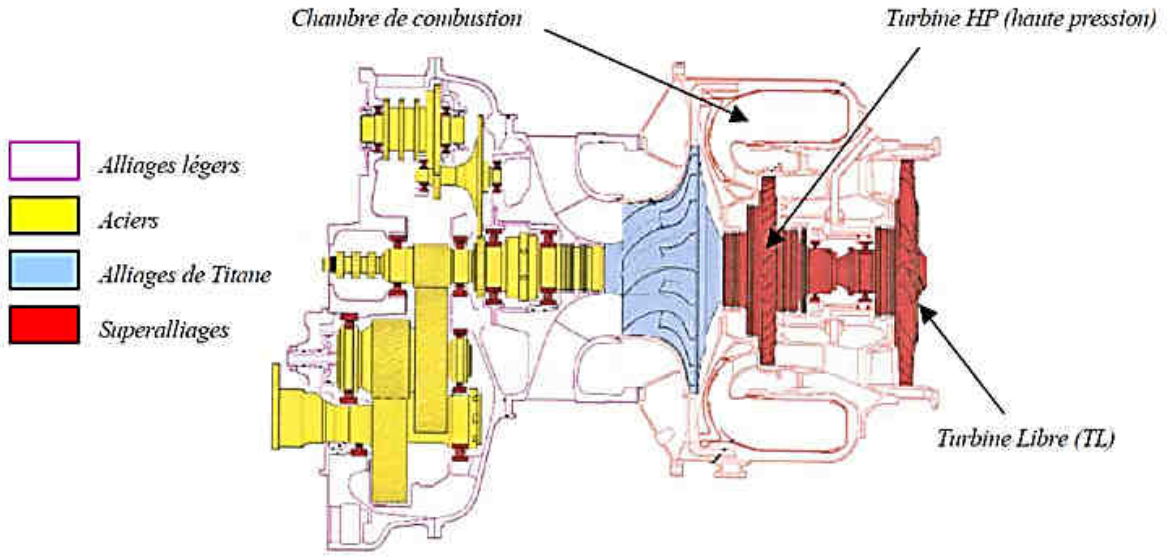


figure I-1 Répartition des différents alliages constituant un turbomoteur, document Turbomeca

Le cœur des turbomachines est constitué de trois étages du point de vue thermodynamique, comme le montre la figure I-2:

- un étage de compression (repères 1-2),
- un étage de combustion (repères 2-3),
- un étage de turbinage (repères 3-4).

Cette figure présente également l'évolution de la pression, du volume et de la température des gaz dans le turbomoteur ainsi qu'une modélisation des transformations thermodynamiques au sein de ces trois étages. En considérant les approximations d'une compression et d'une détente isentropique ainsi qu'une combustion isobare, il est possible d'exprimer les travaux de compression $W_{1\to2}$ (équation I-1), et de la détente $W_{3\to4}$ (équation I-2), puis de calculer la quantité de chaleur liée à la combustion $Q_{2\to3}$ (équation I-3). Connaissant la capacité thermique C_p de l'air, ces trois équations permettent de calculer le rendement du turbomoteur (équation I-4) en fonction des températures.

$$W_{1\to2} = C_p(T_2 - T_1) \quad \text{(I-1)}$$

$$Q_{2\to3} = C_p(T_3 - T_2) \quad \text{(I-2)}$$

$$W_{3\to4} = C_p(T_4 - T_3) \quad \text{(I-3)}$$

$$\eta = \left|\frac{energie\ utile}{energie\ fournie}\right| = \frac{-(W_{3\to4} + W_{1\to2})}{Q_{2\to3}} = 1 - \left(\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}\right) \quad \text{(I-4)}$$

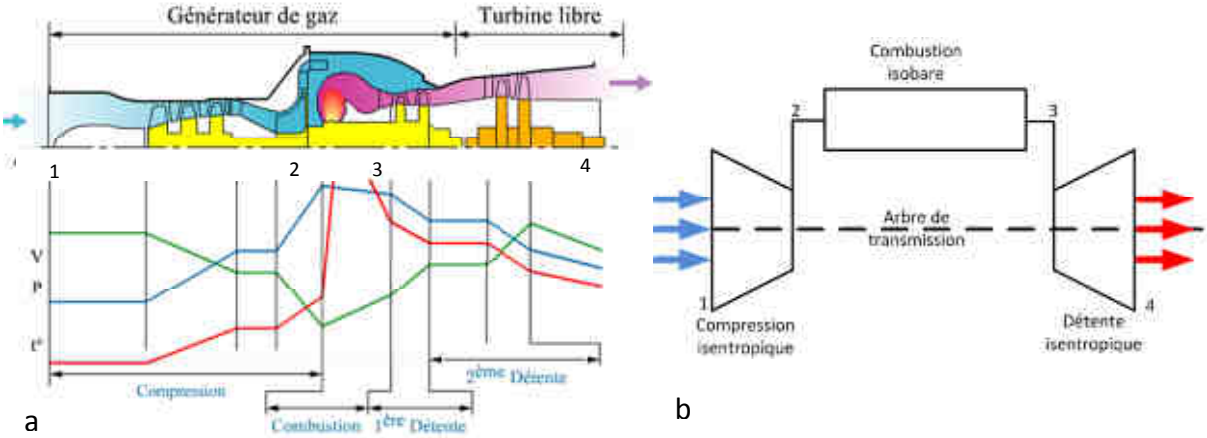


figure I-2 a) Evolutions réelles des variables P, T et V au sein d'un turbomoteur b) Modélisation des transformations thermodynamiques

Cette expression du rendement montre clairement que plus la température en sortie de la chambre de combustion est élevée plus le rendement du turbomoteur augmente. Ce simple calcul justifie l'utilité des superalliages dans la turbomachine en tant que réfractaire, mais surtout démontre l'intérêt de développer des matériaux toujours plus résistants à la température.

Il existe trois types de superalliages : les bases fer-nickel, les bases nickel et les bases cobalt. Ils sont utilisés dans des applications soumises à de fortes sollicitations thermomécaniques en atmosphère très corrosive. Ces trois types de superalliages sont choisis pour des applications de 600 à 1000°C. Le choix d'un superalliage en particulier se fait en fonction de la température et des sollicitations mécaniques appliquées à la pièce. La contrainte de

rupture pour 1000 heures de fonctionnement en fonction de la température pour les trois grandes familles de superalliages est donnée par la figure I-3. Nous constatons alors que les superalliages base-nickel sont utilisés pour des applications très fortement chargées mécaniquement, jusqu'à 1000 MPa et pour des températures de l'ordre de 700°C.

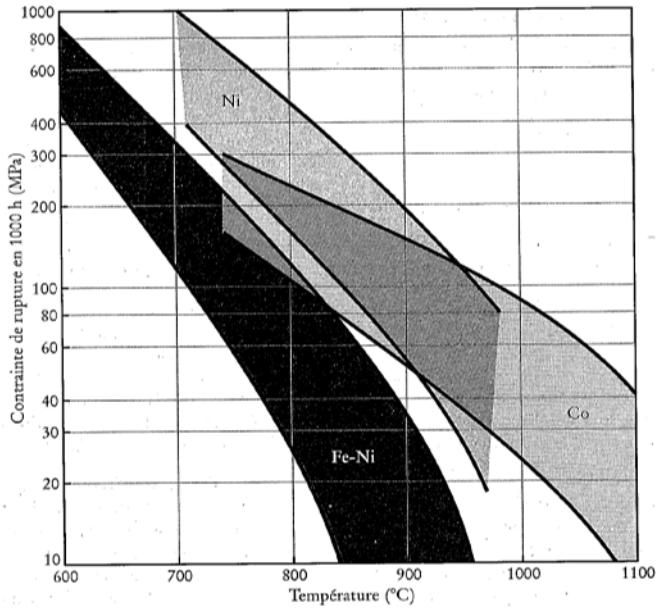


figure I-3 Contrainte à la rupture pour 1000 heures, pour les trois types d'alliages réfractaires d'après [Bailon2000]

Actuellement, le superalliage le plus couramment utilisé dans l'aéronautique est l'Inconel 718®. Dans le cas de turbomachines, il est très couramment employé pour les disques de turbine (pièces tournantes dites chaudes). Sa température maximale de fonctionnement est de l'ordre de 650°C. L'Udimet 720® est aussi un superalliage base nickel qui autorise des sollicitations mécaniques équivalentes à l'Inconel 718® mais pour des températures de fonctionnement de l'ordre de 750°C. Ce matériau améliore donc le rendement du turbomoteur.

II.2 Propriétés de l'Udimet 720®

II.2.a Caractéristiques métallurgiques

La caractérisation des propriétés physiques de cet alliage sera une aide importante dans la compréhension des mécanismes de coupe. Les propriétés présentées dans cette partie seront utilisées dans les parties suivantes pour modéliser les mécanismes mis en jeu durant la coupe de ce matériau. L'Udimet 720® (NC18K15TDA) est un alliage réfractaire dont la composition est donnée dans le Tableau I-1.

Éléments	Ni	Cr	Co	Ti	Mo	Al	W	Fe	B	Si	Mn	Cu	C	P	S
Mini	Base	17.5	14	4.75	2.75	2.25	1		0.015						
maxi		18.5	15.5	5.25	3.25	2.75	1.5	0.5	0.04	0.02	0.1	0.1	0.05	0.015	0.01

Tableau I-1 Eléments constituant l'Udimet 720®

La microstructure de cet alliage est constituée d'une matrice γ et d'une phase intermétallique durcissante γ'. La phase γ possède une structure cristallographique cubique à faces centrées (CFC) constituée par une solution solide de nickel avec du chrome, cobalt molybdène et tungstène en substitution. La phase γ' est une phase intermétallique durcissante de structure CFC, cohérente avec la phase γ. La constitution de la phase γ' est de la forme A_3B où A sont des atomes de nickel et B des atomes de titane ou d'aluminium. La présence de carbures et de borures contribue aussi à renforcer la matrice.

Les études de [Reed1999] définissent trois types de γ' selon leurs dimensions (figure I-4) :

- les γ' primaires (γ'_p) sont principalement formés durant l'opération de forgeage ; leur taille étant influencée par les sollicitations thermomécaniques de cette opération,
- les γ' secondaires (γ'_s) sont formés durant l'opération de trempe ; la vitesse de refroidissement influence leur taille,
- les γ' tertiaires (γ'_t) sont formés durant les opérations de vieillissement ; leur taille est influencée par la durée et la température des opérations de vieillissement.

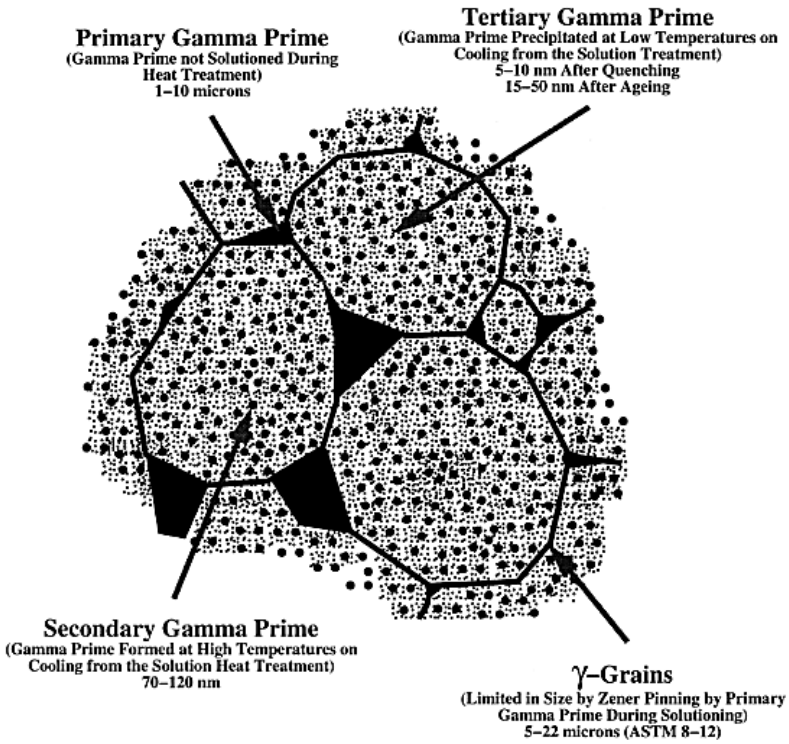


figure I-4 Schéma des principaux éléments constituant l'Udimet 720® d'après [Reed1999]

Il est important de noter que seules les phases γ et γ'_p sont observables au microscope optique ou au microscope électronique à balayage (MEB). Les phases γ'_s et γ'_t ne sont observables qu'au microscope électronique à transmission (MET).

II.2.b Propriétés mécaniques et thermique

Dans le but de caractériser le matériau de cette étude, plusieurs essais mécaniques ont été réalisés en laboratoire. Les résultats des essais de traction, résilience et dureté sont donnés dans le Tableau I-2. Ce matériau étant réfractaire, il est important de noter qu'il garde ses propriétés mécaniques jusqu'à des températures très élevées. Ainsi, le module d'Young du matériau reste élevé jusqu'à 750°C (figure I-5).

	Rm (MPa) Résistance mécanique	Re (MPa) Limite élastique	A (%) Allongement à la rupture	Z (%) Coefficient de striction	E (GPa) Module d'Young	KV_2 (J) Résilience	HV_{30} Dureté Vickers
moyenne	1671	1292	25	31	220	26	504
incertitude	±7	±12	±1	±3	±3	±3	±22

Tableau I-2 Valeurs issues des essais mécaniques réalisés à 20°C durant notre étude

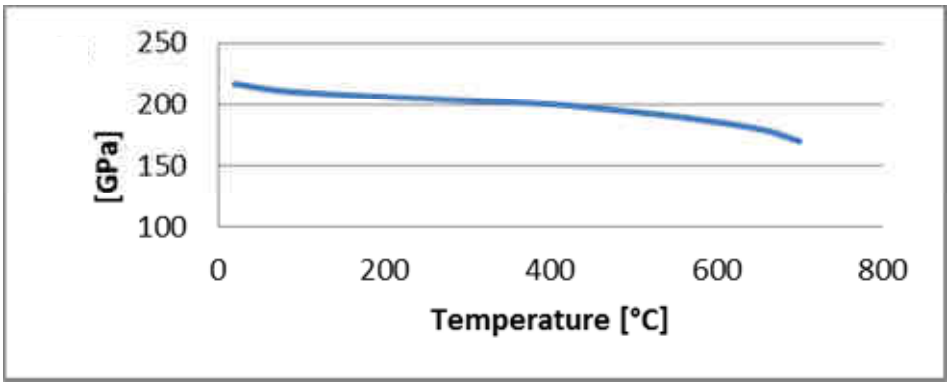


figure I-5 Evolution du module d'Young de l'Udimet 720® en fonction de la température

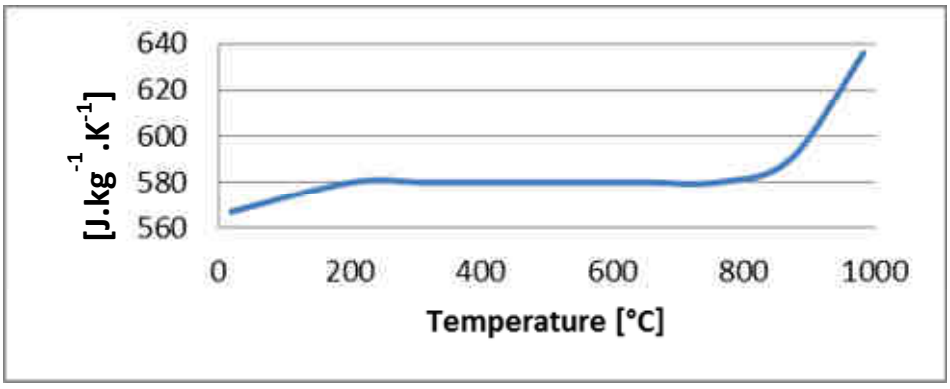


figure I-6 Capacité thermique massique de l'Udimet 720® en fonction de la température

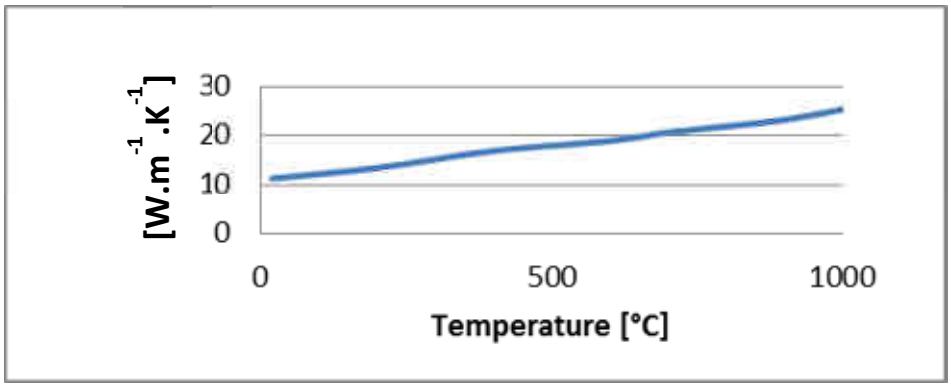


figure I-7 Conductibilité thermique de l'Udimet 720® fonction de la température

Pour des températures de l'ordre de 200 à 800°C, la capacité thermique massique (C_p) reste constante (figure I-6). Passé 800°C, la capacité thermique massique augmente très rapidement. Du point de vue de la conductivité thermique (K), elle évolue progressivement en gardant la même pente de 0 à 1000°C (figure I-7). Il est possible de comparer ces valeurs à celles données par [Wagner2011] dans ses travaux de thèse. Les valeurs de C_p et *K* sont du même ordre que celles du titane Ti5553, et bien sûr très différentes de celles d'un acier classique. Mais malheureusement, passé 450°C, les alliages de titane voient leurs propriétés mécaniques s'affaisser, c'est pour cela que nous utilisons des superalliages.

Ces deux paramètres C_p et *K* seront utilisés dans les deux parties suivantes pour modéliser les températures dans la zone de cisaillement primaire. Certaines études sur le brochage, [Makaroc2008] [Kloke2010], sont basées uniquement sur la modélisation des températures en usinage. Afin de calculer les températures dans les zones de cisaillement primaire et secondaire, il est important de connaître la capacité thermique massique (capacité à emmagasiner de la chaleur), et la conductivité thermique (capacité à diffuser la chaleur par conduction).

II.3 Elaboration de l'Udimet 720®

Avant d'être usinés, les disques de turbine sont obtenus par trois procédés successifs afin d'obtenir les caractéristiques mécaniques et thermiques souhaitées. Le premier est la réalisation d'un lingot par triple fusion, le second est le forgeage de ce lingot et le dernier est le traitement thermique dans la masse de cette pièce forgée.

Les lingots de matière première sont élaborés par triple fusion (figure I-8). Ce procédé a principalement pour but de diminuer le taux d'impuretés présent dans le matériau pour lui assurer une meilleure tenue mécanique :

1. la première fusion est appelée VIM (Vacuum Induction Melting) pour « fusion par induction sous vide » (figure I-8 a). Cette fusion (en quatre étapes) a pour but de mélanger les différents éléments d'addition constituant ce matériau (plus d'une dizaine). Elle est réalisée sous vide pour diminuer la concentration en oxygène et en azote dans le matériau et éviter de former des impuretés,
2. la seconde fusion est appelé ESR (Electro-Slag Remelting) pour « fusion sous laitier » (figure I-8 b). Le lingot du procédé VIM est refondu dans une lingotière dans laquelle se trouve un laitier. Une électrode métallique envoie un courant alternatif dans la lingotière et, sous l'effet du courant et de la fusion du métal, les impuretés migrent dans le laitier qui est évacué par la suite,
3. la dernière fusion est appelé VAR (Vaccum Arc Remelting) pour « refusion à l'arc sous vide » (figure I-8 a). Le lingot issu du procédé ESR est refondu entre deux électrodes sous vide pour éliminer les impuretés inclusionnaires.

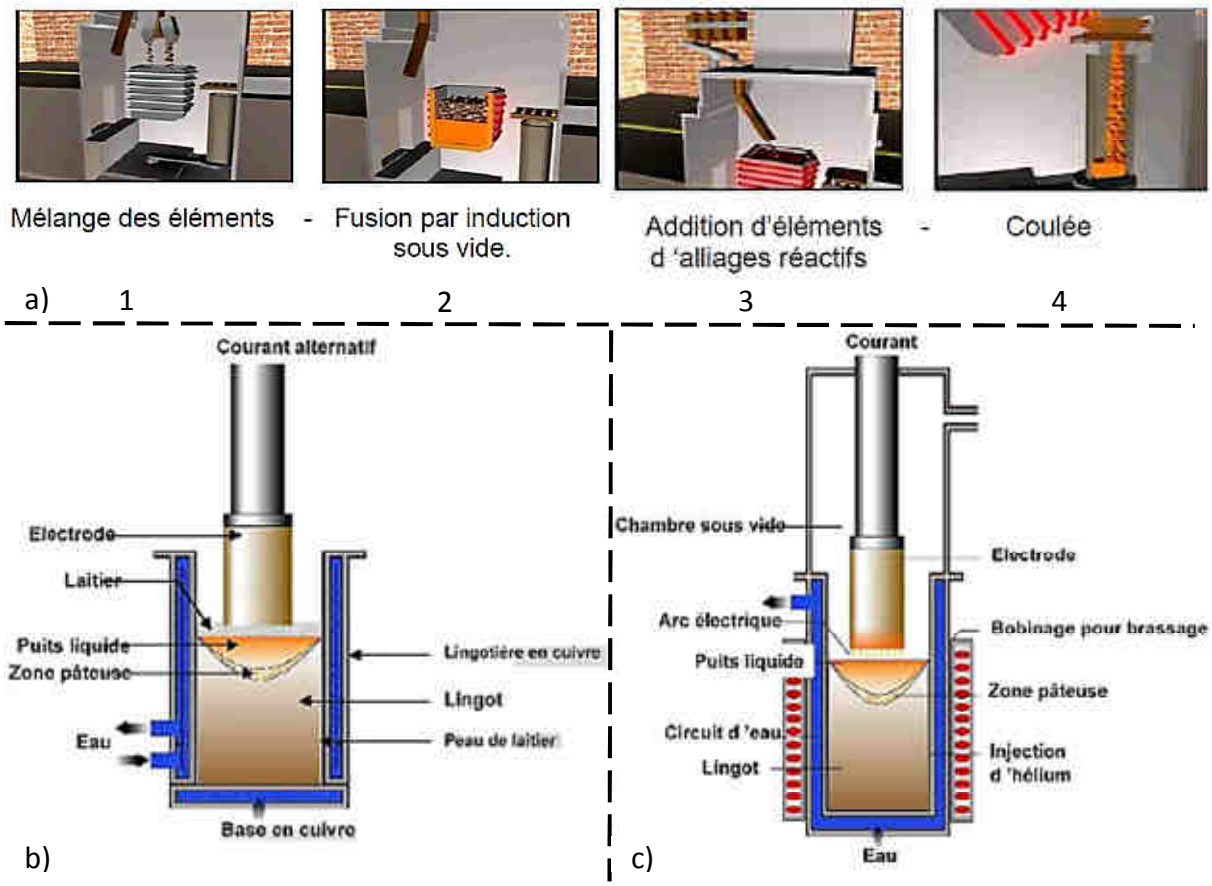


figure I-8 Procédés d'élaboration de l'Udimet 720® d'après [Devaux 2004] :
a) fusion sous vide b) fusion sous laitier c) refusion à l'arc sous vide

Les lingots issus par triple fusion sont laminés en barres de diamètre 80 mm. Ces barres sont alors coupées en lopins de différentes longueurs suivant les dimensions des pièces à forger. Le brut du disque de turbine est forgé :

- par matrice fermée, pour les disques de turbine haute pression (figure I-9 a),
- par matrice libre, pour les disques de turbine libre (figure I-9 b).

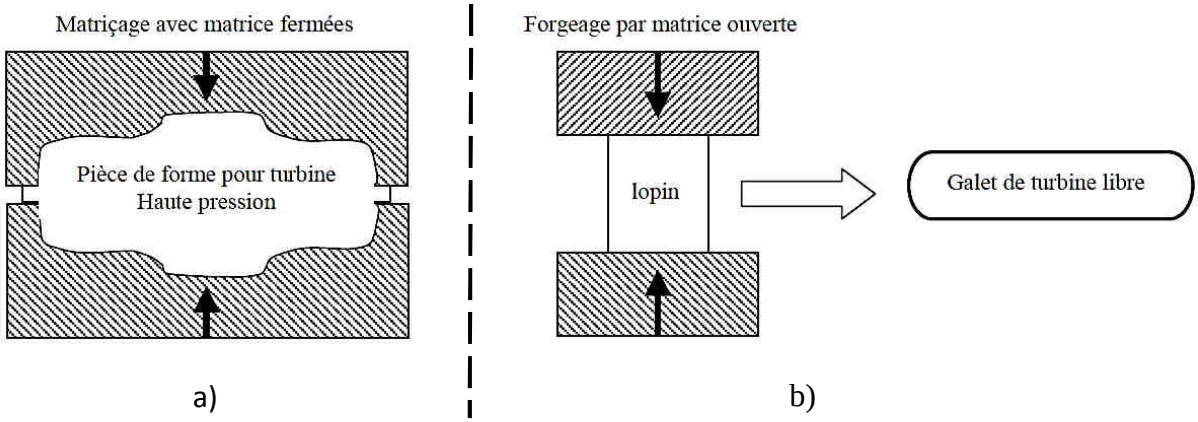


figure I-9 Forgeage des disques de turbine [Devaux2004] : a) par matrices fermées b) par matrices libres

Dans le cadre de cette étude, deux cycles de traitement thermique ont été choisis pour évaluer l'influence du matériau sur son usinabilité. Un premier dit ''grain fin'' est principalement destiné aux pièces fortement sollicitées mécaniquement. Le deuxième dit ''gros grain'' est dédié aux pièces sollicitées en fluage. Les cycles de traitement thermique sont constitués d'une mise en solution suivie de deux vieillissements successifs avec trempe à l'air (Tableau I-3). Ces deux vieillissements différents modifient également la taille des γ'_t se trouvant dans la matrice et changent les propriétés mécaniques du matériau. Durant ces travaux de thèse, mis à part des essais sur l'influence du cycle de traitement thermique sur l'usinabilité de la pièce (présenté au point IV.3 de ce chapitre), tous les essais ont été réalisés à partir d'une même barre laminée (diamètre 80 mm), ayant subi un traitement thermique dit ''grain fin'' pour éviter toute dispersion non souhaitée durant l'étude.

microstructure	Mise en solution	Vieillissement 1	Vieillissement 2
'grain fin'	4h à 1080°C trempe à l'huile	24h à 650°C air	8h à 760°C air
'gros grain'		24h à 845°C air	16h à 760°C air

Tableau I-3 Traitements thermiques utilisés dans le cadre de cette étude

III L'usinage de l'Udimet 720®

Cette partie s'intéresse à l'étude de la coupe dans les bases nickel et au cas spécifique du brochage, du point de vue bibliographique. Elle permettra de dresser un état des lieux, scientifique et industriel, des connaissances dans ce domaine mais aussi de déterminer les investigations nécessaires à la compréhension de la coupe de ce matériau dans le cas particulier du brochage. Les principaux verrous liés au brochage de l'Udimet720® sont :

- la coupe de l'Udimet 720® : il est possible de nos jours de trouver un grand nombre d'études traitant des bases nickel et de l'usinage de ces superalliages, principalement des études basés sur de l'Inconel 718®. Mais les études publiées sur l'Udimet720® sont rares,
- la géométrie d'une dent de broche : contrairement à des procédés de coupe plus courants tels que le tournage ou le fraisage, la technologie de brochage impose une coupe confinée où le copeau ne s'évacue pas de la zone de coupe. Durant l'usinage, le coupeau se retrouve dans la chambre à copeau entre la pièce et la broche, entraînant des risques de bourrage si celui-ci n'est pas retiré avant de brocher l'alvéole suivante,
- les paramètres de coupe particuliers utilisés pour brocher l'Udimet 720® : les broches utilisées pour réaliser les alvéoles pied de sapin sont actuellement en acier rapide spécial (ARS). L'avance par dent (f) et la largeur de copeau (b) de chaque dent sont imposées par la géométrie et le mode de fabrication de la broche. De plus, le matériau usiné influe sur les conditions de coupe : les vitesses de coupe (Vc) sont très faibles (de 2 à 6 m/min), avec des avances par dent (f) de 0,02 à 0,08 mm, et des largeurs de copeau (b) de 0,1 à 10 mm.

La connaissance de la coupe de ce matériau donne des informations sur les efforts et permet de les modéliser pour obtenir des lois de coupe (pour une simulation du brochage). L'étude d'usinabilité sera volontairement simplifiée car elle se déroulera dans le cas de la coupe orthogonale. L'outil devient donc un outil de mortaisage, dans un but initial de ne pas s'intéresser à la géométrie complexe des broches pied de sapin. La vision à l'échelle macroscopique, c'est-à-dire d'une broche complète, sera étudiée aux chapitres suivants (figure I-10).

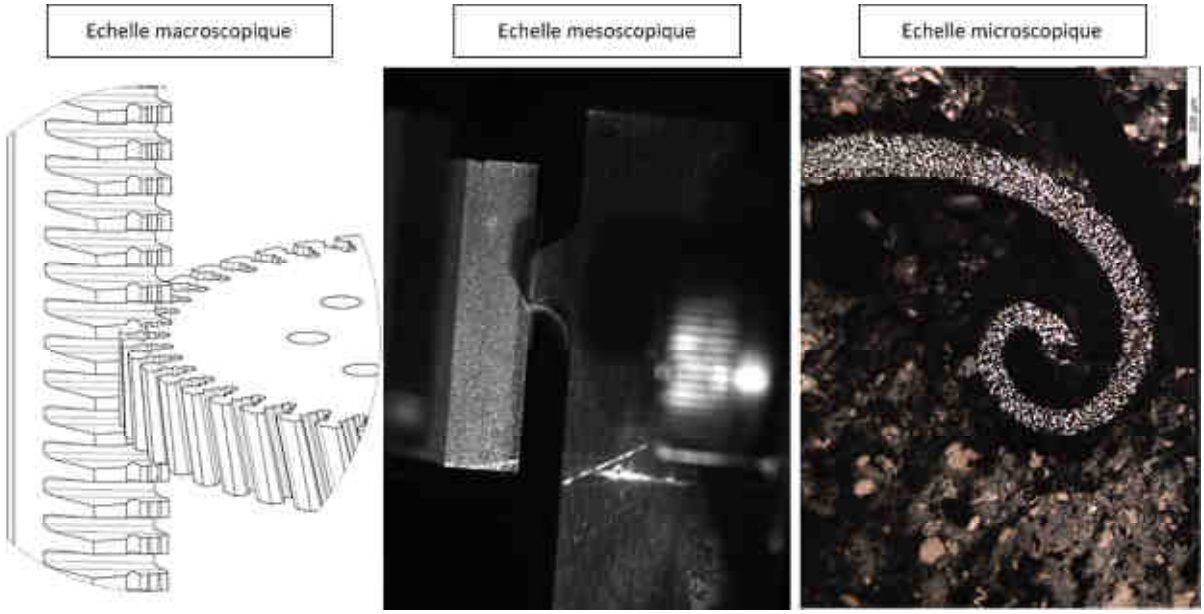


figure I-10 Echelles d'études pour le brochage

III.1 La coupe

La coupe des métaux est un sujet traité dans la littérature scientifique depuis plus d'un siècle. Parmi les plus vieilles études se trouve celle de [Tresca1878] qui a décrit le processus de déformation de la matière durant la coupe. Certaines études datant du milieu du siècle dernier sont toujours utilisées aujourd'hui. [Merchant 1945] et [Albrecht1960] ont proposé des modèles aidant à la compréhension et expliquant les différents phénomènes physiques mis en jeu. L'usinage par enlèvement de copeau fait toujours l'objet d'un grand nombre d'études dans le but d'améliorer ce procédé mais aussi de le rendre toujours plus compétitif et fiable face à de nouveaux matériaux de plus en plus difficiles à usiner. Il s'agit ici de présenter les fondamentaux de la coupe des métaux pour expliquer les phénomènes physiques mis en jeu durant ce procédé.

Le cas de la coupe orthogonale illustre simplement trois principales zones sollicitées durant l'usinage. Ces zones sont le siège de sollicitations mécaniques et thermiques très importantes mais aussi très rapides (figure I-11) :

- la zone de cisaillement primaire (*ZCP*) : est la zone où la matière usinée se transforme en copeau sous l'action du mouvement de coupe et des efforts intenses qui en découlent. La vitesse de déformation de cette zone, aussi appelée $\dot{\varepsilon}_{ab,}$ varie entre 10^2 et 10^4 s^{-1} dans le cadre de notre étude. Pour donner une échelle de comparaison, la vitesse de déformation d'un essai de traction se situe généralement aux alentours de 10^{-3} s^{-1} et la plupart des essais type barre de Hopkinson se limite à des vitesses de déformation de l'ordre 10^3 s^{-1},

- la zone de cisaillement secondaire (*ZCS*) : se situe là où le copeau frotte sur la face de coupe de l'outil. Sous l'action de différents phénomènes tribologiques et d'intenses sollicitations mécaniques, cette zone de cisaillement est due à la vitesse d'écoulement croissante du copeau, de la face de coupe vers la partie extérieure libre du copeau. Dans le cas de l'usinage de matériaux réfractaires, cette zone est significative du point de vue des échanges thermiques. Les matériaux de coupe en ARS ou en carbure étant de bien meilleurs conducteurs thermiques que les superalliages base nickel, la chaleur s'évacue par cette zone de l'outil,
- la zone de cisaillement tertiaire (*ZCT*) : se trouve entre la face de dépouille de l'outil et la surface usinée. On parle de zone de cisaillement tertiaire dans un souci d'uniformisation des trois zones. Mais le cisaillement n'est pas le mécanisme principal rencontré dans cette zone. Les principaux phénomènes rencontrés sont le frottement entre la surface usinée et la face de dépouille de l'outil, et l'indentation de l'outil dans la surface usinée [Waldorf2006]. Les sollicitations thermomécaniques dans cette zone sont moins importantes que dans les deux autres mais, étant la dernière zone de contact entre la surface usinée et l'outil, elle conditionne la qualité finale de la pièce [Valiorgue2008]. C'est aussi dans cette zone que se produit le phénomène d'usure en dépouille des outils.

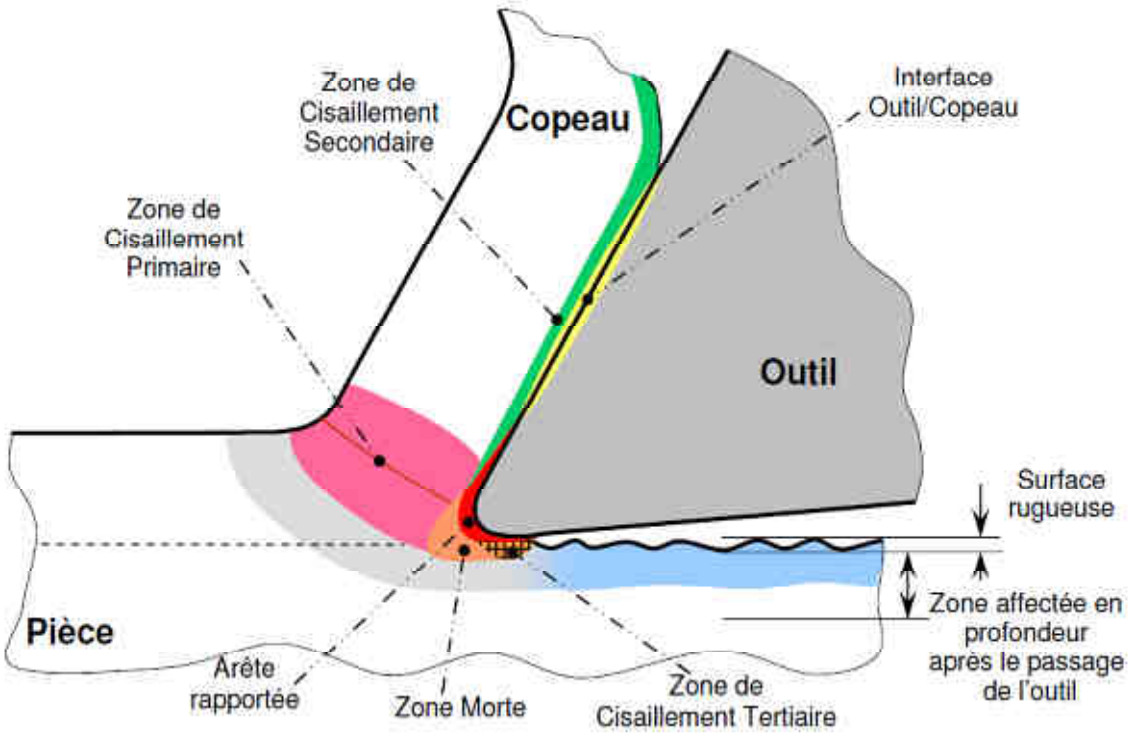


figure I-11 Illustration schématique des zones sollicitées durant la coupe d'après [Perrin2007]

III.1.a La modélisation de la coupe

La modélisation de la coupe fait notamment l'objet de nombreux travaux. Elle a permis de mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu durant ce procédé d'usinage, mais aussi de fournir des lois pour simuler et donc mieux prédire la qualité des usinages. Un état des lieux des modélisations empiriques et analytiques a été dressé par [Germain2011] (figure I-12).

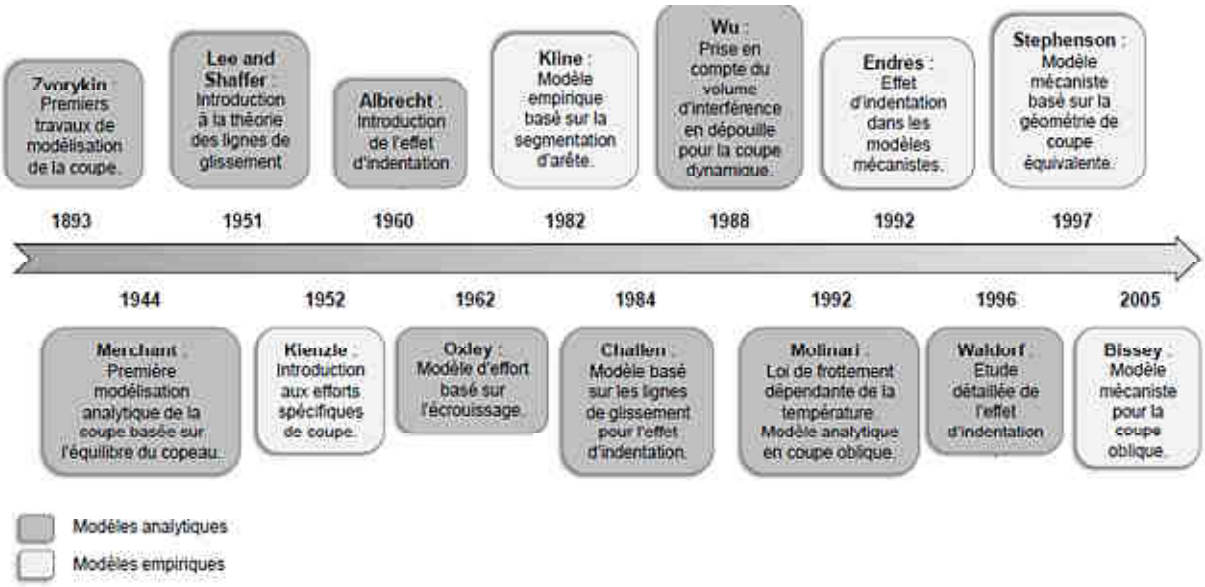


figure I-12 Historique de la modélisation de la coupe d'après [Germain2011]]

Deux types de modélisations de la coupe sont possibles :

- la modélisation empirique : elle est la plus facile à mettre en œuvre car elle ne nécessite pas de connaissance des différents phénomènes physiques opérant durant la coupe. Ces modèles permettent d'obtenir de bons résultats tout en autorisant la modélisation d'un grand nombre de paramètres, à condition de rester dans le domaine borné aux essais d'identification réalisés. Ces modélisations sont souvent surnommées ''modèle boîte noire'' par les industriels, car elles sont obtenues à partir de régressions linéaires entre les paramètres d'entrée et les résultats expérimentaux. La qualité des modèles dépend fortement du nombre de degrés de liberté des régressions donc du nombre d'essais réalisés par rapport au nombre de coefficients du modèle [Bissey2005], [Germain2011],
- la modélisation analytique : elle a pour avantage principal de donner un sens physique à chaque coefficient du modèle. Contrairement à la modélisation empirique, elle nécessite souvent de réaliser des essais de caractérisation hors du système étudié. Nous pouvons citer l'exemple du développement de lois de

comportement du matériau, qui tend à modéliser l'usinage, réalisé sur machine de traction à froid et à chaud [Wagner2011], puis l'exemple des essais avec une barre de Hopkinson [Ozel2006], [Tounsi2002]. Mais contrairement aux modèles empiriques, elles nécessitent des connaissances plus poussées des phénomènes mis en jeu. Cependant, elles conservent quand même une part d'empirisme pour obtenir les coefficients des modèles. Les modélisations analytiques sont plus souvent utilisées dans des applications de recherche, pour décrire un phénomène physique, que dans des applications industrielles, où le but est de prédire et d'optimiser la performance d'un procédé.

Trois modèles de coupe seront présentés. Les deux premiers sont purement empiriques (partie III.1.b), et le troisième est un modèle dit mécanistique (partie III.1.c), car les coefficients de ce modèle sont calculés sur une base analytique. Ce dernier modèle est basé sur les études de [Armarego1985] et de [Budak1996].

La bibliographie disponible sur l'usinage de l'Udimet720® étant très faible (à notre connaissance deux thèses sur le perçage [Dutilh2011], [Popa2012] et une étude sur de l'électroérosion [Antar2011]), il était nécessaire d'identifier des lois de coupe de ce matériau. Une analyse analytique (calcul des angles de cisaillement, des taux de déformation,…) a été réalisée pour expliquer le comportement des matériaux durant l'usinage et pour pouvoir calculer les coefficients du modèle mécanistique. Les modélisations empiriques ont été utilisées pour leur simplicité d'obtention des lois de coupe, même si elles ne donnent pas de sens physique aux coefficients calculés.

III.1.b Modélisation de la coupe orthogonale

Parmi les modèles analytiques de la coupe les plus connus se trouve le modèle de [Merchant 1944] (figure I-13) qui repose sur les hypothèses suivantes :

- matériau homogène et isotrope,
- acuité d'arête parfaite et absence de zone morte,
- coupe orthogonale,
- copeau continu.

Cette modélisation prend en compte la bande de cisaillement (AB), et l'angle de cisaillement ($\boldsymbol{\phi}$) (figure I-13 a). Trois vitesses sont modélisées sur un odographe (figure I-13 c) : la vitesse de coupe (V_c), la vitesse de cisaillement (V_s), et la vitesse du copeau (V_{cop}). Les efforts dans le plan de cisaillement (F_s) et (F_{ns}) et les efforts sur la face de coupe (T) et (N) permettent de calculer une résultante globale (R) grâce au cercle de Merchant (figure I-13 b).

Malgré l'intégration d'un grand nombre de phénomènes, le principal défaut du modèle de Merchant est la non prise en compte des effets d'indentation. Le modèle développé par

[Albrecht1960] ajoute deux composantes, dues à l'indentation, aux efforts radiaux et tangentiels. Les composantes F_{te} et F_{re} sont ajoutées à F_{tc} et F_{rc} pour modéliser les actions dues à l'arête de coupe (équations (I-5) et (I-6)). L'hypothèse d'une acuité parfaite n'est donc plus nécessaire.

$$F_t = F_{tc} + F_{te} \tag{I-5}$$

$$F_r = F_{rc} + F_{re} \tag{I-6}$$

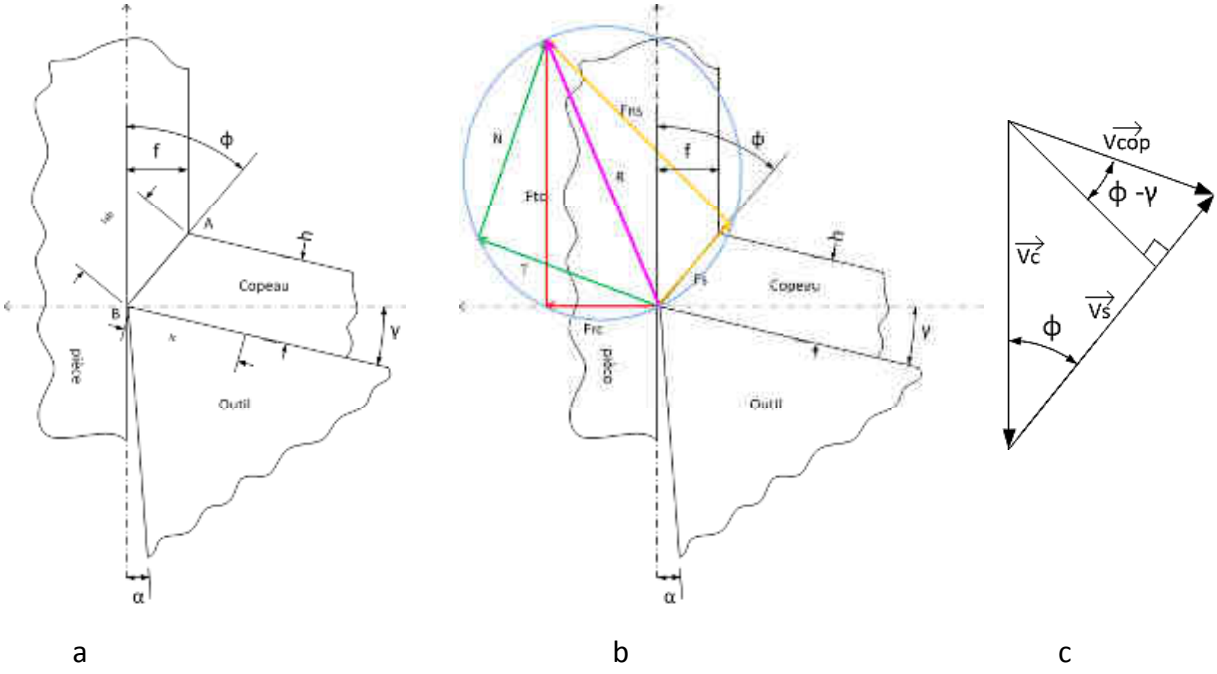


figure I-13 Modélisation de la coupe orthogonale pour un outil ayant une acuité parfaite [Merchant1945]
a) bande et angles de cisaillement b) résultantes des efforts c) odographe des vitesses

Le modèle proposé par [Oxley1989] permet une étude analytique de la coupe, prend en compte l'écrouissage du matériau et des phénomènes thermomécaniques en effectuant un calcul des températures moyennes dans les zones de cisaillement primaire et secondaire. Dans le cadre de notre étude, cette modélisation a été choisie car elle permet de faire l'hypothèse qu'un outil ayant une préparation d'arête est équivalent à un outil ayant une acuité parfaite (F_{tc} et F_{rc}) auquel on additionne un effort dû à l'arête de coupe (F_{te} et F_{re}).

Pour une avance par dent (f), un angle de coupe (γ) et un copeau d'épaisseur (h), il est possible de calculer l'angle de cisaillement (ϕ) (équation (I-7)). Avec les efforts mesurés (F_{tc}) et (F_{rc}), il devient possible de calculer la contrainte de cisaillement (k_{ab}) (équation (I-8)) et le coefficient de frottement sur la face de coupe (β) (équation (I-9)). La différence d'épaisseur entre le copeau et l'avance par dent est matérialisée par le rapport de compression r (équation (I-10)).

$$\phi = \frac{\frac{h}{f} \times cos(\gamma)}{1 - \left[\frac{h}{f} \times sin(\gamma)\right]} \quad \text{(I-7)}$$

$$k_{ab} = \frac{[F_{tc} \times \cos(\phi_n) - F_{rc} \times \sin(\phi_n)] \times \sin(\gamma)}{b \times f} \quad \text{(I-8)}$$

$$\tan(\beta) = \frac{F_{rc} + F_{tc} \times \tan(\gamma)}{F_{tc} - F_{rc} \times \tan(\gamma)} \quad \text{(I-9)}$$

$$r = \frac{f}{h} \quad \text{(I-10)}$$

III.1.c Modélisation de la coupe oblique

La méthode de passage de la coupe orthogonale à la coupe oblique [Budak1996] a été choisie dans le cadre de cette étude. Elle permet de limiter le nombre d'essais car il n'est pas nécessaire de réaliser des essais en coupe oblique pour obtenir les coefficients du modèle mais seulement des essais de coupe orthogonale. Ces travaux sont une évolution des travaux présentés par [Armarego1985].

$$F_t = K_{tc} \times f \times b + K_{te} \times b \quad \text{(I-11)}$$

$$F_r = K_{rc} \times f \times b + K_{re} \times b \quad \text{(I-12)}$$

$$F_a = K_{ac} \times f \times b + K_{ae} \times b \quad \text{(I-13)}$$

Les coefficients k_{tc}, k_{rc} et k_{ac} des équations (I-14) à (I-17) sont issus des équations (I-7) à (I-10). Les coefficients dus à l'arête de coupe K_{te} , K_{re} proviennent des régressions linéaires des essais orthogonaux (équation (I-5) et (I-6)). Le coefficient K_{ae} est considéré comme égal à zéro comme [Armarego1985].

$$k_{tc} = \frac{k_{ab}}{\sin(\phi_n)} \times \frac{\cos(\beta_n - \gamma_n) + \tan^2(\lambda_s) \times \sin(\beta_n)}{c} \quad \text{(I-14)}$$

$$k_{rc} = \frac{k_{ab}}{\sin(\phi_n) \times \cos(\lambda_s)} \times \frac{\sin(\beta_n - \gamma_n)}{c} \quad \text{(I-15)}$$

$$k_{ac} = \frac{k_{ab}}{\sin(\phi_n)} \times \frac{[\cos(\beta_n - \gamma_n) - \sin(\beta_n)] \times \tan(\lambda_s)}{c} \quad \text{(I-16)}$$

$$c = \sqrt{cos^2(\phi_n + \beta_n - \gamma_n) + tan^2(\lambda_s) \times sin^2(\beta_n)} \quad \text{(I-17)}$$

Le principal avantage de la méthode choisie réside dans le passage de la coupe orthogonale à la coupe oblique. Un grand nombre d'études découle de cette dernière ([Milfelner2003] en fraisage, [Ozturk2003] en brochage,…), mais d'autres méthodes ont aussi été développées telles que:

- [Stephenson1997] a calculé une section de copeau et des angles équivalents, au lieu de discrétiser l'arête de coupe,
- [Bissey2005] et [Germain2011] ont, quant à eux, choisi de modéliser la coupe oblique de façon empirique avec des lois issues de régressions linéaires.

III.2 L'usinage des bases nickel et de l'Udimet720®

La plupart des études s'intéressant à la coupe des bases nickel est principalement basée sur l'Inconel 718®, car il représente le plus gros volume produit chaque année dans le monde. Du fait du nombre très restreint de travaux sur l'Udimet720®, la bibliographie sur l'usinage des bases nickel peut être un point de départ intéressant.

L'intégrité de surface est un domaine très souvent abordé pour l'usinage des bases nickel. [Taricco1995] a étudié l'influence des conditions de coupe en tournage, en brochage et en grenaillage sur les contraintes résiduelles d'un disque de turbine. Cette étude propose principalement des conditions de coupe pour garantir des contraintes résiduelles de compression dans la pièce. [Connolley2004] a réalisé des essais de fatigue en flexion plane sur des éprouvettes entaillées par brochage. Les résultats de durée de vie sont exprimés en fonction de la rugosité et des dimensions des couches affectées par le brochage ; ceci permet de mettre en évidence l'influence de ces deux paramètres sur l'essai de fatigue. [Perrin2007] a présenté une étude très complète sur le perçage de l'Inconel 718®. Elle traite de l'usure des outils, de l'intégrité de surface, d'essais de fatigue et pour terminer, de la surveillance en usinage de cette opération. Durant ces travaux, une classification des défauts d'intégrité de surface a été proposée en les reliant aux conditions de coupe.

L'usure des outils de coupe est aussi un sujet riche en travaux dans ces matériaux difficiles à usiner. [Ezugwu1999] a utilisé des réseaux de neurones pour modéliser l'usure en tournage. Les données d'entrée sont les conditions de coupe et les données de sortie sont la mesure

des efforts, la puissance absorbée par le moteur et l'usure en dépouille des outils. Grâce à cette méthodologie, des conditions de coupe optimales sont déterminées, réduisant l'usure des outils et les efforts de coupe. [Kamata2007] a testé différents revêtements d'outils en carbure sous différentes conditions de micro-lubrification en tournage. La principale conclusion est la proposition d'une série de conditions de coupe permettant de réduire l'usure. [Coste2007] a proposé d'utiliser des outils en nitrure de bore cubique (CBN), contrairement à la plupart des études sur l'Inconel 718® qui usinent avec des outils en carbure. Les vitesses de coupe passent donc de 20 m/min à 350 m/min, permettant d'augmenter la productivité.

Face à ces difficultés d'usinage, la modélisation de la coupe est aussi un domaine riche en publications sur les bases nickel. [Zemzemi2007] a modélisé les mécanismes de frottement durant la coupe de l'Inconel 718® permettant ainsi d'améliorer la modélisation analytique de la coupe de ce matériau au niveau des différentes interfaces entre la pièce, l'outil et le copeau. [Campocasso2011] a développé une méthode d'identification inverse des efforts de coupe en tournage de l'Inconel 718®. Cette méthode permet d'implémenter des lois de coupe à partir d'essais simples pour ensuite modéliser les efforts sur des géométries d'outils différentes.

Mais les études sur la coupe de l'Udimet 720® sont beaucoup moins nombreuses, à notre connaissance, seulement deux sur le perçage de ce matériau. [Dutilh2011] a modélisé l'intégrité de surface par l'utilisation de la surveillance en usinage. Les signaux enregistrés présentent une forte corrélation avec l'apparition de défauts comme la formation d'une couche thermomécaniquement affectée. Ces travaux proposent aussi une identification de paramètres optimaux grâce à la méthodologie du couple outil-matière. [Popa2012] propose une méthodologie de surveillance en usinage appliquée à l'usure de l'outil. Un algorithme de discrimination des différents mécanismes d'usure de l'outil est proposé.

Ces quelques études ne sont qu'un très petit aperçu de tous les travaux disponibles sur l'usinage des bases nickel. Le point commun à toutes ces recherches est la faible durée de vie des outils par rapport à d'autres matériaux [Mo2001] et les faibles vitesses de coupe utilisées [Mo2005]. L'usure des outils est l'un des sujets les plus courants dans l'usinage des bases nickel : les articles sont très variés et touchent tous les procédés de coupe.

III.3 Cas spécifique de l'usinage en brochage, usinabilité et vision à l'échelle mésoscopique

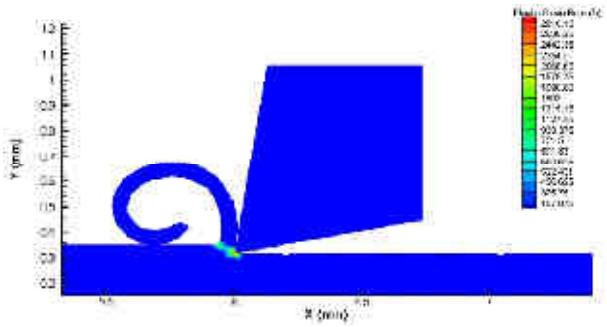
Contrairement à des procédés de coupe largement étudiés, tels que le fraisage ou le tournage, le brochage impose une coupe confinée et des conditions de coupe très particulières, totalement différentes de celles préconisées pour des procédés plus classiques. Les vitesses de coupe dans le cas du brochage de bases nickel varient entre 2 et

6 m/min pour des avances par dent allant de 0,02 à 0,08 mm. Ces faibles vitesses de coupe et avances par dent sont principalement dues au matériau utilisé pour réaliser l'outil (ARS), mais aussi au faible espace disponible entre deux dents consécutives, permettant au copeau de s'enrouler.

A l'échelle mésoscopique, pour le brochage, le nombre de travaux est très faible. Il est possible de citer, il y a plus de dix ans, [Mo2001] et [Ozturk2003]. Ils ont utilisé des simulations par éléments finis pour modéliser des efforts de coupe en brochage de l'Inconel 718®; leurs paramètres de coupe sont très proches de ceux utilisés dans le cadre de notre étude. Dans un premier temps, [Ozturk2003] a essayé de modéliser les efforts de coupe à partir de modélisations disponibles dans la littérature, puis il a réalisé des modélisations par éléments finis (figure I-14 a). Il a finalement comparé ces deux méthodes à des essais de coupe (figure I-14 b). Dans ce cas, les divergences entre les trois méthodes sont importantes, du fait d'un modèle par éléments finis non recalé.

Plus récemment, [Makarov2008] a étudié le brochage du point de vue mésoscopique en basant son étude uniquement sur les températures de coupe. Passé 700°C, l'alliage EI787D voit ses caractéristiques mécaniques chuter fortement. Il décide donc de mesurer les températures durant des essais d'usinage (figure I-15), mais sans précision sur la technique de mesure. Puis, il identifie l'usure en dépouille des outils suite à ces essais. La valeur minimale de l'usure obtenue correspond aux vitesses de coupe et avances par dent donnant une température de 700°C. Cette technique ressemble fortement à la méthodologie du couple outil-matière [NF 66-520], car l'auteur parle de point d'inflexion des efforts pour d'identifier des paramètres optimaux.

[Kong 2011] présente aussi une étude par éléments finis du brochage d'un superalliage base nickel (GH4169), mais les vitesses de coupe annoncées, de l'ordre de 120 à 250 m/min et l'avance par dent de 0,3 mm semblent peu en adéquation avec les moyens utilisables dans notre étude. Très récemment, [Zhang2012] propose une modélisation par éléments finis avec une seule dent dans le but d'évaluer quelle configuration d'angle de coupe et d'avance par dent permet de réduire les efforts et d'obtenir un meilleur enroulement du copeau dans la goujure, pour de l'Inconel 718®. Le plan d'expériences numérique réalisé consiste à faire varier la vitesse de coupe, l'avance par dent puis l'angle de coupe. Il propose un modèle empirique des efforts, mais le résultat le plus intéressant pour le brochage est sûrement la modélisation de volume qu'occupe le copeau. Dans les conclusions de cet article, il est recommandé d'usiner l'Inconel 718® avec des angles de coupe importants et des avances par dent faibles pour limiter les efforts de coupe mais surtout pour permettre au copeau de s'enrouler. Cet article est basé uniquement sur des simulations par éléments finis et ne propose pas de vérifications expérimentales.

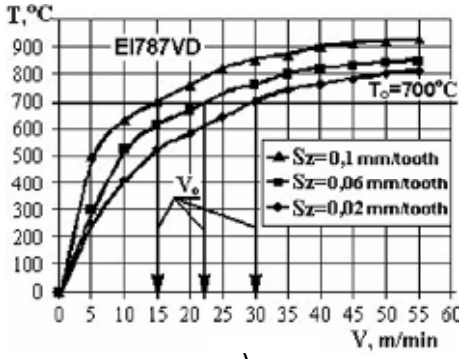


a)

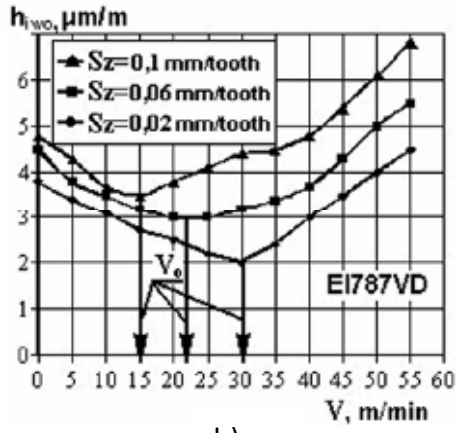
	Ft (N)	Ff (N)
Analytical Method	188.9	80.2
FEA Method	161.0	54.0
Experimental Method	330.4	221.6

b)

figure I-14 a) Modélisation par éléments finis de la déformation plastique durant une opération de brochage
b) Tableau de comparaison des efforts entre essais et modélisation d'après [Ozturk2003]



a)



b)

figure I-15 a) Evolution des températures de coupe en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance par dent
b) Evolution de l'usure des broches en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance par dent
d'après [Makarov2008]

IV Essais de coupe de l'Udimet720® pour une étude à l'échelle mésoscopique dans le cas du brochage

Il s'agit maintenant de développer les essais et les résultats des modèles de coupe mésoscopiques afin de pallier le manque de modèles existants. Les propriétés mécaniques et thermiques présentées sont conservées pour réaliser une étude analytique. L'état de l'art scientifique et industriel est utilisé comme point de départ des plans d'expériences.

IV.1 Essais préliminaires de brochage

Ces premiers essais ont pour but :

- de réaliser une cartographie des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe (Vc), de l'avance par dent (f) et de l'angle de coupe (γ), afin d'évaluer un jeu de paramètres permettant de réduire les efforts et donc d'assurer une meilleure qualité des alvéoles brochées,
- de collecter des coefficients spécifiques de coupe pour implémenter le simulateur de brochage (qui sera présenté au prochain chapitre),
- de comprendre la mécanique de la coupe dans ce matériau, par le calcul de valeurs caractéristiques comme les contraintes de déformation (k_{ab}) ou les angles de cisaillement du copeau (ϕ).

IV.1.a Plan d'expériences

Le plan d'expériences intègre trois facteurs qui sont :

- la vitesse de coupe (Vc),
- l'avance par dent (f),
- l'angle de coupe (γ).

L'angle de coupe et l'avance par dent ont été choisis car ils varient le long de l'arête des dents sur une broche pied de sapin, à cause des formes complexes générées. La vitesse de coupe est constante tout le long de l'outil mais c'est un facteur fondamental sur les efforts de coupe et il est donc judicieux de s'y pencher.

La bibliographie scientifique et industrielle sur le brochage des alvéoles pied de sapin indique que les angles de coupe choisis pour brocher des bases nickel varient généralement entre 8° et 18°, comme en tournage dans ces matériaux. L'avance par dent est généralement fixée entre 0,08 mm pour l'ébauche et 0,03 mm pour la finition alors que sur une opération de tournage les avances sont plutôt de l'ordre de 0,5 à 0,15 mm. La vitesse de coupe varie suivant les matériaux usinés entre 2 et 6 m/min, alors qu'en tournage elle varie de 10 à

40 m/min. Ces plages de variation des paramètres sont communes à plusieurs travaux : [Bellais1997], [Ozturk2003], [Kocturk2004], [Mo2005] et [Mo 2001].

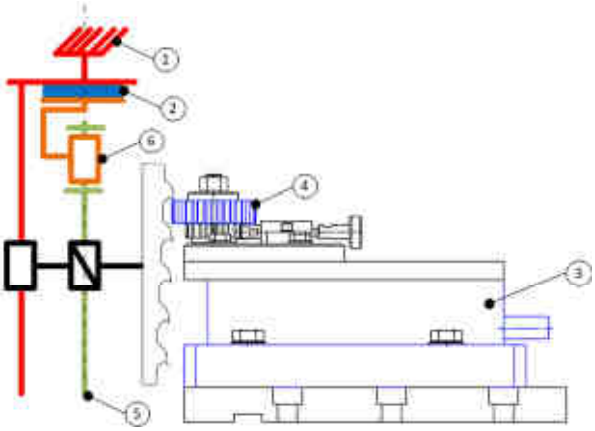
La brocheuse utilisée durant ces essais est une machine de production ; par conséquent la durée des phases expérimentales doit être la plus courte possible. Le Tableau I- 4 présente les trois facteurs ainsi que leurs niveaux choisis. Ce plan d'expériences est un plan complet à vingt-sept combinaisons, chacune répétée trois fois (81 essais).

		Niveaux des facteurs		
		-1	0	1
Facteurs	Angle de coupe (γ)	8°	13°	18°
	Avance par dent (f)	0,02 mm	0,05 mm	0,08 mm
	Vitesse de coupe (Vc)	2 m/min	4 m/min	6 m/min

Tableau I- 4 Plan d'expériences pour essais de coupe orthogonale

Il s'agit d'une brocheuse verticale utilisée par l'industriel pour usiner les alvéoles pied de sapin. Sa course est de 2 mètres avec une poussée maximale de 10 tonnes. Son bâti est schématisé par le repère 1 de la figure I-16. Cette machine est équipée d'une vis à billes et d'un moteur Brushless de 35 kW, assurant un asservissement de la vitesse de coupe, contrairement aux brocheuses équipées de vérins hydrauliques et d'une simple pompe.

La mesure des efforts de coupe a été réalisée par deux instruments : une platine de mesure d'efforts (type Kistler 9255 B) et un capteur piézo-électrique (repère 2) intégré entre le bâti de la machine et le roulement de la vis. L'étalonnage de ce capteur sera présenté au chapitre 4, consacré à la surveillance en usinage.



1	Bâti
2	Capteur intégré à la brocheuse
3	Platine Kistler 9255B
4	Pièce d'essai
5	Vis à billes
6	Roulement et butée de la vis

figure I-16 Schéma du dispositif expérimental installé sur la brocheuse

La figure I-16 montre la pièce d'essai installée sur le montage. Le plan de détail de la pièce usinée est donné par la figure I-17. L'épaisseur de la pièce permet une longueur usinée de 20 mm et une largeur de coupe de 5 mm. Le matériau de la pièce est de l'Udimet 720® ayant subi le cycle de traitement thermique type 'grain fin'.

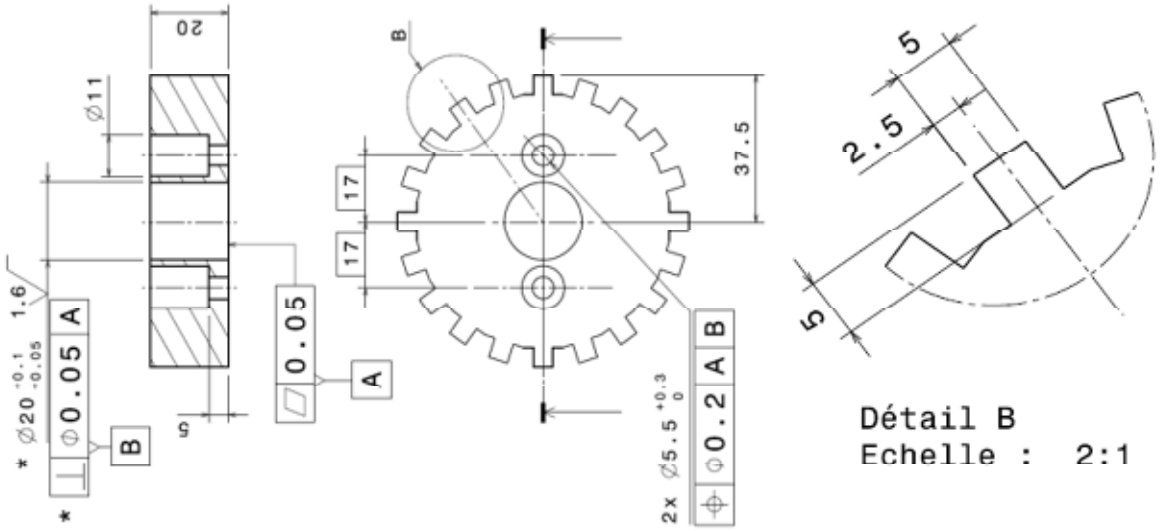


figure I-17 Eprouvette de brochage pour essais de coupe orthogonale

Les outils de coupe utilisés sont des outils en ARS (ASP30). Ils ne possèdent qu'une seule dent ayant des angles de coupe variables (8°, 13°, et 18°) suivant le plan d'expériences décrit précédemment et une dépouille constante fixée à 3°. La profondeur de la goujure est de 2,8 mm, valeur identique à la production (figure I-18). La largeur de l'outil est de 10 mm, ceci pour garantir qu'avec une pièce à usiner large de 5 mm, celle-ci restera toujours dans les conditions de la coupe orthogonale. Enfin, une caméra rapide permet d'enregistrer la formation du copeau durant toute la durée de l'opération de brochage.

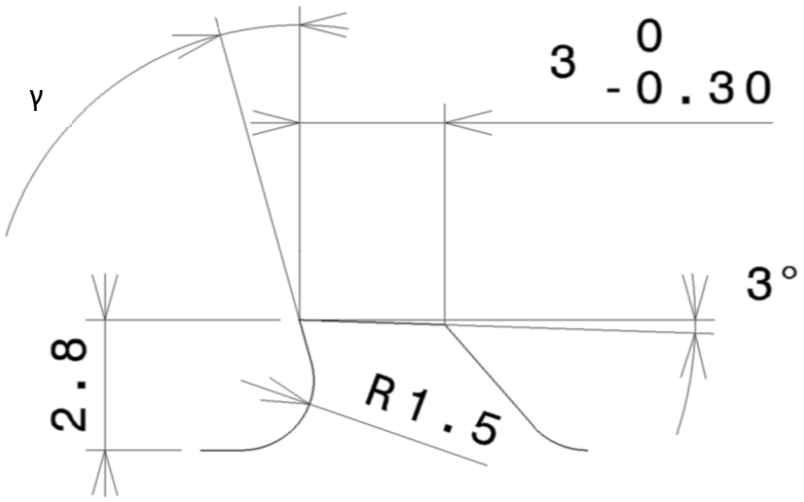


figure I-18 Schéma d'une dent de brochage pour essais de coupe orthogonale

IV.1.b Résultats expérimentaux

Les mesures présentées sont obtenues à partir de la platine de mesure d'efforts. Les valeurs obtenues à partir du capteur intégré dans la brocheuse seront présentées au chapitre 4.

Malgré les conditions d'essais en coupe orthogonale, donc avec un angle d'inclinaison d'arête nul ($\lambda_s = 0°$), les efforts F_t et F_r n'atteignent pas directement leur maximum mais évoluent progressivement. Pour expliquer cette variation des efforts, cinq zones ont été identifiées grâce aux mesures d'efforts et aux vidéos issues de la caméra rapide (figure I-19) :

1. un choc se produit quand la broche entre dans la matière,
2. le montage fléchit légèrement et un copeau commence à se former,
3. le copeau est formé mais n'a pas encore buté dans le fond de la goujure,
4. le copeau bute contre le fond de la goujure,
5. le copeau est en régime établi et frotte sur le fond de la goujure.

Le constructeur de la platine de mesure d'efforts indique que la déflexion de cette dernière est de l'ordre de 0,5 µm/kN. Il semble donc plus probable que cette légère flexion soit due à un manque de rigidité de l'assemblage posé sur la platine pour assurer la prise de pièce. Cette légère flexion du montage se traduit par une variation de l'épaisseur coupée au début de l'usinage, qui peut aussi être observée sur les copeaux, avec l'évolution de la section du copeau (figure I-20).

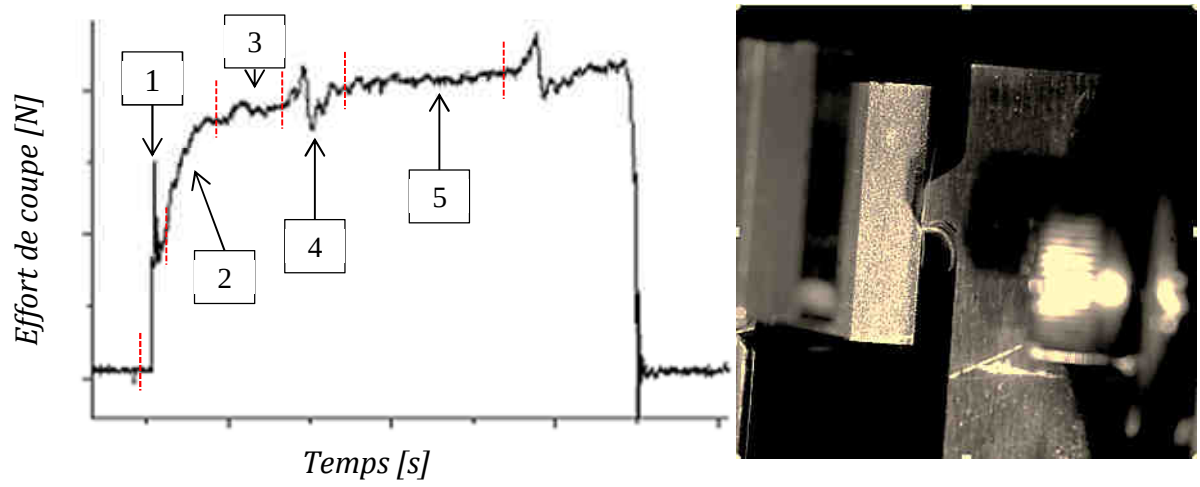


figure I-19 a) Evolution des efforts de coupe en fonction du temps durant les essais de coupe orthogonale
b) Image extraite des vidéos par caméra rapide, quand le copeau est en régime établi (zone 5)

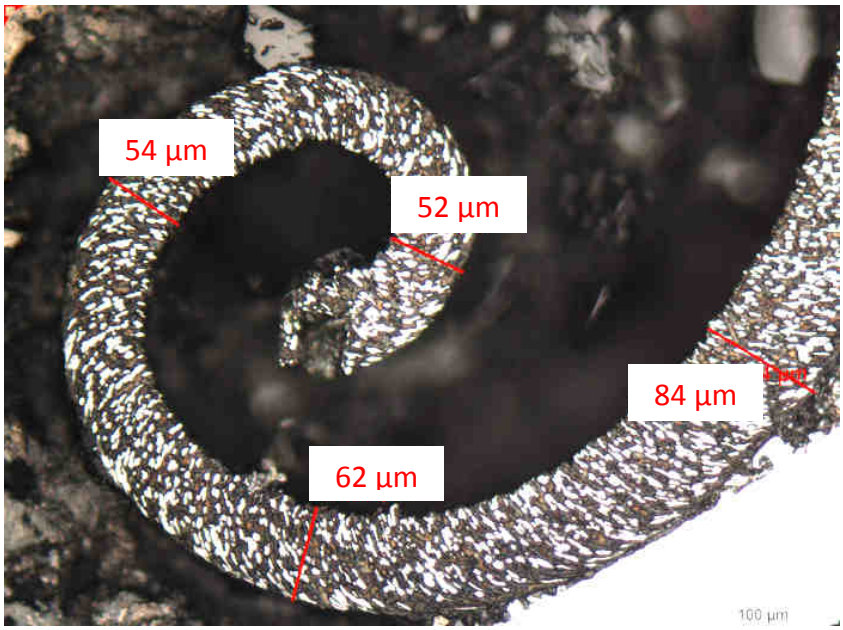


figure I-20 Evolution de l'épaisseur du copeau fonction de sa longueur

Les vidéos et micrographies réalisées démontrent que plus l'angle de coupe est important et plus l'avance par dent est faible, plus le rayon de courbure des copeaux est faible. Cette observation nous permet de vérifier expérimentalement les simulations par éléments finis réalisées par [Zhang 2012]. Connaître le rayon de courbure des copeaux en fonction des paramètres de coupe est un élément important pour la conception de la broche. Si le rayon de courbure du copeau est trop grand, il risque de frotter et d'adhérer à la goujure, donc de ne pas s'évacuer et de rompre la dent si le volume occupé est trop important. Le rayon de courbure du copeau usiné est bien souvent méconnu des fabricants de broches et pour le dimensionner, ils se tournent alors vers les méthodes métiers [Bellais1997] ou les normes telles que la [NF 66-620]. Or, les valeurs données proviennent généralement d'essais réalisés sur des aciers ou des aluminiums, et datent bien souvent des années 1950-60. Si ce rayon est connu, pour un matériau et des conditions de coupe donnés, il est possible de maîtriser parfaitement la taille de la chambre à copeau donc le pas et la longueur de la broche.

La vidéo couplée à la mesure des efforts de coupe permet aussi d'illustrer les phénomènes de copeau mini et ses conséquences sur l'usinage en brochage. La figure I-21 illustre le cas du copeau mini sur une dent de la broche et ses conséquences sur la dent suivante. La courbe verte représente l'effort radial (F_r) et la courbe rouge l'effort tangentiel (F_t). L'effort axial (F_a), courbe bleue de cette figure, reste nul car nous nous trouvons toujours dans le cas de la coupe orthogonale. La partie des courbes se trouvant à un temps inférieur à 3,5 secondes est due à une première dent usinant en copeau mini dans la zone a. Dans la zone b, un copeau commence à se former puis dans la zone c un copeau a été clairement identifié sur les images correspondantes (figure I-22). Cet usinage en condition de copeau mini est dû à la légère flexion du montage et à une avance par dent très faible, de l'ordre de 8 µm.

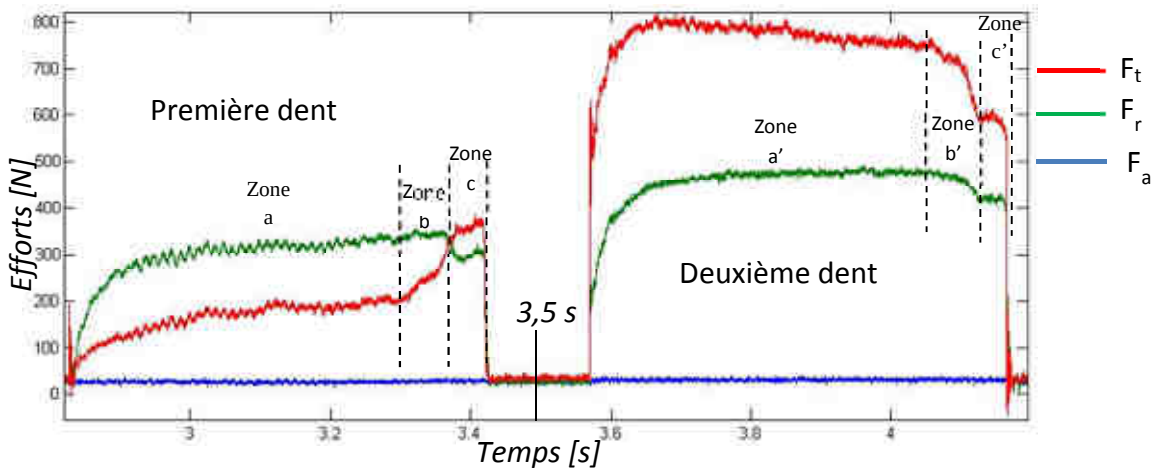


figure I-21 Evolution des efforts sur deux dents consécutives durant un usinage en copeau mini

Au-delà de 3,5 secondes, les courbes correspondent à la dent suivante. Les zones a', b' et c' ont exactement les mêmes durées que les zones a, b et c puisqu'il s'agit des efforts issus de deux dents consécutives. Pour cette deuxième dent, la prise de coupeau théorique est de 30 µm. Comme la précédente n'a pas coupé, mais raclé dans la zone a, les efforts de coupe sont supérieurs dans la zone a' à ceux constatés pour une avance par dent de 30 µm. La deuxième dent doit enlever le surplus de matière laissé par la première. La zone b' est une zone transitoire due à la zone b de la dent précédente. La zone c' a un niveau d'effort normal pour une prise de copeau de 30 µm, car la zone c ne présentait plus de copeau mini; la deuxième dent n'a donc plus à enlever le surplus de matière laissé par la première.

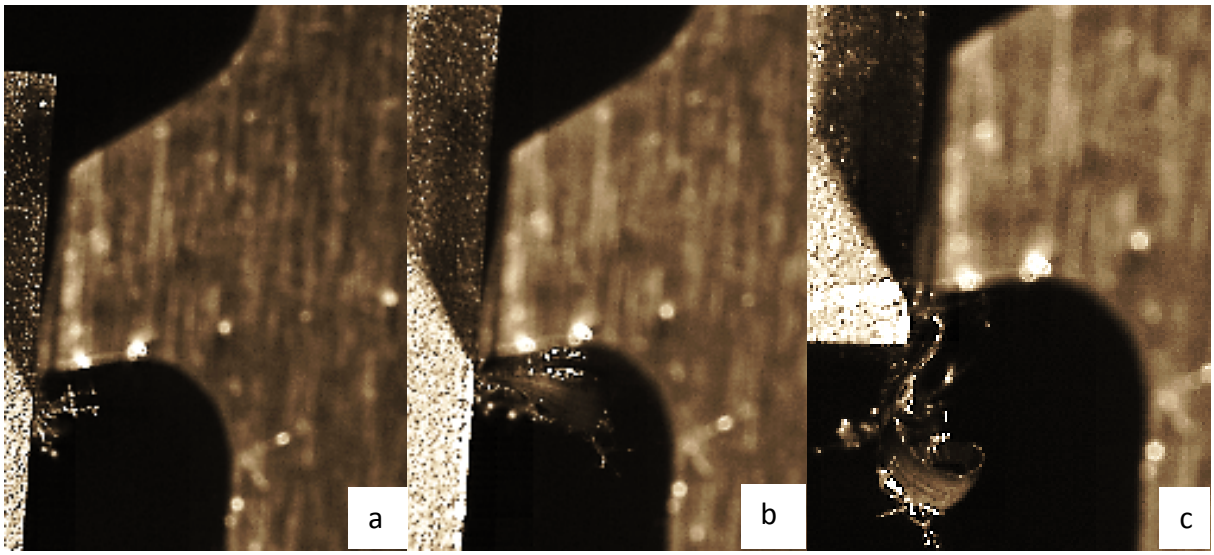


figure I-22 Images illustrant l'usinage en copeau mini : a) raclage de l'outil sur la pièce (zone a) b) début de formation du copeau (zone b) c) production d'un copeau de morphologie atypique (zone c)

La compréhension de l'évolution des efforts permet d'exploiter les mesures réalisées durant les différents essais. La valeur d'effort choisie pour réaliser la cartographie est la moyenne

des efforts mesurés dans la zone 5 de la figure I-19 a, pour qu'il s'agisse d'une zone stable à épaisseur de copeau constante. Les résultats d'essais sont présentés sous une forme normalisée à l'aide des équations (I-18) et (I-19). K_t et K_r sont appelés efforts spécifiques de coupe et sont exprimés en MPa. Cette représentation permet de chercher un point d'inflexion des efforts pour trouver un point de fonctionnement tel que développé dans la méthode du couple outil-matière [NF 66-520].

$$K_t = \frac{F_t}{(b \times f)} \qquad \text{(I-18)}$$

$$K_r = \frac{F_r}{(b \times f)} \qquad \text{(I-19)}$$

Pour être implémentés dans le simulateur d'efforts de brochage, les efforts spécifiques de coupe ont été modélisés par les équations (I-20) (I-21). Les coefficients de ces équations ont été obtenus par régression linéaire (annexe 1). La précision des modèles calculés selon le R^2 donne pour K_t R^2 = 98,04 % et pour K_r R^2 = 98,99 %.

$$K_t = a_t\, V_c + b_t\, f + c_t\gamma + d_t\, V_c\, f + e_t\, V_c\, f + f_t\, V_c\, \gamma + g_t\, f\, \gamma + h_t\, V_c^2 + i_t\, f^2 + j_t\, \gamma^2 \qquad \text{(I-20)}$$

$$K_r = a_r\, V_c + b_r\, f + c_r\gamma + d_r\, V_c\, f + e_r\, V_c\, f + f_r\, V_c\, \gamma + g_r\, f\, \gamma + h_r\, V_c^2 + i_r\, f^2 + j_r\, \gamma^2 \qquad \text{(I-21)}$$

La vitesse de coupe a été fixée à 2 m/min pour les figures I-23 a et b, qui montrent la variation de K_t et K_r en fonction de l'avance par dent et de l'angle de coupe. Pour les figures I-23 c et d, l'angle de coupe a été fixé à 15°. Ces graphiques nous montrent une forme classique de variation des efforts spécifiques de coupe : ils diminuent avec l'augmentation de l'angle de coupe, de l'avance par dent et de la vitesse de coupe. Les valeurs des efforts spécifiques sont très élevées, dans certains cas K_t peut atteindre plus de 9000 MPa.

Il faut souligner que l'évolution des efforts spécifiques suivant la vitesse de coupe suit quasiment une droite, donc ne présente pas de point d'inflexion distinctif des efforts. La vitesse de coupe étant très faible (de 2 à 6 m/min), cette plage d'essais semble insuffisante pour trouver un point d'inflexion des efforts de coupe. Dans le cas du perçage avec des forets en carbure de l'Udimet 720®, [Dutilh2012] avait trouvé un point d'inflexion très faiblement marqué pour une vitesse de coupe de 19 m/min. Cependant, les outils de brochage étant en ARS, des essais réalisés chez l'industriel ont démontré que le nombre de mètres brochés à 6 m/min était trois fois plus faible qu'à 2 m/min pour une usure équivalente.

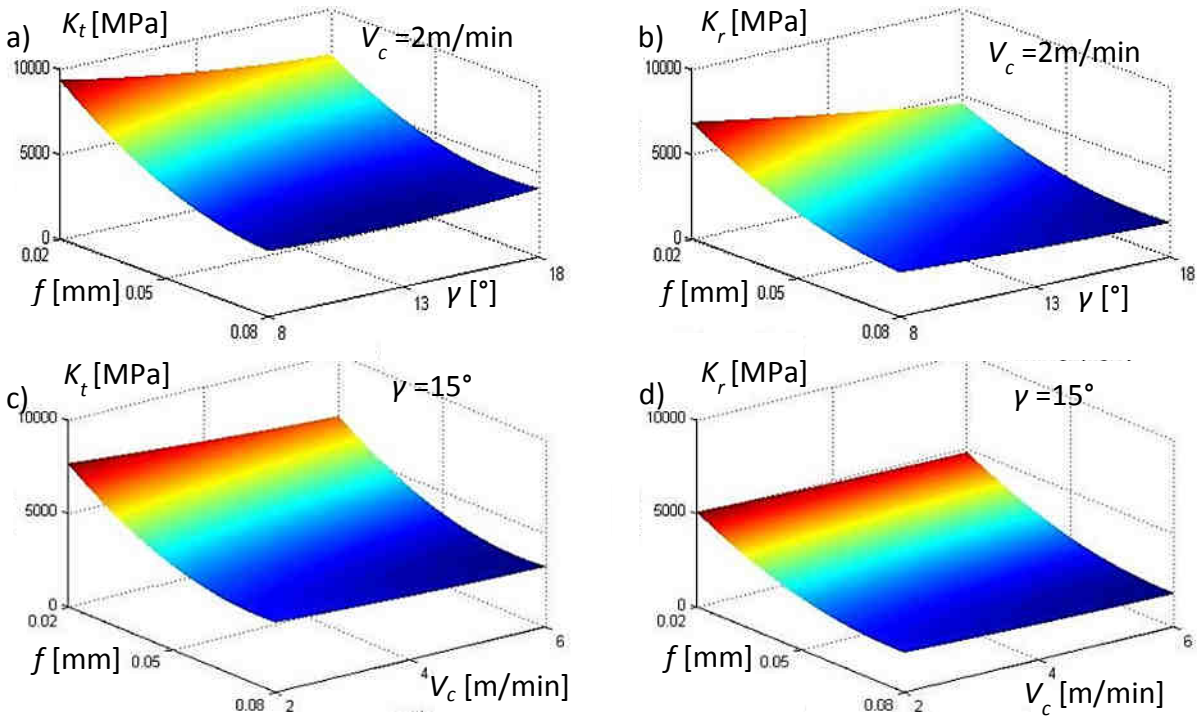


figure I-23 Evolution des efforts spécifiques : a) *Kt* en fonction de *f* et *γ* b) *Kr* en fonction de *f* et *γ* c) *Kt* en fonction de *f* et V_c d) *Kr* en fonction de *f* et V_c

Les deux autres modélisations des efforts mises en place à partir des essais préliminaires sont de la forme des équations (I-5) et (I-6), pour prendre en compte les efforts dus à l'arête de coupe, et de la forme (I-11) (I-13), pour l'inclinaison d'arête. Les résultats numériques de ces trois modèles sont disponibles en annexe 1. L'angle de cisaillement varie, quant à lui, de 30 à 40° et la contrainte de cisaillement de la ZCP varie de 500 à 1000 MPa. Pour le domaine testé, le rapport de compression du copeau (*r*) varie entre 0,45 et 0,4 ce qui signifie que les copeaux sont 2,2 à 2,5 fois plus épais que l'avance par dent : une régression linéaire donne l'équation (I-22).

$$h = 2{,}724 \times f + 0{,}6 \qquad \text{(I-22)}$$

Cette modélisation démontre encore une fois que plus l'avance par dent est importante plus le copeau est épais. Sur ce domaine expérimental, la vitesse de coupe et l'angle de coupe ne semblent pas avoir d'influence sur le rapport de compression (*r*). Par rapport à la dimension réduite du domaine expérimental et au faible nombre de niveaux (3) pour chaque facteur, une campagne plus conséquente est nécessaire pour mieux comprendre la coupe de ce matériau.

IV.1.c Bilan des essais préliminaires

Cette première série d'essais a permis de collecter les efforts spécifiques de coupe pour les implémenter dans le simulateur, de réaliser une cartographie des efforts en fonction des paramètres de coupe, et de mieux comprendre la coupe par une première étude analytique, en calculant l'angle et la contrainte de cisaillement.

A l'issue des résultats précédents, les premières constatations sont :

- le plan complet orthogonal a permis de réaliser une cartographie qui servira, au chapitre suivant, à simuler les efforts de coupe,
- dans le domaine *Vc*, *f* et *γ* étudié, aucun point d'inflexion des efforts spécifiques n'a été observé. Il est important de noter que le nombre de niveaux de chaque facteur est faible (trois niveaux pour chaque facteur) et que les domaines explorés sont très réduits ; par exemple, la vitesse de coupe ne varie que de 2 à 6 m/min,
- les contraintes calculées sont très élevées : jusqu'à plus de 1000 MPa dans la bande de cisaillement. Les angles de cisaillement (ϕ) calculés oscillent entre 30 et 40°, ce qui représente des valeurs très importantes,
- bien que très proche du procédé étudié car une machine de production a été utilisée, des essais de coupes orthogonale sur brocheuse ont le défaut d'être très longs et compliqués à mettre en place. Les machines de production ne sont pas prévues pour réaliser rapidement et facilement un grand nombre de réglages, et tenter de régler des avances par dent de 0,01 mm reste difficile.

IV.2 Deuxième campagne d'essais, pour une extension des modèles

Afin d'étendre les modèles de coupe, des essais de coupe orthogonale en tournage ont été réalisés. Cette campagne a pour but d'étendre les modèles, c'est-à-dire de tester des plages de vitesse, des angles de coupe et des avances par dent plus grandes tout en réalisant un plus grand nombre de points de mesure (niveaux) sur un même facteur. La proximité entre la coupe orthogonale en tournage et en brochage permet des analyses similaires, tout en évitant l'emploi des moyens de production. Nous allons donc durant cette deuxième phase expérimentale :

- étendre le domaine d'étude et augmenter le nombre de niveaux de chaque facteur pour améliorer la qualité de la cartographie réalisée, et chercher de possibles points d'inflexion des efforts spécifiques pour trouver un point de fonctionnement optimal,

- utiliser des outils en carbure, pour assurer une meilleure résistance des outils à l'augmentation des vitesses de coupe.

IV.2.a Procédure expérimentale

Pour réaliser des essais de coupe orthogonale en tournage, deux méthodes sont possibles : soit des essais de coupe sur un disque (figure I-24 a), soit des essais de coupe sur un tube (figure I-24 b). Les essais de coupe orthogonale sur disque permettent de conserver la même vitesse de coupe le long l'arête de coupe. Mais le diamètre du disque diminue à chaque instant et le contact en dépouille varie, comme le montrent les cercles rouges de la figure I-24 c. Dans ce cas, [Germain2011] a démontré que la variation des efforts est due en partie à la variation du diamètre de l'éprouvette. Dans la coupe orthogonale sur tube, la vitesse de coupe varie le long de l'arête de l'outil, selon le rapport entre le diamètre extérieur et le diamètre intérieur. Mais contrairement aux essais sur disque, le contact en dépouille reste identique tout au long de l'essai.

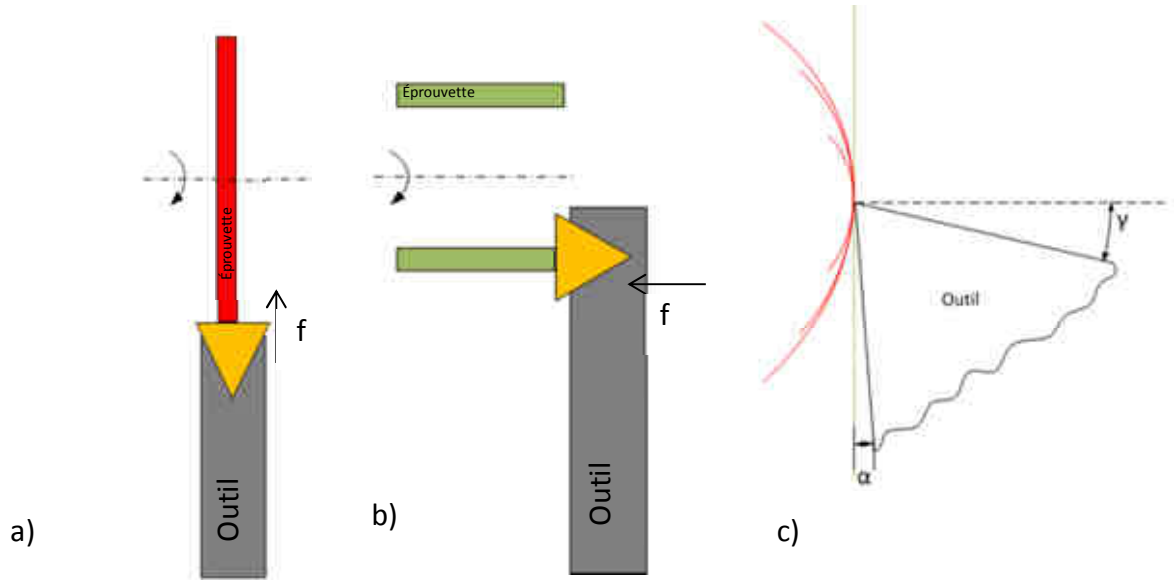


figure I-24 Schéma des essais de coupe orthogonale : a) essai de coupe sur disque b) essai de coupe sur tube c) variation de contact en dépouille entre le tube et le disque.

La configuration tube a été choisie car elle se rapproche le plus du cas du brochage. Pour éviter une trop grande variation de la vitesse de coupe, un diamètre important et une faible épaisseur de tube ont été choisis (figure I-25). Cette configuration génère une variation de la vitesse de coupe de 8% le long de l'arête. Les outils choisis sont des plaquettes du type TCMX 16 T3 08, le X désignant un affutage spécial, qui dans ce cas sont les angles de coupe variant de 0 à 20°.

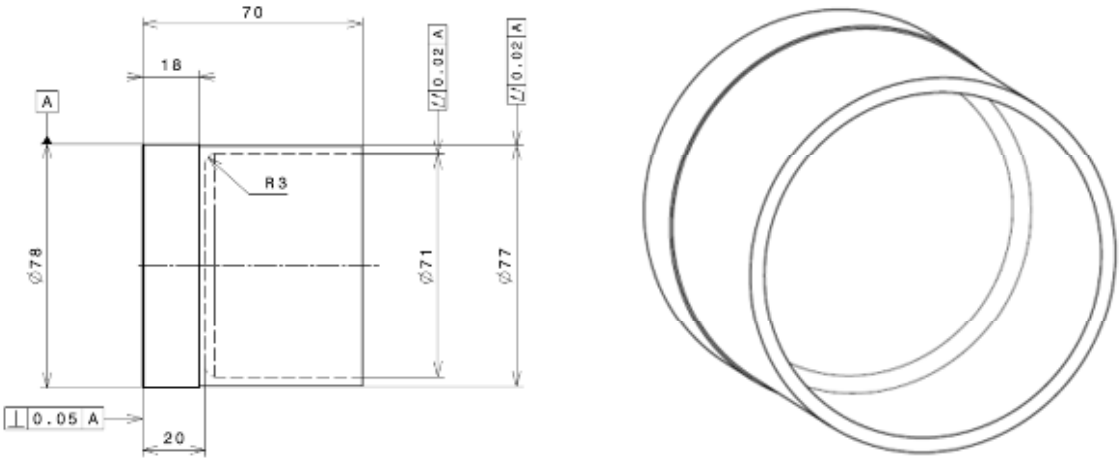


figure I-25 Dessin de l'éprouvette tube pour essais de coupe orthogonale en tournage.

Contrairement aux premiers essais, les outils de cette campagne sont en carbure, pour assurer une meilleure tenue des outils à l'augmentation de vitesse, donc aux températures de coupe plus importantes. La vitesse de coupe maximale est de 20 m/min (Tableau I-5), correspondant à la vitesse maximale de la brocheuse utilisée en production. L'avance par dent la plus grande est fixée à 0,1 mm, comme observé dans la littérature pour brocher des bases nickel avec des outils carbure [Makarov2008]. Les angles de coupe varient de 0 à 20° comme dans certaines études telles que [Kong2011] et [Vogtel2013]. Il s'agit, comme pour la première campagne, d'un plan complet mais avec 125 conditions expérimentales. Ce plan conserve les trois facteurs mais avec une distribution sur 5 niveaux.

Angle de coupe(γ)	0°	5°	10°	15°	20°
Avance par dent (f)	0,01 mm	0,0325 mm	0,055 mm	0,0775 mm	0,1 mm
Vitesse de coupe (Vc)	2 m/min	6,5 m/min	11 m/min	15,5 m/min	20 m/min

Tableau I-5 Plan d'expériences pour les essais de coupe orthogonale en tournage

IV.2.b Résultats expérimentaux

Les outils ont été affutés sans préparation d'arête et non revêtus. De plus, les acuités d'arête des outils des deux campagnes sont du même ordre, entre 4 et 7 µm. Les efforts issus de la deuxième modélisation de tournage et de brochage sont très proches (figure I-26). Dans cet exemple, l'écart maximal est de l'ordre de 8% entre les essais de tournage et de brochage, pour la modélisation issue des équations (I-5) et (I-6) de la page 21. La géométrie de coupe semble, dans notre étude, prépondérante sur les efforts devant le type de matériau de coupe utilisé.

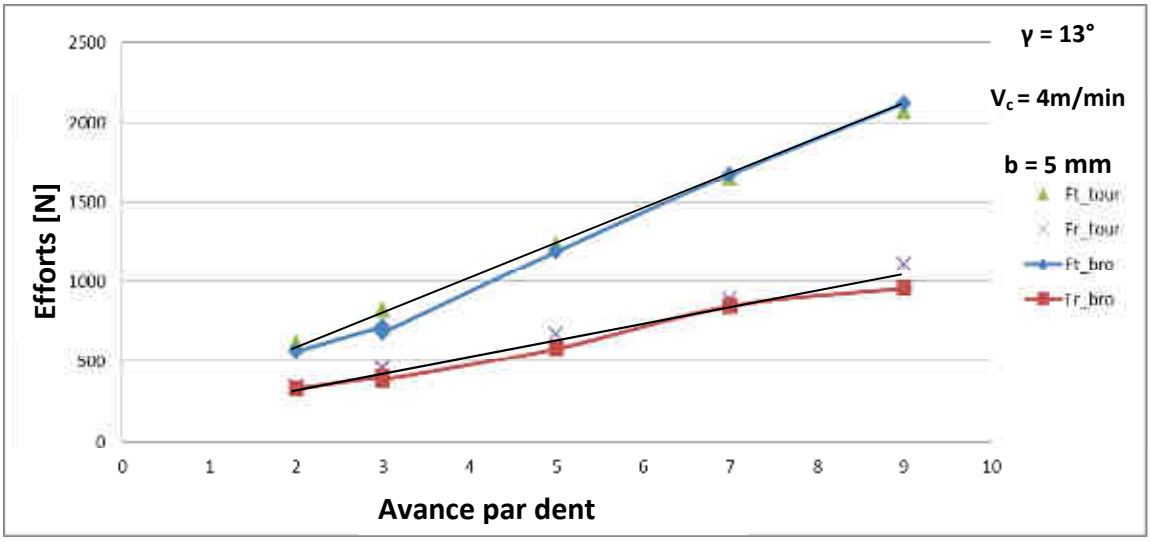


figure I-26 Efforts calculés à partir de la deuxième modélisation empirique en brochage et tournage

Comme durant la précédente étude, la mesure des efforts est le point de départ des modélisations mises en place. Comme précédemment, l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'angle de coupe entraîne une diminution des efforts et ceci aussi bien pour l'effort tangentiel (figure I-27 a), que pour l'effort radial (figure I-27 b). Pour l'effort tangentiel (F_t), une augmentation de 1 m/min de la vitesse la de coupe (Vc) fait diminuer les efforts de 1% en moyenne. Une augmentation de l'angle de coupe (γ) d'un degré diminue notamment les efforts de 1% en moyenne. Sur la plage de vitesses et d'angles de coupe testés, les efforts varient donc sur un intervalle de 40%. Cette indication est primordiale dans le choix des conditions de coupe dans le but d'améliorer la qualité des alvéoles usinées. Plusieurs constatations découlent de l'observation des courbes d'efforts :

- nous le verrons au chapitre 3 plus précisément, mais la diminution des efforts de coupe permet de réduire les défauts géométriques des pièces brochées. Une voie de progrès s'ouvre avec l'utilisation de matériaux permettant l'augmentation de V_c,
- comme durant la première campagne d'essais, aucun point d'inflexion explicite des efforts n'apparaît avec l'augmentation de la vitesse de coupe ; pourtant le domaine a été testé avec une augmentation du nombre de niveaux des facteurs,
- sur des domaines équivalents, les efforts sont similaires entre des outils en carbure et en ARS.

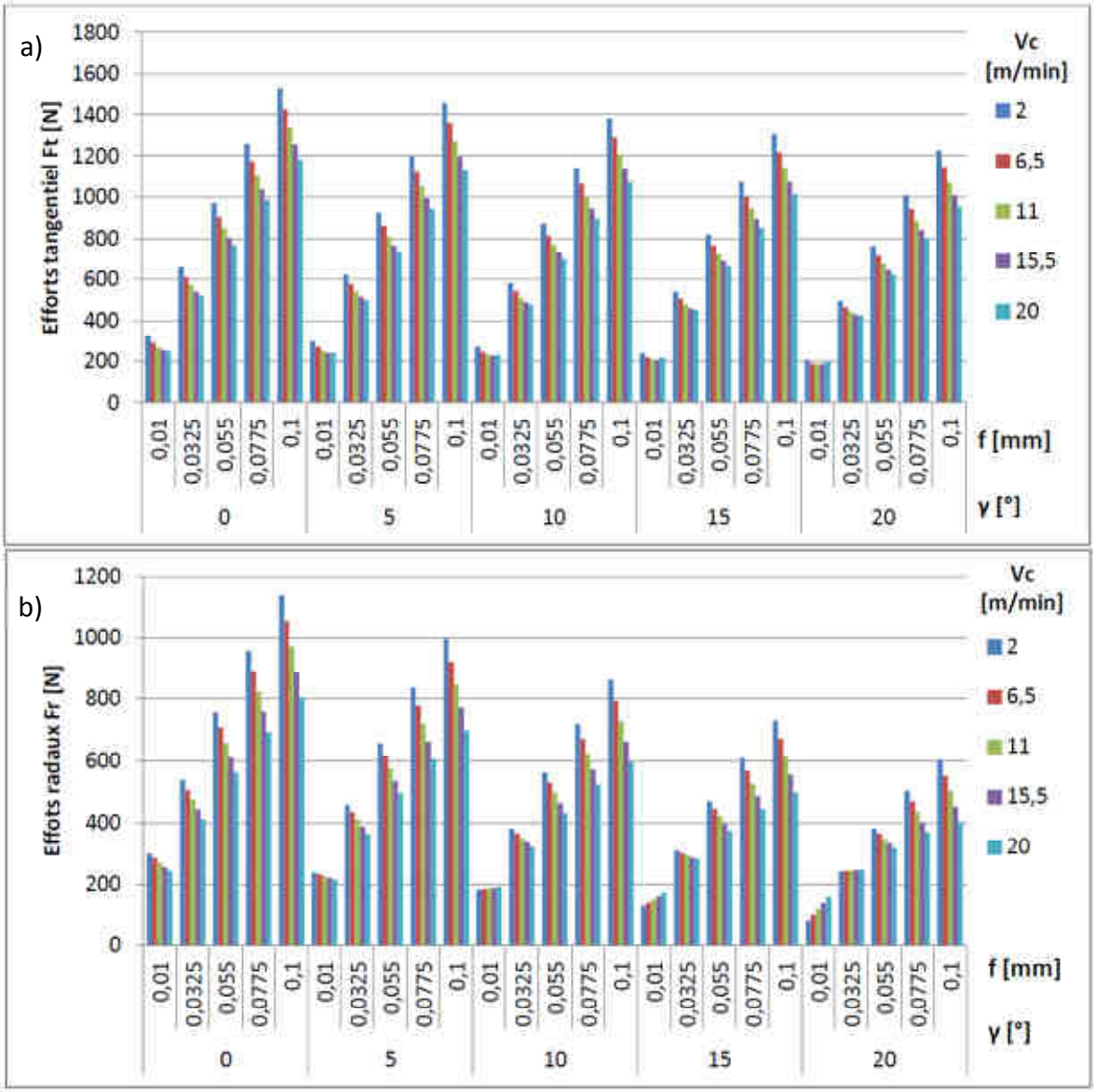


figure I-27 Evolution de l'effort de coupe fonction de *Vc*, *f* et *γ* : a) *Ft* b) *Fr*

Les contraintes de cisaillement du matériau sont toujours très élevées et oscillent comme précédemment aux alentours de 1000 MPa ; sa modélisation est donnée par l'annexe 2.

La mesure de l'épaisseur du copeau est l'un des trois paramètres nécessaires à l'étude analytique de la coupe. Sur un domaine expérimental élargi, la vitesse de coupe et l'angle de coupe présentent maintenant une influence sur l'épaisseur du copeau (figure I-28). Tous les copeaux issus de ces essais sont continus ; aucun festonnage n'a été observé, puisque *Vc* reste relativement faible. Au-delà d'une utilisation dans ce chapitre, afin de réaliser une modélisation des différentes zones de sollicitation de la coupe (calcul de l'angle de cisaillement…), cette grandeur sera réemployée au chapitre suivant pour discuter des méthodes de dimensionnement des chambres à copeau. Une autre remarque peut être ici évoquée: plus le copeau est fin, plus il aura tendance à s'enrouler avec un faible rayon de

courbure, et par conséquent à prendre moins de place dans la chambre à copeau. Une vitesse de coupe et un angle de coupe important combiné à une avance par dent faible permet alors d'obtenir un copeau fin et qui s'enroule sur un faible rayon.

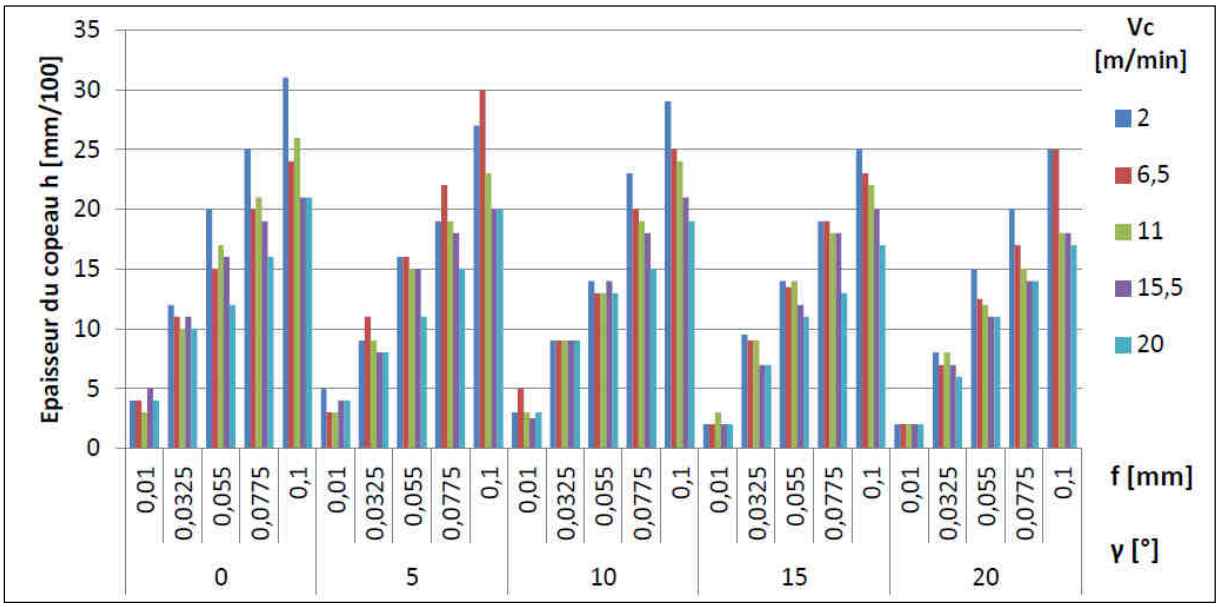


figure I-28 Evolution de l'épaisseur copeau *h* fonction de *Vc, f* et *γ*.

Un quatrième point d'observation a été ajouté dans cette phase expérimentale : la longueur de contact (*lc*) sur la face de coupe. Elle n'était pas mesurable précédemment du fait de la géométrie des outils de brochage qui empêche une vision directe de la face de coupe. La longueur de contact sur la face de coupe a été observée au microscope optique en analysant les marques laissées par le copeau frottant sur la face de coupe. L'utilisation d'une lampe à ultraviolet facilite la délimitation de la zone de contact car elle devient fluorescente (figure I-29 a).

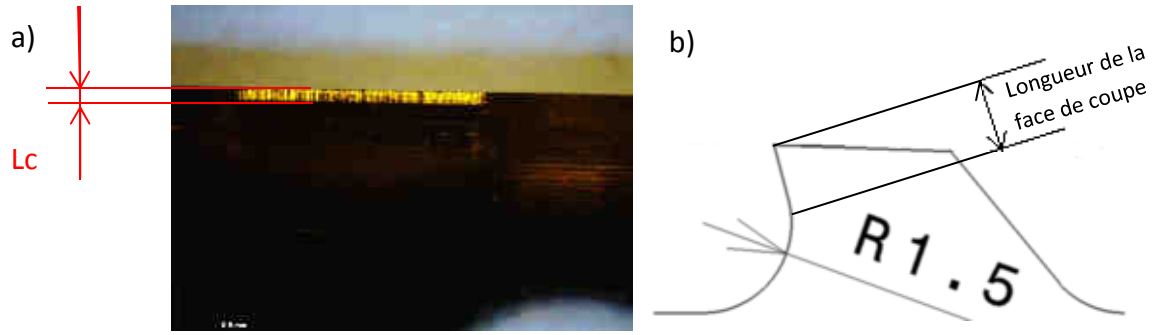


figure I-29 a) Mesure de la longueur de contact sur la face de coupe *lc*
b) Longueur de la face de coupe sur une dent de broche

La longueur de contact sert au calcul de la longueur de la face de coupe nécessaire à la formation du copeau (figure I-29 b). La face de coupe d'une dent de broche est suivie de la goujure, avec un rayon de 1,5 mm dans notre cas. Dans certaines situations de finition, il est

nécessaire de fortement réduire les dimensions des dents de la broche et par habitude, les fabricants de broches conservent une longueur minimale de la face de coupe de 0,5 mm. Grâce à cette cartographie de *lc* (figure I-30), pour une avance par dent de 0,0325 mm, un angle de coupe de 15° et une vitesse de coupe de 2 m/min, *lc* est égale à 0,13 mm. Par conséquent, la longueur de la face de coupe de 0,5 mm est suffisante. Ceci n'est plus le cas si l'avance par dent passe à 0,1 mm.

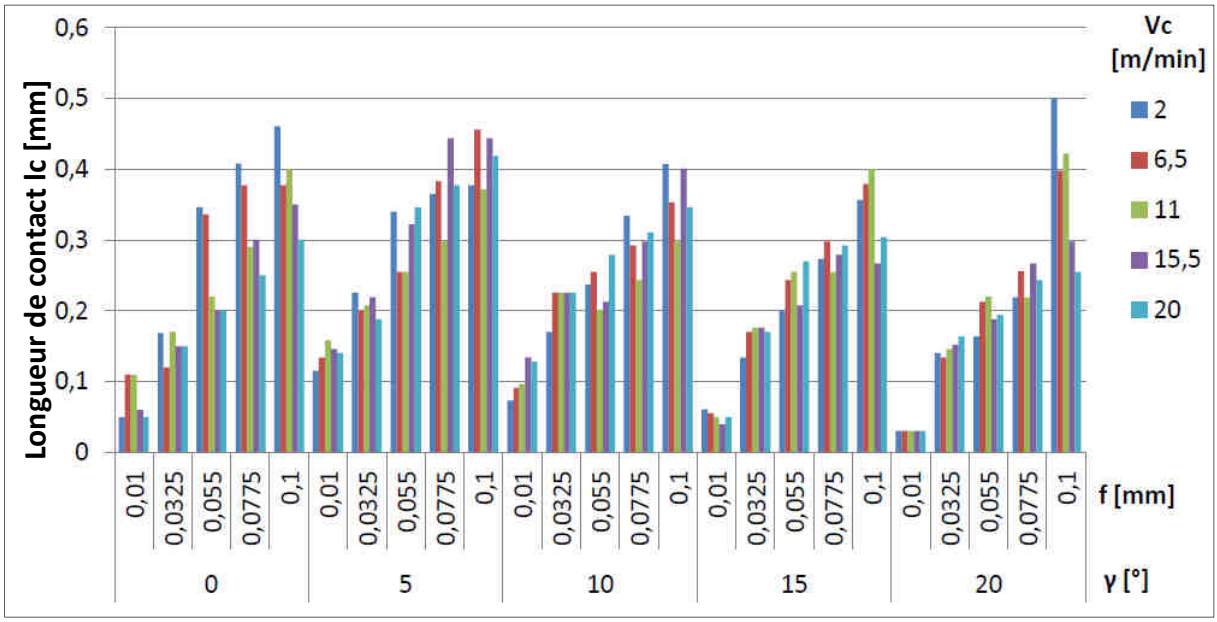


figure I-30 Evolution de la longueur de contact sur la face de coupe *lc* fonction de *Vc*, *f* et *γ*.

IV.2.c Modélisation empirique de la coupe

A partir des résultats obtenus, durant les deux campagnes expérimentales, trois modélisations sont proposées :

- la première est issue des équations (I-18) et (I-19) ,

$$F_t = K_t \times b \times f \quad \text{(I-23)}$$

$$F_t = K_t \times b \times \quad \text{(I-24)}$$

- la deuxième intègre l'effet de la zone d'indentation des équations (I-5) et (I-6) de la page 21 ,

$$F_t = K_{tc} \times b \times f + K_{te} \times b \quad \text{(I-25)}$$

$$F_{rc} = K_{rc} \times b \times f + K_{re} \times b \quad \text{(I-26)}$$

- la troisième est la modélisation, mécanistique permet le passage de la coupe orthogonale à la coupe oblique, déjà présenté au point III.1.c par les équations (I-14) à (I-17) de la page 22. Cette modélisation demande au préalable de calculer les paramètres analytiques des équations (I-7) à (I-10) de la même page.

IV.3 Evaluation de l'influence du matériau sur les efforts de coupe

Tous les essais réalisés jusqu'à présent proviennent d'éprouvettes issues d'une même barre d'Udimet 720® et ayant subi le même cycle de traitement thermique. Afin de vérifier l'influence des cycles de traitement thermique sur les efforts de coupe, une campagne d'essais a été réalisée sur des éprouvettes ayant trois cycles différents (Tableau I-3) :

- un cycle de vieillissement type grain fin (490 HV_{30}), 'gf',
- un cycle de vieillissement type gros grain (465 HV_{30}), 'gg',
- une mise en solution mais sans vieillissement (440 HV_{30}),'st'.

Ces trois traitements ont été choisis car ils permettent une variation de dureté du matériau de l'ordre de 50 HV_{30}, soit une variation de 10%. Le vieillissement influence principalement la formation de la phase γ'_t. Le plan d'expériences pour cette dernière étude se compose d'essais de coupe orthogonale où la vitesse de coupe a été fixée à 2 m/min, et l'angle de coupe fixé à 15°. Trois avances par dent ont été choisies (0,05, 0,07 et 0,09 mm) pour éviter des risques de copeau mini et identifier des variations d'effort significatives. Ces essais ont été répétés sur trois broches afin d'évaluer la répétabilité des essais.

Les résultats de la mesure des efforts tangentiels (F_t) se trouvent dans le Tableau I-6 où l'avance théorique et l'avance mesurée sont précisées.

Numéro de broche	1	2	3	1	2	3	1	2	3
f théorique [µm]	50	50	50	70	70	70	90	90	90
f mesurée [µm]	50	53	62	65	69	74	84	90	90
F_t 'gf' [N]	1265,0	1286,0	1661,0	1561,0	1766,0	1857,0	1884,0	1915,0	1928,0
F_t 'gg' [N]	1300,0	1290,0	1651,0	1539,0	1767,0	1815,0	1856,0	1989,0	1930,0
F_t 'st' [N]	1234,0	1233,0	1624,0	1597,0	1769,0	1878,0	1901,0	2026,0	1926,0
moyenne	1266,3	1269,7	1645,3	1565,7	1767,3	1850,0	1880,3	1976,7	1928,0

Tableau I-6 Variation de F_t en fonction de l'avance par dent et du cycle de traitement thermique

Pour une même broche et une même avance par dent mesurée, les efforts ne varient que très peu en fonction du traitement thermique ; l'écart maximal est de 5,2%. Par contre, pour

un même traitement et une même avance par dent théorique, les efforts varient beaucoup d'une broche à l'autre. L'écart maximal est de 28,5% car l'avance théorique ne reflète pas la réalité. A partir de ces informations, nous constatons durant cet essai que l'avance peut varier sur un intervalle de plus de 12 µm pouvant créer des erreurs de mesure.

Un autre moyen d'observer la faible variation des efforts en fonction des trois traitements thermiques est de tracer les efforts tangentiels en fonction de l'avance par dent réelle (figure I-31). Sur ce graphique, les cercles bleus représentent les usinages réalisés par la broche 1, en vert ceux de la broche 2 et en rouge la troisième broche. Dans ces cercles se trouvent à chaque fois les trois brochages réalisés par chaque dent de la broche pour les trois différents traitements.

Ce dernier plan d'expériences a fait apparaître que l'avance par dent des broches pouvait varier. Nous verrons ceci plus précisément au chapitre trois. Durant cette campagne, la variation de l'avance par dent a eu plus d'influence sur les efforts que le cycle de traitement appliqué sur la pièce. Les différentes broches testées qui avaient pour but d'améliorer la répétabilité de nos essais ont, au contraire, créé une dispersion prise en compte dans notre étude.

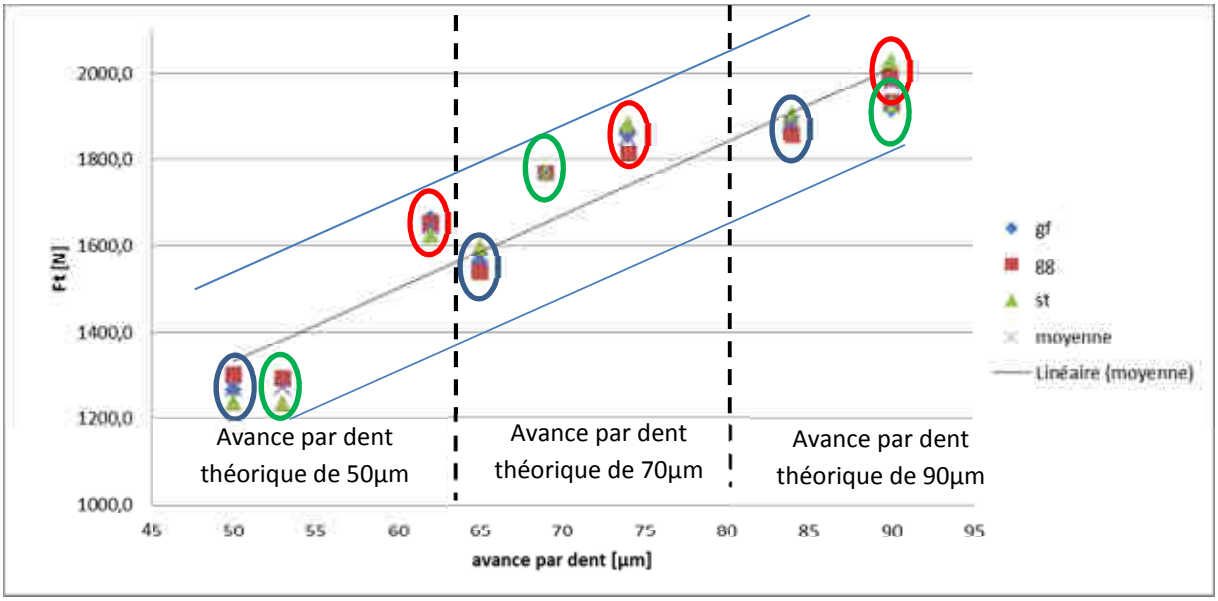


figure I-31 Evolution de l'effort tangentiel en fonction de l'avance par dent mesurée et du cycle de traitement thermique

Pour les prochains chapitres de ce mémoire, nous continuerons à utiliser des éprouvettes issues du cycle de traitement thermique type grain fin, cet essai ayant montré une faible dispersion des efforts en fonction du cycle de traitement thermique appliqué.

V Bilan

L'Udimet 720®, bien que de plus en plus utilisé par les motoristes aéronautiques, est toujours un matériau peu connu avec un faible nombre d'études disponibles sur sa coupe. Ce premier chapitre a présenté ses caractéristiques et des essais d'usinabilité nécessaires pour engager les modèles de coupe.

Ce matériau a des propriétés mécaniques élevées sur tout le domaine exploré par les deux plans d'essais. Les contraintes dans la bande de cisaillement primaire sont supérieures à 1000 MPa et aucun festonnage des copeaux n'a été observé. Les taux de déformation pour des vitesses de coupe de 20 m/min atteignent plus de $2x10^4$ s^{-1}. La résistance de ce matériau est de plus de 1600 MPa à 20°C et il conserve ses caractéristiques mécaniques jusqu'à plus de 750°C, contrairement à la broche en acier rapide spécial qui voit ses caractéristiques mécaniques chuter à partir de 550°C. Les contraintes subies par l'outil lors de l'usinage sont donc importantes. L'étude analytique permet de combler le manque d'information sur ce matériau et d'ouvrir la possibilité à des travaux sur la mécanique de la coupe. Ce mémoire ne développe pas de modèle entièrement analytique mais cela pourrait être une perspective de travail sur l'usinage de ce matériau.

Les essais de coupe orthogonale en tournage se sont montrés plus faciles à mettre en œuvre qu'en brochage et plus précis pour maîtriser les paramètres d'usinage. L'intérêt de réaliser des expérimentations sur la coupe en tournage pour implémenter des lois de coupe et simuler le brochage par la suite est démontré. Cette base de données d'efforts de coupe peut aussi simuler d'autres procédés tels que le fraisage, le perçage et le forage… comme l'ont déjà fait certaines études dans le passé.

Dans ce chapitre, la broche est simplifiée à un outil à une seule dent pour s'intéresser localement à l'usinabilité. Les modélisations empiriques et analytiques utilisées ont été présentées et les résultats obtenus permettent d'obtenir trois modèles d'efforts avec des résultats similaires. Les deux premiers sont purement empiriques et ont pour but de modéliser la coupe orthogonale. Le troisième modélise la coupe oblique à partir d'essais orthogonaux, pour réduire les expérimentations. Le modèle mécanistique sera utilisé pour simuler les efforts issus des formes complexes des broches pied de sapin.

Les trois modèles développés ainsi que d'autres paramètres tels que l'épaisseur des copeaux (h) ou la longueur de contact sur la face de coupe (lc) seront utilisés dans le deuxième chapitre pour développer un simulateur d'effort en brochage et une méthode de conception des broches. La simulation et la base de données permettront aussi d'améliorer la surveillance en usinage.

Deuxième chapitre

Compréhension et dimensionnement des broches pied de sapin

Table des matières

I Objectif de ce chapitre 47

II Présentation industrielle et bibliographique des broches pied de sapin 48

II.1 Les alvéoles pied de sapin 48

II.2 La fabrication des alvéoles pied de sapin 48

II.2.a Usinage des alvéoles pied de sapin par fraisage 50

II.2.b Usinage des alvéoles pied de sapin par rectification 51

II.2.c Usinage des alvéoles pied de sapin par jet d'eau 51

II.2.d Usinage des alvéoles pied de sapin par électroérosion 52

II.2.e Bilan des procédés alternatifs dans le cadre de notre étude 53

II.3 Les broches et brocheuses 53

II.4 Les broches pied de sapin 55

III Bibliographie des méthodes de dimensionnement des broches 60

III.1 Méthodes métiers 60

III.2 Optimisations multicritères 62

III.3 Simulations par éléments finis 65

III.4 Bilan des méthodes de dimensionnement des broches pour optimiser le procédé 66

IV Développement d'un simulateur des efforts de coupe en brochage 67

IV.1 Bibliographie de la simulation des efforts de coupe en usinage 67

IV.2 Méthode de calcul géométrique 68

IV.3 Paramètres caractérisant la broche 70

IV.4 Lois de coupe 72

IV.5 Simulation du brochage 73

IV.5.a Algorithme de simulation 73

IV.5.b Discussion des résultats 75

IV.5.c Utilisation du simulateur 77

V Bilan 80

I Objectif de ce chapitre

Au premier chapitre, il avait été demandé au lecteur de considérer une broche comme un outil n'ayant qu'une seule dent et travaillant en coupe orthogonale, ceci dans le but de simplifier la compréhension et de ne travailler que sur la coupe à proprement dit. Dans ce chapitre, la broche devient un outil à plusieurs dents travaillant en coupe oblique et générant des formes complexes, dans notre cas des alvéoles pied de sapin. Nous allons étudier ces outils complexes pour comprendre les efforts générés durant la coupe. Pour atteindre ces objectifs, ce chapitre est articulé autour de trois axes :

- la présentation des alvéoles pied de sapin, leur fabrication, les machines de brochage et enfin les broches pied de sapin, dans le but de rassembler les connaissances nécessaires sur les outils de brochage,
- les méthodes de dimensionnement et de conception des broches pied de sapin, afin de dresser un état des lieux des méthodes disponibles et de tester leur pertinence pour notre étude,
- le développement d'un simulateur d'effort de coupe en brochage. Le principe retenu est d'associer à chaque section discrétisée de la broche des efforts élémentaires puis de les sommer pour permettre de simuler les efforts dans un repère global fonction du temps. La somme des efforts élémentaires obtenus par l'étude mésoscopique du chapitre précédent permettra de passer à l'échelle macroscopique, c'est-à-dire à l'échelle d'une broche entière.

La dernière partie de ce chapitre fait le bilan des méthodes de conception et du développement du simulateur et proposera les données de sortie nécessaires au chapitre suivant.

II Présentation industrielle et bibliographique des broches pied de sapin

II.1 Les alvéoles pied de sapin

Une alvéole pied de sapin est la partie du disque de turbine assurant la liaison mécanique avec une pale. Les disques et les pales, se trouvant après la chambre de combustion, sont soumis à des sollicitations thermomécaniques très importantes et surtout fonctionnent dans une atmosphère corrosive pendant un très grand nombre d'heures. Cet assemblage est sollicité en fatigue avec des températures pouvant atteindre 750°C. La figure II-1 montre un disque de turbine, en haut à gauche, et 5 pales montées dans des alvéoles pied de sapin brochées. Le dimensionnement de cet assemblage est un point capital de la conception du turbomoteur aussi bien pour sa performance que pour la sécurité des vols. Bien qu'utilisé depuis plus de cinquante ans dans les turbomachines, cet assemblage fait toujours l'objet d'études, [Béranger2012], [Alvanos2012].

Au vu de ces très fortes contraintes sur le disque de turbine, le procédé de fabrication de ces dernières doit garantir la meilleure intégrité de surface possible. Différents projets européens, impliquant motoristes et laboratoires de recherche, ont permis d'identifier les liens entre procédés de fabrication, perturbations de la coupe et défauts d'intégrité de surface. On peut notamment citer les projets ManHirp et ACCENT.



figure II-1 Assemblage pales disque

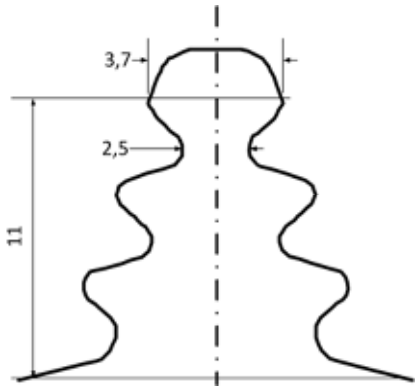
II.2 La fabrication des alvéoles pied de sapin

La première difficulté pour usiner une alvéole réside dans ses dimensions (figure II-2 a) et ses tolérances, correspondant à une enveloppe de 15 µm tout le long du profil. La cote la plus restrictive pour l'usinage étant celle de 2,5 mm (avec un porte à faux de l'ordre de 10 mm)

car elle diminue fortement les dimensions des outils. La figure II-2 b est un schéma d'une alvéole pied de sapin en taille réelle et le cercle entourant l'alvéole est du même diamètre qu'une pièce de 1 euro. Un outil usinant une alvéole pied de sapin est confronté à :

- des formes complexes de petites dimensions,
- des tolérances très serrées (enveloppe de 15 µm),
- une coupe confinée, et laissant peu de place à la formation du copeau,
- des matériaux durs imposant des températures et des efforts élevés.

a)



Alvéole pied de sapin 3:1

b)



Alvéole pied de sapin 1:1

figure II-2 a) Schéma des alvéoles pied de sapin échelle 3 :1 b) Alvéole pied de sapin échelle 1 :1

Une étude bibliographique a permis d'évaluer si d'autres procédés que le brochage étaient utilisables pour usiner des alvéoles pied de sapin ayant les dimensions de la figure II-2. La bibliographie nous propose quatre procédés déjà mis en place chez d'autres industriels et potentiellement utilisables pour notre étude:

- l'usinage par fraisage par fraise de forme,
- l'usinage par rectification,
- l'usinage par jet d'eau,
- l'usinage par électroérosion.

Dans cette étude, deux critères ont été choisis pour décider si ces procédés pouvaient être une alternative au brochage pour l'industriel :

- le procédé est-il capable de réaliser la forme de l'alvéole pied de sapin ? Si un procédé ne peut qu'ébaucher la forme il ne sera pas retenu,
- le procédé garantit-il l'intégrité de surface demandée à l'alvéole pied de sapin ? Si un procédé génère des couches thermomécaniquement affectées (aussi appelées couches blanches, [Perrin2007], [Dutilh2011]), une rugosité trop importante ou des contraintes résiduelles de traction en extrême surface, il ne sera pas retenu.

II.2.a Usinage des alvéoles pied de sapin par fraisage

Le fraisage des alvéoles pied de sapin est couramment utilisé de nos jours pour deux types d'application :

- pour des alvéoles de très grandes dimensions nécessitant des broches trop longues pour être montées sur les moyens dont dispose l'industriel,
- pour réaliser des alvéoles courbes car, contrairement à la fraise, la broche ne peut effectuer des trajectoires courbées, comme le montre la figure II-3 a.

Bien que la littérature sur le fraisage des bases nickel soit importante, aucune étude scientifique à notre connaissance ne traite du fraisage des alvéoles pied de sapin, ainsi les informations collectées viennent du monde industriel. La figure II-3 b présente une fraise de forme pour réaliser les alvéoles pied de sapin, fabriquée par Seco®. Un point important à noter est que cet outil est en carbure monobloc, et peut être doté d'une lubrification par ses goujures ainsi qu'un revêtement, contrairement au brochage avec outils ARS de nos jours. Ces dernières années, avec l'augmentation du marché des turbomachines dans le domaine de l'énergétique de forte puissance, de plus en plus de carburiers proposent ce type d'outils comme alternative aux broches ARS qui nécessiteraient des brocheuses de très grandes dimensions.



a) b)

figure II-3 a) Fraisage d'alvéole courbe b) Fraise pied de sapin d'après Seco®

Bien qu'il permette, si les paramètres de coupe sont correctement choisis, d'obtenir l'intégrité de surface nécessaire [Debard 2010], et qu'il soit de plus en plus employé pour usiner les alvéoles pied de sapin, le procédé de fraisage n'a pas été retenu. En effet, les dimensions des alvéoles usinées dans le cadre de cette étude (figure II-2) ne permettent pas de réaliser une fraise si petite.

II.2.b Usinage des alvéoles pied de sapin par rectification

Historiquement, les pieds de pale (partie de la pale se glissant dans l'alvéole pied de sapin) étaient réalisés par brochage et cette technologie a été remplacée par la rectification. Certains fabricants de machines de rectification de pieds de pale proposent depuis peu d'appliquer ce procédé aux alvéoles pied de sapin. La figure II-4 a est un schéma expliquant comment une meule de forme peut usiner les deux côtés d'une alvéole pied de sapin. La figure II-4 b est une photographie de la meule et des alvéoles à usiner. Ce système est appelé Viper-Grinding et est proposé par la société Makino®.

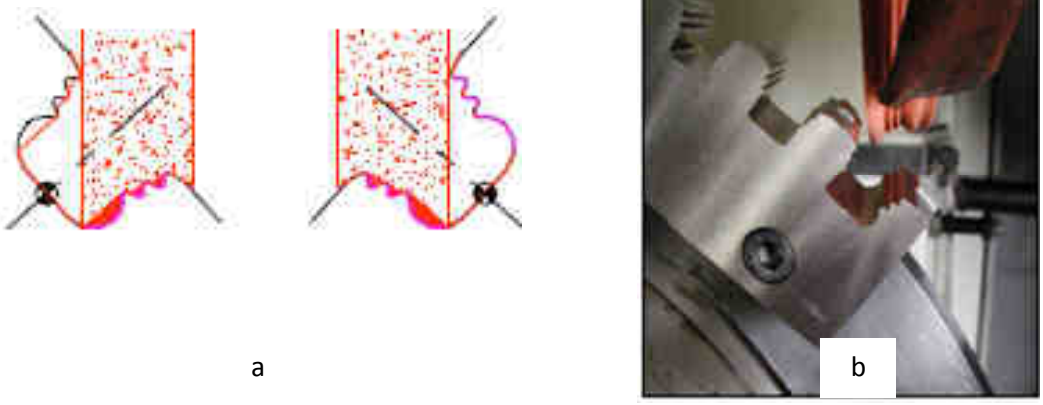


figure II-4 a) Schéma de rectification des alvéoles pied de sapin
b) Meule et disque en cours d'usinage d'après Makino®

Comme dans le cas du fraisage, ce procédé nécessite des alvéoles d'une dimension supérieure à celle de cette étude pour permettre de réaliser l'outil. Le procédé de rectification présente aussi le risque de produire une zone thermomécaniquement affectée pouvant générer un abattement en fatigue de l'alvéole. Ce système n'a donc pas été retenu.

II.2.c Usinage des alvéoles pied de sapin par jet d'eau

Une application d'usinage par jet d'eau est une stratégie proposée par le brevet [El-Wardany2008a] permettant d'usiner les alvéoles pied de sapin et ce procédé a l'avantage de ne pas générer de zones thermomécaniquement affectées dans la pièce. Mais des essais réalisés en interne par l'industriel avant ces travaux de thèse ont démontré que ce procédé n'était pas capable de produire des alvéoles avec des tolérances aussi sévères que celles de notre étude. Sur toute la longueur du brochage, le jet est dévié progressivement, générant des défauts géométriques et de rugosité. Ce procédé ne répond donc pas aux critères fixés pour choisir un procédé alternatif au brochage.

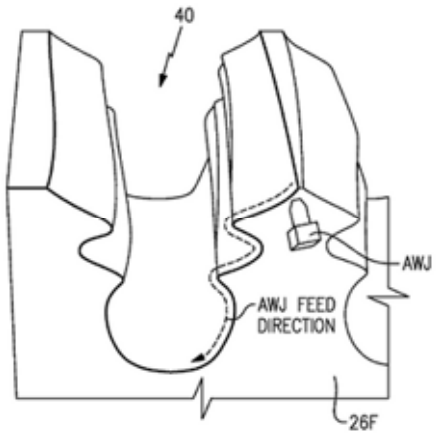


figure II-5 Alvéole usinée au jet d'eau abrasif d'après le brevet [El-Wardany2008a]

II.2.d Usinage des alvéoles pied de sapin par électroérosion

La bibliographie sur la fabrication des alvéoles pied de sapin semble un peu plus fournie pour le procédé d'usinage par électroérosion. Ainsi, un second brevet déposé par [El-Wardany2008b] propose une stratégie d'usinage pour la réalisation des alvéoles.

Une première étude, [Antar2011], propose de modifier les fils utilisés mais surtout suggère d'optimiser les paramètres d'usinage, principalement en réduisant le courant, pour réduire la zone thermomécaniquement affectée. Cette étude indique qu'en choisissant des conditions opératoires adaptées dans de l'Udimet720®, la zone thermomécaniquement affectée tend à devenir très faible sans pour autant disparaître totalement. Ces mêmes paramètres présentent aussi une amélioration du critère de rugosité (Ra) et des contraintes résiduelles passant de la traction à des valeurs quasiment nulles. Cette étude expose aussi des résultats expérimentaux sur du titane type Ti64.

Une autre étude, [Klocke2011], compare la durée de vie entre des éprouvettes de titane (Ti64) rectifiées et usinées par électroérosion. Comme pour [Antar2011], le choix des conditions garantissant une meilleure qualité de la surface usinée est fait.

Malgré tout, ce procédé n'a pas été retenu dans le cadre de cette étude pour deux raisons :

- le risque de formation d'une zone thermomécaniquement affectée,
- le temps nécessaire pour produire une alvéole, beaucoup plus long que celui du brochage.

II.2.e Bilan des procédés alternatifs dans le cadre de notre étude

Ces quatre procédés n'ont pas été investigués après cette étude bibliographique car il n'était pas possible de répondre favorablement aux deux critères fixés. De plus, contrairement au brochage qui usine une alvéole très rapidement (toutes les 3 minutes dans le cadre de cette étude), les procédés alternatifs demandent des temps beaucoup plus longs, pouvant aller jusqu'à 20 min par alvéole pour l'électroérosion (d'après les vitesses annoncées par les études précédentes). Devant l'impossibilité actuelle de trouver une technologie alternative au brochage pour des alvéoles pied de sapin de si petites dimensions, il est nécessaire de se concentrer sur l'optimisation du brochage dans le but d'améliorer la qualité des alvéoles produites.

II.3 Les broches et brocheuses

Il existe deux grandes familles de broche : les broches intérieures (figure II-6 b), et extérieures (figure II-6 a). Les principales publications disponibles sur les généralités du brochage sont [Bellais1997], [Bertin1979], [Monday1960], [ASM1995].

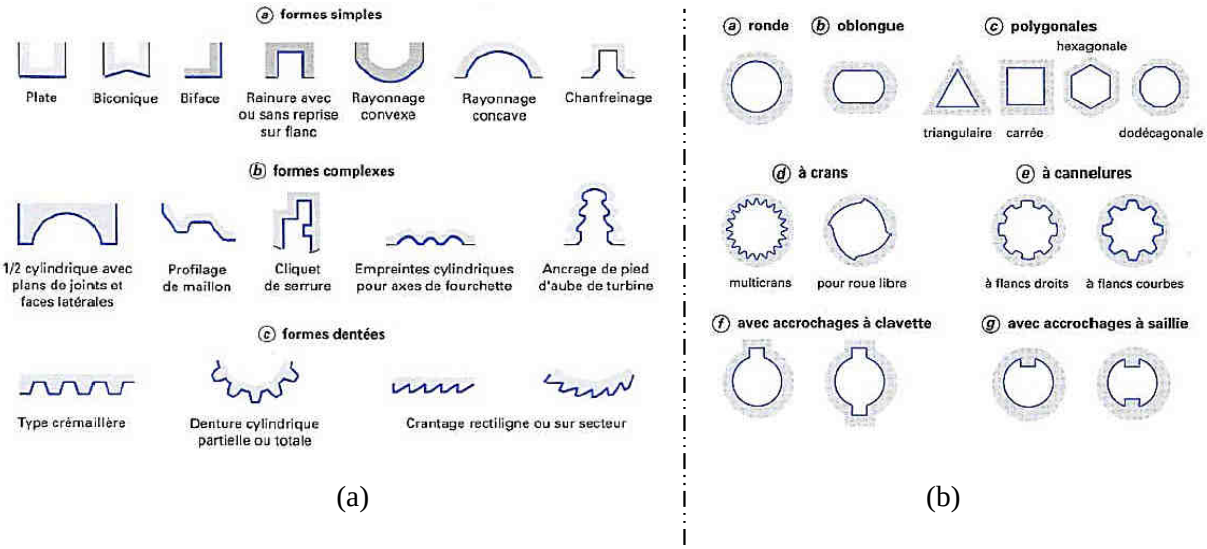


figure II-6 Différents types de formes brochées d'après [Bellais 1997] : a) extérieur b) intérieur

Un outil de brochage intérieur ou extérieur, est toujours caractérisé par certains paramètres clés tels que (figure II-7) :

- le pas (*P*),
- un angle de coupe (*γ*),
- un angle de dépouille (*α*),
- un rayon de goujure ($r_{goujure}$),
- une profondeur de chambre à copeau (*c*).

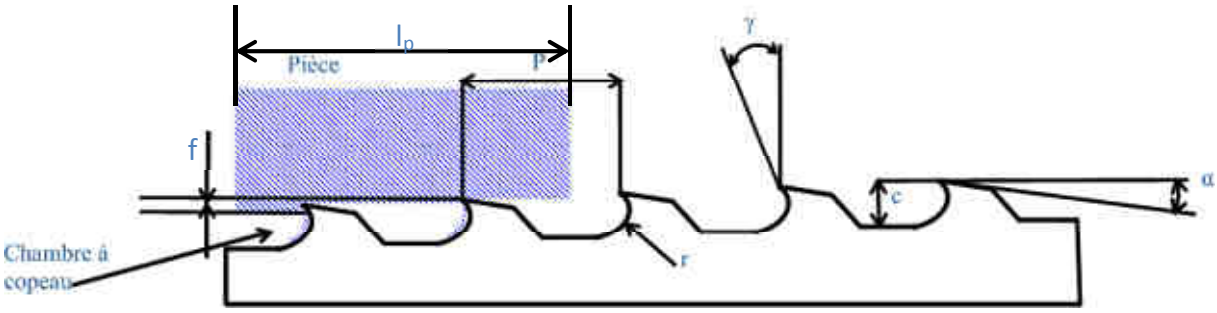


figure II-7 Schéma des éléments caractérisant une broche

De même, il existe deux familles de brocheuses, intérieure et extérieure, suivant le type de pièces usinées. [Bellais1998] propose une classification des brocheuses suivant cinq critères (figure II-8). Pour réaliser des alvéoles pied de sapin, les brocheuses utilisées peuvent être verticales ou horizontales, et la commande, électrique ou hydraulique. La brocheuse utilisée dans le cadre de cette étude est à commande électrique pour garantir une vitesse de coupe constante.

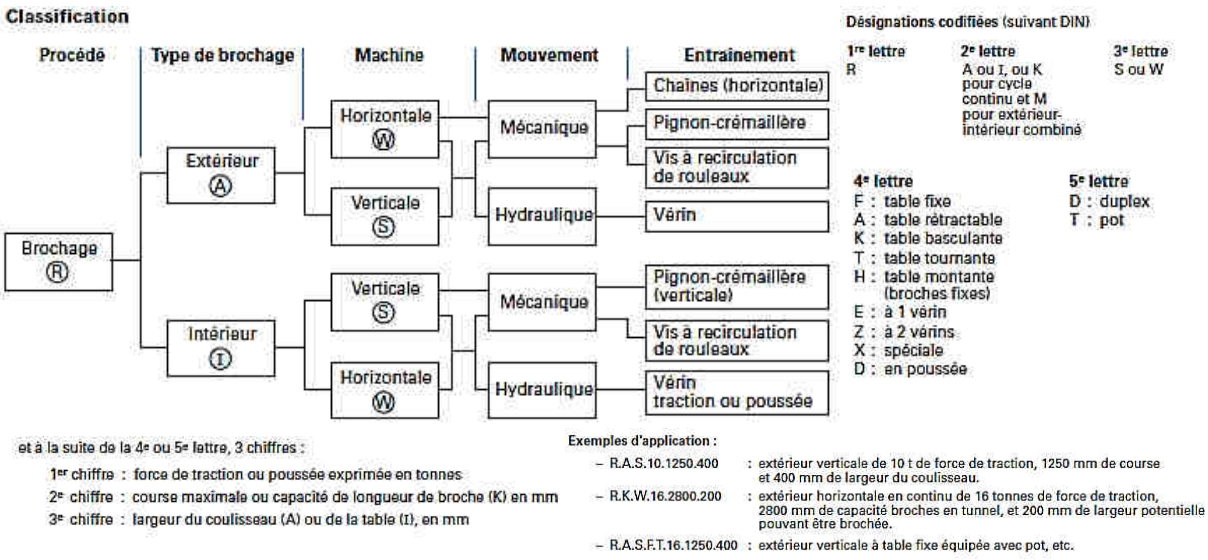


figure II-8 Classification des brocheuses, suivant [Bellais1998]

En suivant cette classification, la brocheuse de l'étude est une R.A.S.A.10.2000.600 verticale à table rétractable avec 10 tonnes de poussée, 2 mètres de longueur de coulisseau et 0,6 mètre de largeur de coulisseau. La figure II-9 est un schéma cinématique représentant les axes de la brocheuse utilisée.

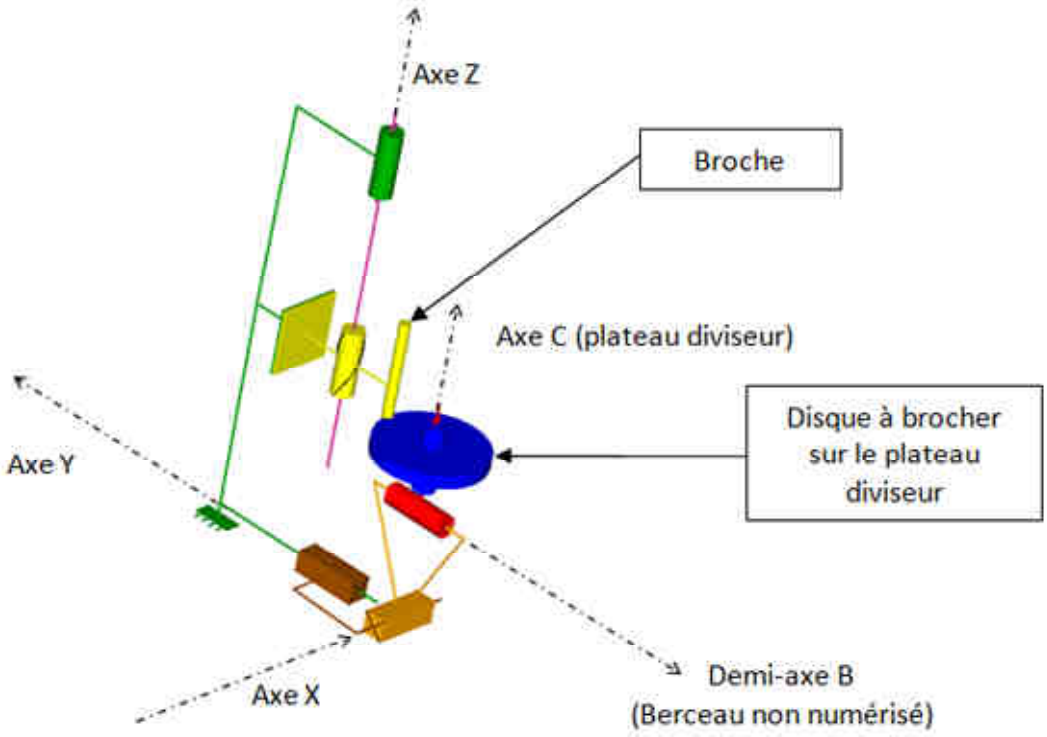


figure II-9 Schéma des axes de la brocheuse d'alvéoles pied de sapin, réalisé sous OpenMeca®

II.4 Les broches pied de sapin

La broche pied de sapin est un cas particulier de broche extérieure. Elle comporte plusieurs éléments, généralement plus d'une dizaine. La figure II-10 a présente les différents éléments constituant la broche pied de sapin à l'aide d'une carte de coupe, qui est une représentation en deux dimensions de l'empreinte laissée par chaque élément de la broche (numérotée ici de 1 à 10) dans le disque. Sur la figure II-10 b se trouve une photographie d'un disque où chaque encoche successive représente l'enlèvement de matière réalisé par chaque élément de la broche. Il est donc possible de voir petit-à-petit la forme de l'alvéole pied de sapin se dessiner. Les 6 premiers éléments (appelés ébauches droites) sont utilisés pour réaliser une encoche dans le disque et permettre le passage des éléments de finition. Les éléments 8 et 9 servent à ébaucher le lobe de la partie la plus profonde de l'alvéole et l'élément 10 permet de transformer l'encoche ébauchée en alvéole pied de sapin. L'élément 10 est réaffuté quand son usure en dépouille dépasse 0,3 mm. Un élément dit de calibrage est ajouté pour obtenir les dimensions de l'alvéole, car le réaffutage diminue les dimensions des éléments de la broche.

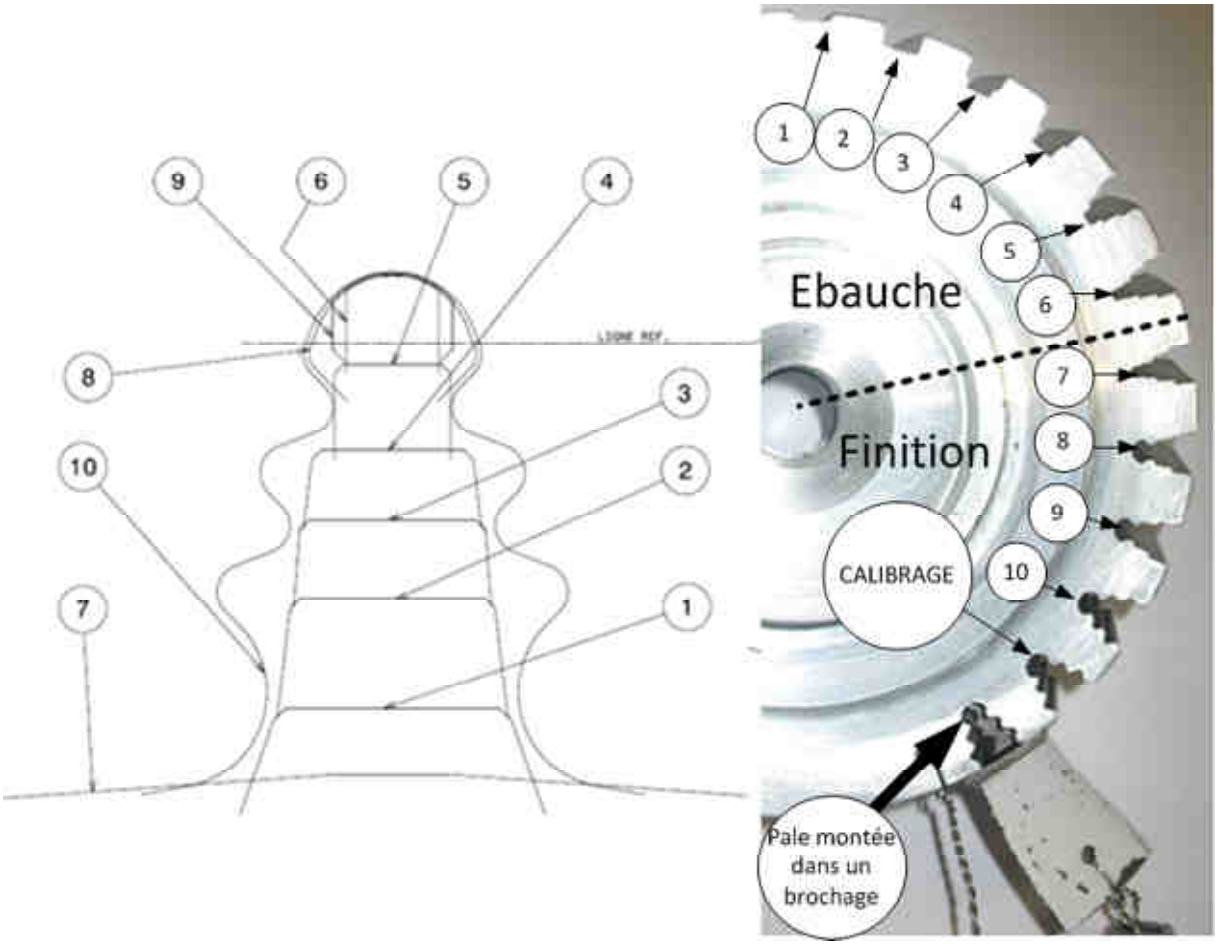


figure II-10 a) Carte de coupe b) Séquences d'usinage sur un disque

Les éléments d'ébauche de la broche ne servent qu'à usiner une encoche dans le disque pour permettre le passage des éléments de finition qui, eux, transforment l'encoche en alvéole pied de sapin. La figure II-11 est une vue isométrique d'un de ces éléments d'ébauche de 12 dents. Ces outils travaillent en condition de coupe orthogonale.

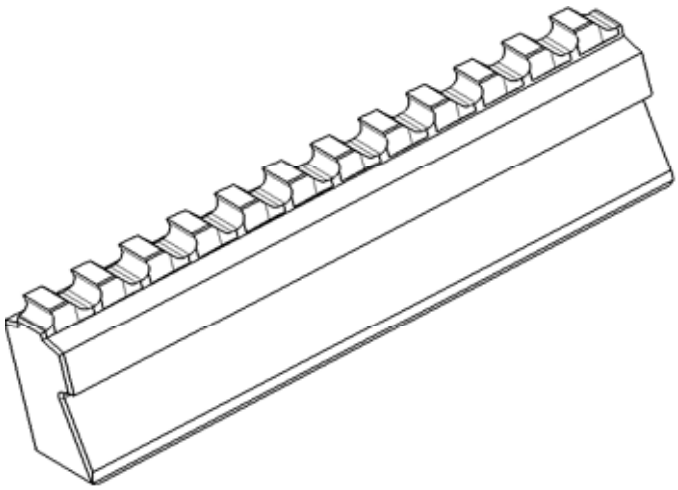


figure II-11 Eléments d'ébauche d'une broche pied de sapin

Une fois que les éléments d'ébauche ont fait une encoche dans le disque, il existe trois possibilités pour générer l'alvéole pied de sapin :

- la première solution est généralement appelée broche sapin (figure II-12 a). Il s'agit d'un usinage en génération où la forme finale (en noir) est progressivement générée par une suite de lignes droites (en rouge) qui creusent progressivement la forme,
- la deuxième solution est appelée broche de calibrage (figure II-12 b). Il s'agit d'un usinage de forme où le profil de chaque dent est identique à celui de l'alvéole à obtenir et progresse suivant la direction d'avance,
- la dernière solution est appelée broche zigzag (figure II-12 c). Cette solution combine deux formes qui s'intersectent progressivement. La forme de l'alvéole souhaitée (en noir) est obtenue par la progression suivant sa direction d'avance d'une forme dite en 'zigzag' (en rouge).

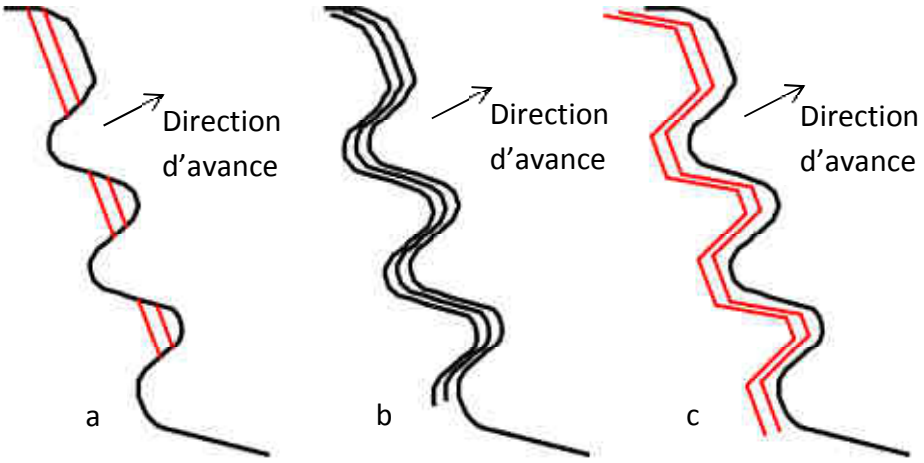


figure II-12 Eléments de finition d'une broche pied de sapin :
a) broche sapin b) broche de calibrage c) broche zigzag

Pour la fabrication de l'outil, au départ, toutes les dents le long de la broche sont identiques, et sont rectifiées à la forme finale de l'alvéole pied de sapin. Puis, chaque dent est rognée progressivement par une autre opération de rectification (lignes droites pour la broche sapin, profil final décalé pour la broche de calibrage et forme en zigzag pour la broche zigzag) pour réaliser l'avance par dent.

La figure II-13 illustre la génération progressive du profil par une broche sapin. Sur le détail A, les dents (les premières de la broche) sont droites et le profil pied de sapin n'est pas encore visible. Sur le détail B, le profil commence à apparaître et le détail C montre des dents ayant le profil final de l'alvéole pied de sapin.

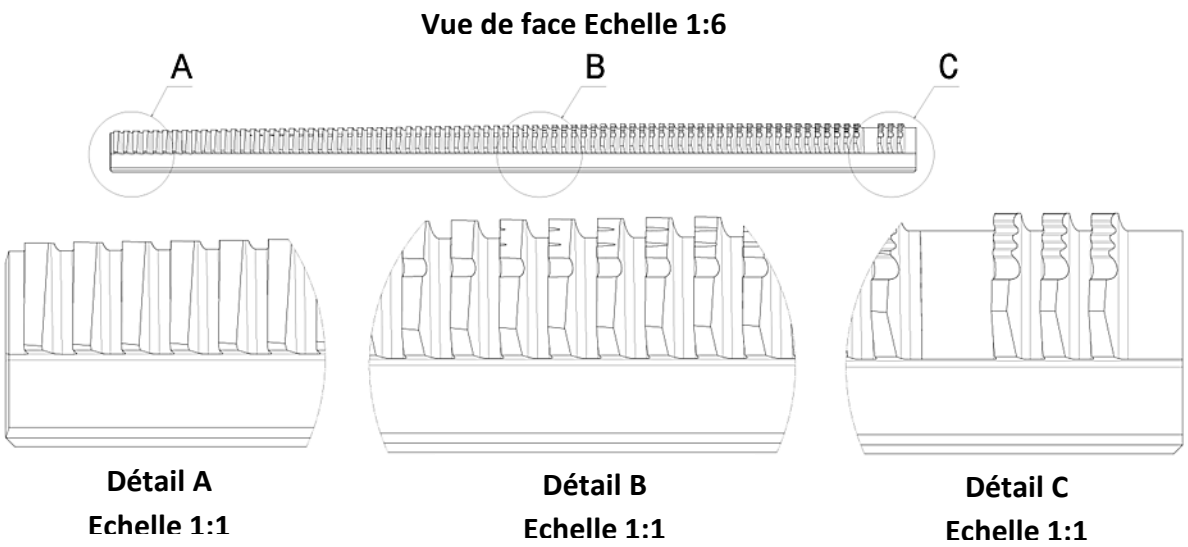


figure II-13 Vues de détail d'une broche sapin

Ces choix d'usinage sont dictés par la méthode de conception des broches (une forme répétée sur toutes les dents, puis rognée progressivement) et ont des conséquences sur la coupe. Prenons comme exemple la variation de l'angle de coupe d'une broche sapin et d'une broche de calibrage le long de l'arête d'une dent. La forme droite de la dent de la broche sapin permet de conserver le long de l'arête un angle de coupe de 15° (figure II-14 a). A contrario, la forme d'une dent de la broche de calibrage étant plus complexe, l'angle de coupe dans le plan normal à l'arête (γ_n) varie de 7° à 15° (figure II-14 b).

Cet exemple, donné pour le cas de l'angle (γ_n), est aussi valable pour l'angle d'inclinaison d'arête (λ_s) ou pour l'avance par dent (f). Pour une broche sapin, l'avance par dent reste presque tout le temps constante ; pour le cas d'une broche de calibrage, l'avance par dent peut varier d'un facteur 2 le long de l'arête, comme sur la figure II-14 b avec l'angle de coupe.

Les calculs détaillés des angles et autres paramètres caractérisant l'usinage seront réalisés au paragraphe IV.2 traitant de la description géométrique de la broche dans le simulateur d'efforts de coupe. La forme générée de chaque dent devenant très complexe, il est alors nécessaire de décrire la broche dans le simulateur.

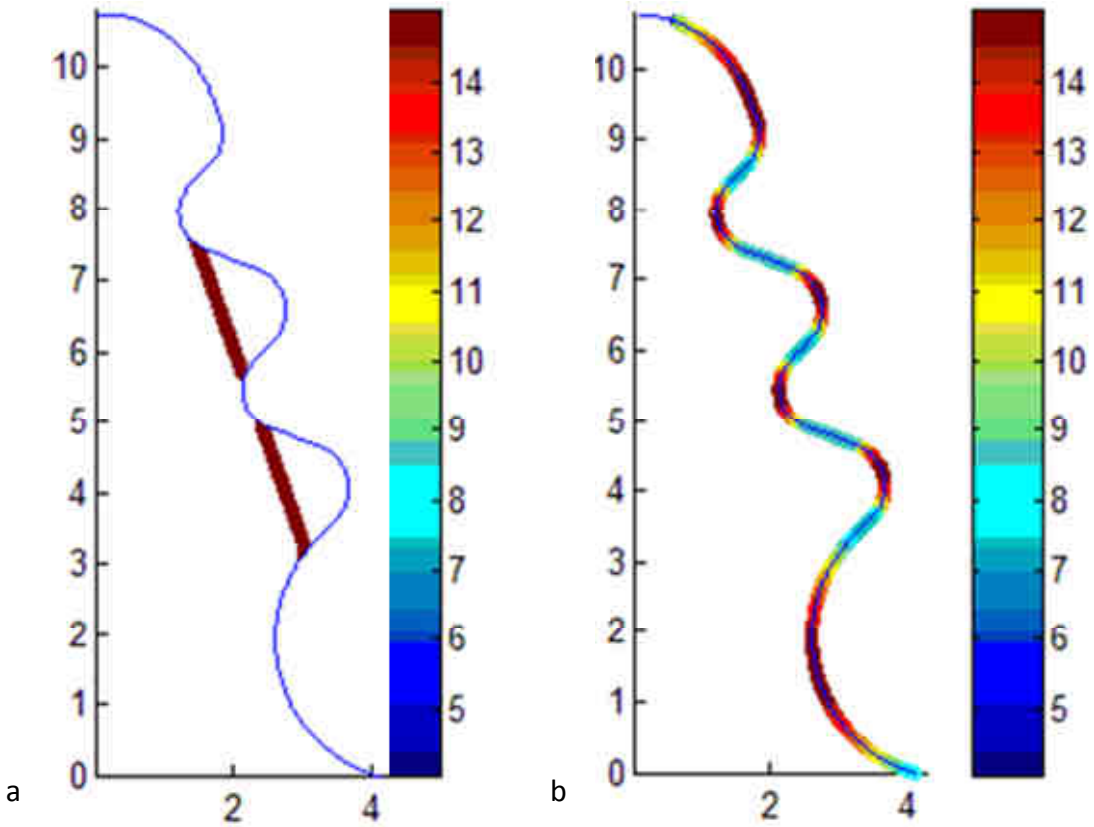


figure II-14 Variation des angles de coupe pour une dent :
a) d'une broche sapin b) d'une broche de calibrage

III Bibliographie des méthodes de dimensionnement des broches

L'objectif principal de ces travaux de thèse étant de maîtriser les efforts de coupe d'une broche afin d'optimiser les conditions opératoires, cette partie va présenter les méthodes de dimensionnement des broches pied de sapin et donnera plus de détails sur ces outils. Elle dressera surtout un état des lieux des méthodes de conception des broches et des critères pris en compte par les concepteurs de ces outils ainsi que leurs conséquences sur l'usinage.

III.1 Méthodes métiers

Les méthodes métiers consistent en une suite de règles et tableaux à suivre pour arriver à dimensionner un outil. Le principal avantage est la simplicité d'utilisation de ces méthodes : il suffit de suivre la méthodologie exposée pour arriver à concevoir un outil et déterminer les paramètres de la figure II-7. Mais ces méthodes n'expliquent pas pourquoi telle ou telle solution est privilégiée et masquent l'origine des calculs. Ainsi, les articles proposés par [Bertin1979] et par [Bellais1997] présentent une méthodologie générale pour concevoir des outils de brochage. Elle comporte les étapes suivantes :

1. le choix de l'avance par dent (*f*) suit un tableau fonction du type de broche (intérieure/extérieure), du type d'opération (ébauche/finition), et du type de matériau broché (aluminium/acier),

2. le choix du pas de la broche (P) se fait avec l'équation (II-1) pour [Bellais1997] et avec l'équation (II-2) pour [Bertin1979], sans savoir à quel moment choisir l'une ou l'autre. Ces équations sont exprimées en fonction de l'avance par dent (f), de la longueur à brocher de la pièce (l_p) et d'un rapport de remplissage de la chambre à copeau nommé *X*,

$$P = 3{,}25 \times \sqrt{f \times l_p \times X} \qquad \text{(II-1)}$$

$$P = 1{,}75 \times \sqrt{l_p} \qquad \text{(II-2)}$$

3. le rapport de remplissage de la chambre à copeau (X) est obtenu à partir de l'équation (II-3), en fonction de f, l_p et de la hauteur de la chambre à copeau (c), (figure II-7, page 54),

$$X = \frac{\pi \times {c^2}/{4}}{f \times l_p} \qquad \text{(II-3)}$$

4. la hauteur de la chambre à copeau (*c*) est donnée par un tableau extrait de la norme [NF E 66-620] qui est donné en fonction du type de broche (intérieur/extérieur), du type d'opération (ébauche/finition), et du type de matériau broché (aluminium ou acier),

5. tous les autres paramètres tels que les angles de coupe et de dépouille par exemple sont également donnés par des tableaux en fonction du type de broche (intérieur/extérieur), du type d'opération (ébauche/finition), et du type de matériau broché (aluminium ou acier),

6. le nombre de dents en prise se calcule en faisant le ratio entre l'épaisseur de la pièce (*Ep*) et le pas de la broche (*P*),

$$m = \frac{Ep}{P} \tag{II-4}$$

7. la longueur de la broche (L_B) se calcule en connaissant le nombre de dents nécessaire puis en multipliant cette valeur par le pas de la broche. La progression maximale d'un outil (*H*) correspond à la différence d'altitude entre la première et la dernière dent de la broche. L'équation (II-5) montre que pour une progression maximale donnée (*H*), seuls les paramètres *f* et *P* conditionnent la longueur de la broche (L_B).

$$L_B = \frac{H}{f} \times P \tag{II-5}$$

Ces méthodes ont été développées dans les années 1950-60 par des fabricants automobiles et ces tableaux sont conçus pour des alliages d'aluminium et des aciers. Les méthodes métiers ne sont donc pas optimales dans le cas du brochage de disque de turbine en Udimet 720® car les données d'entrée n'existent pas.

De plus, ces méthodes métiers imposent des règles arbitraires dans le choix des paramètres caractérisant la broche. Une de ces règles est d'interdire d'utiliser un pas (*P*) sous multiple de la longueur à brocher (l_p) dans le but d'éviter de faire entrer en même temps plusieurs dents dans une pièce à brocher (figure II-15). Cette règle, qui a un intérêt dans le cas de pièces empilées, est quand même appliquée dans le cas où une seule pièce est brochée. Nous verrons plus tard dans ce chapitre qu'en allant à l'encontre de cette règle, dans le cas d'un seul disque de turbine broché à la fois, il est possible de limiter la variation des efforts et donc d'améliorer la qualité des alvéoles brochées.

Les méthodes métiers, présentant un manque de paramètres d'entrée pour le matériau de cette étude, ainsi que des équations et règles de conception souvent non expliquées, semblent peu indiquées pour comprendre et optimiser le brochage des alvéoles pied de sapin par la maîtrise des efforts de coupe.

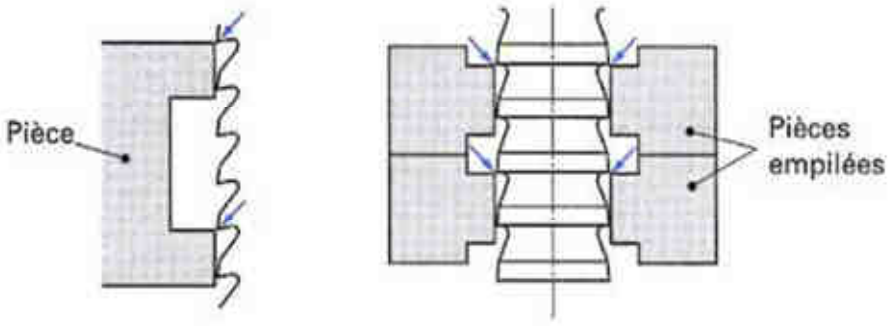


figure II-15 Explication de la règle de conception limitant les valeurs du pas (P) d'après [Bellais1997]

III.2 Optimisations multicritères

Les broches étant des outils de forme, une fois l'outil fabriqué, le seul paramètre pouvant être modifié durant l'utilisation est la vitesse de coupe (V_c) ; l'ensemble des autres paramètres (*f*...) est bien sûr figé par la forme de la broche. Afin d'améliorer la conception de ces outils [Terry1986] propose d'utiliser un algorithme d'optimisation multicritères. La fonction à optimiser est le coût de la broche par pièce.

Les fonctions de contrainte sont :

- la durée de vie de la broche (donnée par une équation du type loi de Taylor),
- la contrainte maximale à la rupture de l'outil,
- le temps de réglage des outils.

Les paramètres retenus, caractérisant la broche, sont ceux qui permettent un coût par pièce le plus faible possible sans rompre l'outil. Cet article ne présente pas de résultats de calcul de broches ni de résultats expérimentaux obtenus par cette méthode. Il faut attendre [Terry1992] pour voir une extension de la méthode, avec l'ajout d'autres critères, mais surtout pour voir des résultats expérimentaux permettant de valider la méthode.

Bien que cette dernière permette de réduire les coûts des broches, elle n'est pas transposable aux broches pied de sapin. En effet, la plupart des équations utilisées suppose que toutes les dents de la broche enlèvent le même volume de matière, avec des géométries simples, ce qui n'est pas le cas des broches pied de sapin où chaque dent est différente des autres. De plus, le but premier de nos travaux est d'optimiser la qualité des pièces brochées par la maîtrise des efforts de coupe alors que ces deux études ne n'intéressent qu'à l'optimisation des coûts par pièce.

Près de 10 ans plus tard, [Ozturk2003] propose aussi de définir les paramètres d'une broche par un algorithme d'optimisation multicritères. Le sujet traite des broches pied de sapin et la fonction à optimiser est la longueur de la broche. Les fonctions de contrainte sont les suivantes:

- l'avance par dent doit être comprise entre 0,012 et 0,065 mm pour éviter un usinage en copeau mini ou une rupture des dents,
- la longueur de la broche doit être inférieure à la longueur du tablier de la brocheuse pour assurer son montage,
- la contrainte maximale à la rupture des dents ne doit pas être dépassée. La contrainte est donnée par une loi empirique issue de calculs par éléments finis,
- la puissance maximale de la machine ne doit pas être dépassée,
- la flexion de l'interpale (partie du disque entre deux alvéoles) ne doit pas dépasser une certaine valeur.

Ce dernier point traitant de la flexion des interpales est en accord avec l'un des objectifs de notre étude, c'est-à-dire la qualité des pièces brochées. La géométrie des pièces usinées et des outils présentés par [Ozturk2003] étant du même type que celle traitée ici, il semble donc possible d'utiliser cette étude pour optimiser les alvéoles pied de sapin. Un an plus tard, à partir de l'étude précédente, [Kokturk2004] présente un calculateur pour prédéfinir les paramètres caractérisant une broche pied de sapin la plus courte possible tout en satisfaisant les contraintes fixées. Il ajoute une autre fonction de contrainte à l'algorithme : le nombre de dents en prise doit être toujours supérieur à 2 pour limiter la variation des efforts. Plus le nombre de dents en prise est grand, plus la variation due à l'entrée ou à la sortie d'une dent sera faible.

Les deux études précédentes présentent des broches avant et après utilisation de cette méthodologie, mais les résultats de l'algorithme ne sont pas disponibles. C'est [Özelkan2007] qui donne le résultat de l'algorithme sur le domaine du pas (P) et de l'avance par dent (f). Dans cet article, la loi de comportement caractérisant la contrainte appliquée sur chaque dent a été modifiée en ajoutant un paramètre fonction du pas de la broche, ce qui n'était pas le cas avant. Cependant, le fait marquant est que la fonction définissant la flexion des interpales n'est plus utilisée ; il n'y a donc plus de contrainte sur la qualité des pièces usinées mais uniquement sur la performance du procédé par rapport à la longueur de l'outil. Quatre ans plus tard, [Özelkan2011] détaille le fonctionnement de l'algorithme de calcul plus profondément.

Cette vision de l'optimisation de la longueur des broches pour les alvéoles pied de sapin est motivée par deux raisons :

- si la longueur de la broche dépasse la longueur d'une ligne de la brocheuse, il faudra la monter sur la ligne suivante,
- plus le nombre de lignes de la brocheuse est important, plus le temps d'usinage est grand.

En prenant exemple sur le cas de Turbomeca, il est facile de comprendre l'intérêt de réduire le nombre de lignes utilisées sur la brocheuse. La vitesse de coupe étant de 2 m/min et la longueur de la ligne de la brocheuse étant de 2 m, il faut une minute de temps d'usinage (T_u)

par alvéole et par ligne. Le temps de rotation du disque et de remontée de la ligne de broche (T_r) est de trente secondes par alvéole. L'usinage étant réalisé en deux phases (n), c'est-à-dire ébauche et finition de l'alvéole, le temps nécessaire pour usiner totalement une alvéole ($T_{alvéole}$) est de 180 secondes (sans tenir compte des temps de montage de l'outil et de la pièce) (équation (II-6)). Si une troisième ligne devait être utilisée, le temps passerait à 270 secondes soit une augmentation de 50% du temps d'usinage.

$$T_{alvéole} = n \times (T_u + T_r) \qquad \text{(II-6)}$$

Devant l'intérêt qu'apporte cette diminution de la longueur de la broche, l'algorithme a été testé sur une broche d'ébauche de notre étude. Cette broche est actuellement conçue avec un pas de 8 mm et une avance par dent de 0,065 mm. La largeur de copeau est de 4 mm et son angle de coupe est de 15°. La figure II-16 détaille les résultats des calculs obtenus avec la méthodologie mise en place par [Ozturk2003]. Les deux bornes rouges sont les limites minimales et maximales de l'avance par dent. La courbe bleue est le pas minimal pour assurer un volume suffisant de la chambre à copeau d'après [Ozturk2003]. Sur tout le domaine testé, l'effort maximal de poussée de la brocheuse ainsi que la contrainte à la rupture de la dent ne sont jamais atteints, c'est pour cela qu'elles ne sont pas tracées sur la figure II-16. L'étoile rouge représente la solution optimale d'après l'algorithme utilisé (avec le plus petit pas possible et la plus grande avance par dent possible) et l'étoile bleue la solution mise en place par Turbomeca. La solution optimale proposée par l'algorithme n'a pas été retenue puisqu'il est difficile actuellement de réaliser des broches pied de sapin avec un pas inférieur à 8 mm. Une nouvelle limite est proposée (en vert) et symbolise le pas minimal pour fabriquer la broche. Avec cette nouvelle frontière, la solution optimale est un pas de 8 mm et une avance par dent de 0,065 mm, celle appliquée par l'industriel sans utiliser l'algorithme d'optimisation multicritères. La méthode d'optimisation multicritères paraît utile pour des cas différents de notre étude, c'est-à-dire quand la puissance maximale de la brocheuse ou la limite à la rupture des dents de la broche risque d'être atteinte. Dans le cas de notre étude, des facteurs plus sévères tels que la fabrication de l'outil rendent cette méthode inefficace.

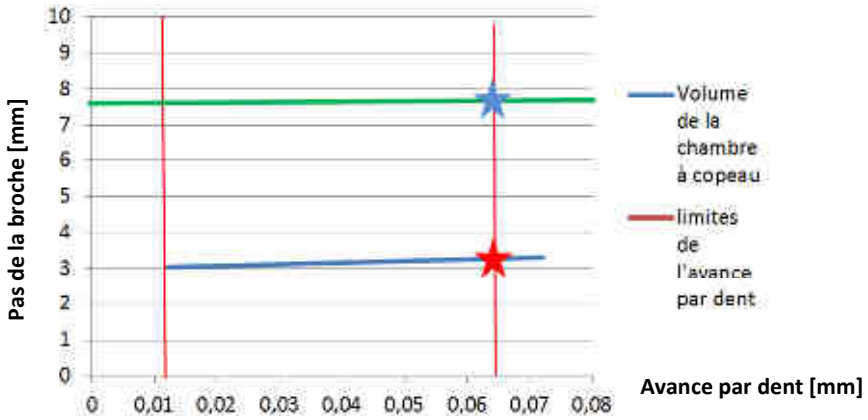


figure II-16 Résultat donné par l'algorithme initialement proposé par [Ozturk2003]

III.3 Simulations par éléments finis

Du point de vue des méthodes de conception des broches pied de sapin, des solutions par éléments finis existent. Dans un troisième brevet, [El-Wardany2009] propose une méthodologie incluant des essais d'usinage et deux types de simulation par éléments finis. La première simulation détermine la qualité de la pièce brochée en termes d'intégrité de surface en simulant les contraintes résiduelles. Une deuxième simulation vérifie la géométrie de l'alvéole usinée (figure II-17). Bien que très intéressante, cette méthodologie ne détaille pas les étapes de calcul ni les lois qui définissent les contraintes résiduelles ou celles qui déforment les alvéoles. Ce brevet ne montre pas non plus de vérification expérimentale du système mis en place.

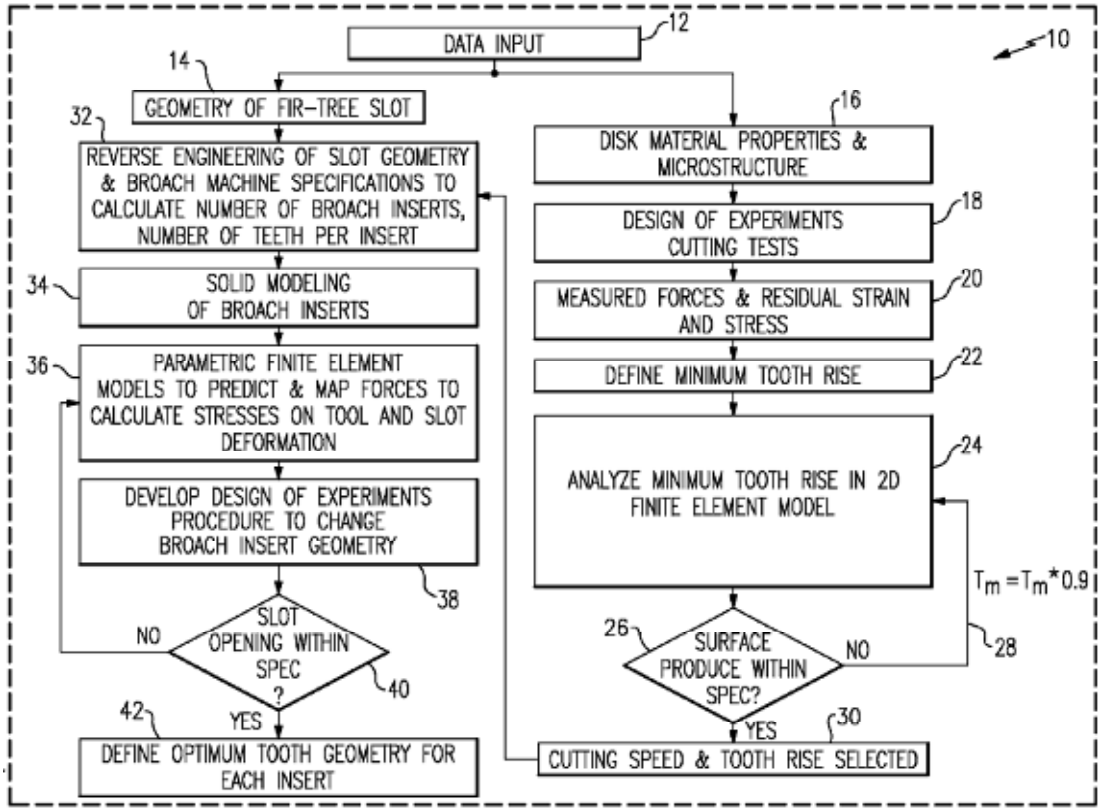


figure II-17 Méthodologie de conception des alvéoles pied de sapin par éléments finis, d'après [El-Wardany2009c]

Afin de déterminer certains éléments caractérisant une broche tels que la profondeur de la chambre à copeau (c), [Kong 2011] et [Zhang2012] utilisent des simulations par éléments finis pour définir les dimensions qu'occupe le copeau dans la chambre à copeau. Seul le paramètre de profondeur de la chambre à copeau (c) est déterminé et les autres ne sont pas abordés. Ces deux derniers articles sont plutôt centrés sur une étude mésoscopique de la coupe plutôt qu'une étude macroscopique, et ne s'intéressent donc pas à des paramètres tels que le pas de la broche.

III.4 Bilan des méthodes de dimensionnement des broches pour optimiser le procédé

Les méthodes métiers permettent de définir très rapidement tous les paramètres caractérisant une broche. L'explication du choix des paramètres n'est pas donnée et le calcul des efforts de coupe n'est que très succinctement abordé. En conclusion, elles ne permettent pas de répondre aux trois objectifs fixés dans l'introduction de ce chapitre, qui sont :

- comprendre la conception des broches,
- comprendre comment usinent les broches,
- simuler les efforts durant une opération de brochage.

Les méthodes d'optimisation multicritères permettent de trouver les paramètres assurant le meilleur résultat de la fonction à optimiser tout en garantissant le respect des fonctions de contrainte fixées. Elles permettent donc de définir des paramètres caractérisant la broche. Cependant, si les contraintes imposées à l'algorithme sont mal positionnées, insuffisantes ou surabondantes, le risque est de proposer une broche non fabricable, ou à l'inverse un domaine de solutions possibles trop grand qui n'aide pas le concepteur de l'outil.

Les méthodes par éléments finis sont principalement des méthodes implémentées à partir d'essais de coupe. Mis à part le brevet présenté par [El-Wardany2009c], toutes les autres études par éléments finis se focalisent uniquement sur une dent et non pas sur une broche complète. Le passage de l'échelle mésoscopique à l'échelle macroscopique pour simuler les efforts de coupe semble donc très difficile techniquement, tout en nécessitant des temps de mise en place des modèles et de calculs très importants.

Par rapport à ce qui a été vu sur les possibilités des trois méthodes, il apparaît donc nécessaire de réaliser une simulation des efforts de coupe (à l'échelle d'une broche) à partir d'une description géométrique précise de l'outil.

IV Développement d'un simulateur des efforts de coupe en brochage

IV.1 Bibliographie de la simulation des efforts de coupe en usinage

Pour simuler les efforts de coupe en brochage, il est possible de s'appuyer sur la littérature riche et variée disponible sur la simulation des autres procédés d'usinage.

Il y a plus de 25 ans, [Amarengo1985] proposait une première théorie unifiée visant à simuler les efforts de coupe en tournage, fraisage et perçage. Cette publication explique comment simuler les efforts de coupe en quatre étapes :

- la description géométrique des sections coupées par discrétisation de l'arête,
- la description de paramètres tels que les angles de coupe et d'inclinaison d'arête,
- la modélisation d'efforts élémentaires issus d'essais de coupe,
- le calcul des efforts globaux par la sommation des efforts élémentaires.

Les lois de coupe permettent de modéliser la coupe oblique grâce aux essais réalisés eux aussi en coupe oblique. Dix ans plus tard, [Budak1996] propose de simuler les efforts de coupe aussi par la discrétisation de l'arête. Mais la simulation de la coupe oblique est réalisée grâce à des essais de coupe orthogonale, ceci permettant de réduire les campagnes expérimentales. La même année, [Lee1996] utilisait le même principe. C'est cette méthode que nous avons choisie pour simuler la coupe oblique en brochage.

[Stephenson1997] a réalisé lui aussi une simulation des efforts de coupe oblique. Mais au lieu de discrétiser l'arête en plusieurs sections élémentaires, une section équivalente était calculée. Puis, en fonction des lois de coupe, les efforts étaient calculés directement.

Pour le procédé de brochage, il est aussi possible de trouver des simulations des efforts de coupe, sauf qu'elles ne proposent pas de méthodologies générales mais des simulations spécifiques à chaque outil, puisque ces derniers sont conçus sur mesure. [Sutherland1996] propose une approche pour simuler les efforts de coupe pour une opération de brochage hélicoïdal de couronnes dentées. Cette méthodologie nécessite la description précise de la géométrie de l'outil et de ses paramètres pour obtenir une simulation rigoureuse. La comparaison entre simulation et mesures expérimentales des efforts révèle une très bonne corrélation. Ces calculs ne sont pas utilisables dans le cadre de notre étude car le procédé de brochage hélicoïdal, à cause du mouvement de rotation de la broche, est trop éloigné du brochage des alvéoles pied de sapin.

Les études de [Ozturk2003], [Kokturk2004] et [Ozlu2010] permettent de faire une simulation des efforts de coupe du brochage des alvéoles pied de sapin. Bien que présentant les lois de coupe et les résultats obtenus, ces articles n'expliquent pas comment les arêtes de coupe de

chaque dent ont été représentées puis discrétisées. De plus, ces articles ne proposent pas de comparaison entre la simulation et des mesures expérimentales des efforts. Cependant, [Ozturk2003] compare les puissances simulées et mesurées qui visuellement présentent une assez bonne correspondance.

Finalement, [Kamat2009] simule les efforts de coupe sur des géométries simples telles que des broches à cannelures. Les sections de copeau étant très simples, les efforts de coupe sont calculés à partir de géométries équivalentes. La discrétisation de l'arête n'est pas nécessaire car les sections de copeaux sont toujours les mêmes et les paramètres de coupe ne varient pas le long de l'arête.

Le premier chapitre de ce manuscrit a permis de disposer de lois de coupe. Mais devant le manque d'informations concernant la description des arêtes de coupe de chaque dent de la broche pied de sapin, il apparaît nécessaire de développer notre propre méthodologie pour décrire la géométrie de l'outil et donc de disposer d'une simulation la plus proche possible du procédé. La discrétisation de l'arête de coupe présentée dans la bibliographie sera utilisée plutôt que le calcul de géométries équivalentes afin de permettre de simuler les formes complexes de l'alvéole pied de sapin. Une broche réalisant une alvéole pied de sapin étant constituée de plusieurs éléments (figure II-10, page 56), il serait long de présenter la simulation de tous ces éléments. Le choix a été fait dans ce mémoire de ne présenter qu'un seul exemple, la broche sapin, car cet outil possède les formes les plus complexes. La méthode de calcul pour les autres éléments est rigoureusement la même.

IV.2 Méthode de calcul géométrique

Afin d'appréhender la géométrie complexe de chaque dent d'une broche pied de sapin, il est nécessaire de comprendre les opérations visant à la fabriquer. Une broche pied de sapin est un outil ayant dans un premier temps toutes ses dents identiques (c'est-à-dire le profil de l'alvéole pied de sapin), puis elles sont affûtées progressivement afin de réaliser l'avance par dent.

La figure II-18 a est un tracé de la forme finale de l'alvéole, en rouge, et de la forme laissée par les neuf éléments d'ébauche avant la broche sapin (figure II-10, page 56). Ces deux tracés sont représentés par trois vecteurs de points. Le premier vecteur, nommé $Y_{discrétisation_{yy\times1}}$, contient la discrétisation suivant l'axe *y* de l'alvéole. Le nombre de points du vecteur (nommé *yy*) est variable suivant la hauteur en *y* de l'alvéole et la valeur de la discrétisation. Par exemple, avec une alvéole de 10,8 mm de hauteur suivant *y* et une discrétisation de 0,01 mm, le vecteur contiendra 1081 valeurs (*yy* lignes) et une colonne. A partir de cette discrétisation suivant *y*, il est possible d'exprimer les valeurs suivant *x* de la courbe représentant l'ébauche et la finition. Ces deux vecteurs s'appellent $X_{alvéole_{yy\times1}}$

et $X_{ébauche\ yy\times 1}$, avec *yy* lignes et une colonne. La discrétisation suivant un axe, comme réalisée par [Engin2001], plutôt que suivant l'abscisse curviligne, a été choisie car chaque dent est différente de la suivante. Une discrétisation suivant l'abscisse curviligne aurait imposé un paramétrage de la discrétisation de chaque dent. Le but étant de représenter les dents de la broche comme elles sont fabriquées, il était donc nécessaire de garder le même repère et la même discrétisation pour chaque dent. La discrétisation suivant l'abscisse curviligne est généralement utilisée pour les études sur le tournage, [Germain2011].

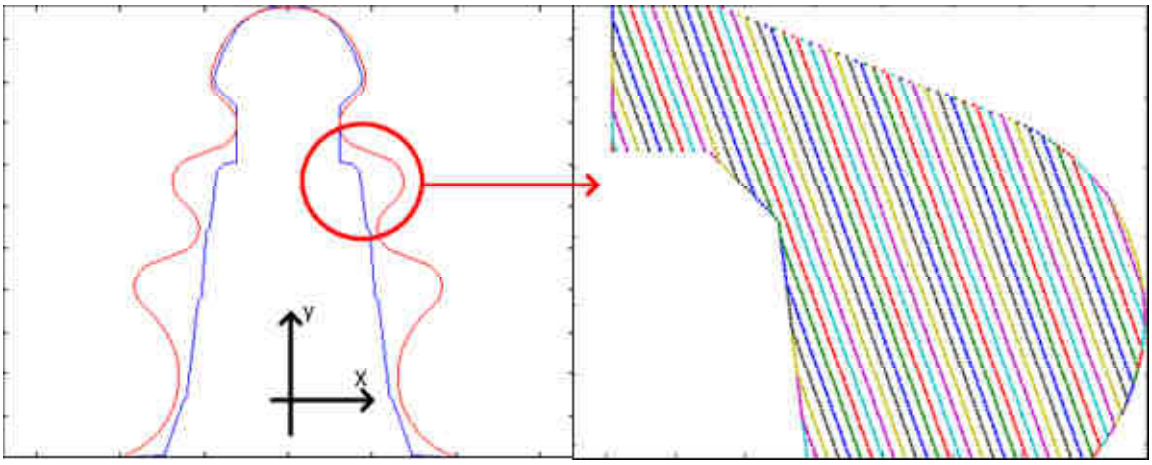


figure II-18 a) Ebauche et finition de l'alvéole b) Tracé des dents de la broche

La figure II-18 b est un grossissement de l'encadré de la figure de gauche. Il est possible de distinguer la forme de l'alvéole pied de sapin et la forme laissée par les neuf éléments précédents. Les traits de couleurs se situant entre la forme ébauchée et la forme finale sont les dents de la broche. Chaque trait est séparé du suivant par l'avance par dent, dans ce cas 0,03 mm. Les différentes couleurs de cette figure ne sont utilisées que pour bien différencier les dents les unes des autres. L'ordonnée des points est donnée par le vecteur $Y_{discrétisation_{yy\times 1}}$ et l'abscisse par la matrice $X_{Broche_{yy\times n}}$ où n représente le nombre de dents de la broche.

La matrice $X_{Broche_{yy\times n}}$ est obtenue à partir d'un autre vecteur $X_{première\ dent_{yy*1}}$, qui caractérise l'abscisse de la première dent qui rogne la forme de l'alvéole, et l'algorithme ci-après.

Si un point d'une dent de la broche se trouve entre l'ébauche et la finition alors l'abscisse de ce point est égale à l'abscisse de $X_{première\ dent_{yy*1}}$ multipliée par l'avance par dent et le numéro de la dent. Sinon l'abscisse de ce point est nulle. Cet algorithme permet donc de générer automatiquement les n dents de la broche de la même manière que la broche est fabriquée.

Pour nn = 1 à n
    Pour *y* = 1 à yy
        Si $X_{ébauche_{y*1}} \leq X_{première\ dent_{y*1}} \times nn \times f \leq X_{alvéole_{y*1}}$
        Alors $X_{broche_{y*nn}} = X_{broach\ first\ tooth_{y*1}} \times nn \times f$
        Sinon $X_{broche_{x*nn}} = 0$
        Fin SI
    Fin Pour
Fin Pour

A partir de ce moment, l'abscisse et l'ordonnée de chaque point de chaque dent de la broche est connue et est caractérisée par les matrices $Y_{discrétisation_{yy\times1}}$ et $X_{Broche_{yy\times n}}$. Tous les calculs suivants seront réalisés à partir de ce vecteur et de cette matrice et permettront de caractériser l'avance par dent, l'angle de coupe, l'angle d'inclinaison et d'arête pour chaque point de chaque dent.

IV.3 Paramètres caractérisant la broche

Chaque dent étant différente de la suivante, il est donc nécessaire d'automatiser la méthode d'obtention de tous les paramètres caractérisant la broche, qui serviront de données d'entrée des lois de coupe pour associer un effort élémentaire à chaque point de chaque dent.

La première étape du calcul consiste à déterminer les vecteurs tangentiels, radiaux et axiaux de chaque point de chaque dent à partir de $Y_{discrétisation_{yy\times1}}$ et $X_{Broche_{yy\times n}}$. Le vecteur tangentiel est colinéaire à l'axe *z* qui est celui du déplacement de la broche et donc de la vitesse de coupe. Les vecteurs radiaux et axiaux se trouvent dans le plan perpendiculaire à la vitesse de coupe, c'est-à-dire le plan *xy*.

La figure II-19 a illustre le même agrandissement que celui fait pour la figure II-18 b, mais cette fois uniquement deux dents consécutives de la broche sont tracées, ainsi que la forme de l'ébauche et de la finition. Sur cette figure, les vecteurs axiaux et radiaux d'un point de cette dent sont tracés. La figure II-19 b est un agrandissement de la figure II-19 a, où sont ajoutées la largeur de copeau ainsi que l'avance par dent de ce point. L'angle θ permet de calculer la projection des vecteurs axiaux et radiaux dans le repère *xy*. Une fois calculés, les efforts F_t, F_r, et F_a seront exprimés dans la base *xyz* grâce aux équations (II-7) à (II-9).

L'avance par dent (f) et la largeur de copeau (b) de chaque point de chaque dent est calculée par les abscisses et ordonnées de chaque point par rapport aux autres points. L'angle d'affûtage de la chambre à copeau $(\theta_{affutage})$ représente la direction avec laquelle la goujure des dents est réalisée. Il permet de calculer l'angle d'inclinaison d'arête (λ_s) et l'angle de coupe dans le plan normal (γ_n). Pour une même broche, l'angle $\theta_{affutage}$ est une

constante. Sur la figure II-20, il vaut 15°. Puisque la face de coupe est affûtée à 15° et que la forme de l'arête varie (forme de pied de sapin), les angles λ_s et γ_n varient eux aussi le long de l'arête de chaque dent. Les équations (II-10) à (II-12) permettent de calculer ces angles.

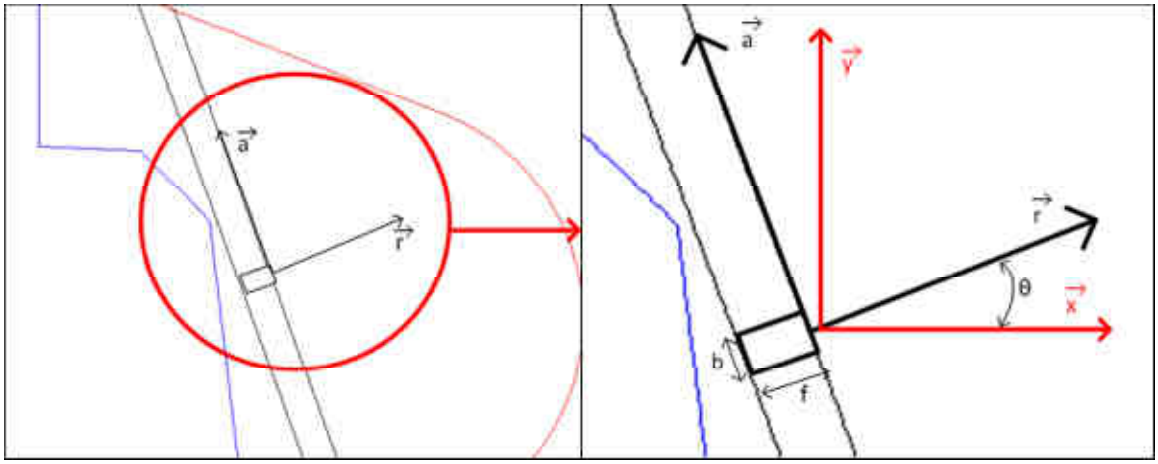


figure II-19 a) Tracé des vecteurs axiaux et radiaux d'un point d'une dent
b) Tracé de f et b d'un point d'une dent

$$F_z.\vec{z} = F_t.\vec{t} \quad \text{(II-7)}$$

$$F_x.\vec{x} = F_r.\cos(\theta).\vec{r} - F_a.\sin(\theta).\vec{a} \quad \text{(II-8)}$$

$$F_y.\vec{y} = F_r.\sin(\theta).\vec{r} + F_a.\cos(\theta).\vec{a} \quad \text{(II-9)}$$

$$\tan(\gamma_o) = \cos(\theta - \theta_{affutage})\tan(\gamma) \quad \text{(II-10)}$$

$$\tan(\lambda_s) = \sin(\theta - \theta_{affutage})\tan(\gamma) \quad \text{(II-11)}$$

$$\tan(\gamma_n) = \cos(\lambda_s)\tan(\gamma_o) \quad \text{(II-12)}$$

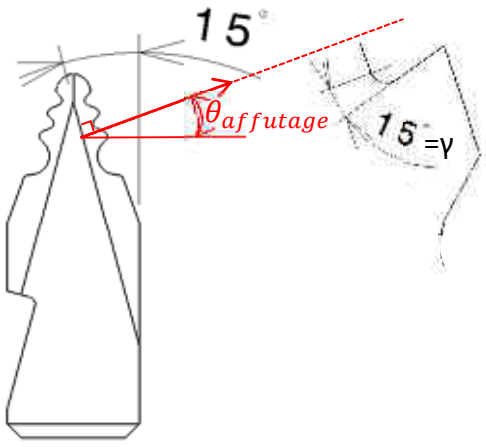


figure II-20 Tracé de l'angle d'affûtage de la chambre à copeau.

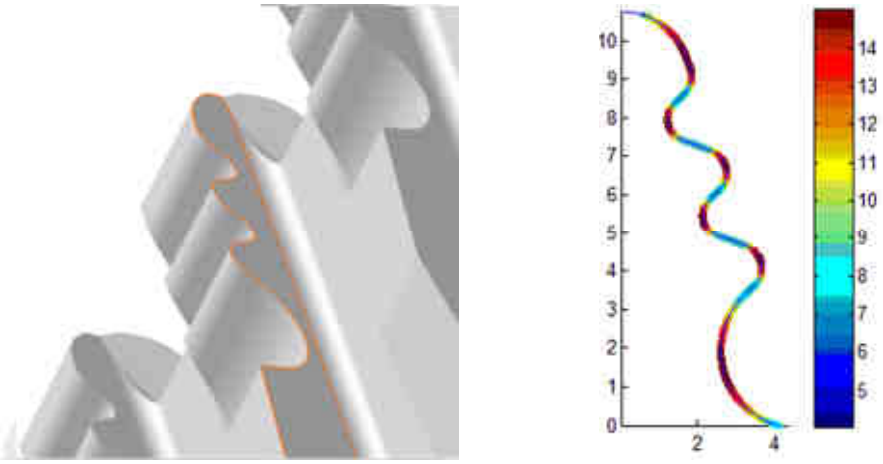


figure II-21 a) Vue en trois dimensions de la face de coupe d'une dent de la broche
b) Variation de γ_n le long de l'arête

Une vue en trois dimensions d'une dent de la broche aide à mieux comprendre la variation des angles de coupe et d'inclinaison d'arête (figure II-21 a). La face de coupe est délimitée par le liseré orange. Le long de l'arête, l'angle de coupe devient progressivement un angle d'inclinaison d'arête. L'angle de coupe dans le plan normal à l'arête (γ_n) varie entre 7 et 15° (figure II-21 b).

IV.4 Lois de coupe

Le point précédent a permis d'obtenir six matrices qui définissent chaque point de chaque dent de la broche. L'abscisse et l'ordonnée de chaque point sont données par les deux matrices $Y_{discrétisation_{yy\times 1}}$ et $X_{Broche_{yy\times n}}$. L'avance par dent est donnée par la matrice $f_{yy\times n}$, la largeur de copeau est donné par $b_{yy\times n}$ et les angles de coupe dans le plan normal et d'inclinaison d'arête par $\lambda_{s_{yy\times n}}$ et $\gamma_{n_{yy\times n}}$. Les efforts de coupe sont calculés à partir de ces six matrices. Les trois modèles, empiriques et mécanistique peuvent être utilisés, suivant que l'approximation de coupe orthogonale est faite ou non.

Pour calculer les efforts tangentiels et radiaux de chaque point de chaque dent, le premier modèle empirique ne nécessite que les matrices $f_{yy\times n}$, $b_{yy\times n}$, et $\gamma_{n_{yy\times n}}$ et les coefficients K_t et K_r donnés par les équations (I-23) et (I-24) page 41.

$$F_t = K_t \times b \times f \tag{I-23}$$

$$F_t = K_t \times b \times f \tag{I-24}$$

Pour le deuxième modèle empirique, les calculs sont les mêmes que précédemment mais en appliquant les équations (I-25) et (I-26) page 41. Ces calculs donnent deux matrices $F_{t_{yy\times n}}$ et

$F_{r_{yy\times n}}$. Après projection dans la base *xyz*, grâce aux équations (II-7) à (II-9) (page 71), nous obtenons trois matrices $F_{x_{yy\times n}}$, $F_{y_{yy\times n}}$ et $F_{z_{yy\times n}}$. A chaque point de chaque dent est associé trois efforts élémentaires dans la base *xyz*.

$$F_t = K_{tc} \times b \times f + K_{te} \times b \quad \text{(I-25)}$$

$$F_{rc} = K_{rc} \times b \times f + K_{re} \times b \quad \text{(I-26)}$$

Le modèle mécanistique permet, en plus de connaitre les efforts tangentiels et radiaux, de calculer les efforts axiaux et donc d'obtenir une troisième matrice d'efforts élémentaires $F_{a_{yy\times n}}$. Mais avant d'obtenir les efforts élémentaires, il est nécessaire de calculer les angles de cisaillement (ϕ), les contraintes de cisaillement (k_{ab}) et l'angle de frottement sur la face de coupe (β). A partir de ces trois paramètres, il est possible de calculer les efforts spécifiques avec les équations (I-14) à (I-17) page 22. Les efforts élémentaires sont obtenus par les équations (I-11) à (I-13) page 22. Le même changement de base que précédemment a été effectué pour projeter les efforts élémentaires dans la base *xyz*.

$$F_t = K_{tc} \times f \times b + K_{te} \times b \quad \text{(I-11)}$$

$$F_r = K_{rc} \times f \times b + K_{re} \times b \quad \text{(I-12)}$$

$$F_a = K_{ac} \times f \times b + K_{ae} \times b \quad \text{(I-13)}$$

IV.5 Simulation du brochage

IV.5.a Algorithme de simulation

Les trois modèles d'efforts ci-dessus permettent d'associer à chaque point de chaque dent trois efforts élémentaires. A l'échelle mésoscopique (pour une dent), le brochage est une opération de coupe continue, mais à l'échelle macroscopique l'opération de brochage est une opération de coupe discontinue, les dents entrent et sortent successivement. De plus, suivant l'épaisseur de la pièce brochée et du pas de la broche, le nombre de dents usinant simultanément varie. Il est donc nécessaire de développer un algorithme de sommation des efforts élémentaires pour connaître les efforts globaux et ayant deux fonctions :

- identifier quelles dents usinent ou non,
- sommer l'effort élémentaire pour chaque dent et pour chaque altitude z.

Pour cela, l'algorithme comporte trois boucles imbriquées 'Pour', en fonction de l'altitude *z* de la broche, du numéro *nn* de la dent et de la discrétisation suivant *y* de chaque dent. A partir de ces trois boucles, l'algorithme calcule l'altitude de chaque dent, nommée *k*, et les limites supérieures et inférieures de la pièce (figure II-22). Puis, pour chaque boucle, les

efforts sont sommés pour chaque pas de calcul. Cela permet de remonter progressivement à partir des efforts élémentaires, aux efforts sur chaque dent, et finalement aux efforts pour chaque avance suivant l'attitude *z* de la broche dans la pièce. Pour simplifier la compréhension, seule la sommation des efforts en suivant l'axe *x* est présentée dans l'algorithme ci-dessous. Pour sommer les efforts en *y* et *z*, le calcul est le même. La figure II-22 présente tous les paramètres de l'algorithme sur un schéma. C'est cet algorithme qui permet le passage de l'échelle mésoscopique à l'échelle macroscopique en fonction du temps :

Pour z = 0 à la longueur de la broche (discrétisation du déplacement suivant l'axe z)
Pour nn =1 à n (les n dents de la broche)
Pour y = 0 à yy (discrétisation suivant y de l'alvéole)
K=nn*Pas (calcul de la position sur l'axe z de chaque dent)
Limite supérieure de la pièce = z + tan($\alpha_{pièce}$°) x $X_{Broche_{y\times nn}}$
Limite inférieure de la pièce = z + tan($\alpha_{pièce}$°) x $X_{Broche_{y\times nn}}$ – Ep
Si k < Limite supérieure de la pièce
Et Si k > Limite inférieure de la pièce
Alors Effort élémentaire = $F_{x_{y\times nn}}$,
Sinon Effort élémentaire = 0
Fin Si
Fin Pour
Effort par dent = Somme des efforts élémentaires par dent
Fin Pour
Somme des efforts = somme des efforts par dent (pour toute la broche à chaque altitude z)
Fin Pour

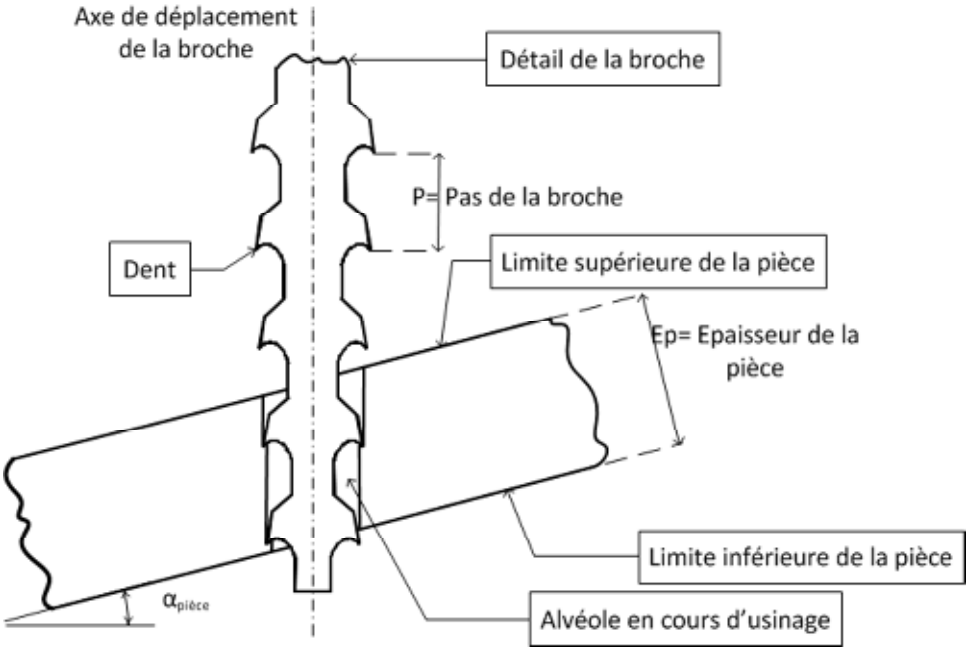


figure II-22 Section représentant la broche usinant le disque de turbine

Grâce à cet algorithme, nous obtenons trois vecteurs $F_{x_{zz\times1}}$, $F_{y_{zz\times1}}$ et $F_{z_{zz\times1}}$ qui sont des vecteurs de longueur *zz* fonction de la longueur de la broche et de la discrétisation de l'avance en *z*. En connaissant la vitesse de coupe, il est possible d'exprimer ces trois efforts en fonction du temps et non plus en fonction du déplacement de la broche.

IV.5.b Discussion des résultats

Les principaux résultats proposés par le simulateur sont les efforts dans le repère *xyz*. La figure II-23 permet de comparer le résultat de la simulation avec la mesure des efforts. Une bonne concordance entre la simulation et la mesure est obtenue pour les efforts selon les trois axes. En particulier les pics d'effort suivant l'axe *z* à 1750 N et 3250 N sont clairement identiques. On constate cependant que pour l'axe *x*, la simulation et les mesures montrent une légère déviation. L'alvéole étant symétrique, les efforts mesurés devraient rester centrés sur 0 N comme sur la simulation. Cette déviation, due à un défaut de l'outil, sera expliquée au chapitre 3.

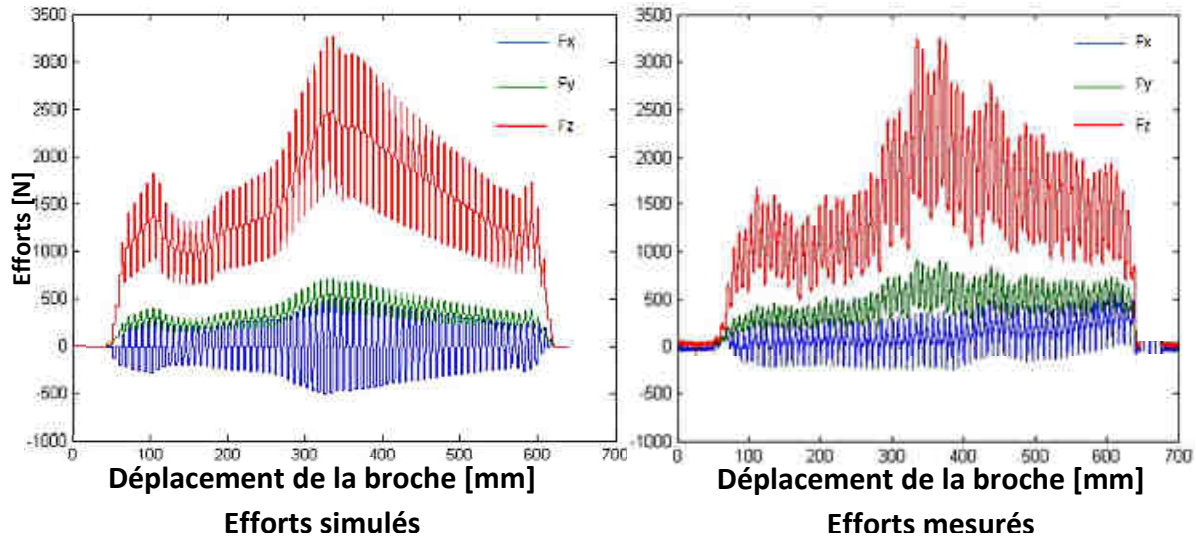


figure II-23 a) Courbes d'efforts issues du simulateur b) Courbes d'efforts issues de mesures

Trois modèles d'effort ont été mis en œuvre. La figure II-24 a montre les résultats de simulation issus du deuxième modèle empirique et la figure II-24 b présente ceux du modèle mécanistique. Les deux figures semblent très proches et cela est dû à l'angle d'inclinaison d'arête très faible des dents de la broche, de l'ordre de 1,4°. Avec une valeur si faible, l'approximation de la coupe orthogonale du modèle empirique est justifiée, [Mandrile2013].

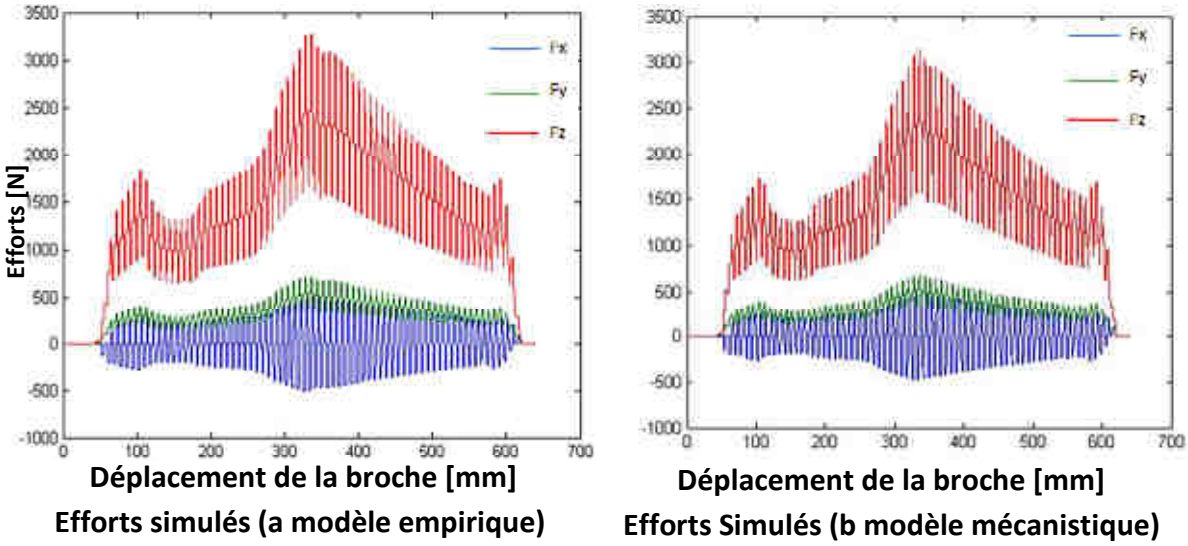


figure II-24 Comparaison des modèles : a) deuxième modèle empirique b) modèle mécanistique

La variation des résultats entre les deux modèles d'effort étant très faible, la figure II-25 trace la différence d'effort entre ces deux modèles en fonction du déplacement de la broche. En regardant la figure II-25 nous pouvons conclure que, dans le cas de notre étude, la simulation du brochage des alvéoles pied de sapin ne s'améliore pas en changeant les modèles de coupe. Le chapitre suivant permettra de mieux comprendre les différences entre la simulation et les mesures en s'intéressant à des essais de brochage d'alvéoles pied de sapin mais aussi en dimensionnant précisément les outils.

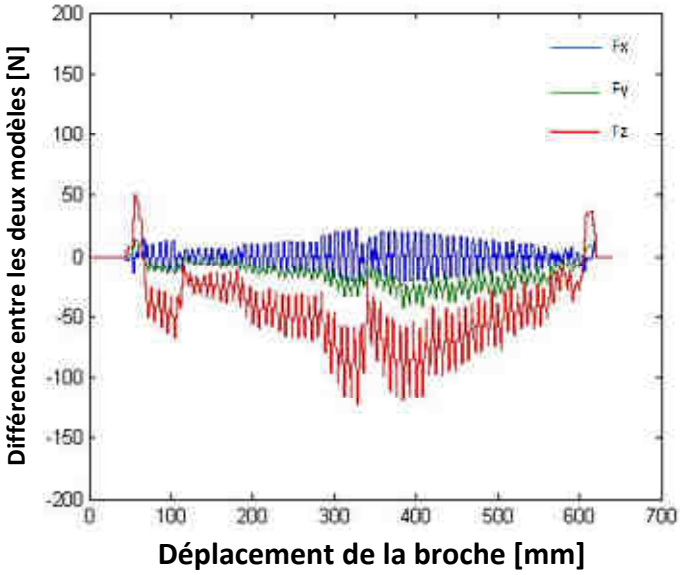


figure II-25 Différences d'efforts entre le deuxième modèle empirique et le modèle mécanistique

IV.5.c Utilisation du simulateur

Une fois la pertinence de la simulation vérifiée, il est possible d'utiliser le tracé des efforts de la broche pied de sapin comme une aide à la compréhension du fonctionnement de l'outil (figure II-26). Ainsi, l'effort F_z atteint les valeurs les plus importantes car il est colinéaire à l'effort de coupe F_t de chaque dent. Cet effort est aussi appelé effort de poussée de la brocheuse. Les efforts F_x et F_y ont des valeurs plus faibles car ils sont les projections des efforts F_r et F_a. L'effort F_z a pour conséquence de faire fléchir le montage. Sa valeur maximale est importante pour concevoir les montages d'usinage. L'effort F_y va repousser la pièce par rapport à la broche et risque de faire glisser la pièce dans le montage. L'effort F_x, oscille et même s'il est le plus faible en valeur absolue, il génère des efforts alternés sur les côtés des interpales. Cette alternance des efforts a des conséquences sur la qualité géométrique des alvéoles : cette question sera traitée au chapitre suivant. Les efforts de la figure II-26 étant tracés en fonction du déplacement de la broche dans la pièce, il est possible d'y superposer la broche pour localiser ces pics d'effort sur l'outil. Cinq zones ont été définies sur la figure II-26 et la figure II-27 afin de localiser sur l'alvéole l'enlèvement de matière associé :

- la zone 'a' correspond :
  - sur l'outil, aux dents 7 à 13 (les précédentes n'usinent pas),
  - sur l'alvéole, à la zone bleue du début de l'usinage,
- la zone 'b' correspond :
  - sur l'outil, aux dents 14 à 32,
  - sur l'alvéole, à une section de copeau prise par la broche diminuant puis augmentant progressivement à cause de la forme de l'ébauche et de l'alvéole finie,
- la zone 'c' correspond :
  - sur l'outil, aux dents 33 à 45,
  - sur l'alvéole, à la section de copeau de chaque dent augmentant fortement (tracé en vert) ce qui se traduit par le pic d'effort,
- la zone 'd' correspond :
  - sur l'outil, aux dents 46 à 72,
  - sur l'alvéole, à une zone dont la forme ébauchée disparaît petit-à-petit et dont la variation de section de copeau est principalement due à la forme de l'alvéole pied de sapin,
- la zone 'e' correspond :
  - sur l'outil, aux dernières dents de 73 à 77,
  - sur l'alvéole, à la zone correspondante (en violet), qui est de très petite dimension.

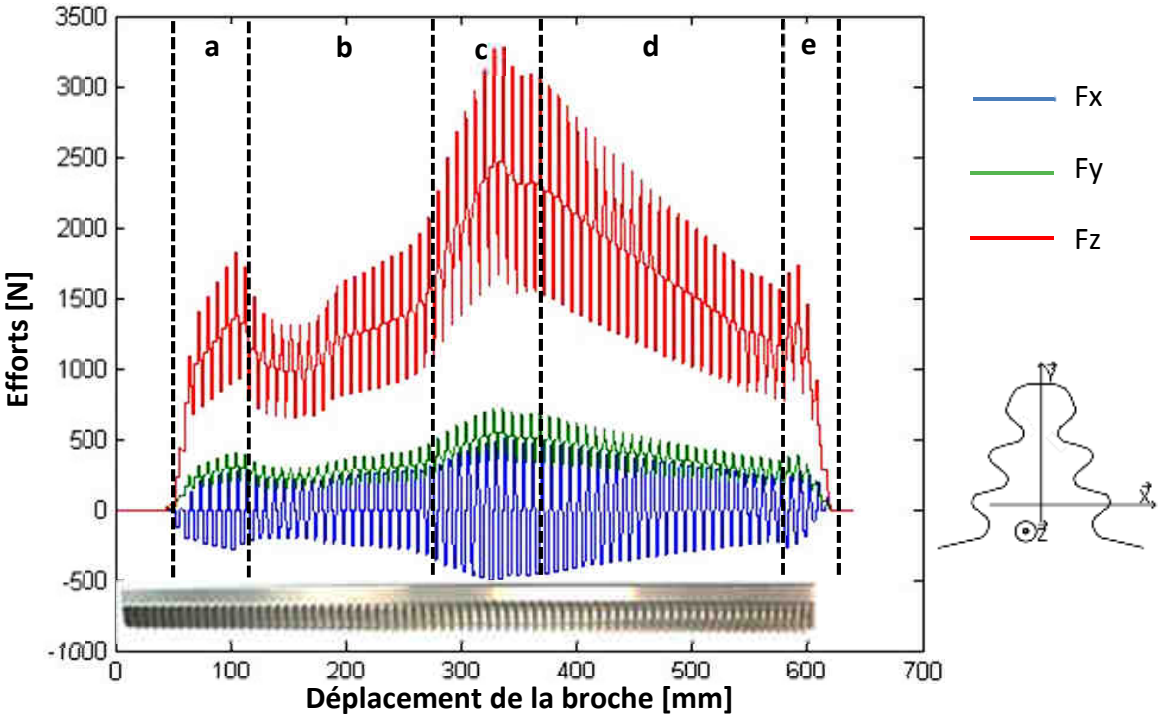


figure II-26 Courbes d'efforts issues du simulateur pour localiser sur la broche les pics d'effort

La figure II-27 est un exemple des réponses apportées par la simulation pour mieux comprendre les efforts localisés sur les zones usinées. Dans ce cas, il est possible de concilier quatre informations :

- les signaux d'efforts,
- la localisation des zones usinées sur la dent,
- la localisation sur l'alvéole,
- les sections de copeau de chaque dent.

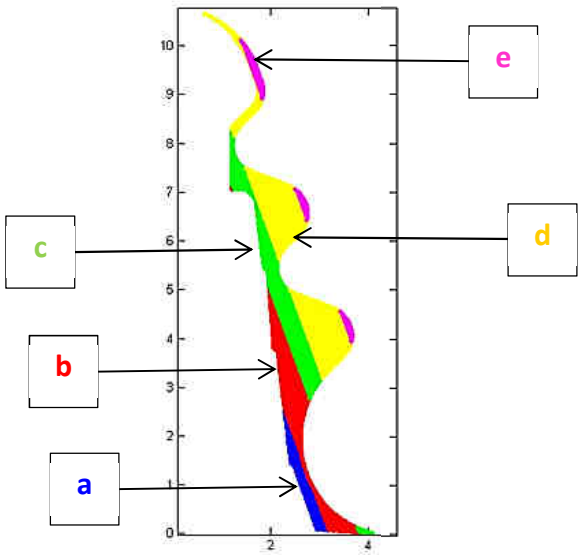


figure II-27 Représentation des cinq zones caractéristiques des efforts

Un autre exemple de l'intérêt de la simulation est de pouvoir évaluer l'influence de la conception de l'outil de brochage sur l'usinage. L'exemple ci-dessous illustre le fait qu'un simple choix de conception de l'outil peut fortement modifier la variation des angles de coupe. La figure II-28 présente deux configurations d'angle $\theta_{affutage}$, c'est-à-dire deux directions de chambre à copeau d'un élément ébauchant l'œilleton (repère 8 de la figure II-10 page 56).

Dans le premier cas (figure II-28 a) l'angle $\theta_{affutage}$ est fixé à 90° et dans le deuxième (figure II-28 b), il est fixé à 12°. La forme de l'arête de coupe est la même mais l'angle de coupe γ_n varie fortement entre les deux choix de conception. Dans le premier cas, l'angle γ_n varie de 0 à 15° alors que dans le deuxième, l'angle γ_n varie de 7 à 15°. Même si la section de copeau est identique, les efforts seront différents et l'usure sera plus rapide avec des angles de coupe plus faibles.

Le choix de l'angle $\theta_{affutage}$ égal à 90° est fait par les fabricants de broches pour faciliter la fabrication. Dans ce cas, la face de coupe des deux côtés de l'outil est réalisée en une seule fois comme un outil d'ébauche. Un angle $\theta_{affutage}$ égal à 12° bien que nécessitant deux faces de coupe, et étant donc plus cher à fabriquer, permet de conserver des angles de coupe (γ_n) plus importants et donc de réduire les efforts et l'usure à cet endroit précis de la broche. Dans les bases nickel, il est généralement nécessaire d'usiner avec des angles de coupe importants pour réduire les efforts et l'usure.

La simulation permet d'argumenter des choix avant de fabriquer l'outil ou alors d'expliquer des problèmes d'usure prématurée de certains outils.

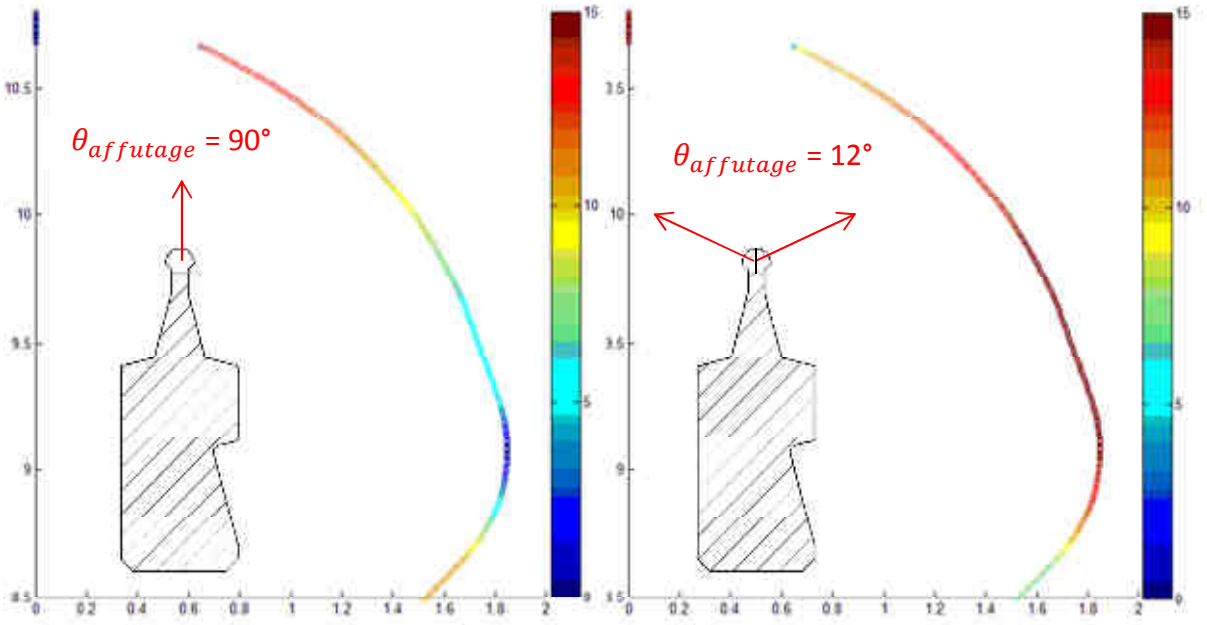


figure II-28 Broches ébauchant l'oeuilleton : a) avec $\theta_{affutage}$ =90° b) avec $\theta_{affutage}$ =12°

V Bilan

A l'issue de ce deuxième chapitre, notre démarche a permis d'enrichir le modèle de brochage étudié d'une seule arête de coupe à une suite de dents formant un outil complexe capable d'usiner une alvéole pied de sapin.

Une évaluation bibliographique et industrielle des procédés alternatifs au brochage justifie, dans l'état actuel de nos connaissances, le brochage comme seul procédé répondant à toutes les exigences de l'industriel pour réaliser des alvéoles pied de sapin. Cette étude a donc légitimé l'intérêt porté par l'industriel à l'amélioration continue de ce procédé. Ce chapitre a présenté en détail les broches pied de sapin et permis de comprendre le fonctionnement de ces outils très complexes.

Il a mis en lumière les méthodes de conception des broches pied de sapin et les raisons des choix de l'ensemble des paramètres caractérisant un tel outil. Les trois méthodes de conception présentées se sont montrées, face aux objectifs de ces travaux, peu appropriées car :

- les méthodes métiers permettent de travailler uniquement sur des géométries simples et ne justifient pas forcément l'origine des équations et des règles,
- les méthodes d'optimisation multicritères sont limitées par les spécificités des alvéoles produites par l'industriel. Elles doivent donc être développées pour chaque cas spécifiquement afin de trouver la solution optimale de la fonction à optimiser tout en satisfaisant les fonctions de contrainte,
- les méthodes par éléments finis semblent peu appropriées pour définir des outils coupants dans le cadre industriel, car elles nécessitent des spécialistes et demandent des temps de mise en place et de calcul très longs,
- le matériau étudié n'étant pas implémenté dans les bases de données de ces méthodes, il semble très difficile de définir des jeux de paramètres optimaux à partir des méthodes précédentes.

Ce chapitre a finalement présenté la simulation des efforts de coupe en brochage dans le but de mieux comprendre cet outil et d'apporter les éléments de réponse non donnés par les autres méthodes. La méthode de simulation est basée sur le principe de discrétisation de l'arête et l'implémentation de lois de coupe (issues du chapitre 1). La simulation, en plus de fournir des efforts macroscopiques suivant trois directions, permet d'associer à chaque point discrétisé de l'arête les éléments caractérisant un usinage.

Plus généralement, la simulation étant construite à partir de la méthode de fabrication d'une broche, il devient possible d'évaluer l'influence des éléments de conception sur les efforts et les paramètres d'usinage, qui sont, mis à part la vitesse de coupe, figés par une broche. Il est donc faisable de comprendre pourquoi une broche s'use majoritairement dans certaines zones ou pourquoi les efforts de coupe ne sont pas identiques si un simple élément de

conception a été changé tel que l'angle d'affûtage. La figure II-29 schématise les cinq étapes utilisées dans le simulateur d'usinage. C'est grâce à ces dernières qu'il est possible de simuler les efforts de coupe mais aussi de tracer tous les paramètres de coupe utilisés dans les étapes intermédiaires du calcul. Une version exécutable du logiciel de simulation des efforts, dotée d'une interface homme-machine a été développée par l'industriel suite aux travaux développé dans ce chapitre, [Manzano2013].

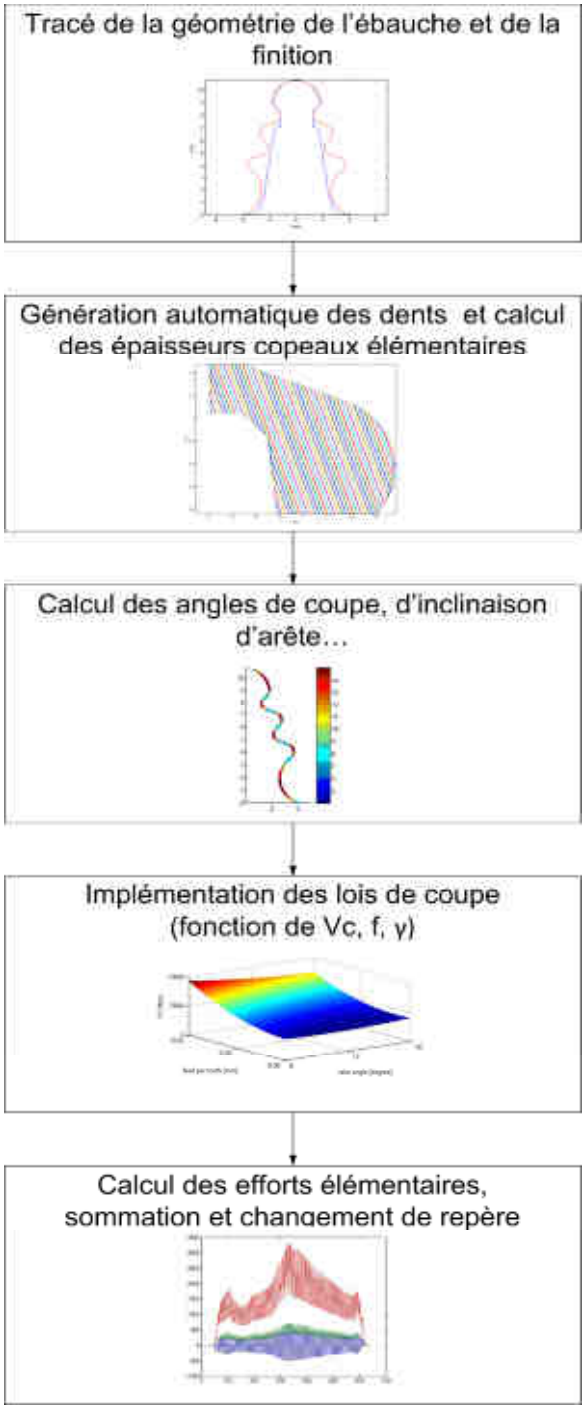


figure II-29 Schéma récapitulatif des étapes de la simulation des efforts

Troisième chapitre

Application industrielle, utilisation des essais de coupe et du simulateur afin d'améliorer la compréhension du procédé

Table des matières

I Objectifs de ce chapitre 85

II Essais de coupe du point de vue macroscopique 86

II.1 Installations expérimentales 86

II.2 Essais de coupe avec une broche pied de sapin 87

III Comparaison entre la simulation et les essais de coupe 88

III.1 Comparaison simulation-mesure 88

III.2 Simulation de défauts et mesures de broches 92

III.2.a Défaut de forme de l'alvéole 93

III.2.b Défaut d'alignement entre l'ébauche et la finition 94

III.2.c Défaut d'avance par dent 96

III.2.d Défaut de rectitude 98

III.3 Conclusion sur l'influence des défauts 102

IV Caractérisations métallurgiques et géométriques des alvéoles 103

IV.1 Géométrie de l'alvéole 103

IV.1.a Etude bibliographique de la qualité géométrique des pièces brochées 103

IV.1.b Mesures utilisées dans le cadre de notre étude 104

IV.1.c Confrontation géométrie/efforts 107

IV.2 Intégrité de surface 107

IV.2.a Etat de l'art de l'intégrité de surface des pièces brochées 107

IV.2.b Mesures réalisées dans le cadre de cette étude 109

IV.3 Essais en fonction du pas de la broche 110

IV.4 Conclusion sur la qualité des pièces brochées 112

V Proposition d'une re-conception des broches à l'aide des essais et de la simulation. 113

V.1 Les paramètres du point de vue de la coupe 113

V.2 Les paramètres du point de vue de la structure de la broche 114

V.3 Les paramètres du point de vue de la stratégie d'usinage 115

V.4 La broche reconçue 117

V.5 Conclusion sur la conception des outils de brochage 118

VI Bilan 119

I Objectifs de ce chapitre

Les deux premiers chapitres ont permis d'obtenir les informations nécessaires pour exprimer les efforts de coupe, dans le cas de du brochage de l'Udimet 720® et pour appréhender la fabrication des broches pied de sapin. Ce troisième chapitre a pour but de réaliser des essais d'usinage d'alvéoles pied de sapin en conditions réelles, de confronter les mesures obtenues grâce à la simulation mise en place, et de contrôler la géométrie et l'intégrité de surface des alvéoles produites afin d'estimer l'influence des conditions de coupe. A partir des trois points précédents et de la simulation, une broche sera proposée et testée. Elle permettra de réduire la variation des efforts et donc d'améliorer la géométrie des alvéoles produites. Pour atteindre ces objectifs, ce chapitre est articulé en quatre axes :

- les essais de coupe du point de vue macroscopique : les alvéoles brochées durant ces essais permettront de mesurer les efforts et fourniront des éprouvettes pour des contrôles métrologiques et métallurgiques,
- la comparaison des efforts simulés et des efforts mesurés dans le but de caractériser la performance du simulateur et d'expliquer les divergences entre simulation et essais,
- le contrôle des alvéoles brochées : le respect des tolérances géométriques et de l'intégrité de surface des alvéoles pied de sapin sont deux critères essentiels du point de vue de la sécurité de fonctionnement de la turbine. L'optimisation du brochage des alvéoles pied de sapin sert notamment à garantir ces deux critères. La corrélation entre les efforts mesurés et les pièces usinées permettra de déterminer les indicateurs améliorant le plus possible la qualité des pièces,
- la re-conception d'une broche pied de sapin afin de garantir une meilleure géométrie des alvéoles usinées.

Enfin, la dernière partie conclut sur l'efficacité de cette approche.

II Essais de coupe du point de vue macroscopique

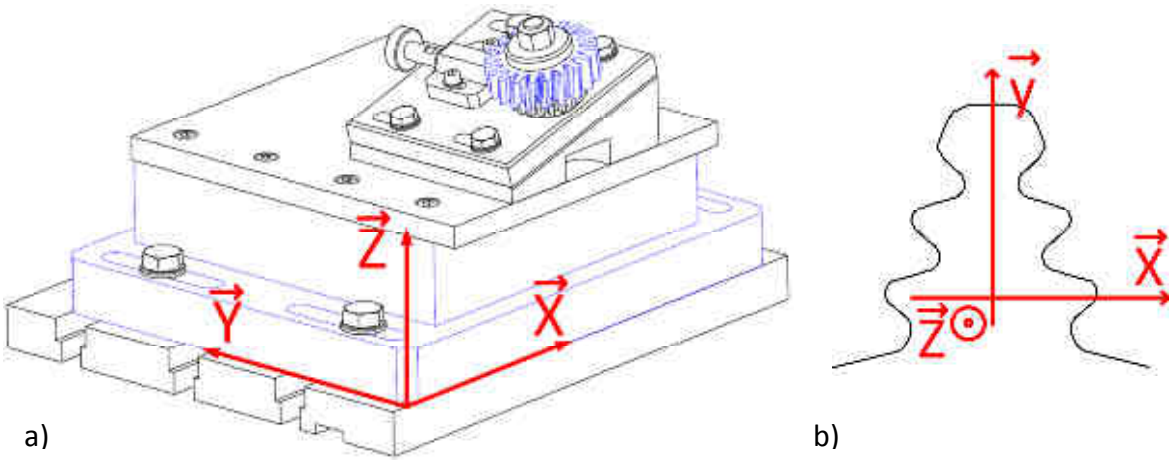
II.1 Installations expérimentales

La plupart des publications traitant du procédé de brochage présente la mesure des efforts comme une partie délicate de ces études. La principale difficulté pour brocher des alvéoles pied de sapin, tout en enregistrant les efforts de coupe, réside dans le fait qu'une brocheuse est une machine spécifique possédant un système de fixation qui ne permet d'installer que des disques de turbine. Au contraire, une fraiseuse autorise une grande flexibilité dans le choix des montages, grâce à sa table, pour fixer facilement des moyens expérimentaux tels qu'une platine de mesures d'effort. Certaines études traitant de l'optimisation de ce procédé ne présentent pas de mesures d'effort mais seulement des résultats issus de mesures de rugosité ou dimensionnelles, [Legutko2007], [Legutko2010], [Shchedrin2008], donc obtenus sur la pièce réalisée et démontée de la brocheuse.

[Budak2001] avait résolu ce problème en plaçant à l'intérieur d'une brocheuse des capteurs piézoélectriques, permettant ainsi de mesurer les efforts en permanence sur une ligne de production. La brocheuse de notre étude utilise aussi le principe d'un capteur piézoélectrique placé à l'intérieur de la machine mais celui-ci ne permet de mesurer les efforts que suivant l'axe *z*. Pour obtenir les efforts sur une alvéole pied de sapin suivant les trois directions, nous avons utilisé une platine de mesure d'effort montée sur le diviseur de la brocheuse, comme l'avait déjà présenté [Axinte2003]. La platine crée une plateforme pour installer une pièce d'essai ou rajouter des capteurs supplémentaires, accéléromètres ou acoustiques par exemple. [Kishawy2012] sur le même principe que précédemment, a pu mesurer des efforts sur des broches à cannelures intérieures.

L'installation expérimentale que nous avons choisie pour brocher des alvéoles pied de sapin est du même type que pour les premiers essais de coupe présentés au chapitre 1. La platine de mesures d'effort est toujours utilisée mais la partie supérieure a été modifiée pour permettre de brocher des alvéoles inclinées à 15° dans un disque (figure III-1 a). Le repère de mesure est identique à celui présenté au chapitre précédent (figure III-1 b).

Par la suite, pour réaliser des essais de vérification, dans des conditions identiques à la production, la platine ne sera plus utilisée. Seul le capteur interne à la machine permettra de mesurer les efforts suivant l'axe *z*, en s'assurant préalablement de la corrélation entre les efforts mesurés par la platine et par ce capteur interne. Ces essais, dans les conditions de production, permettront de valider les nouvelles conceptions d'outils proposées à la fin de ce chapitre. Les broches choisies sont des broches pied de sapin identiques à celles présentées au chapitre précédent à la (figure II-10 page 56).



a) b)

figure III-1 a) Montage expérimental permettant de brocher les alvéoles pied de sapin b) Alvéole pied de sapin

II.2 Essais de coupe avec une broche pied de sapin

La brocheuse utilisée dans le cadre de cette étude étant une machine de production, sa disponibilité pour réaliser des essais est réduite. La simulation a permis de limiter le nombre d'essais nécessaire au strict minimum, c'est-à-dire uniquement pour vérifier les résultats de simulation et obtenir des éprouvettes dans le but de préciser la géométrie des alvéoles produites. Ces différentes campagnes d'essais sont au nombre de trois :

- une première campagne visant à vérifier la pertinence des efforts simulés par rapport aux efforts mesurés, au paragraphe III.1,
- une deuxième campagne visant à mesurer l'influence du couple : (pas de la broche / épaisseur de la pièce à brocher) sur les efforts de coupe et sur la qualité géométrique de l'alvéole, au paragraphe IV.3,
- une troisième et dernière campagne d'essais visant à tester une broche reconçue à partir de ces travaux de thèse, au paragraphe V.4.

Pour réaliser ces essais, ainsi que ceux d'usinabilité du chapitre 1, la brocheuse n'a été utilisée que pendant onze jours sur trois années, soit 88 heures d'essais sur brocheuse. Sans la simulation, les temps et le nombre d'essais d'usinage nécessaires auraient été beaucoup plus importants. Dans ces travaux de thèse à forte proximité avec l'application industrielle, la démarche employée respecte deux préoccupations : des interactions maîtrisées avec les contraintes de production et une applicabilité fiable des résultats.

III Comparaison entre la simulation et les essais de coupe

III.1 Comparaison simulation-mesure

La simulation est développée à partir d'une description géométrique précise de la broche (grâce au calcul analytique en trois dimensions de chaque arête de coupe), des paramètres caractérisant la coupe, et des lois de coupe identifiées par des méthodes directes. Comme pour le chapitre précédent, seule la broche sapin est présentée dans le but de simplifier la lecture du mémoire. L'essai mis en place pour vérifier la qualité de la simulation consiste à usiner une alvéole pied de sapin par une broche sapin ayant les mêmes caractéristiques que celles de la simulation. Les conditions d'essais retenues sont les suivantes :

- pas de broche P = 8 mm,
- épaisseur pièce Ep = 11,59 mm,
- vitesse de coupe Vc = 2m/min,
- avance par dent f = 0,03mm par dent,
- angle de brochage de 15°.

Les résultats issus de la simulation sont tracés sur la figure III-2 a et ceux issus de la mesure sur la figure III-2 b. Comme déjà expliqué, les valeurs d'effort suivant l'axe *z* sont très proches entre la simulation et la mesure ; les efforts suivant les axes *x* et *y* présentent les mêmes amplitudes entre simulation et mesure mais avec une légère divergence. L'outil étant théoriquement symétrique, les efforts suivant l'axe *x* devraient rester centrés sur zéro et ne devraient pas dévier comme sur la figure III-2 b.

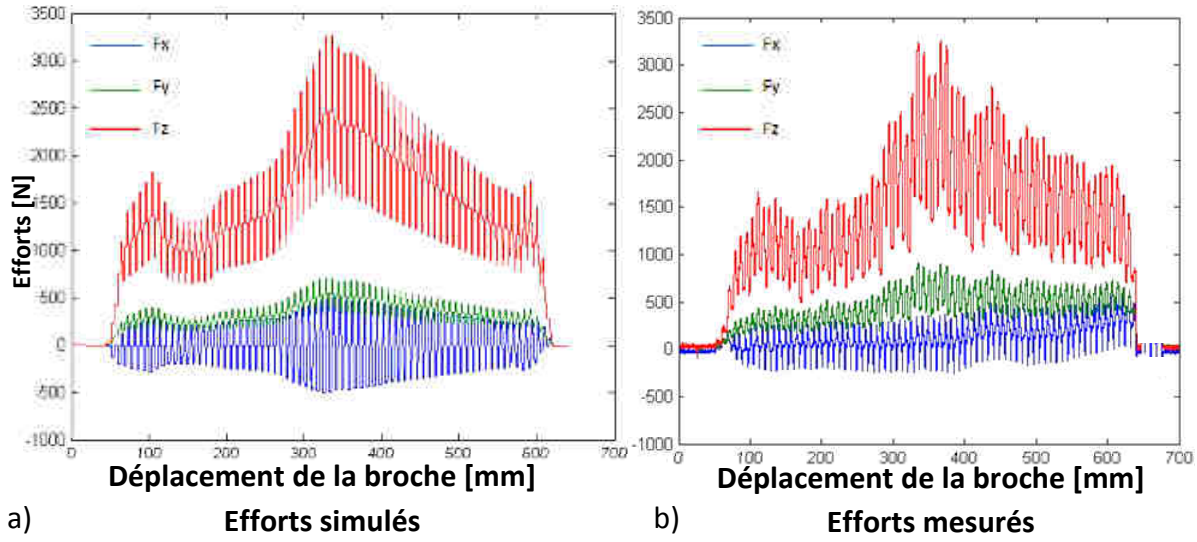


figure III-2 a) Courbes d'efforts issues du simulateur b) Courbes d'efforts issues de mesures

Afin de mieux évaluer la qualité de la simulation par rapport à la mesure, une étude de corrélation est effectuée en prenant en compte les pics et les creux d'effort de la simulation et de la mesure suivant les trois axes (figure III-3). Comme observé précédemment, les meilleurs résultats sont obtenus sur l'axe *z*. Les axes *x* et *y,* même si leurs coefficients de corrélations sont supérieurs à 90%, présentent une plus forte dispersion. Les écarts peuvent atteindre 60 à 150 % pour 30% des points sur l'axe *x* (figure III-4). L'écart pour les axes *y* et *z* ne dépasse jamais 40%. Seulement pour un très petit nombre de points de l'ordre de 2% de la population, l'écart est supérieur à 30%. La forte divergence des efforts sur l'axe *x* est due à la déviation du signal d'effort lui faisant perdre sa forme symétrique. L'explication de la déviation des efforts suivant l'axe *x* sera expliqué au paragraphe (III.2).

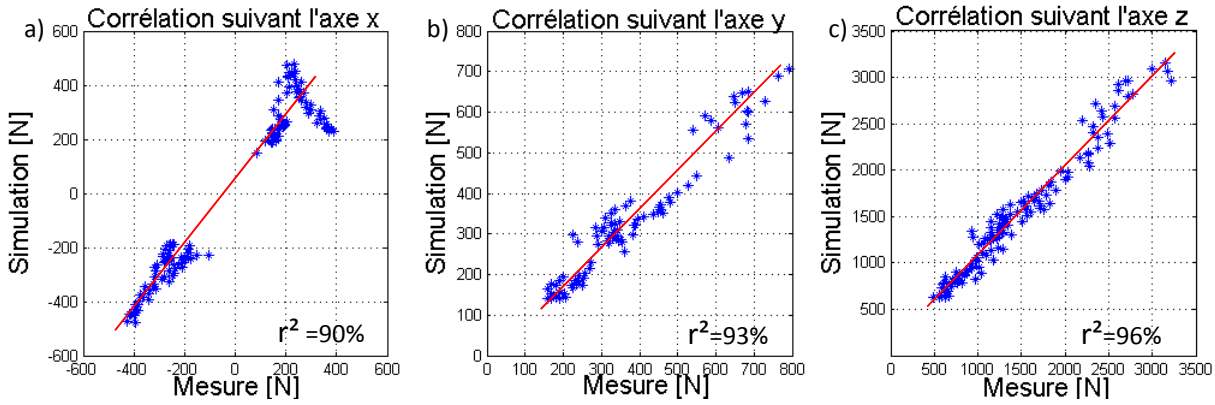


figure III-3 Corrélation simulation/mesures : a) axe *x* b) axe *y* c) axe *z*

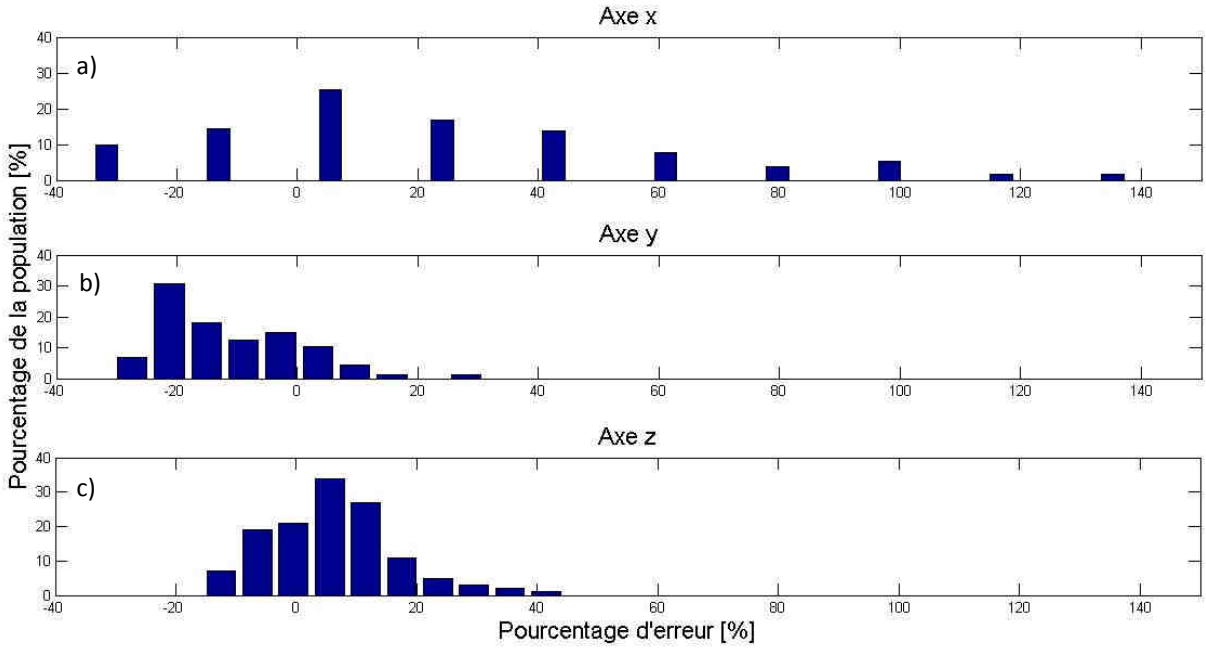


figure III-4 Pourcentage d'erreur de la simulation par rapport à la mesure : a) axe *x* b) axe *y* c) axe *z*

La superposition de la simulation et de la mesure permet d'expliquer en partie pourquoi la corrélation entre les efforts suivant l'axe *x* est plus faible que suivant les deux autres axes. La broche pied de sapin étant un outil avec deux faces de coupe symétriques par rapport à l'axe *y* (figure III-5), chaque pic d'effort est dû aux deux faces de coupe d'une même dent. Or, comme cette symétrie se fait par rapport à l'axe *y*, les efforts des deux faces de coupe suivant l'axe *x* (*Fx_g* et *Fx_d*) se soustraient au lieu de s'additionner pour les axe *y* et *z*. Comme notre montage présente une légère souplesse, les efforts sur la mesure n'atteignent pas directement leur maximum, contrairement à la simulation. Pour l'axe *x*, les efforts d'un côté d'une dent n'ont pas fini d'augmenter que déjà l'autre côté voit ses efforts augmenter, empêchant d'atteindre les pics maximaux. Il est possible de simuler cette évolution progressive des efforts grâce à une fonction exponentielle ; mais cette évolution étant due à un manque de raideur de notre montage, elle n'est pas représentative d'un brochage en conditions réelles.

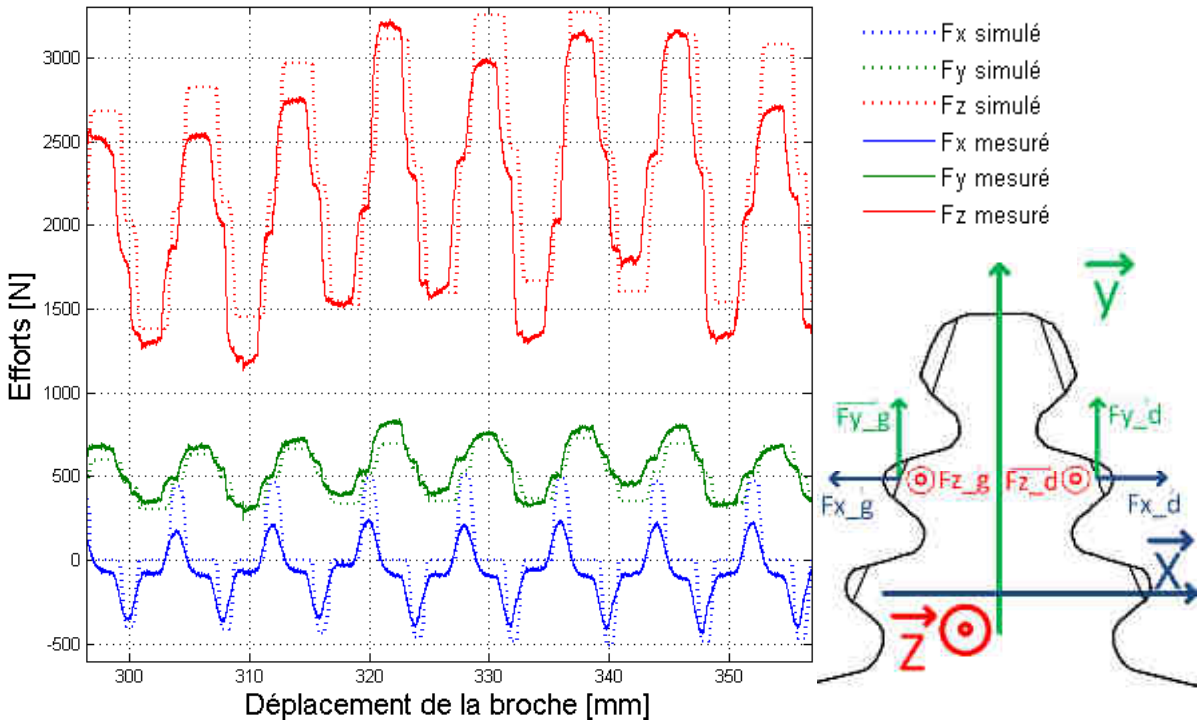
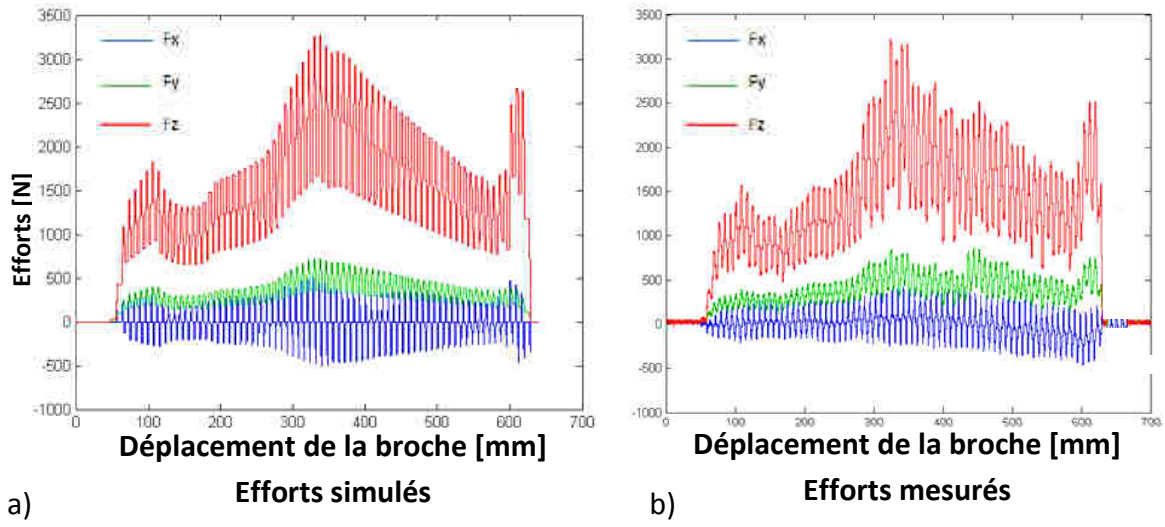


figure III-5 Superposition des efforts simulation/mesure

Suite à ces constatations, une deuxième alvéole a été brochée avec une nouvelle broche pour mesurer à nouveau les efforts (figure III-6 b). Cette broche présente les mêmes caractéristiques que la précédente, à la différence d'un changement de stratégie d'usinage sur les dernières dents (de 600 à 650 mm). A nouveau, une très bonne corrélation des efforts, jusqu'à une abscisse de 450 mm, est observée. De 450 à 600 mm, la déviation des efforts a été expliquée par une dégradation de certaines dents de la broche par [Mandrile2012]. Cette variation est surtout visible sur le tracé des efforts de l'axe *y*. Le pic d'effort visible de 600 à 650 mm est dû à un changement de stratégie d'usinage qui modifie

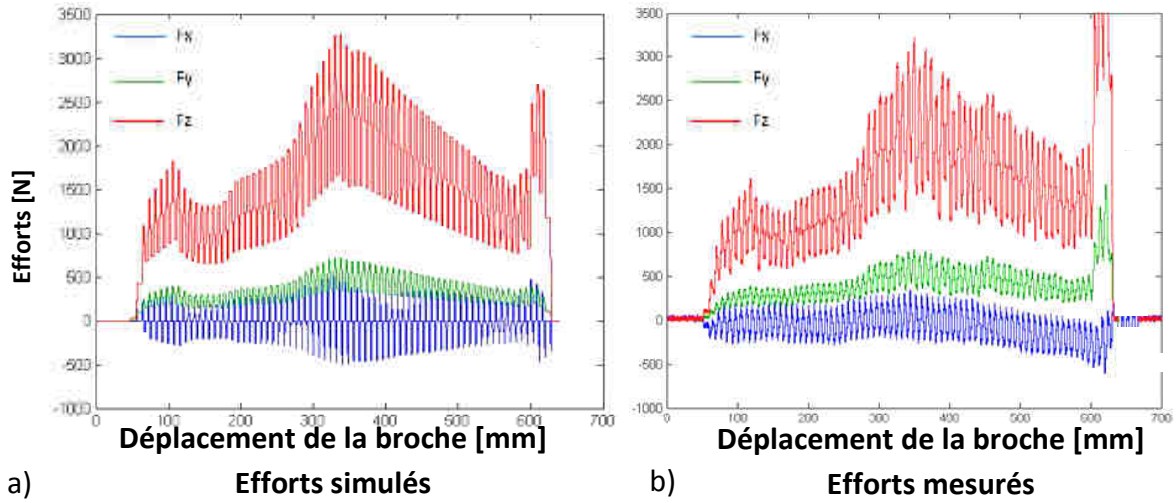
les sections de copeau prises par la broche. Durant l'usinage des trois dernières dents, la broche agit comme une broche de calibrage (figure II-12 page 57), avec une avance par dent de 0,005 mm entraînant une augmentation de la section de copeau et, en conséquence, des efforts. Ce changement de stratégie d'usinage a été implémenté dans le simulateur (figure III-6 a), et nous observons des pics d'efforts semblables entre la simulation et la mesure.



a) **Efforts simulés** b) **Efforts mesurés**

figure III-6 a) Courbes d'efforts issues du simulateur b) Courbes d'efforts issues de mesures

Comme nous avons observé des différences sur les efforts entre deux broches théoriquement semblables, une troisième broche a été testée pour vérifier la répétabilité des essais et nous retrouvons encore une bonne corrélation globale entre l'essai et la simulation. Toutefois, pour la zone entre 600 et 650 mm, les sections de copeau prises par la broche sont plus importantes (figure III-7 b), que dans l'essai précédent (figure III-6 b). Ces différences sont dues à l'imprécision de la fabrication, issue des tolérances de l'outil.



a) **Efforts simulés** b) **Efforts mesurés**

figure III-7 a) Courbes d'efforts issues du simulateur b) Courbes d'efforts issues de mesures

Suite à ces trois essais, une bonne corrélation globale entre la simulation et les mesures est observée, mais des divergences des essais de brochage sont aussi notées. Une série de mesures géométriques des outils de brochage a été réalisée puis implémentée dans le simulateur d'effort. Ceci permet d'apprécier les différences entre les broches et de comprendre les écarts entre la mesure et la simulation ; le but est aussi de caractériser l'influence de chaque défaut de l'outil sur les efforts de coupe.

III.2 Simulation de défauts et mesures de broches

Au premier chapitre, une cause de divergence possible des modèles de coupe a été analysée : il s'agissait de l'influence de l'état du matériau sur les efforts de coupe suite aux cycles de traitements thermiques. Cette première analyse avait démontré la très faible influence du traitement thermique sur les efforts de coupe, mais avait fait apparaître un défaut d'avance par dent des broches. En plus de ce défaut mesuré sur l'outil, plusieurs mesures ont été réalisées sur la brocheuse permettant ainsi d'identifier quatre types de défauts:

- la forme de l'alvéole : les broches étant des outils de forme, le profil réel de l'alvéole a été mesuré et implémenté dans le simulateur d'efforts de coupe pour évaluer les écarts possibles entre la forme théorique, implémentée en premier dans le simulateur, et la forme réelle de l'alvéole sur les efforts de coupe,
- l'avance par dent de la broche : l'avance théorique des broches sapin est de 0,03 mm par dent ; or, la fabrication de ces outils s'accompagne d'une certaine dispersion. Après mesure, les avances par dent réelles d'une broche ont été notamment implémentées dans le simulateur,
- le décalage entre l'ébauche et la finition : théoriquement, ébauche et finition sont parfaitement alignées. Dans la réalité, ceci dépend des imperfections géométriques de la broche et de la brocheuse, entraînant une imprécision de la remise en position du coulisseau entre l'ébauche et la finition. La simulation a permis d'évaluer l'influence d'un tel décalage sur les efforts,
- la rectitude de l'outil : les broches étant des outils de génération, si toutes les dents de la broche ne sont pas parfaitement alignées, des zones de l'outil ne devant pas usiner sont amenées à le faire. Après des essais avec une broche réelle, dont la rectitude a été changée artificiellement, le même défaut a été appliqué sur le simulateur et ainsi comparé à la réalité.

Suivant les cas, ces défaut ont été mesurés ou générés de façon contrôlée, pour ensuite réaliser une mesure des efforts de coupe puis une simulation pour apporter une meilleure compréhension de leur influence sur la coupe et sur l'alvéole produite.

III.2.a Défaut de forme de l'alvéole

La première étape pour prendre en compte l'influence de la forme de l'alvéole dans la simulation est la mesure de l'alvéole pied sapin. La discrétisation de l'alvéole réalisée par la machine à mesurer n'étant pas la même que celle du simulateur, la forme de l'alvéole a été reconstituée par une courbe du type cubique polynomiale (degré 3), pour obtenir une alvéole discrétisée d'un pas de 0,01 mm suivant l'axe *y* (figure III-8). [Kishawy2012] et [Hosseini2013] ont aussi reconstitué des formes brochées à partir de mesures puis de courbes de Bézier pour simuler des efforts de brochage. La forme réelle de l'alvéole étant très proche de celle de l'alvéole théorique et la bande de tolérance du profil de l'alvéole étant de 15 µm, l'influence sur les efforts n'est que de 2,5% sur les efforts au maximum (figure III-9). La différence entre le profil mesuré et théorique ne permet pas d'expliquer les défauts observés sur la mesure des efforts.

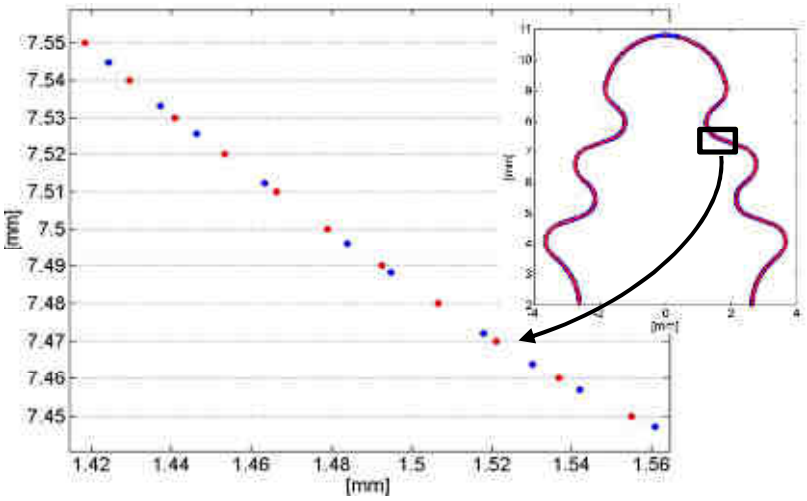


figure III-8 Schéma de la reconstruction de l'alvéole par une courbe cubique polynoniale à partir du balayage MMT

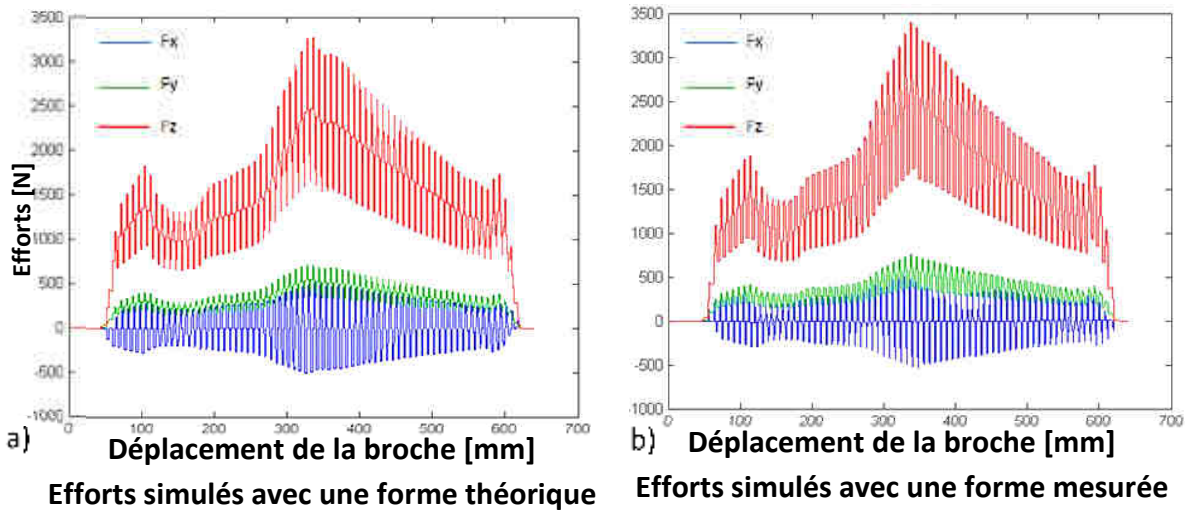


figure III-9 a) Courbes d'efforts simulées avec la forme théorique de l'alvéole b) Courbes d'efforts simulées avec la forme mesurée

La figure III-10 permet de faire le bilan de l'influence de la tolérance de la forme de l'alvéole sur les efforts de coupe. Sur cette figure sont tracés, en traits continus, les efforts issus d'une simulation dans les conditions nominales, et, en pointillés, les limites de variation en prenant en compte de la tolérance de l'alvéole. La variation possible, due à la tolérance de l'alvéole sur les efforts, est très faible.

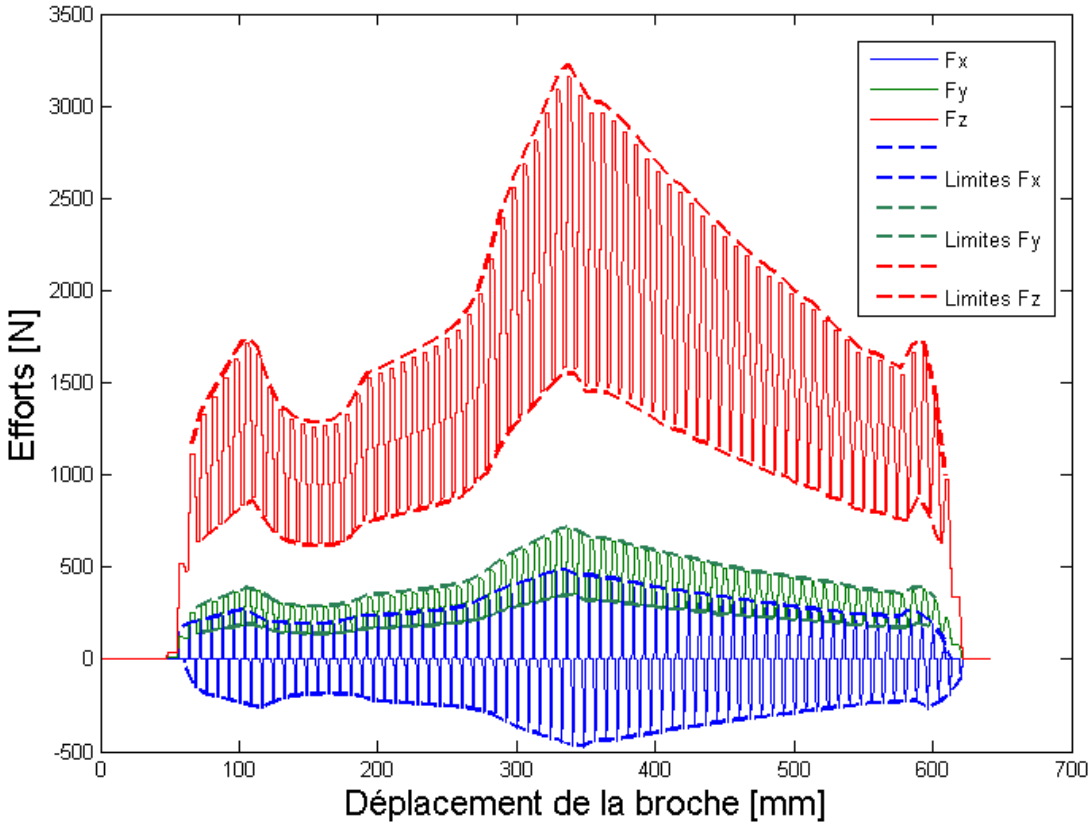


figure III-10 Intervalle de tolérance des efforts en fonction de l'intervalle de tolérance de la forme de pied de sapin

III.2.b Défaut d'alignement entre l'ébauche et la finition

Le défaut d'alignement se caractérise par un désalignement entre la forme ébauchée et la forme finale de l'alvéole. Dans le cas présenté ici, l'ébauche a été décalée de 0,05 mm suivant l'axe *x*, car les tolérances des outils d'ébauche sont de ± 0,02 mm et le défaut de positionnement de la brocheuse entre les lignes d'ébauche et de finition a été mesuré en production de l'ordre de 0,02 à 0,03 mm. Contrairement au cas où l'ébauche et la finition sont parfaitement alignées (figure III-11 a), le défaut d'alignement entraîne une variation des efforts dans la direction du désalignement. Dans le cas présenté ici, les efforts dérivent jusqu'à 250 N suivant l'axe *x* dans les parties entourées en rouge (figure III-11 b).

La figure III-12 permet de faire le bilan du défaut d'alignement sur les efforts de coupe. Sur cette figure sont tracés, en traits continus, les efforts issus d'une simulation dans les conditions nominales, et, en pointillés, les limites d'efforts dues à ce défaut. Certaines zones des courbes sont plus affectées que d'autres à cause de l'intersection progressive des dents de la broche avec la forme ébauchée et la forme de l'alvéole finale.

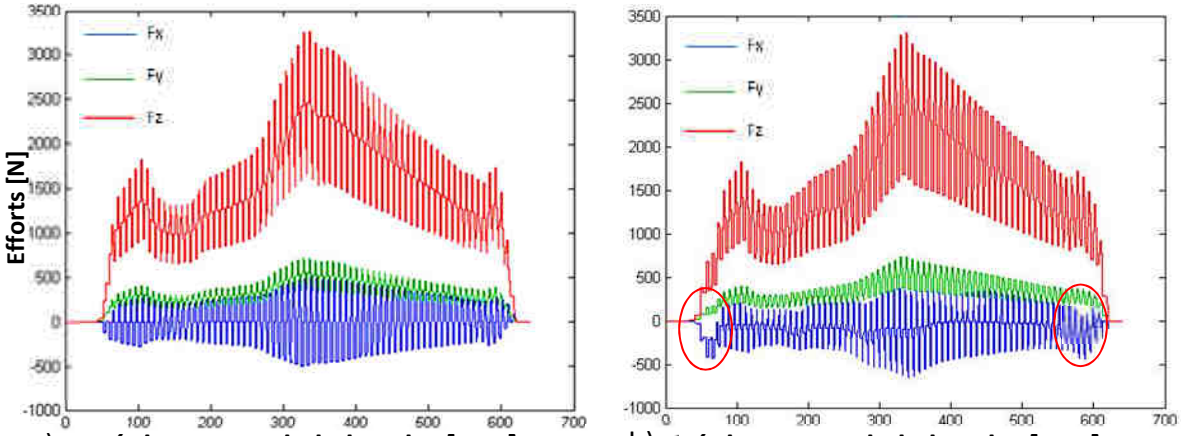


figure III-11 a) Courbes d'efforts issues du simulateur avec ébauche et finition alignées b) Courbes d'efforts issues du simulateur avec ébauche et finition désalignées de 0,05 mm

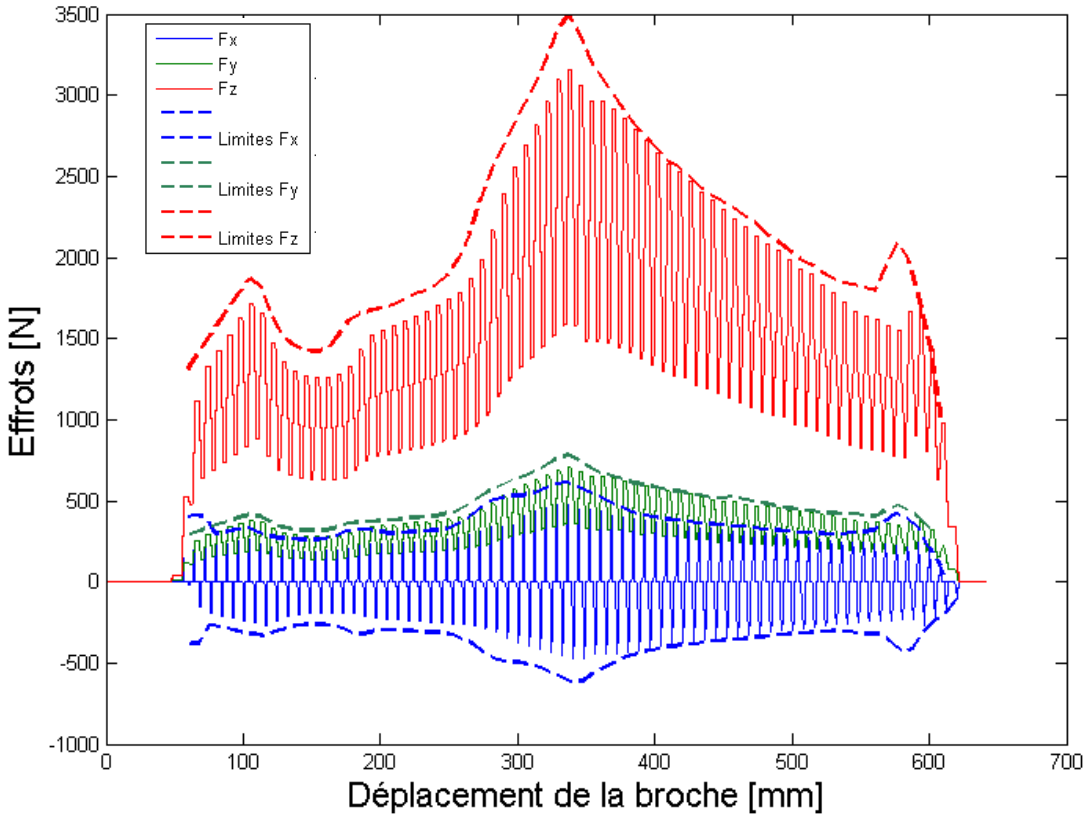


figure III-12 Intervalle de variation des efforts dû au décalage entre l'ébauche et la finition

III.2.c Défaut d'avance par dent

Le défaut d'avance par dent, aussi appelé défaut de progression par les fabricants de broches, correspond à une erreur d'altitude de la meule au moment où la forme de la broche est affûtée sur chaque dent. En observant les courbes issues des mesures d'efforts pour les différentes broches utilisées (figure III-2 b à figure III-7 b), une oscillation des pics d'efforts est observée, plus importante sur les mesures que sur la simulation. Une série de mesures de l'avance par dent des broches a permis d'expliquer ces variations comme étant la conséquence de la variation de la progression des broches. La mesure de l'avance par dent est réalisée grâce à une colonne de mesures et une règle sinus inclinée à 20° pour permettre à l'arête de coupe de chaque dent d'être parallèle au marbre (figure III-13 a).

L'avance par dent théorique étant de 30 µm, les mesures réalisées montrent une population suivant une loi normale avec une moyenne (M) de 30 µm et un écart type (σ) de 8 µm (figure III-13 b). Comme cette population suit une loi normale, 99,73% de la population représentent une étendue égale à 6 écart types centrée sur la moyenne, donc une avance par dent possible allant de 6 µm à 54 µm. Cette variation de l'avance par dent induit une variation des efforts durant l'usinage de 35% de l'effort tangentiel (F_t) et de 18% de l'effort radial (F_r) (figure III-13 c). Les modèles d'efforts ont démontré au premier chapitre que le facteur ayant le plus d'influence sur les efforts est l'avance par dent.

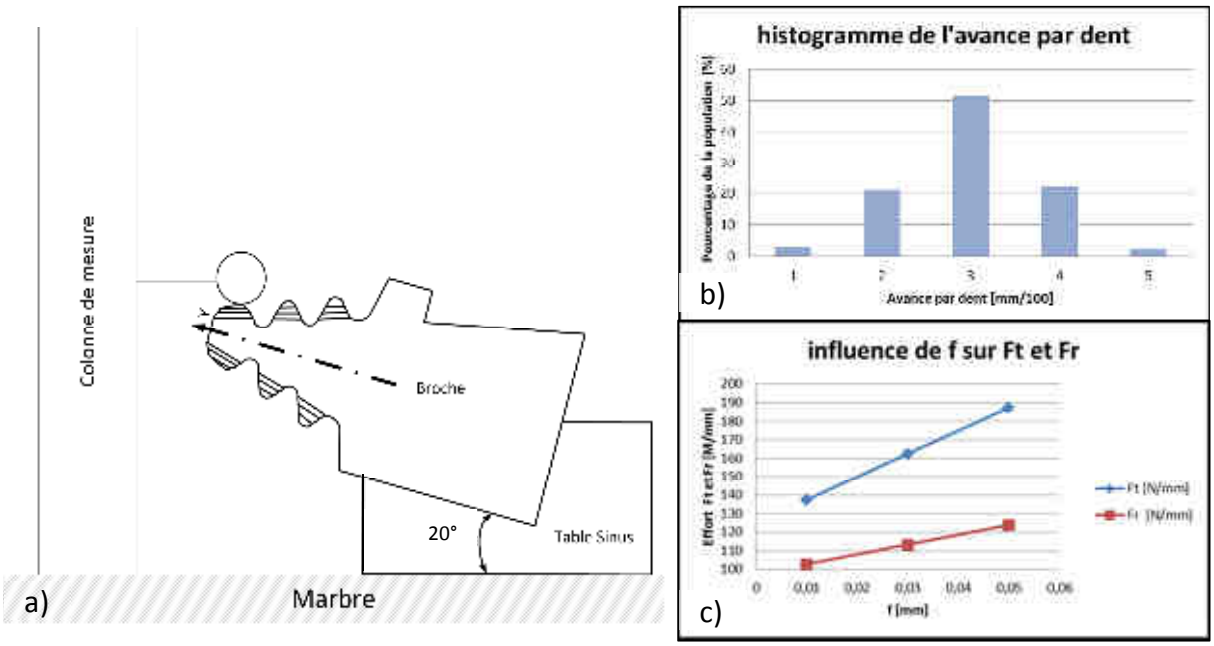


figure III-13 Mesure de l'avance par dent : a) schéma de principe b) histogramme de la population de l'avance par dent c) influence de l'avance par dent sur les efforts

Une avance par dent de 6 µm risque d'induire un refus de coupe (copeau-mini), et une avance par dent de 54 µm est très proche de l'avance par dent moyenne d'un outil

d'ébauche (60 µm). Ceci perturbe les mesures d'efforts, mais la durée de vie des broches en est aussi affectée, car avec une telle progression, les dents de la broche ne s'usent ni uniformément, ni à la même vitesse. Les mesures réalisées sur l'outil ont été implémentées dans le simulateur d'effort (figure III-14 b). A ce moment, des oscillations de ± 15 % des pics sur F_z et de 10 % sur F_x apparaissent, contrairement à une simulation utilisant une progression théorique (figure III-14 a). La figure III-15 permet de faire le bilan de la variation d'avance par dent de 6 à 54 µm sur les efforts. Toutes les zones de la broche sont affectées uniformément car il s'agit d'une variation de la position des dents, et non pas du profil.

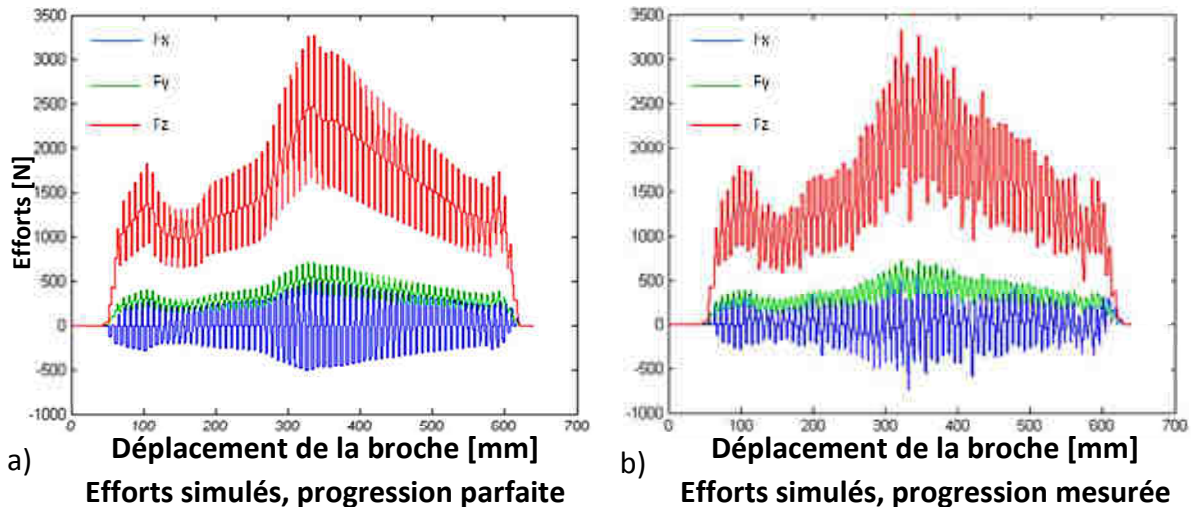


figure III-14 a) Courbes d'efforts issues du simulateur avec une progression parfaite b) Courbes d'efforts issues du simulateur avec une progression réelle implémentée

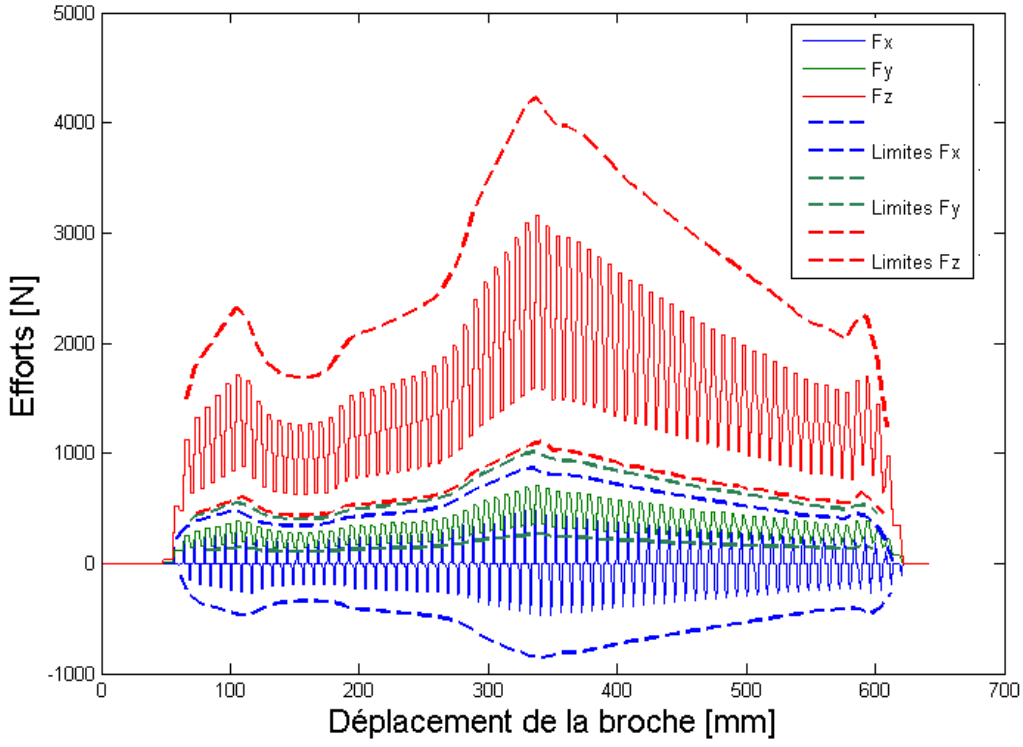


figure III-15 Intervalle de variation des efforts dû à l'intervalle de fabrication de l'avance par dent

III.2.d Défaut de rectitude

La broche étant un outil de génération, théoriquement, le profil de l'alvéole pied de sapin est le même et a la même position sur chaque dent de la broche. Le défaut de rectitude de la broche correspond à une erreur de positionnement du profil de l'alvéole pied de sapin sur une dent par rapport aux autres. Il ne se répercutera donc pas de façon uniforme sur toutes les dents de la broche. Ce défaut est extrêmement difficile à mesurer car le profil de la broche est généré progressivement sur chaque dent, et la répétabilité de la mesure n'est pas suffisante pour pouvoir le mesurer directement quand la broche est montée sur la brocheuse. Pour évaluer l'influence de ce défaut, il a été décidé de le créer de façon contrôlée durant des essais de brochage, plutôt que de le mesurer avec une incertitude importante. Pour générer ce défaut, une série de clinquants a été rajoutée entre la broche et la face d'appui sur la brocheuse (figure III-16). Trois configurations ont été testées :

- cas a : la broche est bridée sur la brocheuse sans clinquants sur la face d'appui (figure III-16a). Nous ne connaissons pas sa rectitude exacte, mais ce cas servira de référence par rapport aux deux autres essais qui, eux, verront leur rectitude changer de façon maîtrisée par rapport à celui-ci,
- cas b : la broche est bridée sur la face de référence avec un jeu de clinquants imposant un décalage de la partie supérieure de la broche (figure III-16 b). Ce décalage est progressif de 0,03 mm sur 300 mm de long (0,03 mm représente le défaut maximal de rectitude mesuré sur les faces d'appui de la brocheuse sur ses 2 mètres de course),
- cas c : la broche est bridée sur la face de référence avec un jeu de clinquants imposant un décalage de la partie inférieure de la broche (figure III-16 c). Ce décalage est progressif de 0,03 mm sur 300 mm de long.

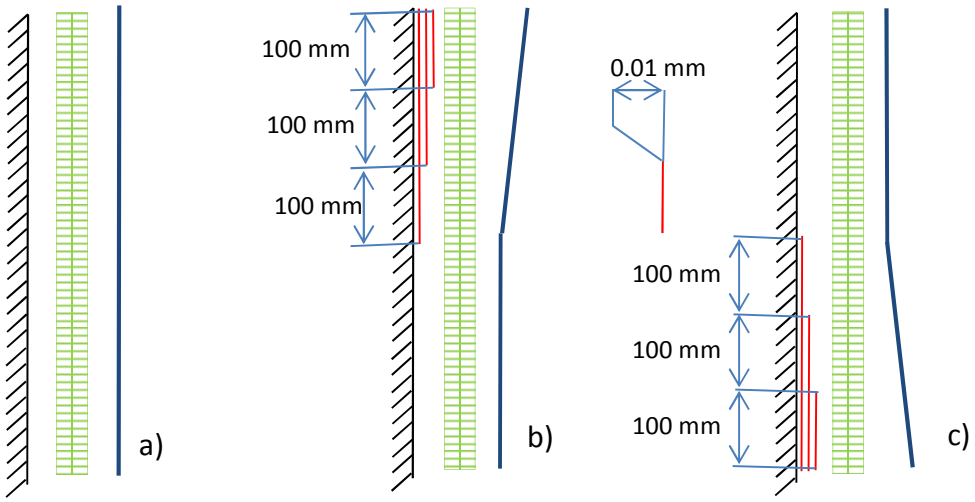


figure III-16 Essais de rectitude de l'outil a) outil sans défaut de rectitude ajouté, b) outil avec un défaut de rectitude dans la partie haute, c) outil avec un défaut de rectitude dans la partie basse.

Sur la figure III-16, les traits rouges schématisent les clinquants de 0,01mm d'épaisseur placés entre la broche, dessinée en vert, et la face d'appui de la brocheuse, représentée par les hachures noires. Les traits bleus, à droite sur les trois figures, matérialisent le défaut de rectitude de l'outil qui sera implémenté dans la simulation par la suite.

Pour chacun des trois cas, une mesure des efforts, puis une simulation ont été réalisées. La première configuration est présentée sur la figure III-17 a, pour la simulation, et figure III-17 b, pour la mesure d'efforts. Comme sur les essais précédents, les efforts mesurés sur l'axe *x* ne sont pas centrés sur 0 à cause des différents défauts déjà explicités ; ces courbes nous serviront de référence par rapport aux deux autres configurations. Le décalage d'effort suivant l'axe *z* de 500 N du premier pic, entre la simulation et la mesure, n'est pas dû à un défaut de rectitude mais à un défaut de positionnement de l'alvéole dans le disque durant l'essai. L'alvéole a été usinée sur un rayon plus grand (1,3 mm), donc une partie des premières dents a usiné dans le vide. La position de l'alvéole dans le disque restant la même pour les deux autres essais, cette légère différence n'influence pas le raisonnement mis en place.

Les deux autres cas sont tracés sur la figure III-18 et la figure III-19. Sur les six graphiques se trouvent à chaque fois deux repères 'D' et 'F' (début et fin), ils sont positionnées sur deux pics d'effort présents sur tous les tracés. Les différences entre le cas de référence (figure III-17), et les cas où des clinquants sont rajoutés (figure III-18 et figure III-19), permettent d'évaluer la pertinence de la simulation sur ce défaut, et sont synthétisées dans le tableau III-1. Comme il est possible de le constater, la simulation et la mesure donnent des résultats similaires. Il est donc maintenant possible d'associer des efforts à un défaut de rectitude.

	Repères D	
	Simulation	Mesure
Différence entre les cas a et b	≈0 N	≈0 N
Différence entre les cas a et c	≈250 N	≈250 N

	Repère F	
	Simulation	Mesure
Différence entre les cas a et b	≈350 N	≈350 N
Différence entre les cas a et c	≈0 N	≈0 N

tableau III-1 Différences d'efforts suivant l'axe *z* pour la simulation et la mesure à partir d'un défaut de rectitude

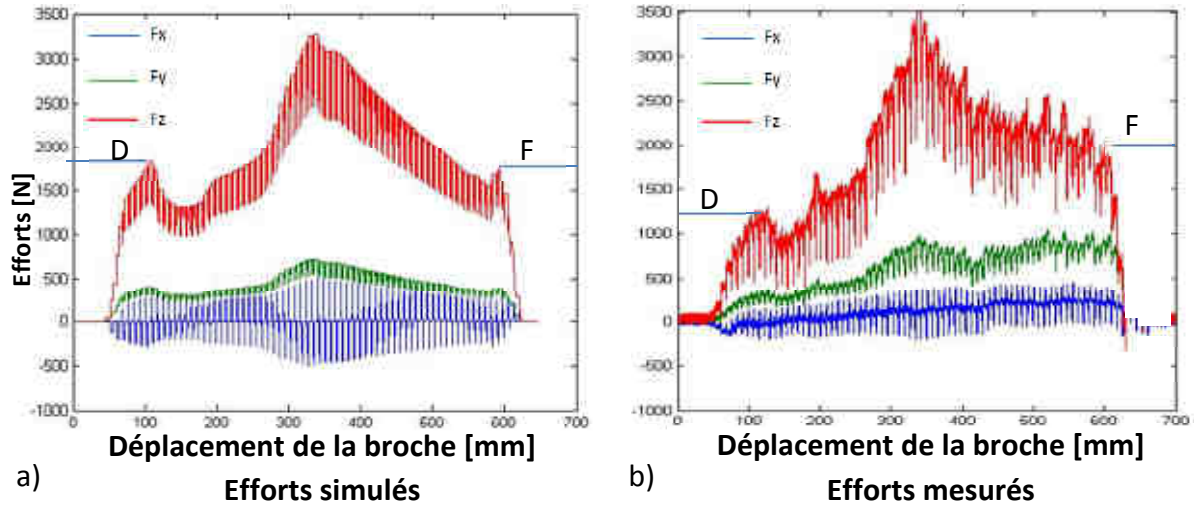


figure III-17 Analyse de la rectitude sans défaut ajouté (cas a) : a) courbes d'efforts issues du simulateur b) courbes d'efforts issues de mesures

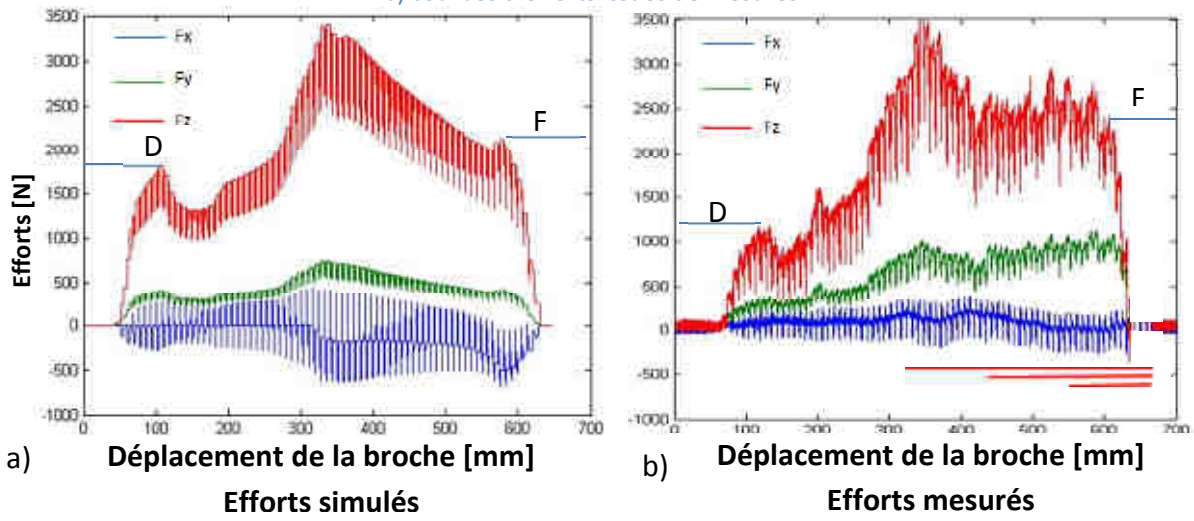


figure III-18 Analyse de la rectitude avec défaut ajouté sur la partie haute de la broche (cas b) : a) courbes d'efforts issues du simulateur b) courbes d'efforts issues de mesures

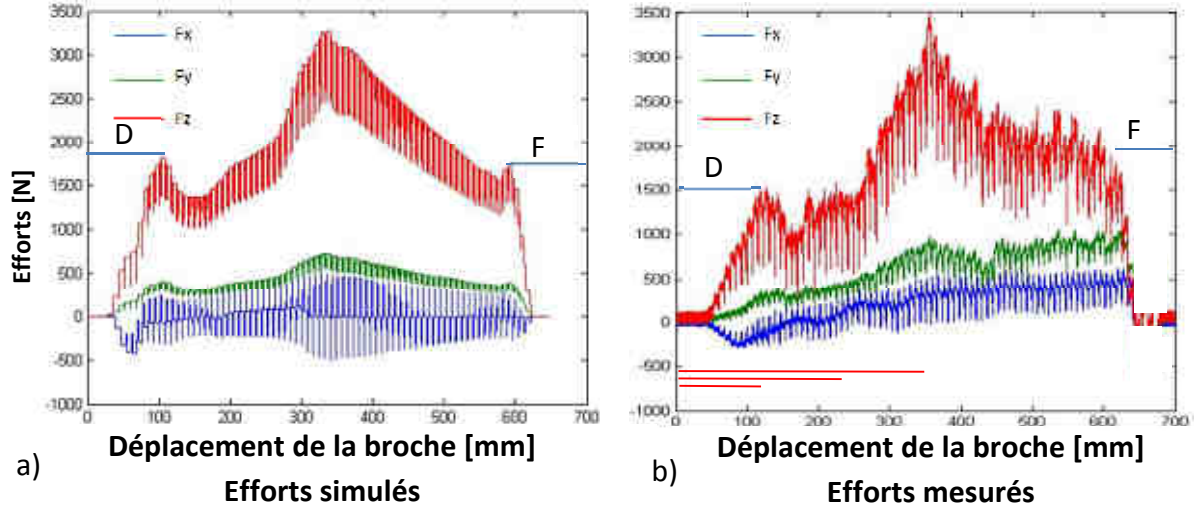


figure III-19 Analyse de la rectitude avec défaut ajouté sur la partie basse de la broche (cas c) : a) courbes d'efforts issues du simulateur b) courbes d'efforts issues de mesures

La figure III-20 fait le bilan de l'influence de la tolérance de la forme de l'alvéole sur les efforts de coupe. Sur cette figure sont tracés, en traits continus, les efforts issus d'une simulation dans les conditions nominales, et, en pointillés, les limites de variation des efforts en prenant en compte une variation de rectitude de 0,003 mm par 300 mm, appliquée tout au long de la broche. Cette figure nous permet aussi d'expliquer pourquoi nos premières simulations et mesures étaient similaires puis présentaient une légère déviation après 450 mm de déplacement de la broche ; cette déviation des efforts est due au défaut de rectitude.

Devant ces résultats, nous formulons l'hypothèse qu'une dent de la broche est guidée par la forme laissée par les dents précédentes, et la variation des efforts mesurés est due à l'équilibre des efforts imposés à chaque dent pour suivre la forme laissée par les dents précédentes. Ce phénomène est équivalent à un alésoir passant dans un trou percé et présentant un défaut de rectitude : l'alésoir permet d'obtenir le bon diamètre mais pas de redresser le défaut de rectitude. Le défaut de rectitude d'un trou percé est supprimé par une fraise à redresser puis l'alésoir calibre le diamètre du trou redressé. Cette technique n'est pas envisageable dans le cas de notre procédé industriel de brochage.

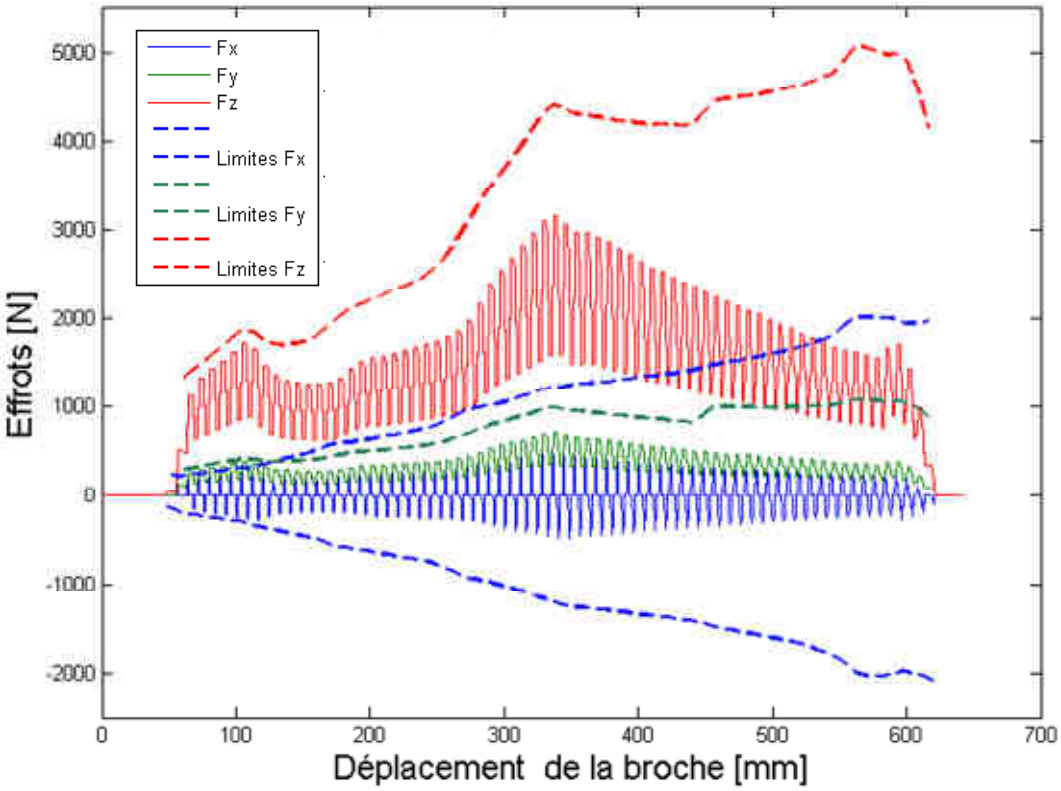


figure III-20 Intervalle de variation des efforts due au défaut de rectitude

III.3 Conclusion sur l'influence des défauts

Le cycle de traitement thermique, vu au chapitre I, ainsi que la tolérance de l'alvéole n'ont que peu d'influence sur les efforts de coupe, il est donc possible de les négliger. Il nous reste maintenant trois défauts que nous pouvons classer par ordre croissant d'influence sur les efforts :

- le décalage entre l'ébauche et la finition,
- l'avance par dent,
- la rectitude de la broche.

Il est difficile, à partir d'une mesure d'efforts, même tridimensionnelle, de retrouver tous les défauts de l'outil puisque ces phénomènes s'additionnent pour générer un défaut de localisation de chaque dent, qui engendrera des efforts de coupe spécifiques. Mais l'inverse est réalisable aisément : en mesurant et en implémentant le défaut dans le simulateur, il est possible de retrouver les mêmes variations que sur les mesures d'efforts de coupe.

Les défauts observés peuvent modifier les efforts, pour certains de près de 50%, et ces perturbations sont bien supérieures aux variations d'efforts générées en modifiant la conception des broches ou en changeant l'angle ou la vitesse de coupe. Les outils ayant tous de légères différences, il est tout à fait normal de ne pas trouver les mêmes résultats concernant les efforts. Par contre, il est important de maîtriser les intervalles de tolérance sur les cotes de la broche, dans le but de maîtriser les efforts et de garantir la qualité des pièces brochées, d'optimiser la performance du procédé mais aussi de maîtriser le coût de cette opération à haute valeur ajoutée.

Après nous être assurés de la qualité de la simulation et avoir compris l'influence des tolérances de l'outil sur les efforts, nous allons nous intéresser à la caractérisation de l'intégrité de surface et de la géométrie des alvéoles.

IV Caractérisations métallurgiques et géométriques des alvéoles

IV.1 Géométrie de l'alvéole

IV.1.a Etude bibliographique de la qualité géométrique des pièces brochées

Plusieurs études ont discuté de la qualité géométrique des alvéoles brochées. [Krimmel1990] propose une méthodologie pour mesurer l'ébauche des alvéoles pied de sapin directement sur une brocheuse grâce à une tête de palpage intégrée dans la machine pour améliorer le positionnement de l'ébauche par rapport à la finition.

Des études traitant de la qualité des pièces sont disponibles, comme celle menée par [Axinte2007]. Cette étude décrit les défauts de géométrie des alvéoles pied de sapin. Le principal défaut présenté est celui de la rectitude de l'alvéole brochée qui se caractérise par une variation en forme de ''s'' le long de l'alvéole (figure III-21 a). Ce défaut est dû à l'entrée et à la sortie alternative des dents de la broche dans la pièce (figure III-21 b et c). Ces entrées-sorties des dents provoquent une variation des efforts sur la pièce et donc un mouvement latéral de va-et-vient de la broche, augmentant ou diminuant la prise de copeau de chaque dent. Dans un précédent article, [Axinte2004] avait débattu de l'influence de la variation des efforts et de sa conséquence sur la forme de l'alvéole brochée. La variation de la prise de copeau due aux entrées et sorties alternatives des dents a été investiguée à l'aide de simulation par éléments finis par [Schulze2012]. Cette étude a permis d'expliquer les variations d'épaisseur de copeau et des efforts spécifiques aux moments où se produisent ces entrées et sorties alternatives.

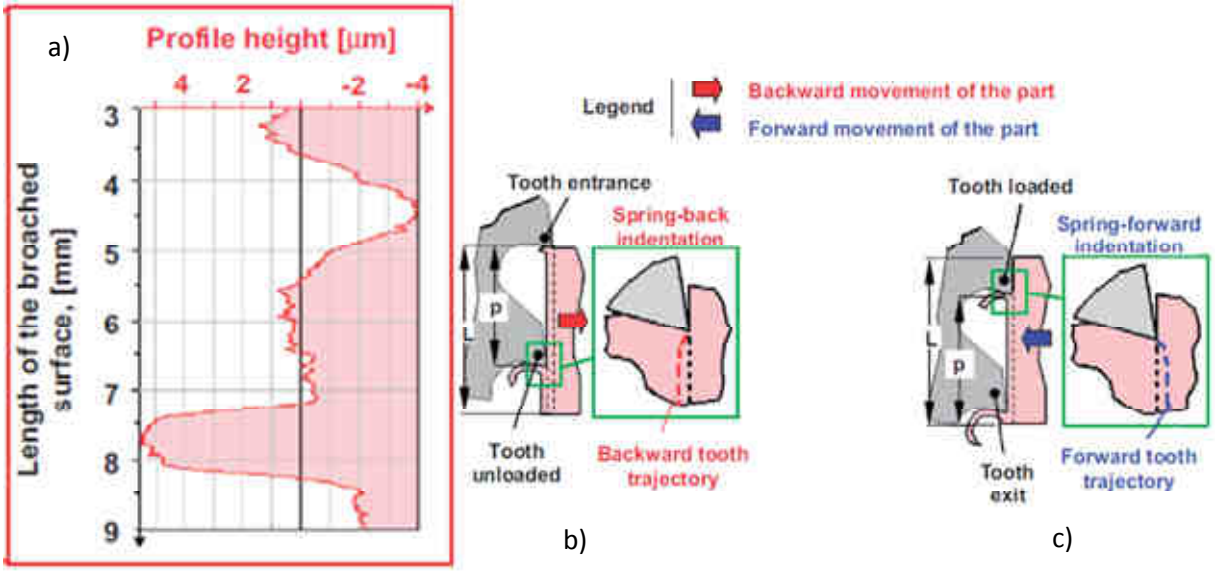


figure III-21 Mesure de rectitude de l'alvéole d'après [Axinte2007]

Au-delà de ces études décrivant la phénoménologie de la variation de rectitude des alvéoles brochées, d'autres études se sont intéressées à préciser les causes des variations, c'est-à-dire à identifier qui de la broche ou de la pièce brochée est à l'origine du défaut de rectitude de la pièce brochée. Grâce à une étude par éléments finis et à des mesures sur des pièces brochées, [Sajeev1997a] prouve, dans le cadre de son étude, que le défaut mesuré sur la pièce brochée est principalement dû à cette dernière et non pas à une flexion de la broche. De même pour [Ozurtk2003], les défauts mesurés sur les alvéoles pied de sapin sont principalement dus à un manque de rigidité des pièces brochées, mais aucune analyse n'est proposée pour vérifier cette affirmation.

Dans l'étude menée par [Axinte2004], le défaut de rectitude des alvéoles pied de sapin est expliqué comme étant le résultat d'un manque de rigidité de la table de la brocheuse. Des mesures réalisées par [Boud2006] sur la même machine viennent vérifier ces propositions. Pour [Maksimov2011], les défauts mesurés sur la pièce sont dus à un manque de rigidité des dents de la broche. Il propose de modifier les dimensions de ces dernières pour diminuer cette flexion de l'outil et obtenir des cotes satisfaisantes.

La grande variété de causes possibles, contribuant à un défaut de rectitude des alvéoles brochées, s'explique par le fait que les broches sont des outils conçus sur mesure et utilisés sur des machines, elles aussi conçues sur mesure. Nous ne trouvons pas de cause générique au défaut de rectitude des alvéoles, mis à part les efforts de coupe. Le manque de rigidité dépendra du type de pièces brochées, de la brocheuse et de l'outil utilisé. Il est donc très important de s'intéresser de près au procédé pour limiter le défaut de rectitude des alvéoles mais surtout pour comprendre les origines de ces défauts.

IV.1.b Mesures utilisées dans le cadre de notre étude

Le tolérancement de l'alvéole est une enveloppe de 15 µm sur toute la profondeur du disque. La figure III-22 présente une vue en deux dimensions d'une alvéole pied de sapin et de l'enveloppe de tolérance. Les dimensions et la tolérance de l'alvéole brochée étant très faibles, la mesure est réalisée grâce à une machine de mesure tridimensionnelle (*Werth Visiocheck®*) équipée d'un palpeur fibro-optique. Ce palpeur permet de mesurer par balayage le profil de l'alvéole pied de sapin sur toute la profondeur.

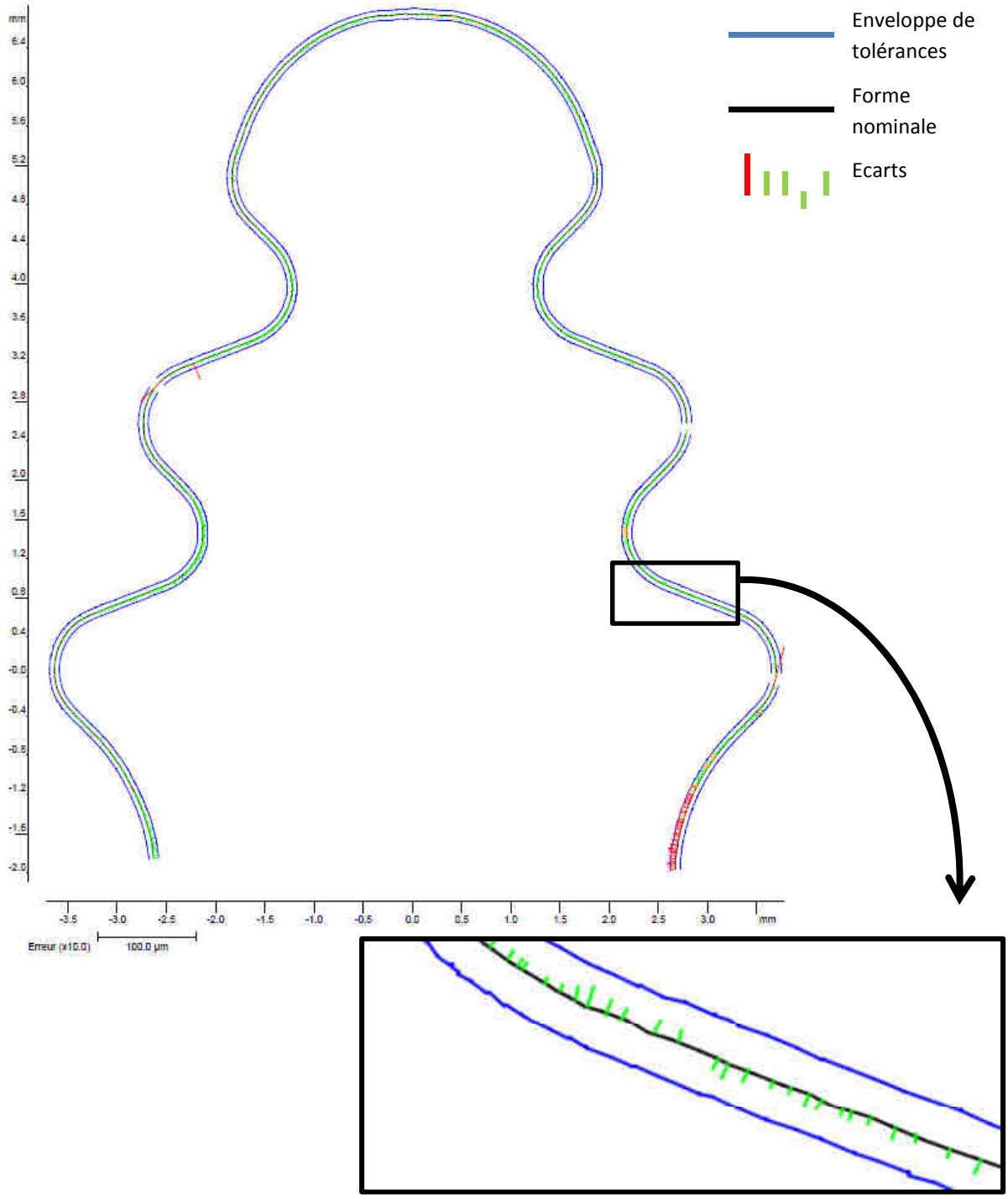


figure III-22 Enveloppe de tolérance du profil d'une alvéole pied de sapin

Le principe de fonctionnement de la mesure fibro-optique est la suivante (figure III-23) :

- une fibre en titane, au bout de laquelle se trouve une sphère d'un diamètre de 0,55 mm, suit le profil à mesurer tout en fléchissant,
- une caméra, placée au sommet de la fibre, mesure la position de la sphère par rapport à son propre repère durant son déplacement.

La répétabilité de ce moyen de mesure est de l'ordre de 2 µm. Mais surtout, il permet de d'obtenir les caractéristiques géométriques de l'alvéole pied de sapin à partir des balayages réalisés à différentes altitudes pour vérifier le critère de l'enveloppe cité précédemment, [Gea2012]. A partir des différentes mesures réalisées sur toute la profondeur de l'alvéole (figure III-24 a), des billes virtuelles (diamètre 1,4 mm) sont placées sur chaque tranche (figure III-24 b), et à partir de la position du centre des billes la rectitude de l'alvéole en est déduite (figure III-24 c). Ce critère de rectitude nous aidera à juger de la qualité des alvéoles brochées durant nos différents essais.

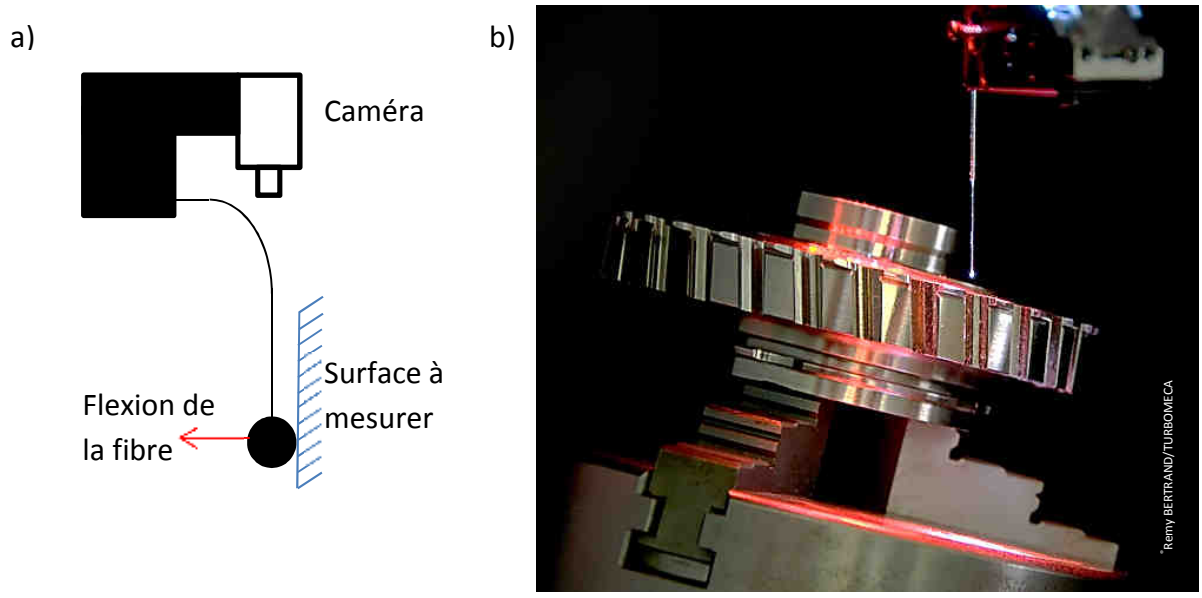


figure III-23 Mesure par palpeur fibro-optique : a) schéma de principe b) photographie d'un disque en cours de mesure (document Turbomeca)

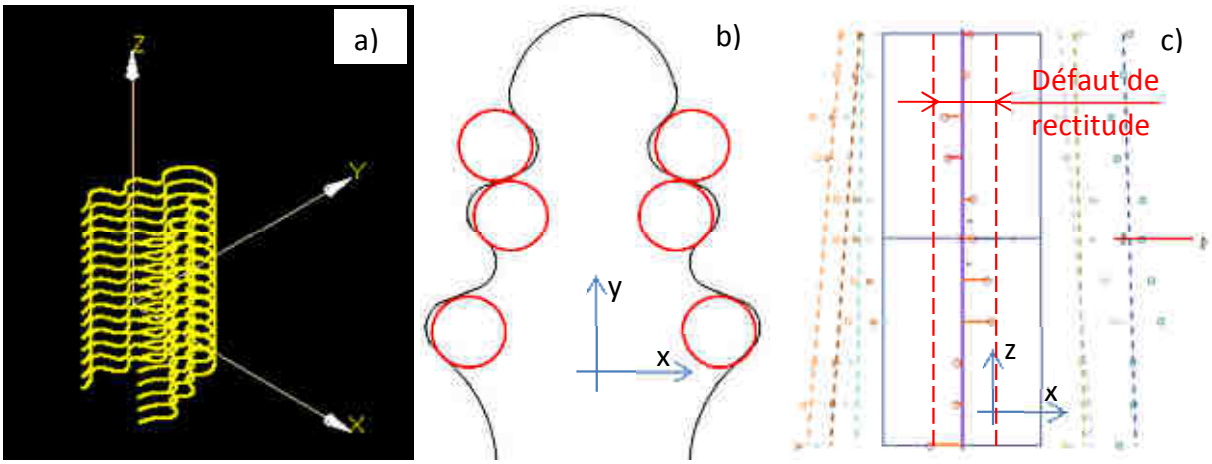


figure III-24 Mesure de rectitude des alvéoles : a) balayage b) cotes sur billes c) rectitude des billes

IV.1.c Confrontation géométrie/efforts

La rectitude de l'alvéole est directement liée aux l'entrées-sorties alternatives des dents de la broche dans la matière comme l'avait montré [Axinte2007]. La figure III-25 a est un agrandissement de la mesure d'efforts suivant l'axe *x* de la figure III-2 b (page 88). La figure III-25 b présente la mesure de la rectitude de l'alvéole brochée durant cet essai. Comme il est possible de le voir, la forme que suit la rectitude de l'alvéole est identique à la variation que suit l'effort suivant *x*. Nous nous attacherons désormais à limiter la variation des efforts suivant l'axe *x* pour améliorer la rectitude des alvéoles brochées.

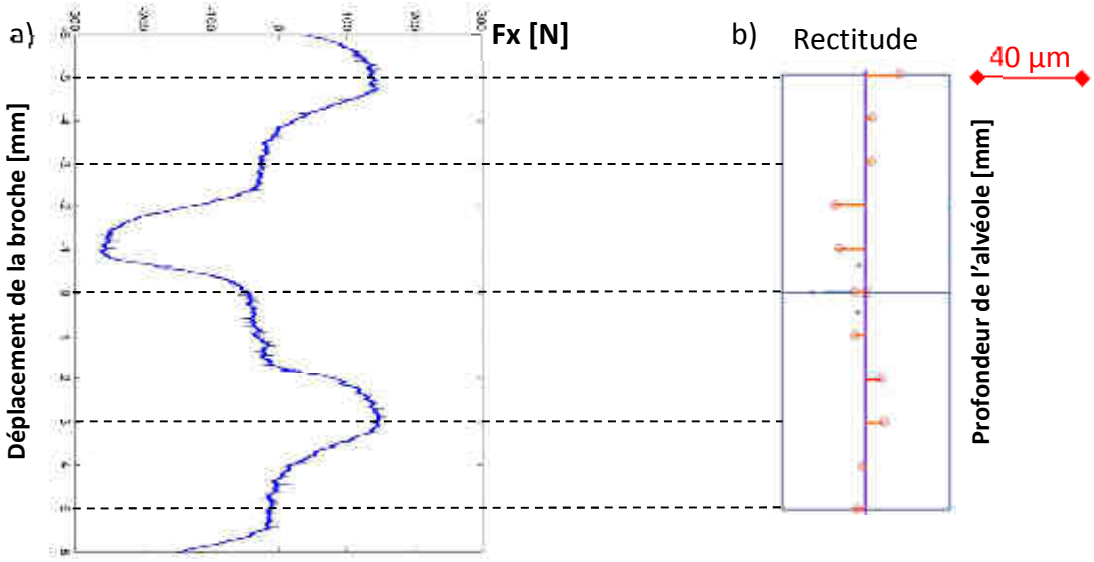


figure III-25 Confrontation entre les efforts suivant l'axe *x* et la rectitude de l'alvéole brochée

IV.2 Intégrité de surface

IV.2.a Etat de l'art de l'intégrité de surface des pièces brochées

L'intégrité de surface, du point de vue qualité métallurgique, est aussi importante que la géométrie dans le but de garantir la durée de vie des pièces brochées. La bibliographie est riche d'articles sur l'intégrité des pièces brochées, mais la plupart de ces études traite de matériaux tels que l'Inconel 718® et non de l'Udimet 720®.

Le choix des paramètres optimaux pour brocher des alvéoles pied de sapin et garantissant une bonne santé métallurgique est un point capital pour tous les fabricants de turbomachines. [Taricco1995] propose une série de paramètres opératoires visant à maîtriser les contraintes résiduelles. Pour le brochage de l'Inconel 718®, cette étude

explique que l'augmentation des vitesses de coupe et de l'usure entraîne une augmentation des contraintes résiduelles en traction. Le grenaillage après brochage permet d'obtenir des contraintes de compression. Près de 20 ans plus tard, [Shulze2012] publie un article sur l'influence de la vitesse de coupe sur les contraintes résiduelles de pièces brochées, grâce à des simulations par éléments finis. Les conclusions sont équivalentes à l'étude précédente : l'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une augmentation de contraintes résiduelles en traction. [Sajeev1997b] propose d'expliquer, grâce à des simulations par éléments finis, l'influence de phénomènes de coupe, tels que le brunissage, sur les contraintes résiduelles. Comme pour le grenaillage, le brunissage permet, par action mécanique, de faire tendre les contraintes résiduelles vers la compression pour améliorer la qualité des pièces brochées. Le brunissage a surtout l'avantage de pouvoir être réalisé par les dernières dents de la broche permettant des gains de cycle de production.

D'autres études mettent en relation la température durant l'usinage et l'intégrité de surface des pièces brochées, [Klocke2010] et [Klocke2011]. Ces articles, s'intéressant au-delà des contraintes résiduelles, exposent des résultats sur les transformations métallurgiques que peuvent subir en surface les pièces brochées (comme la formation de couches affectées thermomécaniquement, et les profils de dureté). La recherche de défaut généré durant l'usinage est aussi une question importante traitée par des articles comme [Klocke2011], [Kishawy2012], [Axinte2004] et [Mo2001]. Les défauts recherchés sont :

- métallurgiques :
  - couches thermomécaniquement affectées (couche blanche),
  - couches écrouies et enchâssées,
- incidents d'usinage :
  - copeaux incrustés,
  - arrachement de matière.

Les études les plus complètes dans ce domaine semblent être celles intégrant des essais de fatigue, car les mesures citées précédemment sont aussi réalisées : rugosité, contraintes résiduelles, dureté, micrographies. [Connolley2004] a réalisé des essais de fatigue sur des éprouvettes en Inconel 718® entaillées par brochage. Ces éprouvettes ont été caractérisées par des mesures de rugosité avant essais et des micrographies et des fractographies après essais. De cette étude ressort que la santé métallurgie des pièces en extrême surface a joué un rôle majeur dans la durée de vie des éprouvettes testées. Les éprouvettes présentant les plus grandes déformations des couches écrouies avaient les durées de vie les plus faibles. [Derrien2006] a aussi réalisé des éprouvettes entaillées par brochage caractérisées avant et après des essais de fatigue, mais, cette fois, le matériau étudié était du TA6V. Cette étude a fait apparaître que l'usure de l'outil induit une plus grande dispersion des essais de fatigue.

Il est aussi nécessaire de s'intéresser à la rugosité des alvéoles. Certaines publications, telles que [Beakaev2011], justifient l'influence de quelques paramètres, comme l'avance par dent (*f*) sur la rugosité finale des pièces brochées. Mais la plupart des études ne fait que suivre

l'évolution de la rugosité des pièces brochées par rapport à l'usure de l'outil [Legutko2007] et [Legutko2010]. D'autres articles présentent des mesures de rugosité en fonction de stratégies d'usinage très particulières telles que des systèmes de brunissage, [Shchedrin2008] et [Shchedrin2009].

IV.2.b Mesures réalisées dans le cadre de cette étude

Les principaux défauts que nous avons cherché à diminuer dans le cadre de ces travaux sont les défauts d'ordre géométrique. Les différentes inspections métallurgiques réalisées ont eu pour unique but de vérifier que les solutions testées respectaient les impératifs de santé matière de l'industriel, c'est-à-dire éviter la formation de couches thermomécaniquement affectées (couches blanches). Deux types de mesure ont été réalisés :

- micrographies,
- mesures de dureté.

Les micrographies réalisées présentent, sur toutes les configurations testées, une couche enchâssée épaisse de 7 à 11 µm (figure III-26 a), et aucune micrographie n'a présenté de couche thermomécaniquement affectée aussi appelée couche blanche. Les micrographies ont été réalisées avec un polissage mécanique (suspension diamantée 3 µm) puis deux bains successifs, un premier d'acide oxalique concentré à 1%, et un deuxième d'acide fluorhydrique concentré à 1%.

Des mesures de dureté ont été réalisées sur différents points de l'alvéole (à l'aide d'une machine *Futurtech FM-700®)*, sans présenter de différences ni de variations entre la surface usinée et le cœur de la pièce (figure III-26 d). Les valeurs de dureté mesurées sont de l'ordre de 510 $HV_{100.}$ La couche enchâssée étant trop faible, il n'était pas possible de réaliser, avec l'indenteur utilisé, des mesures à l'intérieur de la couche enchâssée.

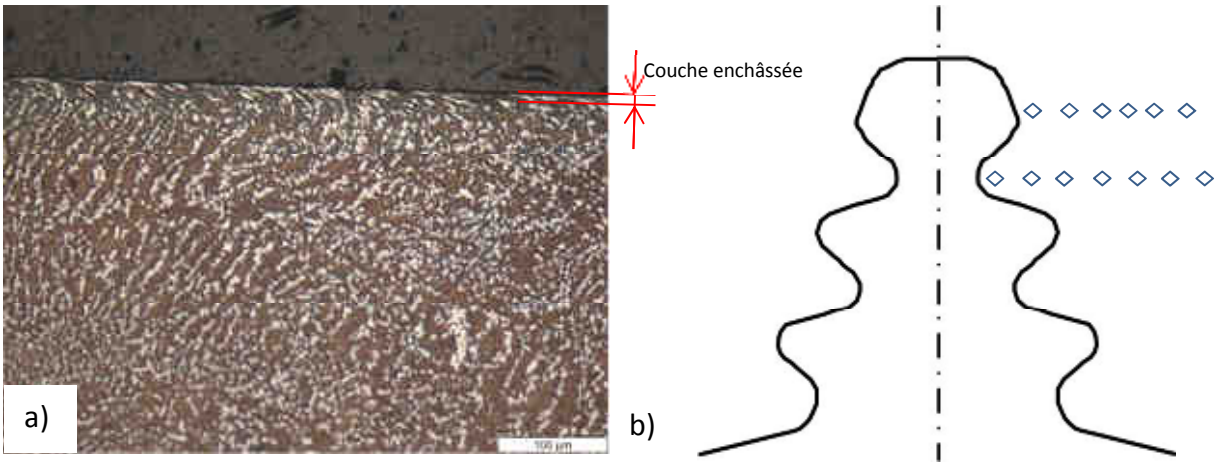


figure III-26 a) Micrographie d'une éprouvette d'Udimet 720® b) Schéma de mesures de dureté

IV.3 Essais en fonction du pas de la broche

Le paragraphe IV.1.c et l'étude [Axinte2007] ont expliqué l'origine des défauts de rectitude des alvéoles brochées ainsi que la similitude entre le profil de l'alvéole et les efforts suivant l'axe *x*. Les alvéoles brochées dans le cadre de cette étude présentent ce type de défaut nuisible à la qualité de l'assemblage pale-disque. Pour tester l'influence du nombre de dents en prise (*m*) sur la rectitude des alvéoles, nous avons décidé de faire varier l'épaisseur de la pièce et non pas le pas de la broche, afin de réduire le coût des essais et le temps d'approvisionnement des outils. La figure III-27 illustre la modélisation mise en place pour simuler les efforts de coupe mais aussi pour les essais d'usinage. Les essais consistent en une broche pied de sapin, ayant un pas de 8 mm, brochant des alvéoles dans trois disques ayant des longueurs à brocher de 12 mm, 16 mm et 20 mm. Les pièces sont inclinées d'un angle de 15° (tableau III-2).

figure	Lp [mm]	P [mm]	α_{piece} [°]	m [mm]	Ep [mm]	Rectitude alvéole [µm]
III-21 a	12	8	15	1,5	11,59	17
III-21 b	16	8	15	2	15,45	7
III-21 c	20	8	15	2,5	19,32	12

tableau III-2 Configurations d'essais de la rectitude des alvéoles en fonction du pas de la broche

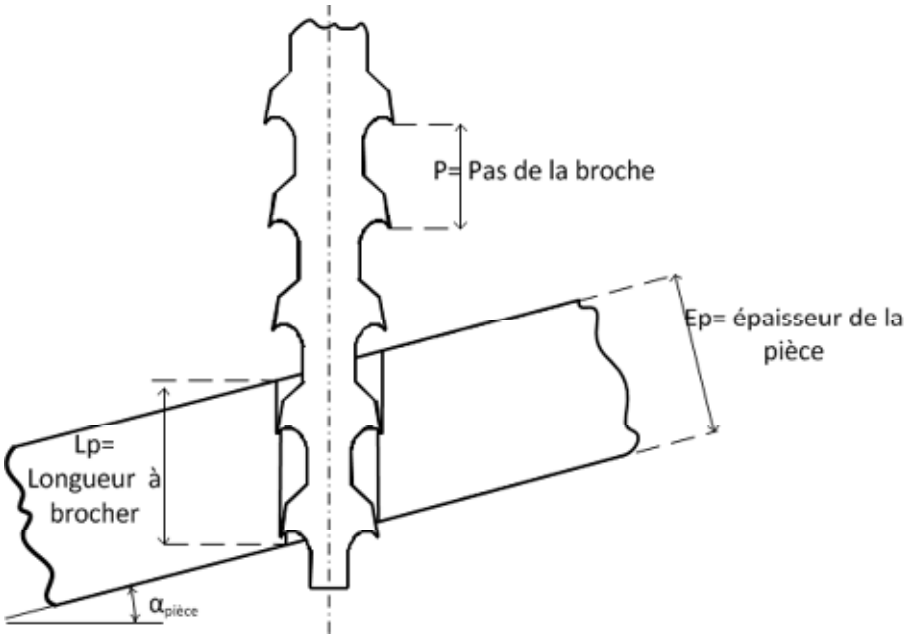


figure III-27 Cas d'étude

La variation des efforts suivant l'axe *x* est quasiment annulée lorsque le rapport *m* est égal à 2 (figure III-28 b) contrairement aux deux autres cas (figure III-28 a et c). Cela s'explique par la simultanéité de l'entrée et de la sortie de deux dents de la broche dans la pièce. La

simulation nous indique qu'un pas sous-multiple de la longueur à brocher permet de limiter la variation des efforts. Pour rappel, les méthodes métiers illustrées par la figure II-15 (page 62), interdisent d'utiliser un pas sous multiple de la longueur à brocher dans le cas de pièces empilées. Cette règle est également appliquée par les fabricants de broche pour une seule pièce inclinée à brocher, ce qui implique dans ce cas une variation des efforts de coupe sur l'axe *x* et donc un défaut de rectitude de l'alvéole.

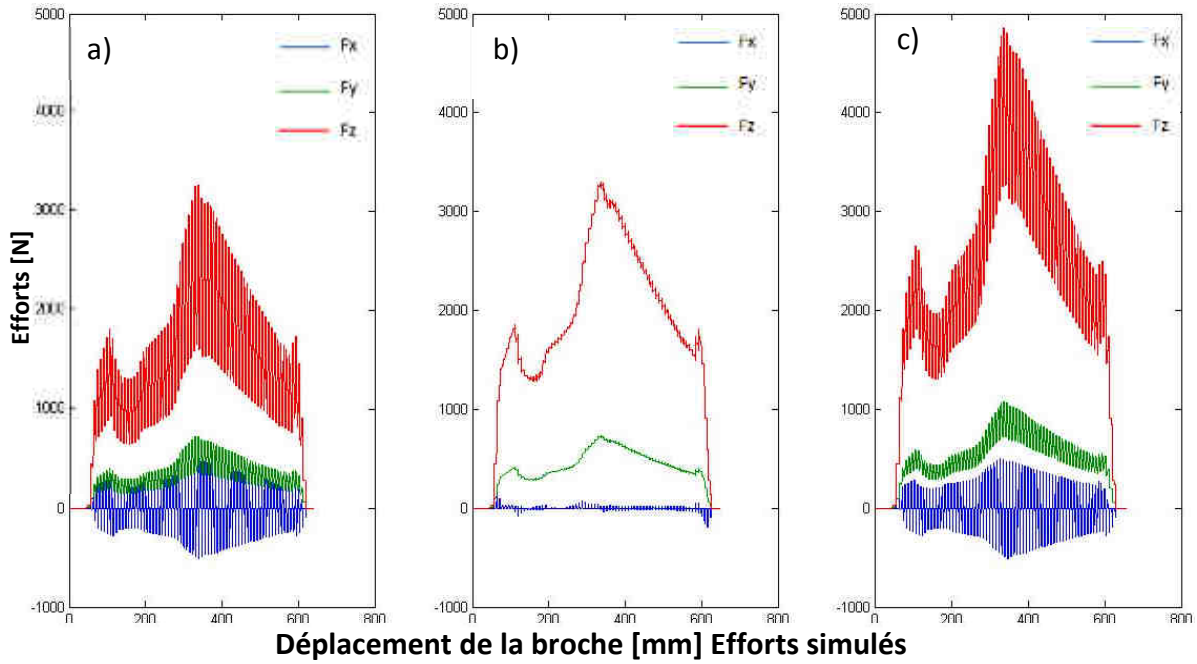


figure III-28 Simulation des efforts pour différentes longueurs à brocher a) 12mm, b) 16mm, c) 20mm

La simulation nous a démontré que pour une pièce inclinée brochée seule, la variation des efforts peut être fortement limitée en allant à l'encontre des règles de conception précédemment établies. Afin de vérifier les valeurs du nombre *m* préconisées mais aussi de mesurer l'amélioration de la rectitude des alvéoles, trois essais de brochage, identiques aux trois simulations, ont été réalisés (figure III-29).

Les essais confirment les résultats de la simulation : lorsque le pas de la broche est égal à un sous-multiple de la longueur à brocher, la variation des efforts diminue fortement ; la rectitude des alvéoles ainsi produite a été mesurée (tableau III-2).

Le pas sous-multiple de la longueur à brocher permet de réduire la variation des efforts de coupe et le défaut de rectitude des alvéoles pied de sapin. Les cotes des pièces brochées étant tolérancées, le calcul du pas de la broche doit prendre en compte ces tolérances. L'équation (III-1) permet le calcul de ce pas optimal en tenant compte de l'épaisseur de la pièce (*Ep*), de l'angle de brochage ($\alpha_{pièce}$), de leurs tolérances et du nombre de dents en prise (*m*) désiré.

$$P = \frac{\left[\frac{E_{p_{max}} + E_{p_{min}}}{2}\right]}{m \times \cos\left(\frac{\alpha_{max} + \alpha_{min}}{2}\right)} \qquad \text{(III-1)}$$

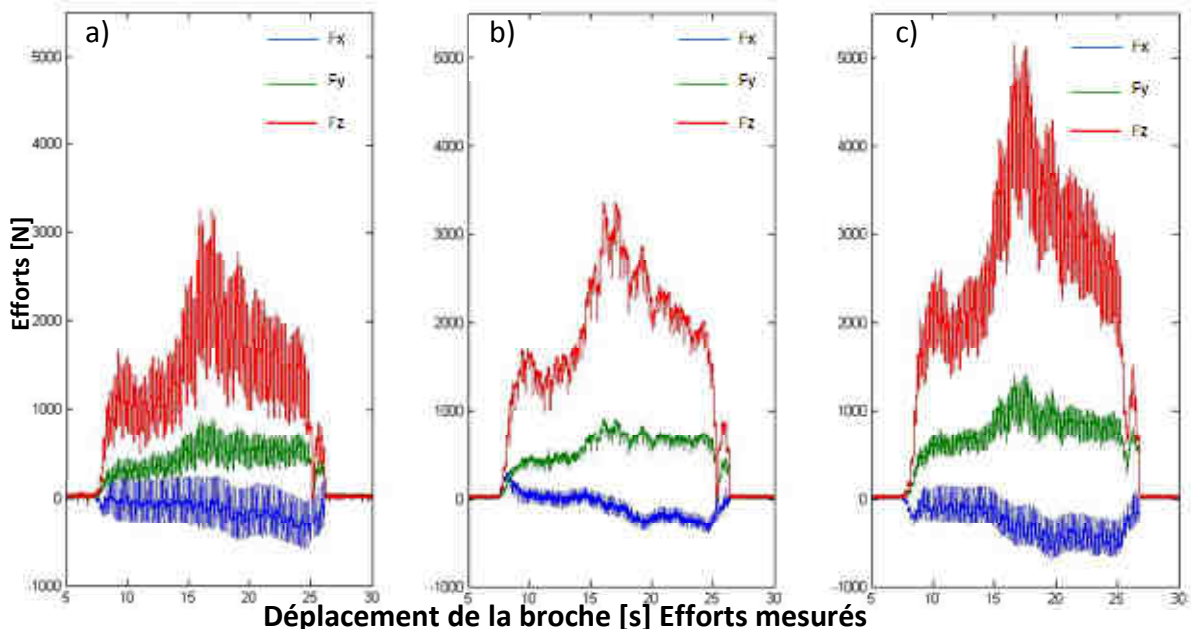


figure III-29 Mesure des efforts pour différentes longueur à brocher a) 12mm, b) 16mm, c) 20mm

A partir de ces résultats, et pour protéger l'utilisation de broches ayant un pas sous-multiple de la longueur à brocher, Safran Turbomeca a décidé de réaliser une demande de dépôt de brevet. Cette demande a été déposée le 1er février 2013 auprès de L'INPI sous le numéro 1350893 et le titre 'Broche et procédé de brochage d'alvéoles pour des pièces telles que des disques de rotor de turbine ou disque de compresseur de turbomachine'.

IV.4 Conclusion sur la qualité des pièces brochées

Après un état de l'art des connaissances actuelles sur la qualité des pièces brochées, notre étude s'est principalement axée sur la qualité géométrique des pièces, dans le but d'améliorer la forme de l'alvéole pied de sapin. L'intégrité de surface a été vérifiée et aucune alvéole n'a présenté de dégradation. Pour réduire les défauts géométriques des alvéoles, une série de simulations couplées à des essais d'usinage a été réalisée, et l'utilisation du pas sous-multiple de la longueur à brocher a permis de réduire nettement le défaut de rectitude des alvéoles pied de sapin. Avec cette meilleure connaissance du procédé de fabrication des alvéoles pied de sapin et le développement d'un simulateur d'effort de coupe, nous allons maintenant proposer une re-conception d'un outil de brochage visant à réduire les défauts géométriques de l'alvéole brochée, tout en préservant l'intégrité de surface.

V Proposition d'une re-conception des broches à l'aide des essais et de la simulation

L'objectif de cette cinquième partie est de faire le bilan des observations faites précédemment pour proposer une méthode de conception des broches pied de sapin visant à améliorer la qualité géométrique tout en préservant l'intégrité de surface des pièces brochées. Les différents paramètres choisis ont été divisés en trois parties :

- les paramètres du point de vue de l'arête de coupe, à l'échelle mésoscopique,
- les paramètres du point de vue de la broche, donc à l'échelle macroscopique,
- les paramètres traitant de la stratégie d'usinage de la broche dans sa globalité.

V.1 Les paramètres du point de vue de la coupe

Notre objectif étant de réduire les défauts géométriques des alvéoles pied de sapin, les paramètres de coupe doivent permettre de réduire les efforts. Ces paramètres sont :

- la vitesse de coupe : les essais de coupe du premier chapitre ont démontré que l'augmentation de la vitesse de coupe permettait de réduire les efforts de coupe. Cette diminution est de l'ordre de 1% d'effort en moins pour 1 m/min de vitesse de coupe en plus. Mais des essais réalisés par l'industriel ont aussi démontré que les outils ARS utilisés actuellement ne supportent pas une augmentation de la vitesse de coupe ne serait-ce que de 2 à 6 m/min sous peine de voir les outils se dégrader très rapidement. Dans l'état actuel des matériaux utilisés pour réaliser ces outils, ASP30 ou T15, il est difficile d'augmenter les vitesses de coupe et nous resterons sur une vitesse actuelle de 2 m/min. Toutefois, des outils en carbure de tungstène ont permis d'atteindre des vitesses de coupe de plus de 20 m/min pour brocher des alvéoles pied de sapin dans une base nickel, [Molokhov1980] et [Makarov2006],
- l'angle de coupe : comme pour la vitesse de coupe, l'augmentation de l'angle de coupe permet de réduire les efforts. Les essais de coupe ont permis de démontrer que 1° d'angle de coupe supplémentaire permettait de réduire de 1% les efforts. De plus, ces essais ont aussi démontré que l'épaisseur du copeau diminuait fortement avec l'augmentation de l'angle de coupe, permettant ainsi un meilleur enroulement à l'intérieur des goujures de la broche. Le choix s'est alors naturellement porté vers un angle de coupe important (15°) valeur historique utilisée par l'industriel,
- l'angle de dépouille : l'angle de dépouille a une très grande influence sur le réaffutage de l'outil : plus il est important plus les dimensions de la broche sont

diminuées lors du réaffutage. De plus, il s'agit de la dernière partie de l'outil en contact avec la pièce usinée : il est donc très important en termes d'intégrité de surface. Mais n'ayant pas réalisé d'essais sur l'influence de l'angle de dépouille, l'angle actuel de 3° est conservé,

- l'avance par dent : les essais ont montré que l'avance par dent est le principal facteur faisant varier les efforts : 0,01 mm de plus sur l'avance par dent augmente l'effort de coupe de 10%. Mais des valeurs trop faibles de l'avance par dent peuvent entraîner un refus de coupe. Nous avons donc conservé la valeur de 0,03 mm pour les éléments de finition et 0,06 mm pour les éléments d'ébauche,
- l'acuité d'arête : des études sur d'autres outils en ARS travaillant par génération (fraises mères), ont démontré l'importance d'une préparation d'arête et plus particulièrement l'intérêt de retirer les bavures et d'éviter les brûlures de rectification permettant ainsi de garantir la durée de vie de l'outil, [Rech2005] et [Claudin2008]. Des mesures ont démontré la présence de bavure sur les broches. Nous n'avons pas plus investigué cette question, car les broches ne sont pas fabriquées en interne, mais ce point pourrait constituer une future étude.

V.2 Les paramètres du point de vue de la structure de la broche

Les paramètres définissant la structure de la broche ne sont pas anodins sur les efforts de coupe. Nous l'avons vu précédemment, le pas de la broche influe directement sur la géométrie de l'alvéole brochée et le choix de l'angle d'affutage influe sur les angles de coupe pouvant fortement le diminuer jusqu'à le rendre nul. Il est donc important d'accorder autant d'importance à ces paramètres utilisés à l'échelle macroscopique qu'à ceux discutés précédemment à l'échelle mésoscopique. Ces paramètres sont :

- le pas : ce paramètre ayant déjà été traité dans la partie précédente, nous utiliserons la méthode du pas sous-multiple de la longueur à brocher pour limiter la variation des efforts,
- l'angle d'affutage : déjà présenté au chapitre précédent sous le terme $\theta_{affutage}$, conditionne la forme de l'âme de la broche. Plus l'âme de la broche est grande, plus la rigidité de l'outil est augmentée. La figure III-30 illustre l'influence de l'angle d'affutage sur l'âme de l'outil. Cinq cas sont présentés, repères b à f, et sur le repère a, tous les cas sont superposés. Les deux paramètres influant sur les dimensions de l'âme sont l'angle d'affutage et le rayon de la meule. Les cinq configurations sont classées par ordre croissant de rigidité. Les valeurs de l'angle d'affûtage et du rayon de meule de chaque repère sont données par le tableau III-3. Afin d'encore augmenter la rigidité de la broche, il est possible de décaler la denture (figure III-31 a). Dans ce cas, l'âme monte jusqu'au sommet de la broche

et la denture décalée permet de relier les dents entre elles (la dent d'un côté devient l'âme de l'autre), contrairement aux broches à denture droite (figure III-31 b).

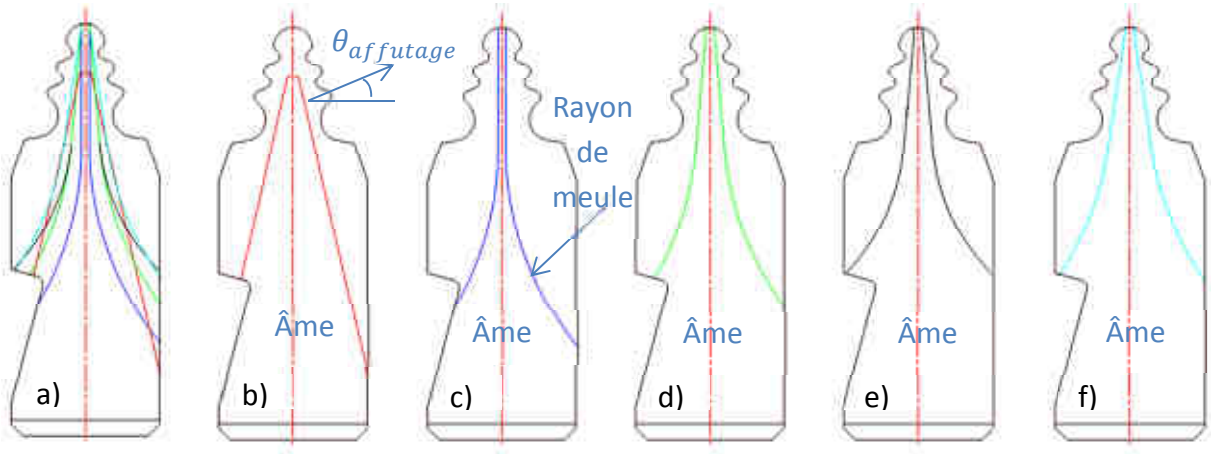


figure III-30 Influence de l'angle d'affûtage sur l'âme de la broche

	b	c	d	e	f
$\theta_{affutage}$	13°	0°	5°	5°	8,5°
Rayon de meule	30 mm	30 mm	30 mm	20 mm	30 mm

tableau III-3 Valeur d'angle d'affûtage et de rayon de meule pour l'âme de la broche

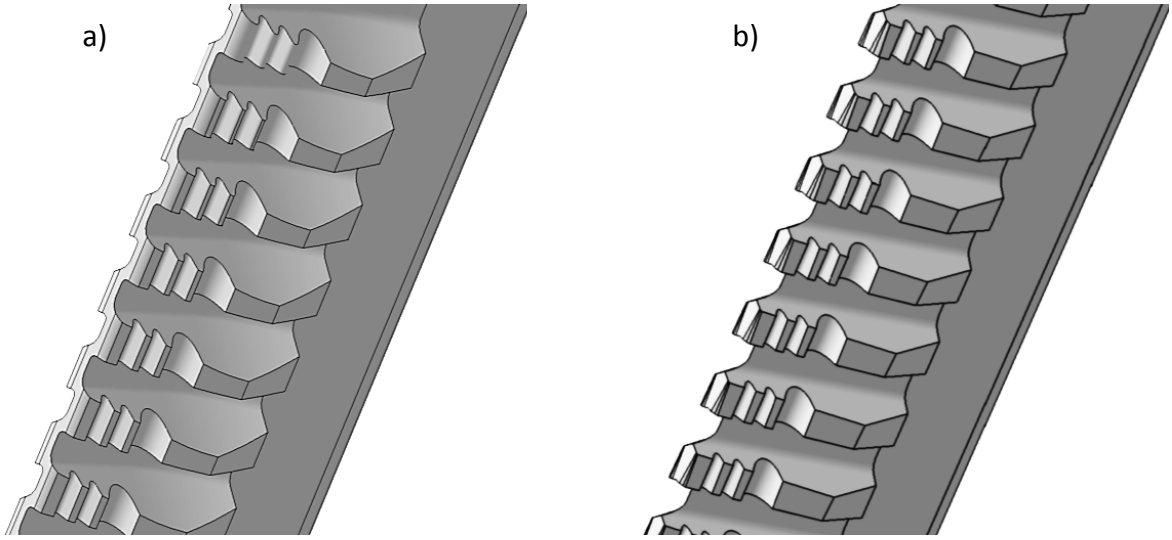


figure III-31 a) Broche à denture décalée b) Broche à denture droite

V.3 Les paramètres du point de vue de la stratégie d'usinage

Le choix de la stratégie d'usinage correspond à la forme que doit laisser chaque élément de la broche dans la pièce. La simulation a permis de comparer plusieurs stratégies dans le but

de réduire les efforts durant l'usinage de l'élément de finition. Dans cette présentation, nous nous sommes volontairement restreints à des stratégies où la broche est réalisable, pour respecter l'esprit d'application industrielle de ces travaux.

Ces stratégies d'usinages sont :

- une ébauche classique : c'est la solution actuelle utilisée en production : la forme laissée par l'ébauche impose de fortes variations de section à l'élément de finition. L'effort maximal atteint est de 3250 N (figure III-32),
- une ébauche droite : elle rogne légèrement plus de matière que dans le premier cas. Les pics d'efforts sont diminués ; la forme de l'ébauche permet de réduire de façon significative les efforts de 25% dans certaines zones (figure III-33),
- une ébauche de la forme : elle correspond au cas incluant une ébauche de la forme de l'alvéole à 0,2 mm de la forme finale. Cette solution permet de limiter fortement la variation des efforts pour l'outil de finition (pres 40% suivant l'axe *z*) et donc de réduire les défauts géométriques. Par la suite, nous opterons pour cette solution (figure III-34).

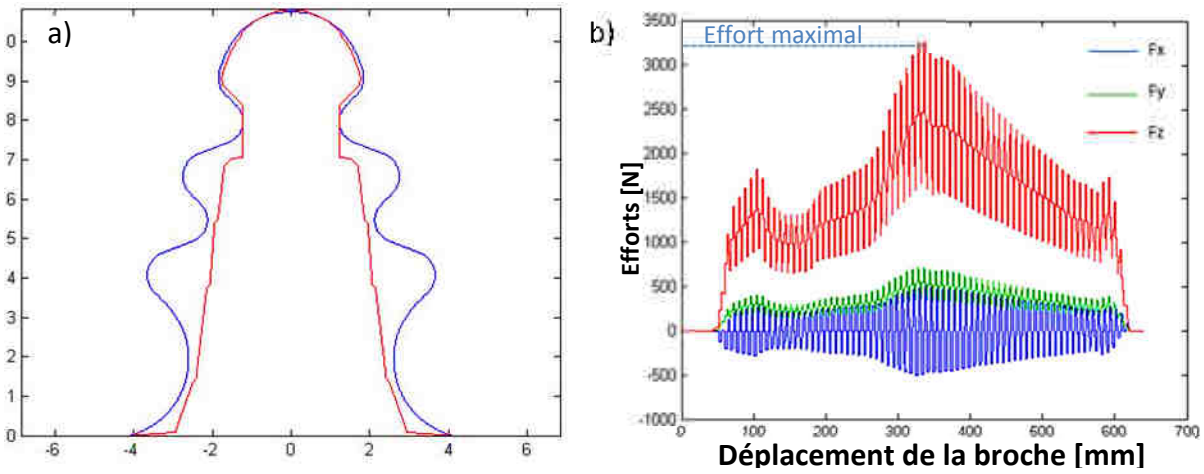


figure III-32 Influence de la stratégie d'usinage, cas actuel a) carte de coupe b) efforts de coupe

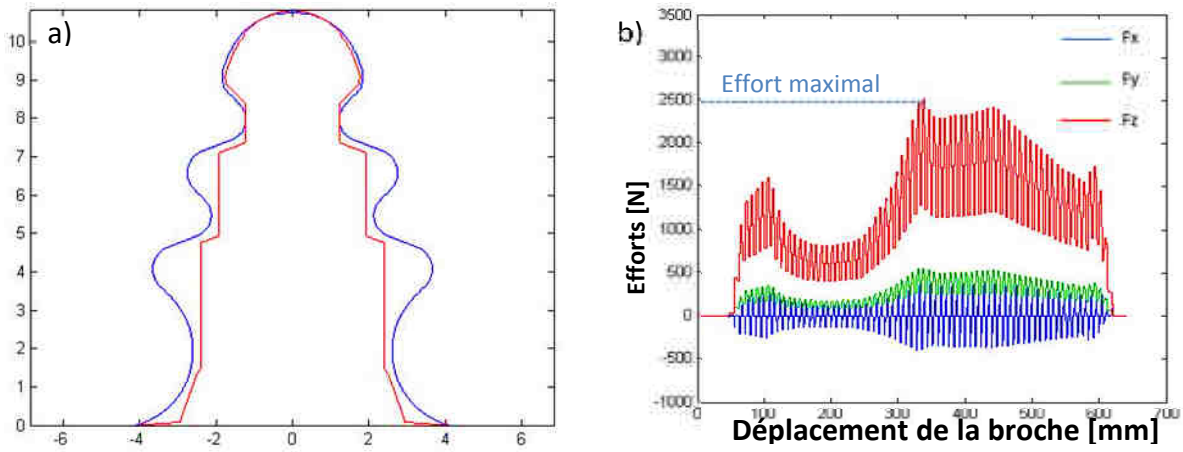


figure III-33 Influence de la stratégie d'usinage, ébauche droite a) carte de coupe b) efforts de coupe

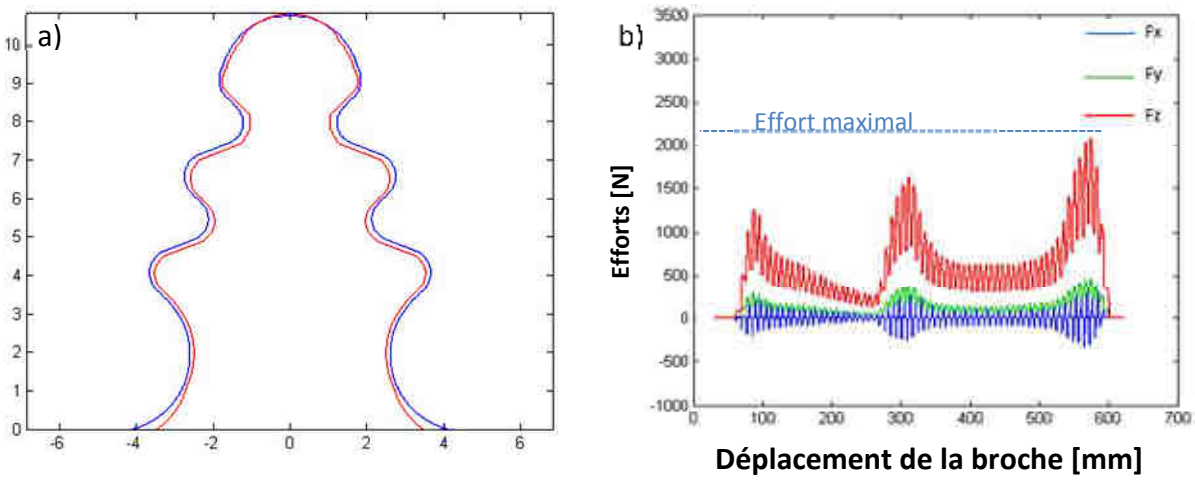


figure III-34 Influence de la stratégie d'usinage, ébauche forme a) carte de coupe b) efforts de coupe

V.4 La broche reconçue

A partir des résultats présentés auparavant, nous avons décidé de proposer une re-conception d'une broche complète dans le but d'améliorer la qualité géométrique des alvéoles pied de sapin. Les résultats et constatations faits précédemment permettent de réaliser un cahier des charges très précis pour le fabricant de broches.

Les efforts de coupe sur l'outil de finition ont été mesurés pour deux broches : un outil d'ancienne conception, et un outil de nouvelle conception. Grâce à l'utilisation du pas sous-multiple, la variation des efforts due à l'entrée et à la sortie des dents (figure III-35 a), est quasiment supprimée sur la figure III-35 b. De plus, l'utilisation d'une stratégie d'usinage incluant une ébauche de la forme de l'alvéole a permis de réduire la section de copeau en finition ; la diminution est, comme sur la simulation, de l'ordre de 40% suivant l'axe *z* .

Le gain le plus significatif se situe sur la qualité d'usinage obtenue. Les alvéoles pied de sapin produites par ces deux broches ont été analysées : la rectitude mesurée sur l'alvéole usinée par la broche reconçue est comprise dans une enveloppe de 2 µm, contrairement à la broche d'ancienne génération qui pouvait, suivant les cas, présenter des défauts de rectitude de l'ordre de 17 µm (figure III-36).

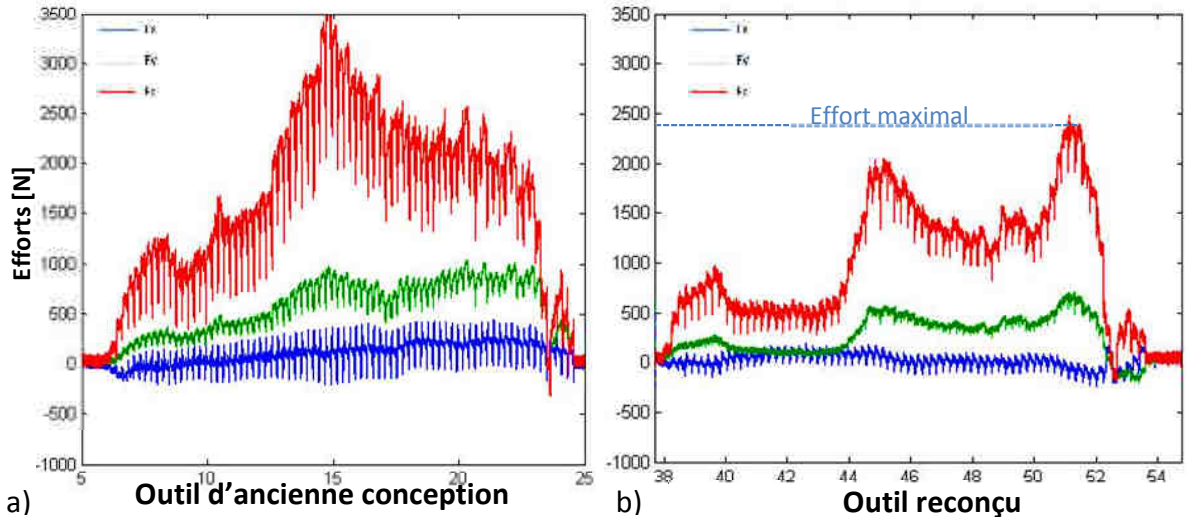


figure III-35 a) Courbes d'efforts mesurées sur la broche d'ancienne conception b) Courbes d'efforts mesurées sur la broche reconçue

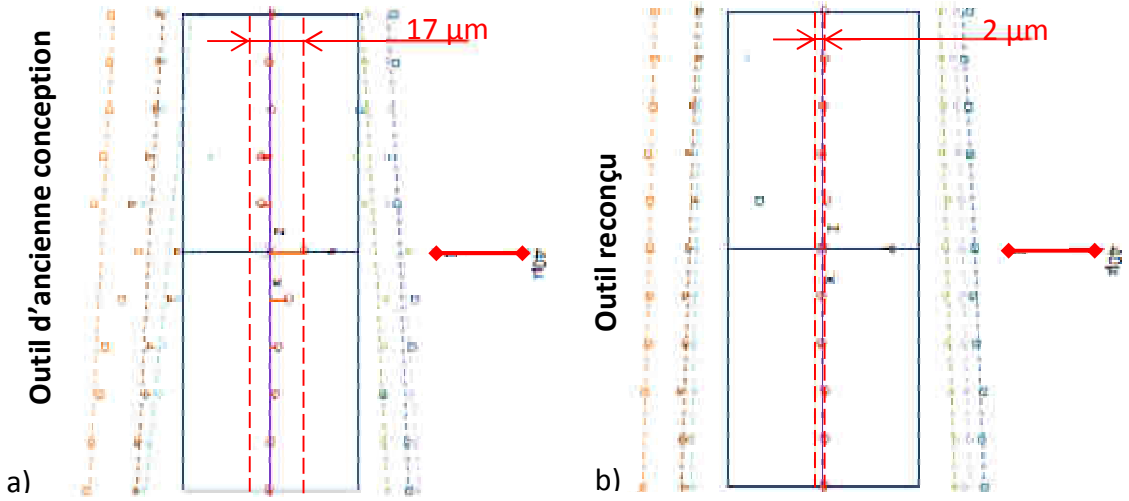


figure III-36 Mesures de rectitude des alvéoles : a) broche d'ancienne conception b) broche reconçue

V.5 Conclusion sur la conception des outils de brochage

Contrairement à des procédés comme le tournage ou le fraisage, où l'optimisation de la coupe est possible une fois l'outil produit, pour une broche pied de sapin, tous les paramètres caractérisant l'usinage sont inclus dans la géométrie l'outil, à l'exception de la vitesse de coupe. De plus, ces outils étant réalisés sur mesure, les temps de fabrication sont très longs (de 3 à 6 mois). Il est donc nécessaire, dès la conception, de choisir les bons paramètres qui vont garantir la qualité des pièces brochées, ce qui a été fait dans cette cinquième partie. La qualité géométrique des alvéoles produites a notamment pu être améliorée. Cette méthode de conception utilisant la simulation des efforts de coupe a été

utilisée pour une pièce mais peut tout à fait être transposée pour d'autres disques de turbine afin améliorer la qualité des pièces usinées. Cette meilleure connaissance de l'outil permet aussi d'éviter des problèmes d'usure dus à des angles de coupe ou de dépouille trop faibles. De plus, la limitation de la variation d'effort due aux entrées et sorties des dents évite à la broche d'aller talonner contre la surface déjà usinée, ce qui devrait aussi améliorer la durée de vie des outils.

VI Bilan

Ce troisième chapitre nous a permis de confronter à la réalité les modèles et simulations mis en place dans les deux chapitres précédents. Des mesures d'efforts tridimensionnelles ont été réalisées pour permettre de mieux appréhender les contraintes apportées par le procédé de brochage. Suite à ces mesures, la simulation des efforts durant le brochage d'alvéole présente une bonne concordance avec les essais d'usinage, et les déviations entre réalité et simulation ont été expliquées grâce à la mesure des défauts de l'outil.

A partir de la simulation et des essais de coupe, une nouvelle méthode de conception de broche pour alvéole pied de sapin a été proposée afin de réduire la variation des efforts et les défauts géométriques des alvéoles (demande de dépôt de brevet N°1350893). Grâce à cela, les mesures effectuées sur les alvéoles fabriquées selon cette nouvelle broche ont démontré une forte diminution du défaut de rectitude. Cette meilleure compréhension du fonctionnement, de la conception et de la fabrication des broches pied de sapin a permis de proposer un cahier des charges très précis pour la fabrication des outils et de justifier le choix des paramètres caractérisant la broche. Les seuls paramètres sur lesquels nous n'avons pas pu agir sont ceux liés à l'acuité d'arête et la qualité de rectification de l'outil, ce qui pourrait être la base d'études futures visant à encore améliorer la qualité des broches et des alvéoles brochées.

La préparation d'arête et le choix de nouveaux matériaux, tels que le carbure de tungstène, semblent être deux points cruciaux à considérer dans le futur pour l'industriel. Il est donc nécessaire de développer les connaissances scientifiques sur ce point. Les alvéoles de cette étude ont été brochées avec une vitesse de coupe de 2 m/min et les essais d'usinabilité ont démontré que, sur une plage de 2 à 20 m/min, les efforts diminuaient de 1% tous les mètres par minute de vitesse supplémentaire, ce qui représente une belle perspective pour de futurs développements.

Enfin, les paramètres du procédé de brochage et les paramètres géométriques de la broche influencent sa durée de vie. La maîtrise de l'usure prématurée ou catastrophique fait notamment partie des objectifs de nos travaux, car c'est un point critique pour l'industriel. Les techniques de surveillance de l'usinage peuvent répondre à ce besoin, comme garantir la qualité de fabrication. Le prochain et dernier chapitre s'intéresse donc à ces deux aspects.

Quatrième chapitre

Surveillance en usinage du brochage des alvéoles pied de sapin

Table des matières

I Objectifs de ce chapitre 123

II Etude bibliographique de la surveillance en usinage, application au brochage 124

II.1 Introduction à la surveillance en usinage 124

II.2 Choix des capteurs pour de la surveillance en usinage 125

II.2.a Mesures des efforts 125

II.2.b Mesures des vibrations 126

II.2.c Mesures acoustiques 126

II.2.d Mesures des déplacements 127

II.2.e Mesures des températures 127

II.2.f Mesures des puissances et des courants 128

II.2.g Bilan et choix des capteurs pour notre étude 129

II.3 Les méthodes de diagnostic 131

II.3.a Méthodes spécifiques à la pièce 132

II.3.b Méthodes génériques 133

II.3.c Sélection des méthodes de diagnostic pour notre étude 137

III Le système installé sur la brocheuse 138

III.1 Architecture 138

III.2 Précision du capteur d'effort 140

III.3 Recalage des courbes 141

IV Etude de cas 142

IV.1 Suivi de différentes séries d'un même type de pièce 142

IV.1.a Analyse générale 142

IV.1.b Types d'incidents étudiés 144

IV.1.c Méthode de surveillance par apprentissage 147

IV.1.d Méthode de surveillance prédictive (par simulation) 149

IV.1.e Méthode de surveillance par traitement du signal 150

IV.2 Proposition de surveillance 154

V Bilan 156

I Objectifs de ce chapitre

Ce dernier chapitre propose de mettre sous contrôle les opérations de brochage par l'utilisation de la surveillance en usinage. Les outils de brochage étant extrêmement coûteux, tout comme les pièces produites et les machines utilisées, notre but est de surveiller l'opération de brochage pour détecter au plus vite toute dérive de l'usinage ou incident.

Outre le prix des pièces et la disponibilité des brocheuses, des essais dans des conditions de laboratoire (hors production) semblent très difficiles à mener. Un chiffrage rapide a permis d'évaluer que chaque configuration d'essai coûterait 70 k€. Il est donc obligatoire de baser notre étude sur des données issues de la production. De plus, le système de surveillance ne doit pas changer les caractéristiques de la brocheuse du point de vue de la raideur des montages ni interférer avec les systèmes déjà en place sur la machine. Nous allons donc utiliser, grâce à la bibliographie, un système non invasif pour réaliser une étude sur la surveillance en usinage du brochage des alvéoles pied de sapin. Pour atteindre ces objectifs, ce chapitre est articulé en trois axes :

- l'état de l'art nécessaire à bâtir notre étude, aussi bien du point de vue des capteurs utilisés que des méthodes de surveillance possibles, sans uniquement se baser sur le brochage,
- la mise en place d'un système de surveillance et sa calibration,
- les études de cas pour choisir les paramètres pertinents permettant de réaliser une surveillance d'usinage efficace.

Enfin, la dernière partie dressera un bilan des travaux et résultats de ce chapitre.

II Etude bibliographique de la surveillance en usinage, application au brochage

II.1 Introduction à la surveillance en usinage

La surveillance en usinage prend aujourd'hui de plus en plus de place dans l'automatisation et la sécurisation du procédé d'usinage, dans le but d'améliorer la productivité. Cela évite aussi de rebuter des pièces à forte valeur ajoutée et demandant des cycles de production de plusieurs mois comme dans le cas de notre étude. [Ritou2006b] présente le système de surveillance en usinage comme étant un système interagissant entre le procédé et la commande numérique par l'intermédiaire de signaux enregistrés (figure IV-1). La surveillance en usinage est donc constituée de 4 étapes, les signaux sont :

- mesurés grâce à des capteurs,
- amplifiés,
- traités,
- testés pour détecter des incidents.

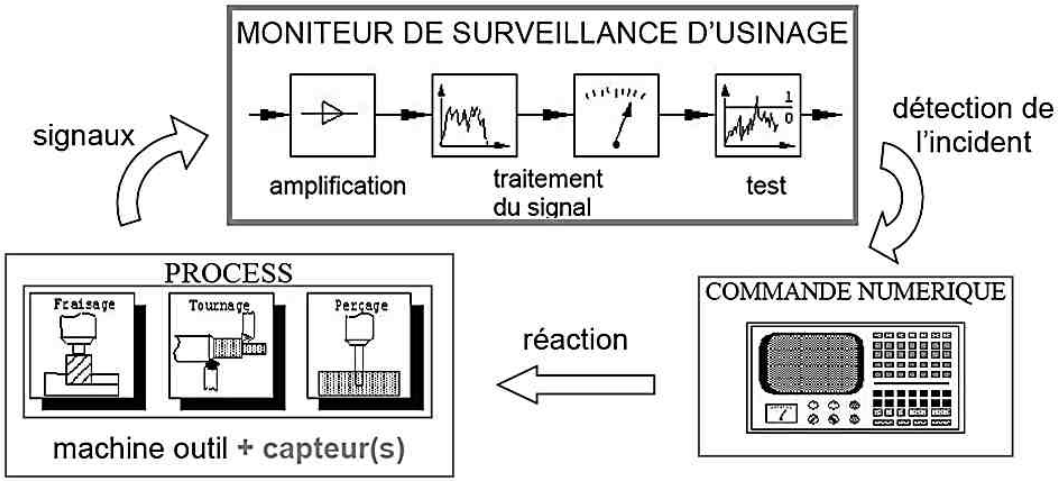


figure IV-1 Principe de fonctionnement d'un système de surveillance en usinage d'après [Ritou2006a]

La surveillance est un domaine riche en études et même le procédé de brochage a fait l'objet de recherche dans ce domaine avec des articles de tous types et généralement très documentés. Certains traitent de la surveillance en usinage en général comme : [Tönshoff1988], [Byrne1995], [Jemielniak1995], [Jemielniak1999], [Tlusty1983], [Dimla2000], [Jantunen2002], [Teti2010], [Prickett1999], [Ritou2006b], [Abellan-Nebot2010], [Kovac2011]. Leur point commun est de dresser un inventaire des capteurs utilisés puis des différentes approches possibles pour surveiller l'usinage. Les paragraphes suivants vont présenter le même formalisme afin d'introduire et de justifier les différents capteurs (II.2), et les différentes stratégies (II.3) utilisés dans le cadre de notre étude.

II.2 Choix des capteurs pour de la surveillance en usinage

Il existe un grand choix de capteurs disponibles pour surveiller des opérations d'usinage. Il est possible de réaliser des mesures directes d'éléments caractéristiques de la coupe, tels que les efforts, les vibrations ou la température, ou des mesures indirectes comme les mesures de courant ou de puissance des moteurs d'axes. La bibliographie démontre que les mesures d'efforts, par platine piézoélectrique, sont quasiment utilisées pour chaque étude, et servent de références du fait de leur précision (figure IV-2).

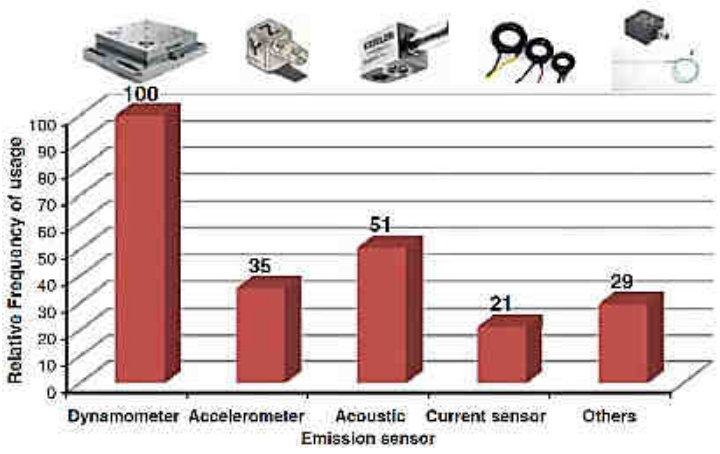


figure IV-2 Pourcentage d'utilisation des capteurs dans la littérature d'après [Abellan-Nebot2010]

II.2.a Mesures des efforts

La mécanique de la coupe faisant intervenir des déformations et des frottements, il en découle des efforts qui sont généralement les éléments discriminants étudiés. Pour mesurer les efforts de coupe, il est possible d'utiliser deux technologies :

- les jauges de déformation : il s'agit d'un fil dans lequel passe un courant électrique qui, sous l'effet d'une déformation, voit varier sa résistivité. Le principal avantage de ce système est sa facilité d'implantation, mais il ne dispose que d'une faible plage de mesure,
- les capteurs piézoélectriques : il s'agit le plus souvent d'un quartz mono-cristallin qui, sous l'effet d'une déformation, se polarise électriquement créant ainsi une charge de l'ordre de quelques pico-coulombs. Le principal avantage de ce système est sa capacité de mesure et sa précision. Par contre, son installation peut s'avérer délicate dans le cadre industriel et suivant les procédés. Dans les laboratoires, les tables de mesure des efforts sont souvent utilisées comme référence pour étalonner d'autres capteurs [Shi2007a]. Mais, à cause de leur relative fragilité et de leur coût, il est difficile de les employer dans le cadre industriel en production. Pour protéger les capteurs piézoélectriques des risques

de choc mais aussi des huiles et des copeaux, il est possible de les intégrer à l'intérieur de la machine entre différentes liaisons mécaniques : c'est le cas du capteur installé sur la brocheuse de notre étude (figure IV-10, page 139).

II.2.b Mesures des vibrations

La mesure des vibrations par accéléromètre repose sur le même principe que la mesure des efforts par platines piézoélectriques, c'est-à-dire un cristal de quartz qui se déforme en générant un champ électrique. La principale différence repose sur le poids du système. Les platines de mesure d'efforts ont couramment des bandes passantes de l'ordre de 2000 Hz à vide. L'ajout de matériel sur la platine (donc de poids) peut réduire les bandes passantes en changeant la fréquence propre et l'amortissement du système. Les mesures par accéléromètre ont pour but d'enregistrer des phénomènes à plus hautes fréquences, de 1 à 20 kHz. Pour ce faire, les accéléromètres utilisés en usinage sont de très petite dimension avec des masses allant de 1 à 50 g. Un autre moyen de mesure des vibrations est le laser à effet doppler : il s'agit d'une solution très performante car sans contact avec la zone usinée et avec une bande passante large. Cependant, son coût n'est pas compatible avec une application industrielle.

Les études réalisant des mesures de vibration et traitant du brochage des alvéoles pied de sapin sont assez nombreuses [Axinte2002], [Shi2007a] et permettent de détecter des incidents d'usinage comme l'usure d'outils. [Klocke2010] a utilisé des accéléromètres dans une étude traitant de l'intégrité de surface en brochage. De plus, l'intégration des capteurs est facile car, le plus souvent, ces derniers ne nécessitent que d'être fixés près de la zone d'usinage. Toutefois, [Axinte2002] a démontré que le positionnement des capteurs est important pour obtenir des signaux de qualité, quitte à les positionner directement sur la pièce usinée, ce qui représente une difficulté en production.

II.2.c Mesures acoustiques

Tout comme les mesures d'efforts ou de vibrations, les mesures acoustiques sont basées sur l'utilisation d'un système piézoélectrique. Cependant, les masses sont encore plus faibles pour permettre au système d'enregistrer des fréquences de l'ordre de 1 kHz à 1 MHz. Comme pour les accéléromètres, leur position influence la qualité des résultats en brochage [Axinte2002], comme en perçage [Everson1999]. Une étude très poussée en brochage, sur les questions d'intégrité des surfaces, est publiée par [Axinte2006]. Cet article propose une méthodologie complète pour surveiller et localiser en trois dimensions l'apparition de micro anomalies d'usinage durant une opération de brochage. Malheureusement, deux principales limitations se heurtent au déploiement dans le cadre industriel de cette étude :

- la géométrie simple des broches utilisées durant l'étude,
- l'impossibilité d'utiliser la lubrification qui empêche de détecter les défauts.

De plus, l'identification des réponses du système usinant (fréquences, RMS, etc.) et de leurs origines peut s'avérer très délicate, comme leur différenciation avec les signaux enregistrés pendant l'incident. Cependant cet article est très souvent cité comme référence pour localiser des incidents d'usinage et dans des procédés autres que le brochage.

II.2.d Mesures des déplacements

Les mesures des déplacements peuvent être de deux types : soit par mesures laser [Moreau2010], soit par mesures inductives [Vafaei2002], [Ritou2006b]. Ces mesures permettent de réaliser des études de la coupe, par la caractérisation des déformations d'outil ou de pièce pendant l'usinage, mais aussi de la surveillance de l'état de la broche d'une machine-outil.

Dans le cas du brochage, [Boud2006] utilise la mesure des déplacements de la table de la brocheuse comme moyen de surveillance de l'usure de l'outil. Le principal avantage de ce type de capteur est qu'il n'affecte pas la rigidité de la machine.

II.2.e Mesures des températures

La mesure de la température en usinage est de plus en plus pratiquée dans le domaine scientifique, mais semble toujours être un moyen de laboratoire difficilement transposable dans un contexte industriel. Les différentes technologies utilisées pour mesurer les températures durant l'usinage sont :

- les caméras infrarouges,
- les thermocouples dans la pièce ou dans l'outil,
- les thermistances dans la pièce ou dans l'outil,
- les pyromètres par fibres optiques.

Dans le cas de procédé où les temps d'usinage sont suffisamment longs, la chaleur a le temps de se diffuser, permettant ainsi l'utilisation de thermocouples [Perrin2007], [Bonnet2009]. Pour des configurations de coupe orthogonale, et non close, il est notamment possible d'opter pour des mesures de champs de température, par l'intermédiaire de caméras infrarouges. Mais pour les opérations de brochage d'alvéoles pied de sapin, la coupe est confinée et le temps d'usinage est très court (0,35 s pour Vc = 2m /min et lp = 12 mm), rendant donc impossible l'utilisation de thermocouples, thermistances et de

caméras infrarouges. Pourtant, l'étude de [Makarov2008] se base uniquement sur les températures, sans détailler comment ces mesures sont réalisées.

Une autre méthode pour mesurer les températures de coupe en brochage vient de [Klocke2011] : il s'agit d'utiliser des fibres optiques placées au plus près de la zone de coupe dans la pièce. Au bout de cette fibre se trouve un pyromètre. Cette méthode nécessitant de percer chaque alvéole de la pièce pour insérer la fibre optique, n'est donc pas utilisable dans notre contexte de production. La mesure de température, bien que très utile dans le cadre d'études scientifiques, semble difficilement applicable pour réaliser des suivis d'usinage en brochage dans notre cadre industriel.

II.2.f Mesures des puissances et des courants

Ces mesures consistent à surveiller les efforts de coupe, de manière indirecte. Ces systèmes ont l'avantage de ne pas occuper de place dans l'espace de travail de la machine et d'être intégrés dans la commande numérique, donc de ne pas interagir avec le procédé. Plusieurs solutions sont possibles :

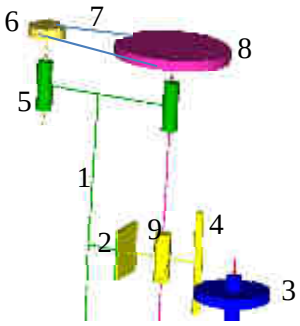
- la mesure de courant,
- la mesure de puissance.

Ces mesures peuvent être réalisées de deux manières : soit en plaçant un dispositif (shunt ou capteurs à effet Hall) entre le variateur et le moteur, soit en faisant appel aux informations de la boucle d'asservissement de la commande numérique. Les fréquences d'acquisition de ces systèmes sont par contre limitées par la fréquence d'asservissement de la commande numérique jusqu'à 500 Hz au maximum sur des commandes numériques classiques [Jeong2002], [Bertok1983], [Lee1995]. Comme ces systèmes ne réalisent pas une mesure directe de la coupe, ils peuvent être perturbés par des éléments intermédiaires entre l'outil et le capteur, tels que l'évolution de la température des moteurs et des boîtes de vitesses, l'usure de ces organes ou tout phénomène mécanique ou électrique.

Dans le cas du brochage, la seule mesure indirecte à notre connaissance est celle réalisée par [Axinte2002] en intégrant un manomètre dans le circuit hydraulique de la brocheuse. Comme pour les moteurs d'axes ou de broches des autres machines-outils, il semble possible d'ajouter un capteur ou d'utiliser la boucle d'asservissement du moteur pour mesurer le courant ou la puissance. Dans notre cas, la commande numérique de la brocheuse, trop ancienne, ne permet pas d'accéder au courant de couple du variateur.

Néanmoins, il est possible d'ajouter un capteur à effet Hall ou un shunt ; mais il est important de remarquer qu'une brocheuse est une machine qui met en déplacement des masses très importantes. Dans notre étude, le poids du coulisseau a été évalué à 1500 kg, le pas de la vis est de 30 mm/tr et le rapport de réduction des poulies est de 2. Ceci impose des couples très importants durant le déplacement du coulisseau (figure IV-3). Ainsi, le couple

généré par la coupe est insignifiant par rapport au couple nécessaire pour déplacer le coulisseau. Une étude précédente a démontré la faible sensibilité de ces mesures indirectes à cause des masses déplacées dans une brocheuse [Axinte2002].



1	bâti
2	coulisseau
3	disque à brocher
4	broche
5	moteur de broche
6	poulie motrice
7	courroie
8	poulie réceptrice et vis à billes
9	écrou

figure IV-3 Schéma cinématique du coulisseau

II.2.g Bilan et choix des capteurs pour notre étude

Notre but étant de trouver la méthode la plus appropriée pour surveiller les opérations de brochage et pour détecter toute détérioration de l'outil entraînant un risque de rupture des broches et de rebut des pièces brochées, le choix du capteur doit permettre de réagir aussi bien à des incidents rapides qu'à des divergences progressives. L'étude de [Axinte2002] (figure IV-4) propose de classifier les types de signaux enregistrés et leur efficacité pour détecter différentes situations d'incident d'usinage. Cette classification est valable aussi bien pour des évènements soudains, tels que l'usure catastrophique, l'écaillage ou la rupture d'une dent, que pour l'usure progressive d'une broche. La distinction entre analyse dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel est aussi présentée.

Summary of the sensor effectiveness in detecting the tool condition[a]

Tool condition	Output signals			
	Cutting forces	AE	Vibration	Hydraulic pressure
Chipped tooth (CT)	●	○, ■/□		
Weakened tooth (WT)	●	○, ■	●, □	
Broken tooth (BT)	●	●	●	●
Worn teeth (WoT)	●	●, ■	●, ■	●

[a] Time domain: (●) high effectiveness; (○) reduced effectiveness.
Frequency domain: (■) high effectiveness; (□) reduced effectiveness.

figure IV-4 Récapitulatif de l'efficacité des signaux suivant le type d'incident d'après [Axinte2002]

Pour cette étude, la solution de la mesure des efforts dans le domaine temporel permet d'observer avec la meilleure efficacité les différents incidents possibles. Les mesures acoustiques semblent notamment pertinentes pour chaque type d'incident mais imposent de jongler entre les analyses dans les domaines temporel et fréquentiel. La mesure de vibration nécessite aussi d'étudier les signaux dans les deux domaines avec des résultats intéressants, mais sans pour autant être capable de détecter des incidents de très faible intensité, tels que l'écaillage d'une dent. La mesure de pression du piston de la brocheuse a été jugée le moyen le moins efficace du fait de la position des capteurs, éloignés de la zone de coupe, mais aussi des inerties en jeu durant le déplacement du coulisseau de la brocheuse. Notons que pour [Axinte2002], une mise en garde quant à la possible difficulté ou impossibilité d'installation des capteurs est donnée par les auteurs dès le début de l'article.

Afin de répondre aux problèmes que pose l'intégration des capteurs en production durant ce dernier article, [Shi2007c] propose une étude ayant pour but d'intégrer des capteurs sur une ligne de production. De plus, une autre publication [Shi2007a], dresse un état des lieux des types de capteurs disponibles sur le marché pour réaliser une surveillance en usinage du brochage (figure IV-5). Cette étude utilise les mêmes capteurs que [Shi2007b], sur la surveillance du procédé de tournage.

Sensors employed in tool wear monitoring system



Type	Platform dynamometer		Integrated force sensor		Surface mounted strain sensor	Accelerometer		Transverse strain gauge
Serial number	Kistler 3-axes 9255B		Kistler 3-axes 9602		Kistler 9232A	Kistler 8692C10		Kistler 9241CA2
Mounting	Need extra space and preload		Need preload		M6 screwed	Magnetic stud		Need preload Ø10 hole
Range	−10 to −40 kN *Dz* −20 to −20 kN *Dx* −20 to −20 kN *Dy*		−5 to −5 kN *Fz* −2.5 to −2.5 kN *Fx* −2.5 to −2.5 kN *Fy*		−600 to −600 mc	−10 to −10 g		−200 to 200 mc
Size and weight	360 × 300 × 95 mm 52 kg		57 × 25 × 10 mm 30 g		40 × 17 × 17 mm 50 g	16 g		40 × Ø10 38 g
Sensitivity	*X*, *Y*: 8pC/N *Z*: 3.7pC/N		*X*, *Y*: 2 mv/N *Z*: 1 mv/N		80 pC/mc	500 mv/g		15pC/mc
Note	Operated with 2 × 5011 Kistler charge amplifier		Integrated charge amplifier		Operated with 5011 Kistler charge amplifier	Coupled with 5024 Kistler coupler		Operated with 5011 Kistler charge amplifier
Correlation coefficients	*Y* 1.00	*Z* 1.00	*Y* 0.886	*Z* 0.724	*Y* 0.643	*Y* 0.591	*Z* 0.501	*Z* 0.621

figure IV-5 Capteurs utilisés pour surveiller des incidents de brochage d'après [Shi2007a]

Notre étude étant réalisée dans un cadre industriel, il est donc fondamental que le système de surveillance utilisé ne soit aucunement invasif sur le moyen de production. La platine de mesure de nos premières expérimentations ne peut donc plus être utilisée du fait de la remise en cause du montage sur le moyen de production, et des risques associés (rigidité, fragilité, fonctionnement sous lubrifiant, etc.). Les capteurs acoustiques nécessitent d'usiner à sec pour être efficaces, imposant ainsi une modification des conditions d'usinage, ce qui n'est donc pas acceptable. Les accéléromètres et les jauges de déformation n'obligent pas forcément à modifier la brocheuse mais ils présentent les plus mauvaises corrélations avec la platine de mesure d'effort (62 % pour la jauge de contrainte et 59 % pour l'accéléromètre

d'après [Shi2007a]). Les meilleures corrélations sont obtenues par un capteur d'effort intégré à la brocheuse (88 %). La brocheuse de production étant déjà équipée d'un capteur d'effort entre le palier de la vis à billes et son carter, nous allons utiliser ce système comme moyen d'enregistrement des efforts de coupe.

Après avoir choisi le type de capteur à utiliser sur la brocheuse, il est nécessaire de déterminer la stratégie de surveillance à mettre dans le but d'identifier les situations où l'outil se détériore, par rapport aux situations d'usinage sans incident.

II.3 Les méthodes de diagnostic

Les types de surveillance, ou méthodes de diagnostic, sont variés ; il est donc nécessaire de les connaître et de les classer pour pouvoir sélectionner les méthodes les plus appropriées à notre étude. Une classification est proposée par [Ritou2006a] dans le cas du fraisage (figure IV-6). Elle permet d'identifier ces méthodes en deux grandes familles, divisées en plusieurs groupes :

- les approches spécifiques à la pièce usinée :
  - Méthode par apprentissage,
  - Méthode prédictive (par simulation),
- les approches génériques sur le procédé :
  - Méthode par intelligence artificielle,
  - Méthode par extraction de caractéristiques,
  - Méthode basée sur les caractéristiques du procédé.

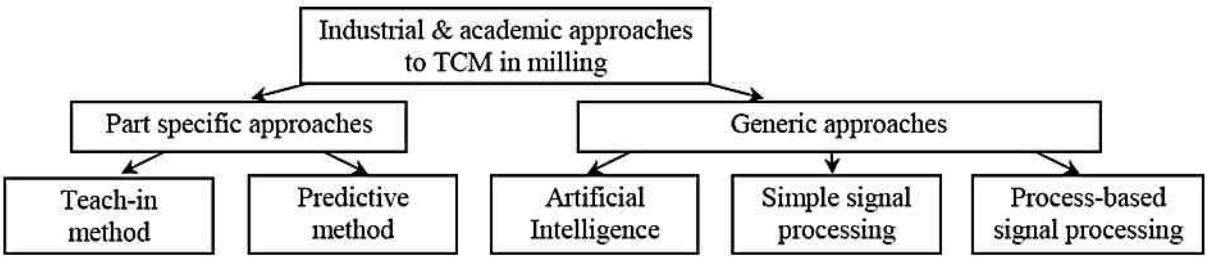


figure IV-6 Classification des méthodes de diagnostic d'après [Ritou2006a]

II.3.a Méthodes spécifiques à la pièce

II-3-a-i Méthode par apprentissage

La méthode par apprentissage est actuellement la méthode la plus connue et la plus répandue dans l'industrie. Elle a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et ne demande pas de connaissances poussées dans le domaine de l'usinage. Son principe de fonctionnement consiste à enregistrer une courbe étalon (souvent la première pièce si aucun incident n'est détecté par l'opérateur ou le contrôle) puis de placer un seuil. Si les signaux enregistrés pendant l'usinage des pièces suivantes dépassent le seuil établi vis-à-vis de la courbe de référence, alors un défaut durant l'usinage est détecté [Jemielniak1999]. La plus grande difficulté consiste à bien déterminer les seuils : s'ils sont trop restrictifs, des déclenchements intempestifs sont possibles, et si les seuils sont trop larges, les incidents ne seront pas détectés. Dans les deux cas, la conclusion est la même : si les seuils sont mal choisis, le système sera désinstallé et la machine, les outils, les pièces usinées et la machine ne seront plus protégés.

Dans le cas du brochage de disques de turbine, les séries peuvent être de quelques pièces et donc d'un nombre de pièces inférieures à la durée de vie de l'outil. Ceci impose d'utiliser toute la durée de vie de l'outil sur plusieurs séries, parfois espacées de plusieurs mois. La courbe de référence, pour le même outil, sera donc refaite plusieurs fois (au début de chaque série) pour intégrer l'usure progressive de l'outil. La procédure de génération des courbes de référence devient donc fastidieuse et la détermination des seuils, nécessitant des essais complémentaires, est à réitérer. De plus, dans le cadre de nouveaux moteurs développés, le nombre de pièces prototypes à brocher peut être très faible (1, 2 ou 3 pièces), ce qui ne permet pas de réaliser un apprentissage suffisant pour déterminer les seuils. Ces pièces, capitales pour l'industriel, sont donc usinées sans protection entraînant un risque de rebut et de perte de temps sur le développement des moteurs.

II-3-a-ii Méthode prédictive (par simulation)

Les méthodes prédictives ont pour but de pallier le principal défaut des méthodes par apprentissage, qui est la difficulté d'obtention de la courbe étalon et des seuils dans certains contextes. Par exemple dans le cas du fraisage d'une pièce unique, l'enregistrement de la courbe de référence est impossible. Pour résoudre ce problème et protéger l'usinage de pièces uniques à forte valeur ajoutée, [Bertok1983] et [Saturley2000] proposent d'obtenir la courbe étalon théoriquement, grâce à une simulation d'usinage. La méthodologie employée est développée dans la figure IV-6. Sur ce schéma, les cases de gauche représentent le chemin classique du procédé numérique de fabrication.

Les deux cases de droite représentent la simulation et la mesure de la puissance de broche. Ces deux étapes sont utilisées pour cette surveillance en comparant les seuils issus de la simulation ('physical simulation') à la mesure de puissance ('sensors'). Un sous-programme de la commande numérique ('supervisory controler') garde en mémoire les seuils et réalise les tests par rapport à la puissance de la broche.

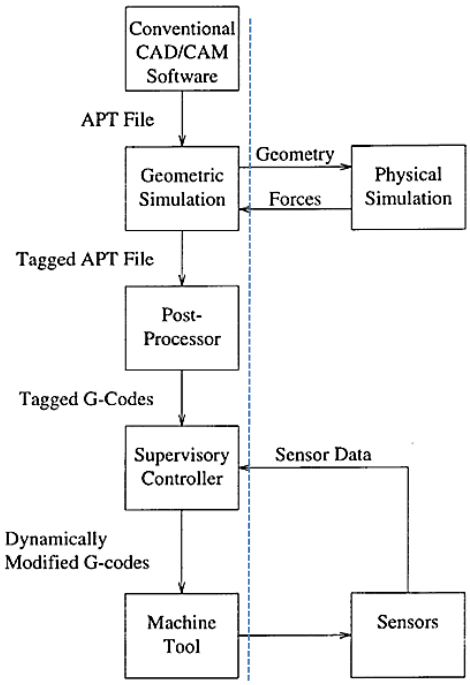


figure IV-7 Méthodologie de surveillance par méthode prédictive d'après [Saturley2000]

Afin d'être facilement intégrable dans la machine, les signaux simulés et enregistrés correspondent à la valeur moyenne de la puissance de broche. Ils sont mesurés grâce à un shunt entre le variateur et la broche. Mais la valeur moyenne de la puissance présente le désavantage d'être moins précise qu'une mesure des efforts qui peut prendre en compte le travail de chaque dent de la fraise.

Dans le cas du brochage, nous disposons d'une simulation des efforts de coupe suivant les trois directions, ainsi qu'une mesure des efforts suivant l'axe *z*. Cette technique de surveillance semble donc utilisable à partir de la méthodologie de base proposée par les deux articles précédents, mais en simulant et mesurant les efforts de coupe pour améliorer la précision du système.

II.3.b Méthodes génériques

Les méthodes de surveillance construites à partir de l'usinage d'une pièce (par apprentissage ou par prédiction), ont le principal désavantage de ne pas être robustes pour des pièces

différentes car les courbes de référence doivent être refaites. Les méthodes génériques ne se basent pas sur la différence entre une mesure et une courbe de référence mais sur l'extraction de caractéristiques des signaux mesurés pour leur associer un type d'incident.

Cette approche est très intéressante dans le cadre de notre étude sur le brochage, car les motoristes aéronautiques produisent un grand nombre de références différentes, mais chacune de ces références est produite en faible quantité (au mieux quelques centaines de pièces par an). Chaque référence induit une forme de disque et une broche particulière. En utilisant les méthodes spécifiques à la pièce, il y a donc autant de courbes étalons ou de références qu'il y a de pièces. Les méthodes génériques devraient donc nous aider à faire abstraction du type de pièce produite et rendre plus robuste notre surveillance.

II-3-b-i Méthode par intelligence artificielle

Les méthodes de surveillance par intelligence artificielle sont principalement constituées de deux techniques :

- les réseaux de neurones (Artificial Neural Network ; ANN) et machines à vecteur de support [Shi2007b] [Axinte2006] [Abu-Mahfouz2003], [Salgado2009],
- les algorithmes à logique floue (Fuzzy), [Perrin2007], [Liang2004].

En combinant ces méthodes, il est aussi possible de constituer des stratégies hybrides. Les méthodes utilisant une intelligence artificielle ont pour objectif principal de classer des populations. C'est pour cela qu'elles sont de plus en plus répandues et dans des domaines très variés. De nos jours, elles servent aussi bien à créer des modèles pour reconnaître les écritures manuscrites dans les systèmes automatiques de traitements postaux, qu'en médecine pour identifier des cellules cancéreuses. Dans l'usinage par enlèvement de copeaux, les méthodes par intelligence artificielle sont utilisées pour discriminer les facteurs qui font qu'un signal issu de la surveillance contient ou non un incident d'usinage.

Si, durant les années 1990, la plupart des articles traitait de la surveillance d'usinage en général, les articles des années 2000 se sont de plus en plus spécialisés vers l'utilisation de méthodes par intelligence artificielle. Il est même possible de trouver des articles très documentés faisant un état de l'art global de l'utilisation de ces méthodes [Abellan-Nebot2010]. Ce dernier dresse aussi un état des lieux de la répartition des différentes méthodes (figure IV-8). Ce développement est principalement dû à l'augmentation de la puissance des ordinateurs mais aussi à la facilité de mettre en œuvre certaines de ces méthodologies. Par exemple, la plupart des logiciels de calcul tels que Matlab® propose une interface de développement et de tests de réseaux de neurones.

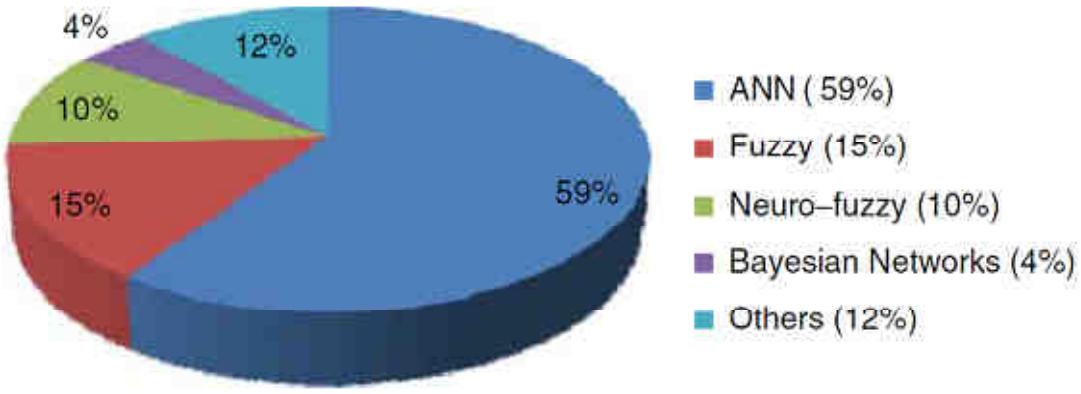


figure IV-8 Répartition de l'utilisation des méthodes par intelligence artificielle d'après [Abellan-Nebot2010]

Les réseaux de neurones et machines à support de vecteur permettent de réaliser un apprentissage sans forcément avoir besoin de bien connaître le procédé. Mais la précision et la capacité d'apprentissage du système dépendent du nombre d'essais. S'il est insuffisant, le réseau risque d'être peu précis et si le nombre d'essais est trop grand, le réseau de neurones risque le surapprentissage, c'est-à-dire une spécialisation trop importante qui le rend instable dans le cas de légères variations des données. Un autre problème des réseaux de neurones correspond bien souvent à l'impossibilité d'associer un modèle phénoménologique à la solution proposée.

Les algorithmes à logique floue présentent une meilleure stabilité, et permettent de réaliser des modèles à partir des connaissances de la coupe ou d'essais en laboratoire. Mais ces algorithmes n'ont pas de capacité d'apprentissage et sont donc difficiles à généraliser. Afin de combler les manques des deux méthodes, il est possible de les fusionner en modèle neuro-flou (neuro-fuzzy) ou en réseau bayésien (Bayesian networks) [Abellan-Nebot2010].

En brochage aussi, il est possible de trouver des articles utilisant ces méthodes. [Shi2007b] utilise une machine à support de vecteur pour prédire l'usure des dents d'une broche en fonction des efforts mesurés. [Axinte2006], quant à lui, utilise un réseau de neurones pour classifier et détecter automatiquement des incidents d'usinage, tels que la rupture ou l'écaillage des broches. A notre connaissance, aucun article ne traite de la surveillance en usinage en brochage à partir d'algorithmes à logique floue. Dans les deux cas, ces méthodes nécessitent des séries d'essais pour réaliser une surveillance de qualité ; cela peut prendre du temps et au final, ne permet pas de surveiller des séries de faible quantité.

II-3-b-ii Méthode par traitement du signal

Cette méthode consiste à extraire des caractéristiques des signaux mesurés pour les comparer à des seuils, obtenus par une étude expérimentale de l'influence de paramètres sur les signaux. Cette méthode permet de ne pas comparer des signaux directement mais seulement certaines de leurs caractéristiques, fiabilisant ainsi le système [Byrne1995].

Dans le cas du brochage, [Shi2007a] propose de réaliser une surveillance en production grâce à l'extraction de caractéristiques dans le domaine temporel et fréquentiel d'un signal d'effort. Cette méthode permet de détecter plusieurs types d'incidents d'usinage, tels que la rupture d'une dent, l'écaillage de l'arête de coupe mais aussi le niveau d'usure en dépouille de l'outil.

[Kloke2010] a tenté de modéliser l'intégrité de surface grâce à l'extraction de caractéristiques issues de mesures d'efforts, d'accélérations et acoustiques, en brochage. La méthode de corrélation de Pearson a été utilisée et les pourcentages de corrélation atteignent au mieux 50 %, ce qui signifie une faible corrélation entre les données d'entrée et de sortie. L'auteur suppose que cette faible corrélation et la variabilité importante des résultats viennent des conditions de mesure extrêmement bruitées de l'atelier.

II-3-b-iii Méthode basée sur les caractéristiques du procédé

Cette méthodologie est une amélioration de la méthode précédente dans le but de rendre encore plus fiable cette solution, grâce à la prise en compte des caractéristiques inhérentes au procédé. Cette idée a été très utilisée en fraisage car elle permet d'extraire des caractéristiques qui se répètent à chaque tour de broche.

Par exemple, pour une fraise, malgré le faux rond des dents, sur un tour complet la somme des avances par dent réelle est égale à la somme des avances par dent théorique. Il est donc possible de calculer un effort moyen théorique sans faux rond puis d'évaluer le faux rond de chaque dent en comparant les variations des efforts. À partir de ces deux caractéristiques (effort moyen théorique, faux rond de chaque dent), si un incident se produit ou si l'outil s'use, les efforts identifiés pour chaque dent vont varier et c'est ce critère qui est surveillé à chaque tour de broche, permettant une détection rapide.

En brochage, nous ne connaissons pas actuellement d'études utilisant l'extraction de caractéristiques issues des particularités du procédé lui-même. Ceci s'explique par la conception sur mesure des outils de brochage.

II.3.c Sélection des méthodes de diagnostic pour notre étude

En suivant la classification des méthodes de surveillance selon les deux grandes familles et les cinq groupes, il est possible de dresser un état des lieux des méthodes proposées et d'évaluer leur faisabilité dans le cadre de notre étude :

- les méthodes par apprentissage apparaissent suite à cet état de l'art peu adaptées à notre étude car elles n'apportent pas de flexibilité face au nombre important de références usinées et au faible nombre de pièces de certaines séries,
- les méthodes prédictives semblent appropriées à notre étude car elles permettent, grâce à une simulation des efforts (développée au chapitre précédent), et de seuils judicieusement définis, de réaliser une surveillance sans nécessiter de phases d'apprentissage,
- les méthodes par intelligence artificielle nécessitent cette phase d'apprentissage qui complique leur développement dans un cadre industriel de production de petites séries ; elles semblent difficiles à mettre en place dans le cas du brochage,
- les méthodes par traitement du signal ont déjà démontré leur pertinence dans des études passées pour surveiller les opérations de brochage des alvéoles pied de sapin,
- les méthodes basées sur les caractéristiques du procédé, sont difficilement utilisables en brochage car chaque dent est différente, rendant impossible l'extraction d'une caractéristique récurrente à chaque passage de dent.

Les méthodes prédictives et par traitement du signal apparaissent donc comme les plus appropriées à notre étude. Nous n'éliminerons pas totalement les méthodes par apprentissage puisqu'elles ont été utilisées historiquement par l'industriel, dans le but de générer une surveillance de type traçabilité de la production et peuvent notamment répondre à certains besoins spécifiques.

III Le système installé sur la brocheuse

III.1 Architecture

D'après l'état de l'art, le capteur déjà placé dans la brocheuse entre le bâti et le palier de la vis à billes semble être compatible avec nos attentes. Il est donc nécessaire d'évaluer sa réponse dans nos situations de brochage tout en caractérisant sa chaîne de mesure.

Le système est constitué de trois capteurs piézoélectriques, placés à 120° autour de la vis à billes de la brocheuse. De cette manière, les trois capteurs mesurent l'effort de poussée de la brocheuse durant l'usinage, c'est-à-dire l'effort colinéaire à l'axe z de notre repère de travail. Ces trois capteurs fournissent des pico-coulombs qui sont sommés dans un boitier. Puis, ce signal est converti par un amplificateur en un signal variant de 0 à 10 volts : 1 volt représente une charge de 1 tonne sur le capteur.

Ce signal est ensuite enregistré par la commande numérique de la machine par l'intermédiaire d'une entrée analogique, puis il est converti en signal numérique à une fréquence de 10 Hz. Enfin, une moyenne glissante sur 9 points est appliquée. La fréquence d'entrée des dents étant de 4,15 Hz, pour un pas de 8 mm et une vitesse de coupe de 2 m/min (équation (IV-1)), il est impossible de distinguer l'entrée-sortie des dents avec le système actuel (figure IV-9).

$$freq_{dent} = \frac{V_c}{60 \times 10^{-3} \times P} \qquad \text{(IV-1)}$$

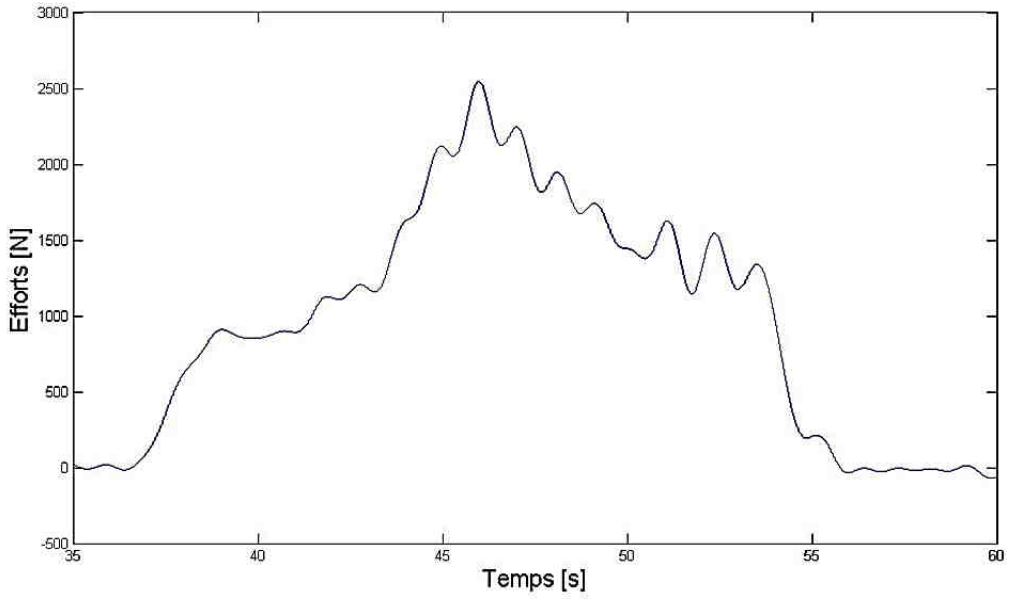


figure IV-9 Mesure d'effort avec le système de surveillance d'origine

Il est donc nécessaire de développer un nouveau système de surveillance des efforts de coupe en s'appuyant sur ces capteurs. Une mesure avec un oscilloscope numérique au niveau de la sortie de l'amplificateur a permis d'observer un signal avec un échantillonnage de 10^2 à 10^4 Hz. Un système autonome constitué d'une carte *National Instrument*, d'une carte PCI et d'un ordinateur a été rajouté pour enregistrer, à chaque début d'usinage, le signal 0-10 volts sortant de l'amplificateur et pour le stocker sur un disque dur (figure IV-10).

Le stockage des mesures est aussi garanti puisque l'ancien système écrasait les données pour chaque nouvel usinage. Lors d'un enregistrement, ce système associe à chaque mesure un fichier ''Jour_mois_année_heure_minute_seconde ''. Ceci permet de réaliser un suivi sur un grand nombre de pièces et sur des séries complètes puis de les classer facilement.

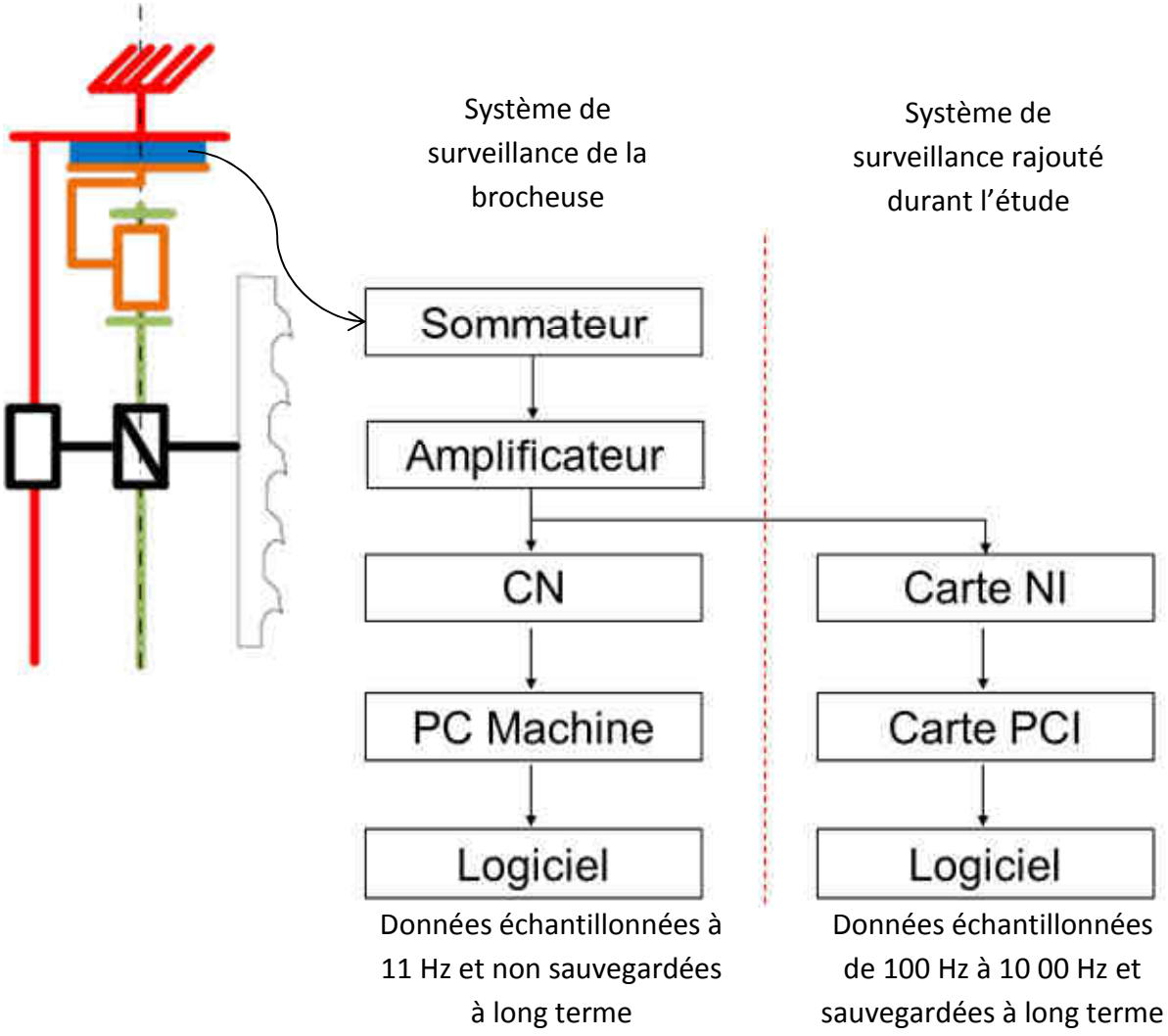


figure IV-10 Chaîne de mesure des efforts implantés sur la brocheuse en production

III.2 Précision du capteur d'effort

Afin de vérifier la qualité des mesures réalisées par le capteur installé dans la brocheuse et par sa chaîne de mesure, nous avons confronté les valeurs mesurées par la platine d'effort, et celles du capteur durant un même usinage. Le schéma de l'essai est identique à celui des essais de coupe réalisés aux chapitres 1 et 3 (figure IV-11).

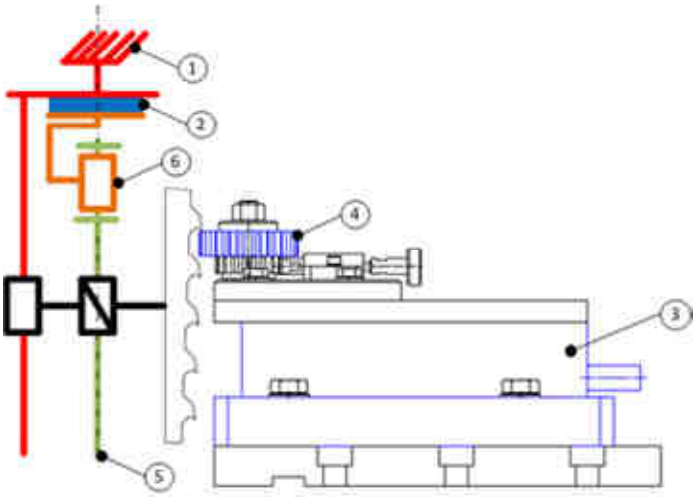


figure IV-11 Schéma représentant l'essai de corrélation entre la platine d'effort et le capteur de la brocheuse

Les deux mesures ont été alignées par un algorithme de corrélation croisée. Puis grâce à l'outil 'curve fiting' de Matlab® ces courbes ont été recalé par l'équation (IV-2) pour donner le résultat de la figure IV-12 a. Le coefficient de corrélation $r^2 = 0{,}93$ est satisfaisant et sans présenter d'hystérésis (figure IV-12 b). L'erreur de mesure entre le capteur et la platine est donnée par la figure IV-12 c.

$$F_{z\ capteur} = F_{Z\ Platine} \times 0{,}829 \qquad \text{(IV-2)}$$

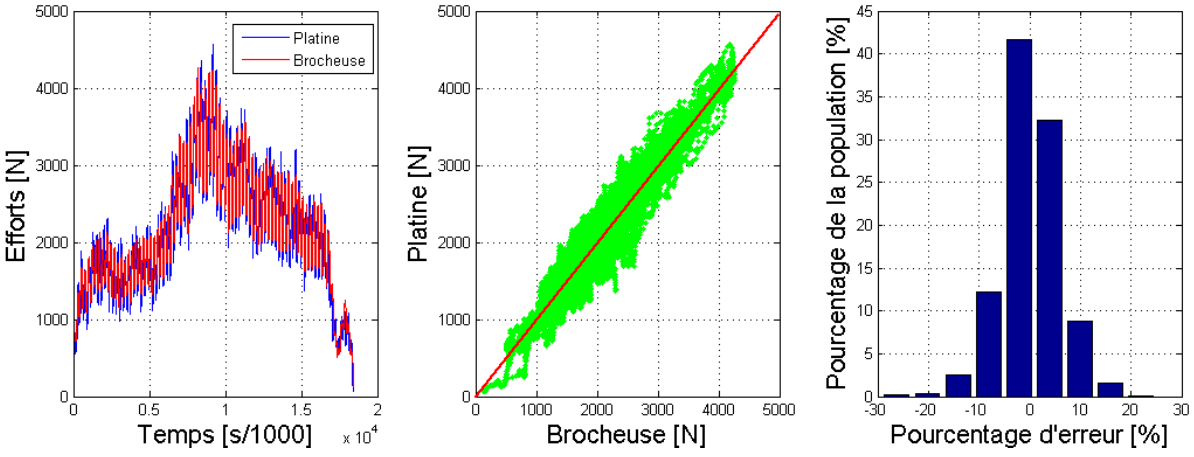


figure IV-12 a) Mesures des 2 capteurs b) Corrélation platine/capteur intégré c) Histogramme des erreurs

III.3 Recalage des courbes

Un des impératifs imposés par la production est que le nouveau système d'enregistrement des efforts ne doit pas modifier le travail de l'opérateur ni le contenu des programmes de commande numérique.

Le départ de la mesure est lancé automatiquement lorsque les signaux d'efforts dépassent un certain seuil défini arbitrairement. Cela nécessite le recalage des courbes suivant l'axe des abscisses par un algorithme utilisant la méthode de corrélation croisée, comme déjà utilisé par [Shi2007c]. Cette méthode, décrite pas l'équation (IV-3), mesure la synchronisation entre deux signaux, F_i et F_j, issus de deux mesures différentes en les décalant progressivement d'une valeur (l) pour trouver la meilleure concordance entre eux. Ensuite, le décalage entre les deux signaux est donné par l'équation (IV-4). Sans cet algorithme, il serait impossible d'analyser les courbes les unes par rapport aux autres (figure IV-13 a). Le résultat est présenté en figure IV-13 b.

Un recalage des courbes suivant l'axe des ordonnées est nécessaire si la remise à zéro de l'amplificateur diverge légèrement. Il s'appuie sur la soustraction des efforts lorsque la broche n'usine pas.

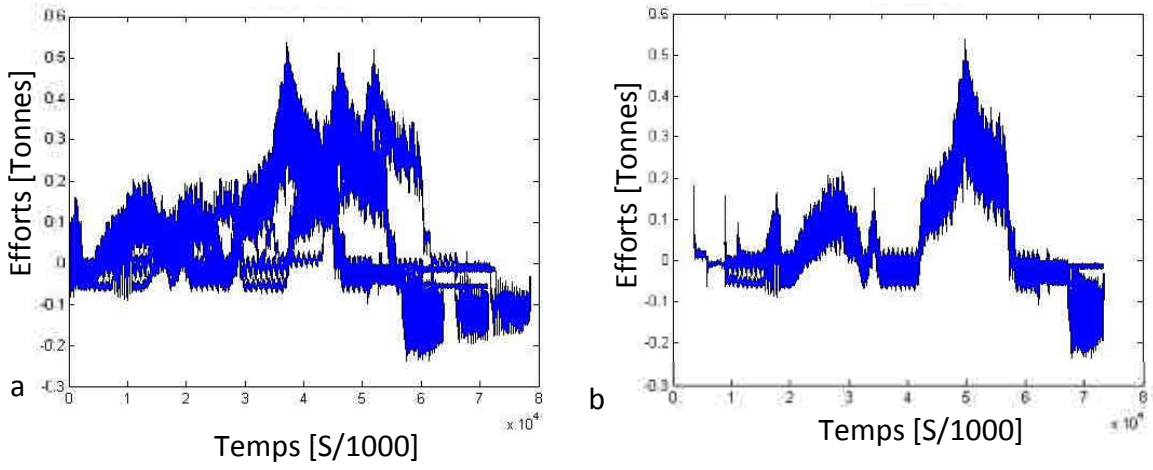


figure IV-13 Utilisation de l'algorithme de corrélation croisée a) avant recalage b) après recalage

$$r_{ij}(l) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} F_i(n) \times F_j(n+l) \qquad \text{(IV-3)}$$

$$d_{ij} = arg\left[\max\left(r_{ij}(l)\right)\right] \qquad \text{(IV-4)}$$

IV Etude de cas

IV.1 Suivi de différentes séries d'un même type de pièce

IV.1.a Analyse générale

A partir des mesures du capteur d'effort intégré, il est possible de réaliser une analyse fréquentielle des signaux par une transformée de Fourier. Ces mesures permettent de déterminer si certaines fréquences des signaux sont dues à l'environnement, au déplacement du coulisseau, ou à la coupe elle-même. Trois cas sont possibles :

- quand la machine est à l'arrêt, quatre fréquences sont visibles : 50, 100, 200 et 300 Hz, marquées par des flèches vertes (figure IV-14). L'environnement de l'atelier génère beaucoup de bruit sur la mesure ; la fosse où est fixé le bâti de la brocheuse contient des groupes hydrauliques qui génèrent ces fréquences, marquées par des flèches vertes,
- quand le coulisseau se déplace mais sans que la broche ne coupe, deux autres fréquences apparaissent : 26 et 83 Hz, représentés par des flèches bleues (figure IV-15),
- quand la broche usine, cinq autres fréquences sont visibles : la fréquence de passage des dents à 4,15 Hz et ses quatre harmoniques à la suite, pointés par les flèches rouges (figure IV-16).

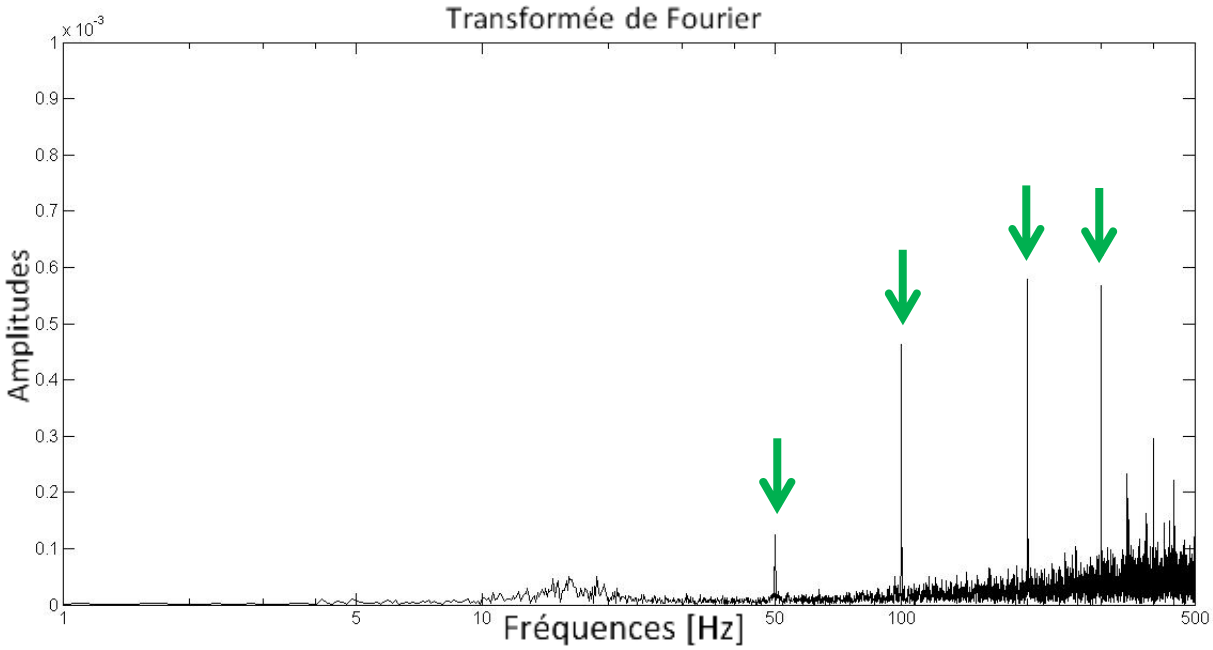


figure IV-14 Analyse fréquentielle des signaux, à l'arrêt

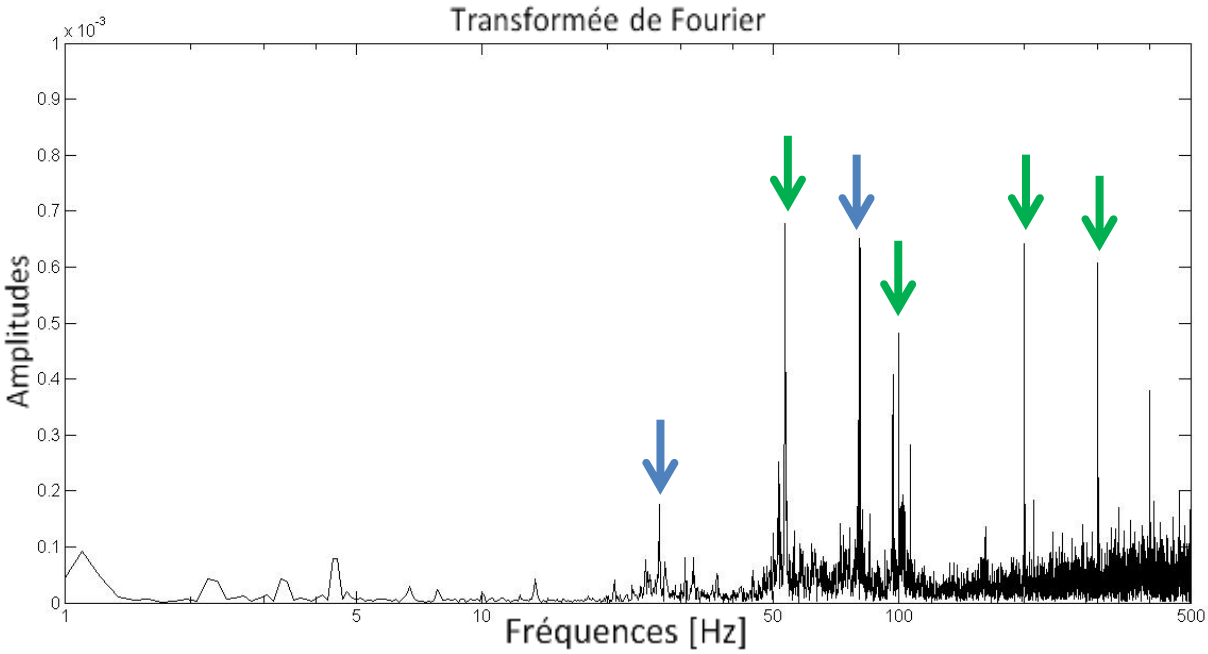


figure IV-15 Analyse fréquentielle des signaux quand la broche se déplace sans usiner

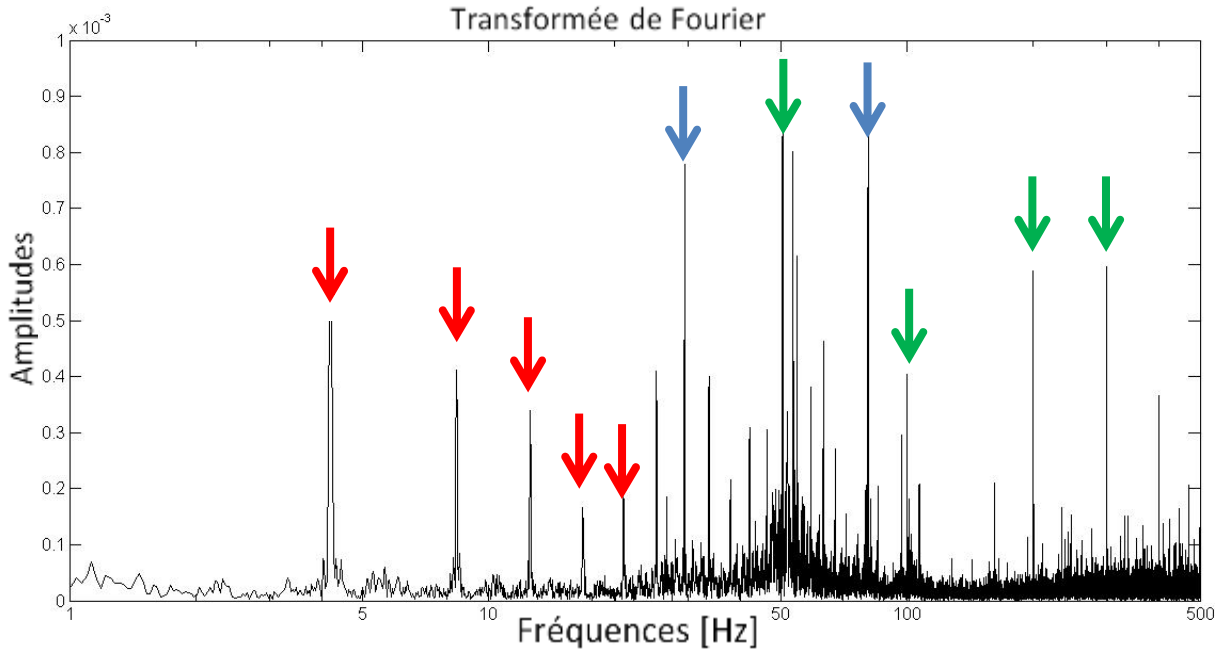


figure IV-16 Analyse fréquentielle des signaux quand la broche coupe

La fréquence due aux entrées-sorties des dents est un point important pour la stratégie de surveillance mise en place. Elle sert à filtrer les signaux pour obtenir des composantes statiques ou dynamiques du signal. Les autres fréquences dues à l'environnement peuvent être soustraites par des filtres coupe-bandes.

En plus de l'analyse fréquentielle, une oscillation de la mesure des efforts alors que la broche n'usine pas est observée (figure IV-17). La fréquence de ces oscillations est de 1,11 Hz, pour une vitesse de coupe 2 m/min et un pas de la vis du coulisseau de 30 mm/tour. Comme la vitesse de rotation de la vis est de 1,11 Hz, cette oscillation est donc due à la machine.

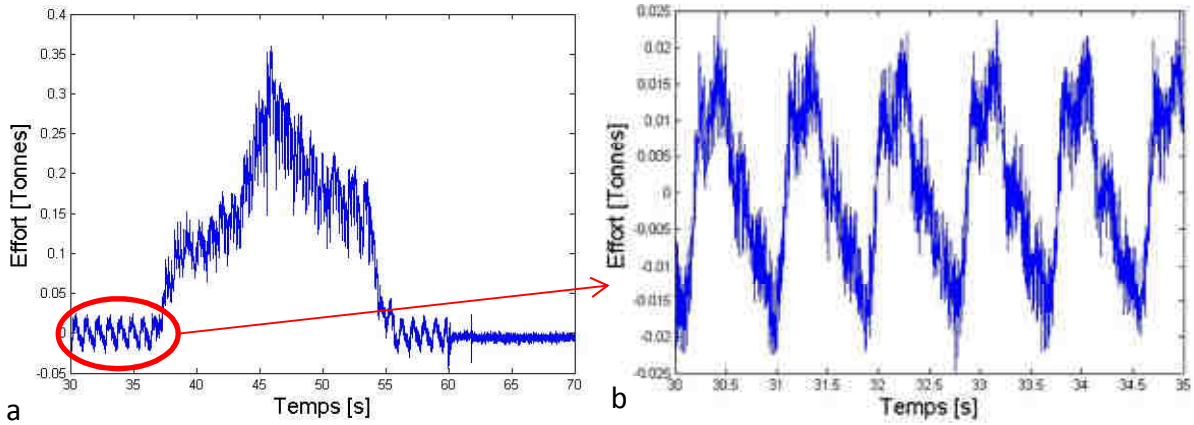


figure IV-17 Variation de la mesure d'effort : a) sur une broche b) zoom sur une zone non usinante

IV.1.b Types d'incidents étudiés

Afin de tester les différentes méthodes identifiées dans l'état de l'art, trois séries de mesures ont été sélectionnées :

- série sans incident et présentant une usure équivalente sur toutes les dents,
- série présentant une usure catastrophique localisée sur certaines dents,
- série présentant une rupture soudaine de la broche.

Ces trois séries de base ont été collectées en production et fournissent donc une référence fiable pour tester les méthodes de surveillance dans des conditions d'usinage réelles. Pour visualiser l'évolution des efforts, des surfaces de réponse sont tracées en fonction du temps, du nombre d'alvéoles brochées et des efforts (figure IV-18).

Suivant l'axe du temps, pour chaque alvéole, nous retrouvons la forme classique des efforts de coupe pour une broche sapin. Suivant l'axe du nombre d'alvéoles brochées, nous observons une progression importante des pics d'efforts (de forme logarithmique) entre le premier et le dernier brochage. Les sections de copeau étant différentes d'une dent à l'autre, pour une même usure sur toute la broche, il est normal d'observer une plus forte variation des efforts là où les sections de copeau sont plus importantes. Alors, si la section de copeau d'une dent est faible, la dégradation de cette dernière risque d'être peu visible par rapport aux efforts plus importants générés pour des sections de copeau plus grandes (figure IV-18b).

Pour mieux visualiser l'évolution des efforts, il est possible de tracer leur ratio, ou l'augmentation relative de l'effort, par rapport à l'effort initial de la première alvéole (figure IV-19). Le pic d'effort visible sur la figure IV-19 b matérialise l'usure catastrophique de trois dents de la broche qui n'était que peu visible sur la figure IV-18 b, car les sections de copeau de ces dernières étaient faibles.

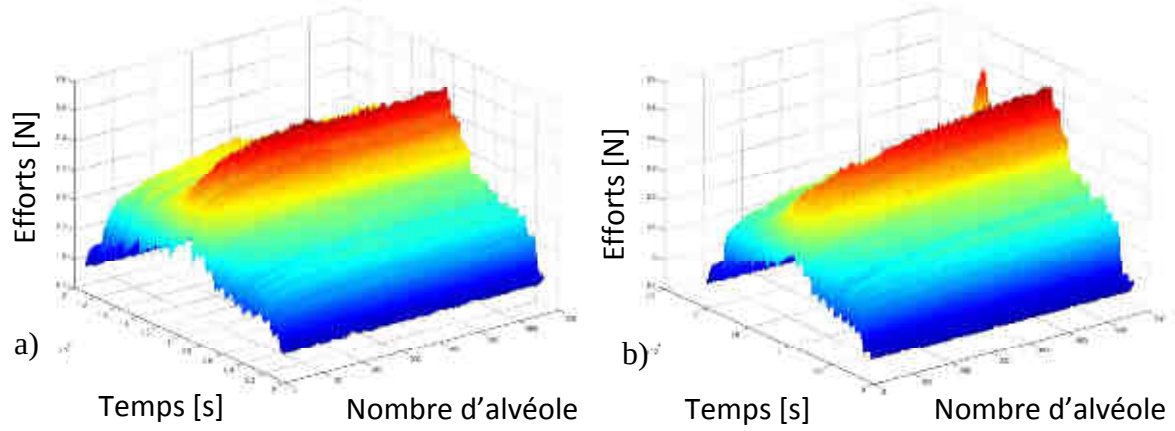


figure IV-18 Mesure d'efforts issues du capteur sur deux séries de pièces : a) sans usure catastrophique b) avec usure catastrophique de trois dents

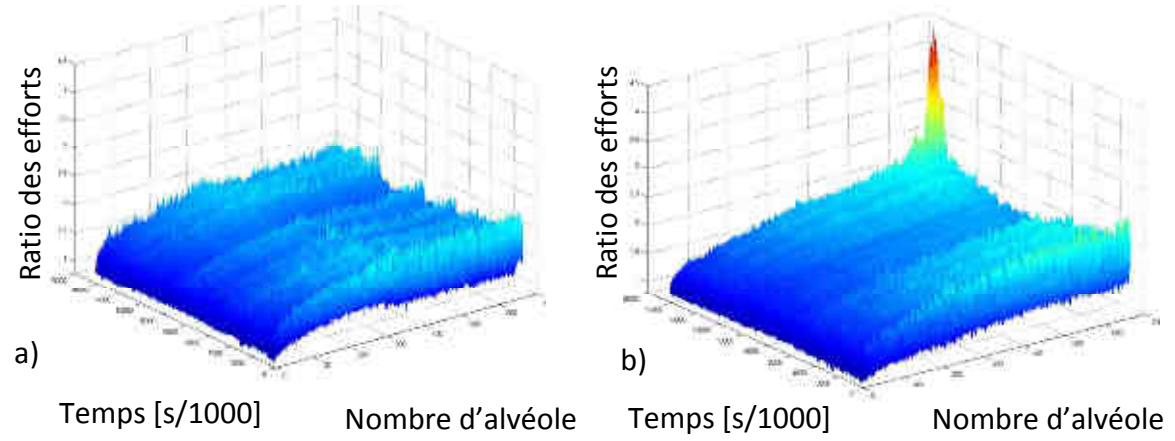


figure IV-19 Ratio d'efforts issues du capteur sur deux séries de pièces : a) sans usure catastrophique b) avec usure catastrophique de trois dents

L'usure classique de la broche est présentée sur la figure IV-20 a, avec une usure en dépouille (*Vb)* de l'ordre de 0.124 mm. L'usure catastrophique de la broche est quant à elle décrite à la figure IV-20 b, où l'on constate une usure en *Vb* de l'ordre de 0.7 mm. Celle-ci a des conséquences sur la forme de l'alvéole usinée (figure IV-21 b), contrairement à une alvéole usinée dans des conditions normales (figure IV-21 a).

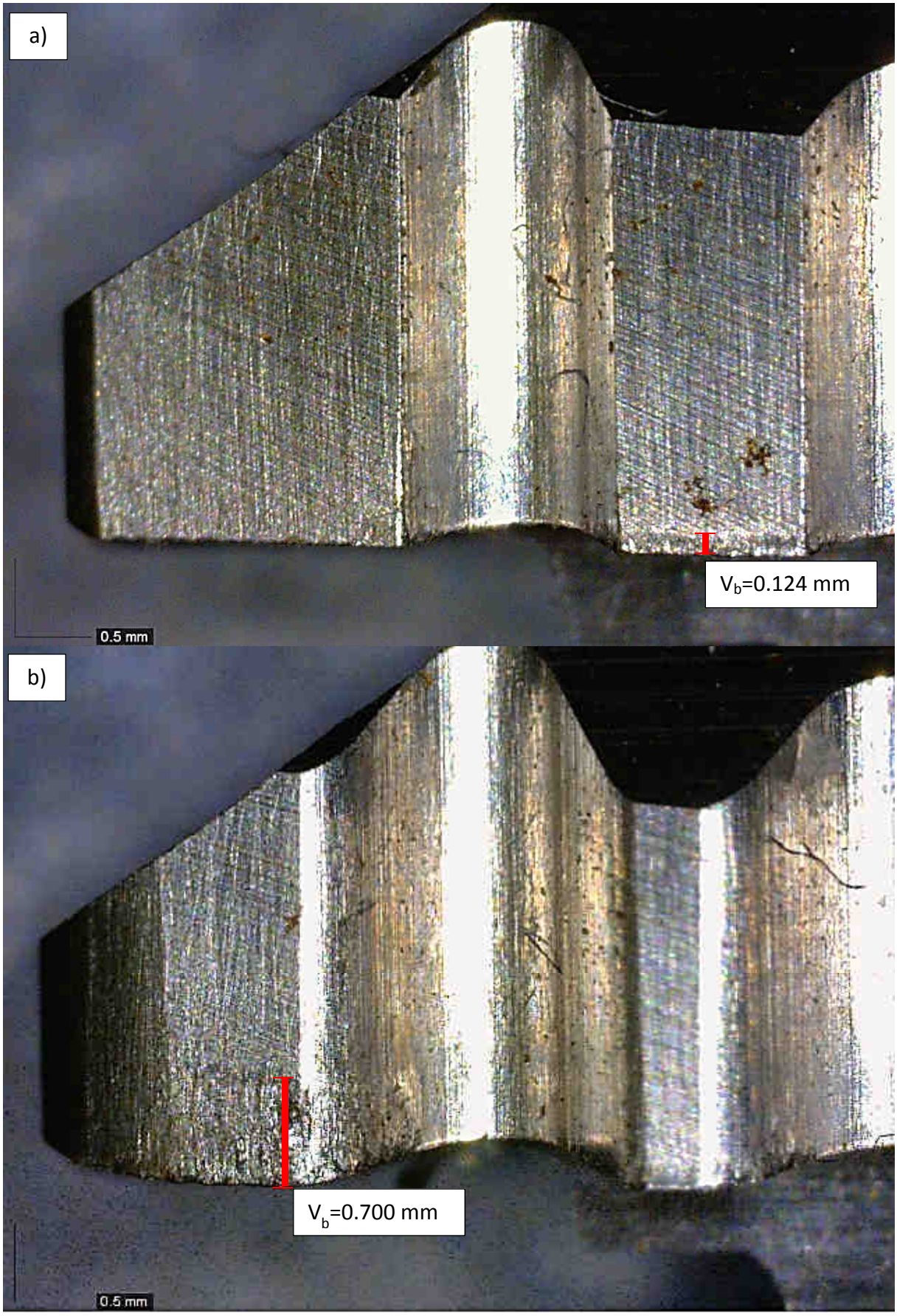


figure IV-20 a) Usure en dépouille classique b) Usure catastrophique

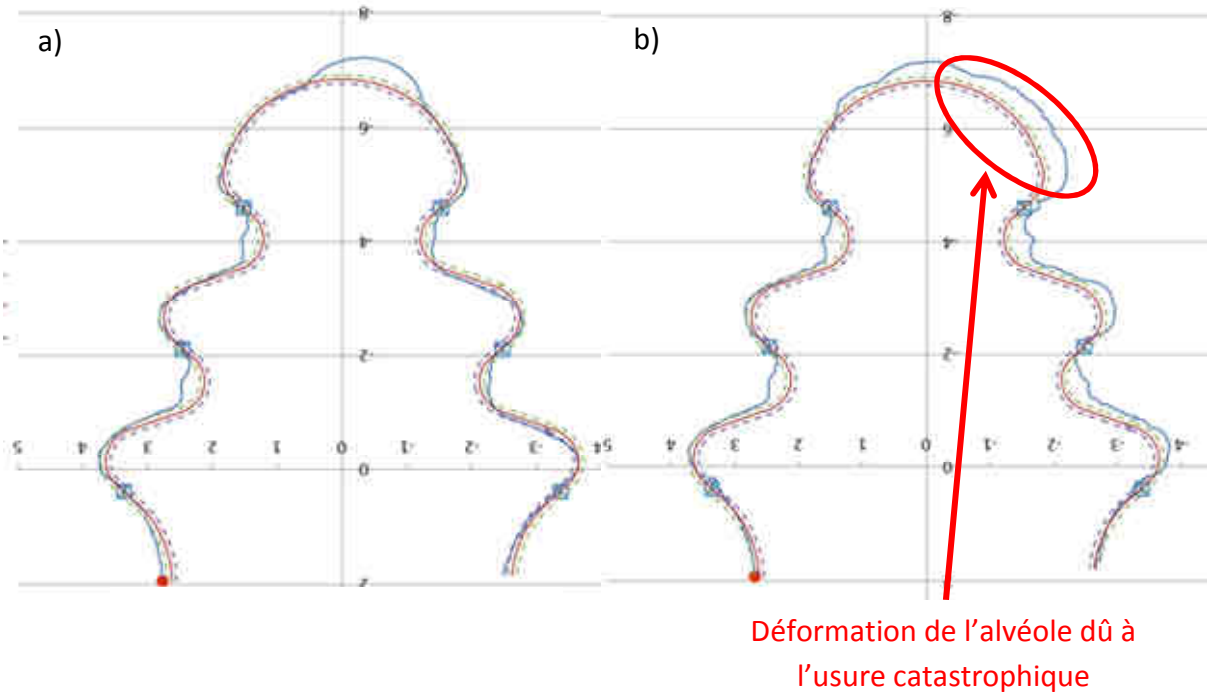


figure IV-21 Mesures du profil de l'alvéole a) sans usure catastrophique b) avec usure catastrophique

Le troisième type d'incident, correspond à une rupture soudaine de la broche (figure IV-22). La courbe bleue représente un signal d'effort juste avant la rupture et la courbe rouge, la mesure de l'usinage d'une alvéole qui présentera une rupture à 16,5 secondes.

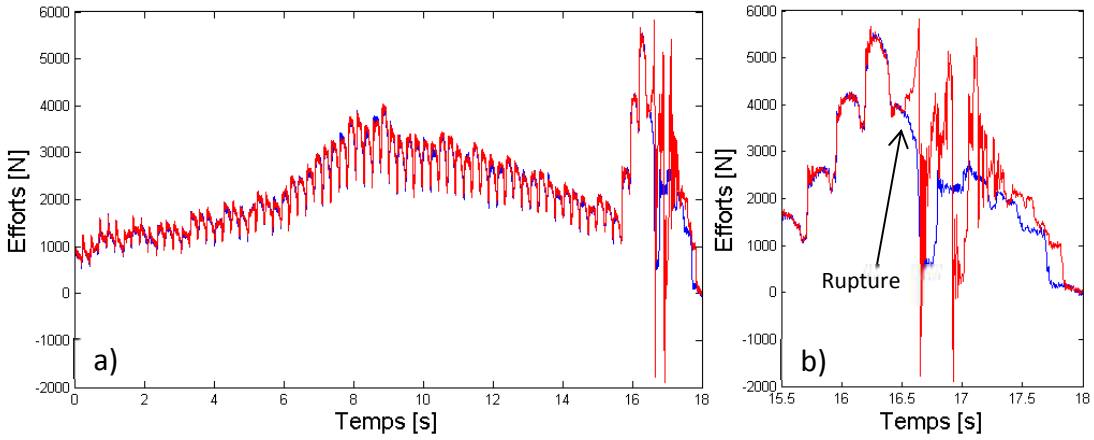


figure IV-22 Rupture soudaine d'une broche a) vue d'ensemble b) agrandissement sur la rupture à 16,5 s

IV.1.c Méthode de surveillance par apprentissage

Si cette méthode n'est pas la plus appropriée pour surveiller de petites séries constituées de plusieurs références de pièces différentes, il est nécessaire de la prendre en compte car elle

est utilisée actuellement par l'industriel pour surveiller ses opérations de brochage avec le principal objectif d'assurer la traçabilité de ce production.

Son principe consiste à mesurer les efforts de la première alvéole brochée pour définir une courbe étalon. Le seuil est calculé en ajoutant 30% (arbitrairement) aux efforts de la courbe de référence. Ensuite, si, durant l'usinage des alvéoles suivantes, les efforts déplacent le seuil, l'arrêt d'urgence de la machine est déclenché. Ce système n'est donc pas capable de faire la distinction entre un événement soudain, tel qu'un écaillage ou une rupture de la broche, et un événement plus lent, tel que l'usure de l'outil.

De plus, les petites séries imposent à chaque remontage de l'outil qu'une nouvelle courbe de référence soit réalisée. Mais le niveau d'usure diffère, ce qui induit un décalage des seuils. Le niveau d'alarme n'est donc pas forcément identique dans tous les cas et un risque de rupture en dessous du seuil reste envisageable. Une solution pourrait être de stocker la courbe de référence issue de la première série réalisée. Mais ceci imposerait d'utiliser exactement les mêmes mises en position de l'outil par rapport au coulisseau et à la pièce, contrainte qui est exagérée avec les réglages manuels réalisés actuellement. Il est donc nécessaire, pour assurer un suivi de qualité par cette méthode, d'usiner des lots ayant un nombre de pièces égal à la durée de vie de l'outil.

D'autre part, durant tous les enregistrements réalisés, cette méthodologie a été mise en défaut par des ruptures soudaines, c'est-à-dire sans usure. La figure IV-23 présente le cas, déjà évoqué en figure IV-22, où la rupture (événement soudain) n'a pas été détectée par la surveillance. Ici, la rupture de l'outil s'est produite sur la dernière dent de la broche, ne provoquant pas une augmentation des efforts mais une forte diminution.

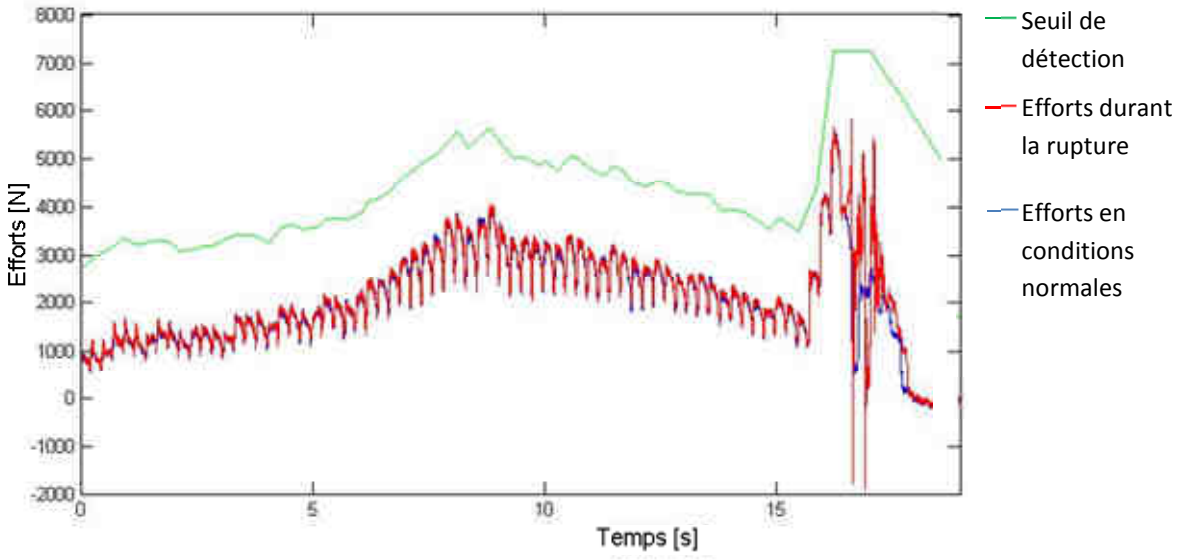


figure IV-23 Méthode de surveillance par apprentissage, sans détection de rupture de broche

IV.1.d Méthode de surveillance prédictive (par simulation)

Pour le développement de nouveaux disques de turbine, aucune courbe de référence n'est disponible pour réaliser la surveillance d'usinage. L'utilisation de la simulation pour générer des courbes étalons peut être une solution, afin d'accroître la performance de la surveillance du brochage et de remédier aux insuffisances de la méthode par apprentissage. A partir de l'algorithme développé par [Saturley2000] (figure IV-7 page 133), de la simulation des efforts de coupe et de la mesure des efforts intégrée à la machine, il est possible de proposer un algorithme de surveillance en brochage en trois étapes (figure IV-24) :

1. la simulation des efforts dans laquelle les défauts sont implémentés, pour générer une enveloppe d'efforts autorisée (courbes vertes),
2. le calcul des seuils d'efforts pour prendre en compte l'usure de l'outil (courbes rouges), en ajoutant 30 % aux efforts comme pour la méthode par apprentissage car la simulation ne prend pas en compte l'usure de l'outil,
3. la mesure des efforts (courbes bleues) et la comparaison par rapport aux seuils (courbes rouges).

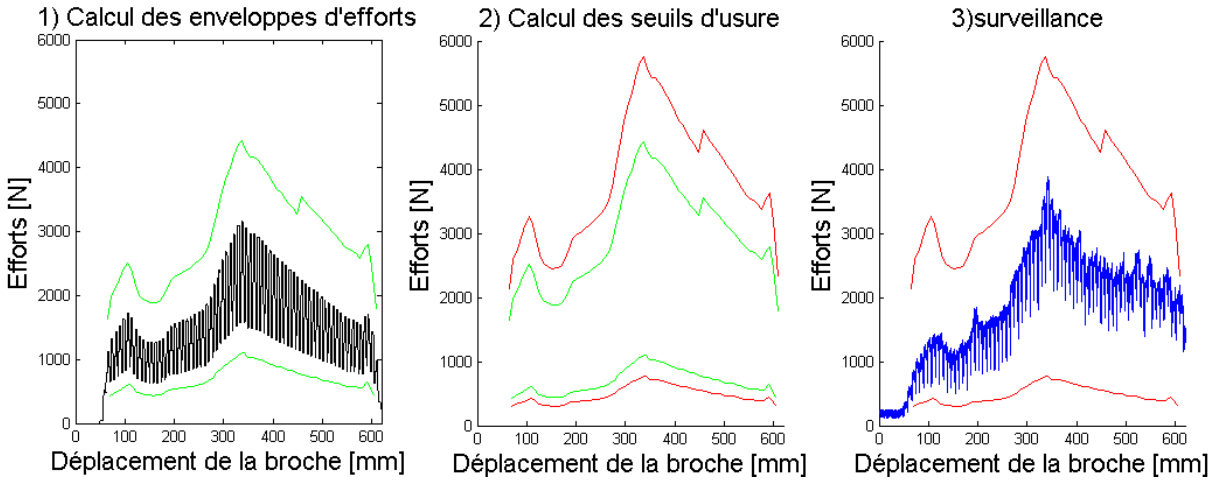


figure IV-24 Développement de courbes étalons en utilisant la simulation des efforts

Au chapitre précédent, trois principales causes de variation des efforts ont été identifiées :

- le désalignement entre l'ébauche et la finition,
- la variation d'avance par dent,
- la rectitude de la broche.

Ces trois perturbations ont des répercussions importantes sur les efforts, pouvant entraîner dans certains cas des variations d'efforts pouvant atteindre 35 à 50 % sur les dents affectées. L'enveloppe d'efforts autorisée est nécessaire pour éviter les détections abusives, dues aux imprécisions de l'outil. Actuellement, face aux variations observées sur la fabrication des

broches, cette enveloppe reste très large. Néanmoins, il est possible de choisir son amplitude de deux façons :

- comme la conséquence des défauts mesurés, ce que nous avons fait dans notre étude,
- comme la conséquence des défauts maximums autorisés, et dans ce cas ces enveloppes peuvent correspondre à un outil de contrôle et de réception des broches.

Toutefois, pour cette dernière solution, les broches sapin disposent sur une même dent de deux faces de coupe ; un défaut induisant une augmentation des efforts d'un côté peut donc être compensé si un défaut de l'autre côté de la dent diminue ses efforts. La mesure des efforts sur l'axe *z* ne pourra donc pas relever certains phénomènes de façon précise.

Enfin, l'enveloppe d'efforts autorisée et la mesure d'efforts uniquement suivant l'axe *z* nuisent à la précision de la surveillance. Cela engendre des seuils de détection si larges qu'une rupture de broche ou l'apparition d'usure catastrophique peuvent se produire en dessous des seuils. Dans le futur, si la capabilité de fabrication des broches est améliorée, l'enveloppe pourra être diminuée et une mesure triaxiale apportera une redondance des signaux pertinents. Ces deux points constituent des axes d'amélioration de cette surveillance.

IV.1.e Méthode de surveillance par traitement du signal

IV-1-e-i Moyenne et écart-type

A partir des deux équations ci-dessous, (IV-5) et (IV-6), il est possible de calculer à chaque instant t la moyenne et l'écart-type de la population des points se trouvant au même instant t sur les courbes précédentes.

Cette méthode permet pour chaque point de mesure de chaque alvéole d'y associer deux valeurs caractéristiques par rapport aux usinages précédents. A partir de ces deux caractéristiques, [Shi2007c] calcule automatiquement et pour chaque point de la courbe un seuil supérieur et inférieur à partir de la moyenne (IV-5), et de plus ou moins trois fois l'écart-type (IV-6), de chaque point. [Shi2007b] explique qu'il est nécessaire, dans le cas du tournage, de filtrer à une fréquence inférieure à celle de la rotation de la broche pour éviter toute perturbation. Dans le cas du brochage, [Shi2007c] filtre à une fréquence inférieure au passage d'une dent, en ne travaillant donc que sur la partie statique du signal.

Contrairement au tournage, la fréquence d'entrée des dents en brochage ne constitue pas une perturbation et, en filtrant le signal avec une fréquence supérieure (par exemple 10 Hz), il est possible d'utiliser cette méthode ainsi que de visualiser précisément sur quelle dent se situe un problème, s'il se produit (figure IV-25).

$$\overline{F_{n(t)}} = \frac{1}{n} \times \sum_{k=1}^{k=n} F_{k(t)} \qquad \text{(IV-5)}$$

$$\sigma^2_{n(t)} = \frac{1}{n-1} \times \sum_{k=1}^{k=n} \left(F_{k(t)} - \overline{F_{n(t)}}\right)^2 \qquad \text{(IV-6)}$$

Le principal avantage de cette approche réside dans son auto-apprentissage permanent. Les deux caractéristiques, moyenne et écart-type, sont recalculées pour chaque alvéole et à chaque pas de temps, pour obtenir automatiquement des seuils inférieurs et supérieurs. Cette solution, basée sur l'extraction de caractéristiques de la coupe, donne plus de souplesse, durant son utilisation, que la famille des méthodes spécifiques à la pièce usinée.

Cette méthode permet de détecter l'usure catastrophique d'une broche (figure IV-25). La courbe bleue représente l'usinage en cours de surveillance, et les courbes vertes et rouges, les seuils issus du calcul de la moyenne et des écart-types. Pour un temps supérieur à 17,25 s, la courbe surveillée dépasse le seuil supérieur, signalant l'apparition d'un incident. Il s'agit de l'usure catastrophique de trois dents de la broche issue du cas déjà présenté en figure IV-19. Les ruptures sont aussi détectées, mais cette solution ne permet pas de dire quel type d'incident a provoqué le dépassement des seuils. Il est donc nécessaire de trouver une solution complémentaire pour discriminer les cas possibles.

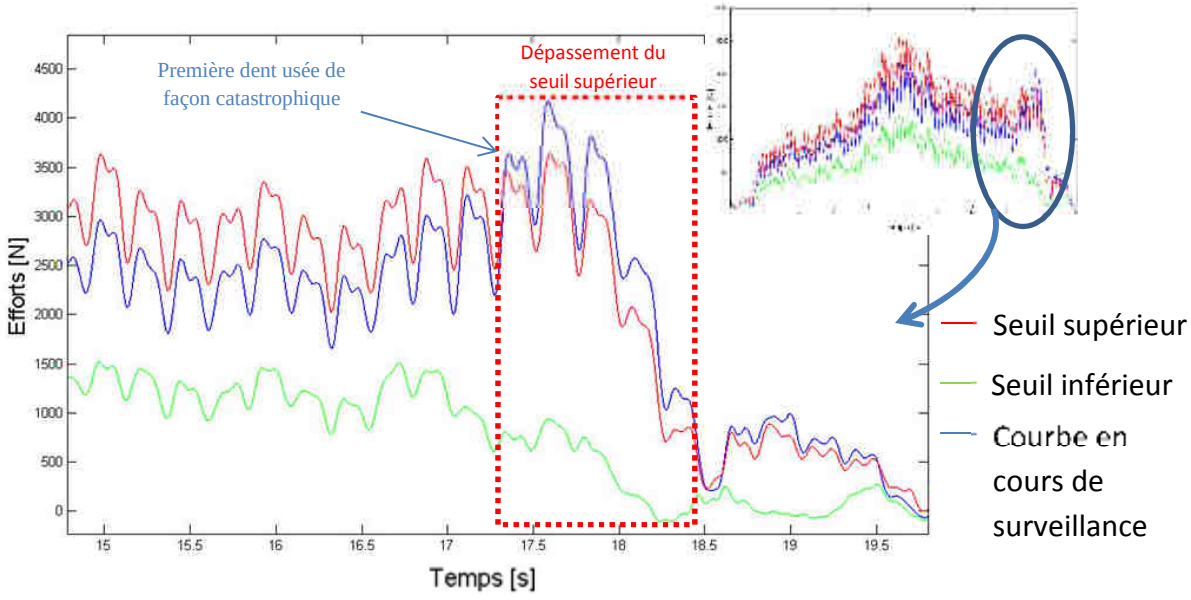


figure IV-25 Surveillance par moyenne et écart-type, détection d'usure catastrophique

IV-1-e-ii Variance du signal

La variance du signal est aussi une caractéristique extraite ; elle est calculée pour une courbe complète, contrairement à la surveillance par moyenne et écart-type vue précédemment. Sur les deux graphiques de la figure IV-26, la courbe bleue représente une série d'alvéoles brochées avec apparition d'usure catastrophique, et la courbe verte montre une autre série mais sans usure catastrophique.

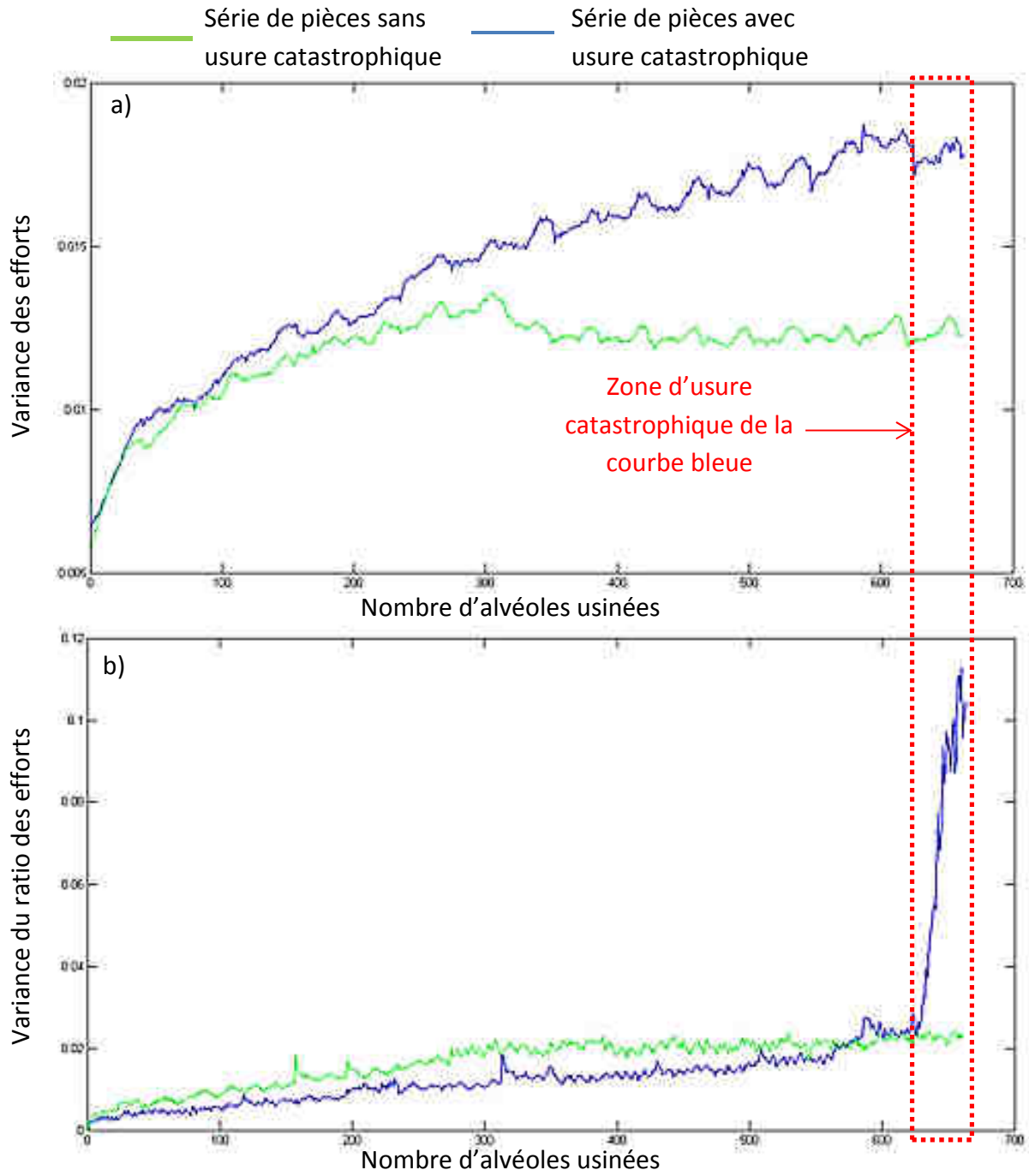


figure IV-26 Calcul de la variance du signal a) efforts bruts b) ratio des efforts

Dans le cas du brochage, les signaux oscillent fortement à cause des entrées-sorties des dents. Pour annuler cette oscillation, il est nécessaire de ne plus travailler sur les efforts directement mais sur le ratio des efforts. Dans ce cas, la composante oscillatoire n'existe plus. Il est alors possible de détecter une évolution de la variance du signal due à l'apparition d'une usure catastrophique (figure IV-26b), qui est bien plus pertinente que la mesure de la variance des efforts au moment où l'usure catastrophique apparaît (figure IV-26a). Cette solution impose d'attendre la fin de chaque brochage pour détecter un incident, ce qui implique potentiellement un retard pouvant atteindre plusieurs secondes. Elle pose donc un problème de réactivité dans notre contexte de production.

IV-1-e-iii Dérivée

La dérivée du signal consiste à calculer à chaque instant t la différence entre deux points de mesures consécutifs d'une même courbe, permettant ainsi de réagir au plus vite. En comparant deux séries avec et sans usure catastrophique de la broche (figure IV-27), il est possible de constater que la dérivée des efforts n'évolue que sensiblement entre l'usure normale (courbe bleue) et l'usure catastrophique (courbe rouge). Cette méthode ne permet donc pas de détecter une détérioration progressive de la broche.

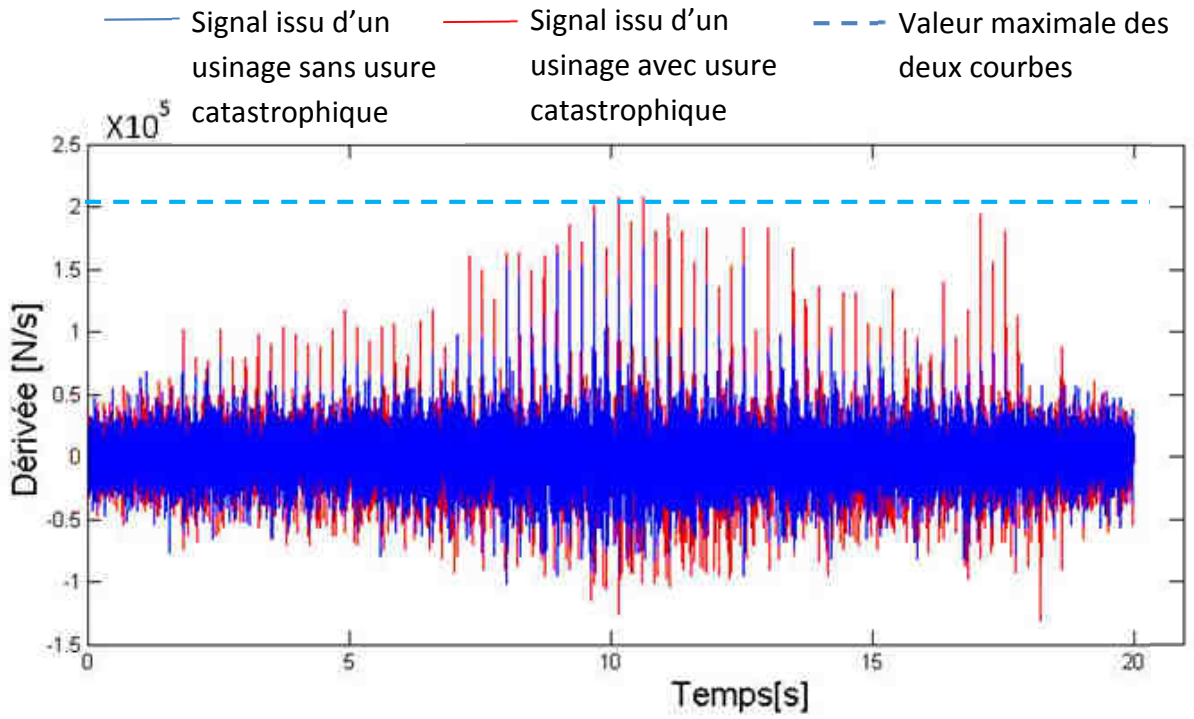


figure IV-27 Calcul de la dérivée du signal

Par contre, sur des évènements soudains tels que la rupture d'une broche, la dérivée fait apparaître des différences significatives (figure IV-28). Si une rupture se produit (courbe rouge), une forte variation des efforts est induite. La mesure réalisée sur les différentes ruptures enregistrées permet de fixer un seuil de détection de $5x10^5$ N/s. La dérivée des efforts hors rupture (courbe bleue) ne dépasse jamais les $2x10^5$ N/s, et la définition d'un coefficient de sécurité de 2,5 par rapport au seuil de détection d'une rupture, évite les risques de détection abusive.

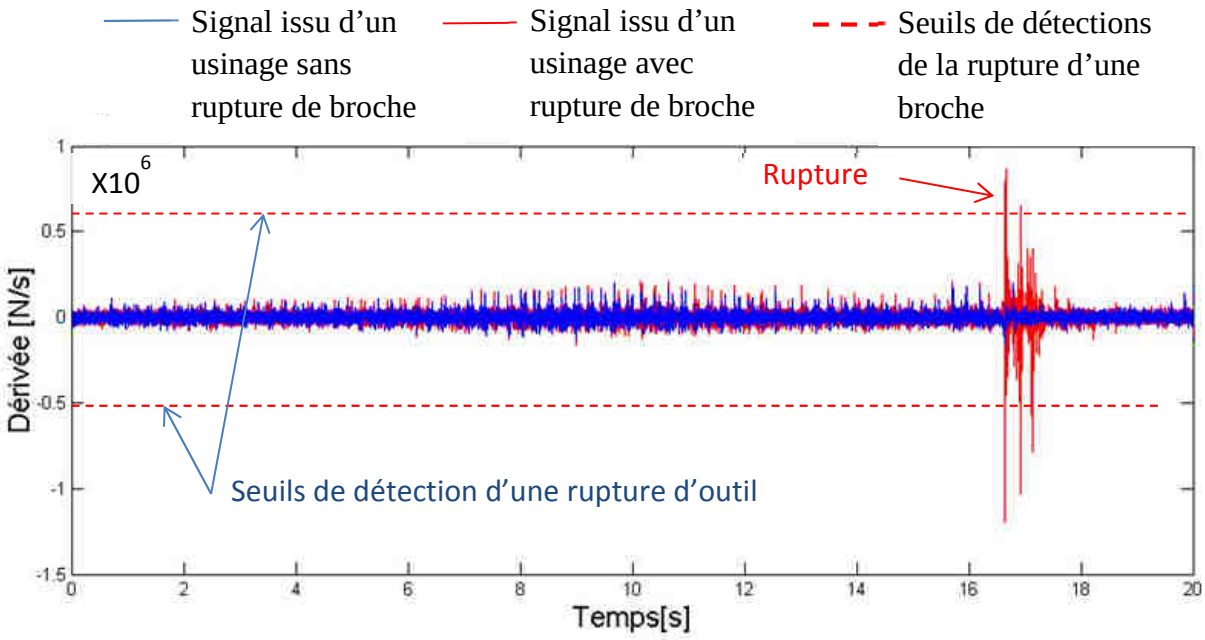


figure IV-28 Calcul de la dérivée du signal pour détecter un événement soudain, tel qu'une rupture d'outil

IV.2 Proposition de surveillance

Selon les résultats des précédents paragraphes, la stratégie de surveillance la plus adaptée à notre étude est celle s'appuyant sur l'extraction de caractéristiques :

- moyenne/écart-type,
- dérivée du signal.

Cette approche permet de réaliser une surveillance en temps réel, mais aussi de s'affranchir des problèmes liés aux méthodes par apprentissage ou basées sur la comparaison entre pièce étalon et usinage suivant. La méthode de surveillance prédictive s'est montrée rapidement mise en défaut par les intervalles de tolérance des broches, ne permettant pas de donner des seuils de surveillance performants. Le critère moyenne et écart-type permet de détecter aussi bien les dérives lentes que les variations soudaines des signaux mais il ne permet pas de distinguer les deux. La mesure de la dérivée, quant à elle, ne détecte que les ruptures d'outil. Il est donc possible d'employer ces deux critères pour réaliser un test logique et savoir quel type d'incident se produit.

Dans le cas de l'usure d'un outil, il n'est pas nécessaire de stopper directement la machine mais il faut prévenir l'opérateur par l'intermédiaire d'une alarme afin d'organiser un changement d'outil à la fin de cette alvéole. Dans le cas d'une rupture, il est nécessaire de stopper le plus rapidement possible la brocheuse, sans attendre l'intervention de l'opérateur. C'est pour cela que nous proposons un algorithme qui combine les deux critères (figure IV-29). Il est important de noter que, pour que cette approche fonctionne en temps réel, il est nécessaire d'améliorer le déclenchement de l'enregistrement des efforts pour ne plus avoir à recaler les signaux après enregistrement.

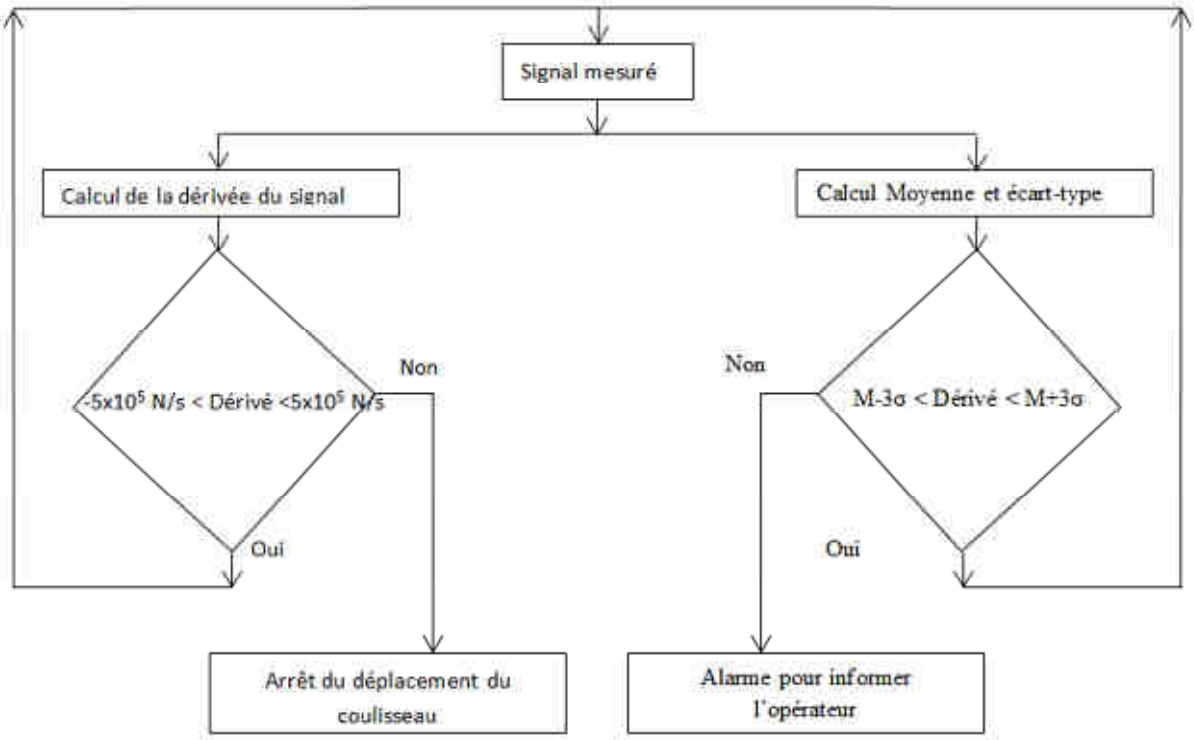


figure IV-29 Test logique de surveillance

V Bilan

Ce quatrième et dernier chapitre avait pour but de mettre sous surveillance les opérations de brochage. Face à l'impossibilité de réaliser des essais d'usure dans des conditions de laboratoire, à cause de la disponibilité machine et du prix des consommables nécessaires (matières et broches), il était impératif d'acquérir des données issues de la production et en parallèle de celle-ci de développer un système de surveillance fiable. Pour cela, les investigations ont été menées en trois phases:

- la première étape consistait à réaliser un état de l'art des moyens utilisés pour réaliser une surveillance en usinage. Cette étude bibliographique ne s'est pas limitée à la surveillance du brochage mais à des procédés d'usinage en général. Elle a permis, dans un premier temps, de cibler les capteurs les plus appropriés à notre étude, puis, dans un second temps, de réaliser un premier choix des méthodes de diagnostic apparaissant comme les plus performantes pour suivre des séries avec des nombres de pièces assez faibles,
- la deuxième étape de cette étude a consisté à installer et à calibrer un système d'enregistrement automatique des efforts de coupe. Ce système a permis de consigner les signaux d'un grand nombre de séries de pièces usinées sans nécessiter de présence humaine pour activer les enregistrements. Ainsi, les différentes séries de mesures réalisées ont servi à implémenter une base de données de mesures d'efforts pour les comparer aux différents incidents d'usinage pouvant se produire,
- la troisième étape a consisté à développer, à partir des mesures réalisées, la stratégie de surveillance et à déterminer les critères les plus aptes à détecter les différents types d'incidents et déclencher les actions les plus appropriées.

Suite à ces trois étapes, une méthode hybride basée sur deux critères est proposée pour détecter et discriminer l'incident nécessitant soit d'avertir l'opérateur, soit d'arrêter instantanément la brocheuse. Cette solution utilisant deux critères n'a jamais été mise en défaut dans le cadre de notre étude ; elle a toujours su détecter les incidents d'usinage sans déclencher d'alarme intempestive. Néanmoins, il semble très important de réaliser une étude statistique à plus grande échelle, et sur différents types de pièces pour déterminer précisément la probabilité de détection de chaque type d'incident, comme cela a déjà été fait dans le cadre du perçage [Popa2012].

Une perspective de ces travaux pourrait être d'utiliser la simulation dans la surveillance avec une mesure triaxiale des efforts (si la capabilité de fabrication des broches s'améliore). Cela ajouterait de la redondance dans la surveillance et la rendrait ainsi plus performante et robuste.

Conclusions et perspectives

Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans une démarche globale de Safran Turbomeca visant à optimiser les opérations de brochage des alvéoles pied de sapin, car ce procédé est actuellement le seul répondant aux spécifications des disques de turbines. Les objectifs premiers étaient de mieux appréhender les phénomènes existants durant l'opération de brochage, de proposer des solutions visant à optimiser la conception des broches, et à surveiller l'usinage. Notre étude s'est articulée en quatre activités dont chacune a constitué un chapitre de ce mémoire.

Le premier chapitre a d'abord exposé les propriétés physiques de l'Udimet 720® pour disposer des informations de bases nécessaires à la compréhension de la coupe de ce matériau. A notre connaissance, les études sur ce sujet sont peu nombreuses, c'est pourquoi nous avons aussi exploité les publications sur d'autres superalliages base nickel, tels que l'Inconel 718®, qui font apparaître une usure rapide des outils sur des procédés de coupe plus classiques, comme le fraisage ou le tournage.

Après cette étude bibliographique générale sur la coupe des bases nickel, nous avons centré nos recherches sur le cas spécifique de la coupe en brochage qui a pour particularité d'utiliser des vitesses de coupes faibles de l'ordre de 2 à 6 m/min et des avances par dent variant de 0,03 à 0,1 mm. Face à la singularité de nos travaux, du fait des paramètres d'usinage et du matériau broché, il était indispensable d'identifier des lois de comportement pour combler le manque d'informations disponibles.

Une première étude de la coupe à l'échelle mésoscopique a été réalisée en brochage, permettant d'obtenir des modèles d'efforts avec des coefficients de corrélation supérieurs à 90% et des erreurs toujours inférieures à 15%. Ces essais réalisés en coupe orthogonale, par mesure de simplification de la démarche expérimentale, ont été filmés avec une caméra rapide pour mieux comprendre certains phénomènes, tels que la formation du copeau ou le refus de coupe pour des avances par dent trop faibles. L'observation de l'enroulement du copeau nous a permis de conclure que l'effort dû au frottement de celui-ci dans la goujure de la broche était faible et que les efforts étaient principalement dus aux trois zones de cisaillement. Le domaine expérimental testé durant cette première campagne correspond à l'état de l'art actuel du brochage.

Pour étendre les modèles, une deuxième campagne d'essais a été effectuée. L'utilisation du procédé de tournage en coupe orthogonale permet de réaliser des essais hors production, d'augmenter le nombre de points expérimentaux, de réduire les coûts et de simplifier le réglage de certains paramètres, comme l'avance par dent qui, sur une brocheuse, n'est pas réglable car fixée par l'outil. Cette campagne a surtout exploré un domaine expérimental plus vaste que l'état de l'art actuel, faisant apparaître l'influence de la vitesse et de l'angle de coupe sur la diminution des efforts, de façon significative avec 40% de variation sur le domaine testé. Enfin, des études sur les bases nickel avaient expliqué, grâce à des simulations par éléments finis, que le copeau était plus fin et s'enroulait mieux avec l'augmentation des angles de coupe et la diminution de l'avance par dent. Nos campagnes

d'essais et nos modélisations confirment ces résultats de simulation, et nous avons complété ces études grâce à des paramètres plus étendus. Dans des domaines expérimentaux similaires, les résultats des modèles d'efforts entre le brochage et le tournage sont proches, laissant présager la possibilité de standardiser cette méthode d'essais hors production pour d'autres matériaux et ainsi d'implémenter de nouvelles lois de coupe.

Le deuxième chapitre correspond au passage de l'échelle mésoscopique, traitée au premier chapitre, à l'échelle macroscopique ou au procédé de brochage étudié dans sa globalité. Si le principe de base du procédé de brochage est simple, les broches pied de sapin sont des outils complexes à cause des formes usinées et des intervalles de tolérance étroits. La littérature sur le procédé de brochage est ancienne, généraliste, et souvent inadaptée au cas des alvéoles pied de sapin base nickel. Nous avons donc entrepris de décrire ces outils de brochage car, mis à part la vitesse de coupe, tous les paramètres d'usinage sont obtenus par leur géométrie.

Nous avons notamment évalué les méthodes de conception de ces outils des plus simples, telles que les méthodes métier, aux plus compliquées, comme les méthodes par optimisation multicritères ou par éléments finis. Ces stratégies ayant pour la plupart le but d'optimiser les coûts de l'opération de brochage, elles ne prennent pas en compte l'objectif principal de nos travaux, c'est-à-dire l'optimisation de la qualité des alvéoles brochées.

Afin de modéliser les efforts pendant le travail complet d'une broche, nous avons développé un simulateur d'efforts de brochage. Cet outil s'appuie sur la description géométrique précise de chaque dent de la broche et l'association de chaque élément discrétisé de la broche à un effort élémentaire issu des modèles de coupe. Cela permet de comprendre et de quantifier l'influence de chaque élément constituant la broche sur les efforts résultants. Par exemple, il nous a permis d'évaluer l'influence de l'angle d'affutage sur l'angle de coupe, le faisant passer de 15° à 0°. L'algorithme de calcul a été optimisé pour être performant et fournir des résultats en 90 secondes.

Pour le troisième chapitre, le simulateur d'efforts de brochage a permis de réduire fortement la dimension des campagnes expérimentales avec des broches pied de sapin, en limitant uniquement les essais à une campagne de vérification de la simulation et à une fabrication d'alvéoles pour des contrôles géométriques et d'intégrité de surface. Les essais de brochage réalisés sont représentatifs du cas industriel, grâce à une brocheuse et des outils utilisés en fabrication. La principale différence provient du montage expérimental, moins rigide qu'en production, qui provoque une variation progressive des efforts.

La précision de corrélation entre la mesure et la simulation des efforts est supérieure à 90% suivant les trois directions. Le pourcentage d'erreur suivant les axes *y* et *z* reste toujours inférieur à 40% et, seulement pour 2% de la population, l'erreur dépasse 30%. Néanmoins pour l'axe *x,* le pourcentage d'erreur atteint dans certains cas 150%. Cette forte divergence a été expliquée par la souplesse du montage expérimental mais aussi par l'influence des

dispersions de fabrication de l'outil sur l'ensemble des efforts mesurés. Plusieurs essais ont été réalisés pour générer des défauts afin d'évaluer la plage de variation et d'apporter une meilleure connaissance des cotations fonctionnelles nécessaires sur l'outil pour limiter ces divergences.

Le contrôle de l'intégrité de surface des alvéoles s'est avéré satisfaisant, sans jamais présenter de couches thermomécaniquement affectées, mais uniquement de faibles couches enchâssées de 7 à 11 µm d'épaisseur. La mesure de la géométrie des alvéoles a été confrontée à la mesure des efforts de coupe, identifiant la principale cause du défaut de rectitude des alvéoles. Nous avons donc cherché à diminuer cette oscillation en allant à l'encontre des préconisations actuelles, c'est-à-dire en utilisant un pas sous multiple de la longueur à brocher. A partir des observations précédentes et de la simulation des efforts, une proposition de re-conception des broches a été faite, puis testée en situation industrielle. Cette solution a diminué de près de 40% les efforts maximaux et a permis de limiter très fortement la variation des efforts suivant l'axe *x.* Elle a permis d'améliorer la rectitude des alvéoles brochées de 17 µm à 2 µm.

Après avoir amélioré la conception des broches pied de sapin, le quatrième chapitre a mis sous surveillance les opérations de brochage. La bibliographie a identifié quel type de capteur s'avérait le plus pertinent pour détecter des incidents d'usinage sur notre procédé, et quels critères étaient les plus adaptés. Un système d'enregistrement automatique des efforts a été installé sur une brocheuse de production pour disposer de données et développer une surveillance efficace et fiable. Des séries sans incident, avec usure catastrophique et avec rupture de broche ont servi de test aux différentes méthodes de surveillance possibles.

L'utilisation de la simulation des efforts pour générer des courbes étalons a été fortement handicapée par les tolérances des outils qui entraînent une forte dispersion des efforts. La surveillance par extraction de caractéristiques présente les meilleurs résultats, sans jamais générer de détection intempestive ou de non détection d'incident. La méthode par calcul de la moyenne et de l'écart-type détecte l'usure catastrophique des broches, une alarme peut avertir l'opérateur. La dérivée du signal n'est sensible qu'à la rupture des outils et pourra déclencher un arrêt des avances pour protéger la machine.

En conclusion, les objectifs industriels initiaux sont atteints avec la proposition d'une méthodologie de modélisation des efforts de coupe en brochage, de re-conception des broches pour limiter les perturbations d'usinage et de surveillance du procédé.

Les perspectives suite à ces travaux peuvent être selon diverses directions :

- le développement de modèles de coupe analytiques pourrait être un chemin à suivre pour améliorer la simulation des efforts et prédire l'intégrité de surface des pièces brochées. Il s'agirait alors de calculer non seulement des efforts, mais aussi la thermique de la coupe et les contraintes résiduelles résultantes, en modélisant un chargement thermomécanique réaliste des pièces comme déjà réalisé en tournage par [Valiorgue2008],
- actuellement la surveillance n'est basée que sur la mesure des efforts suivant une direction et deux critères. D'autres signaux (mesure triaxiale des efforts) et d'autres critères (à partir de ces signaux supplémentaires) apporteraient de la redondance dans la surveillance pour la rendre plus robuste. De plus, il peut être opportun de s'intéresser à la surveillance de l'intégrité de surface des pièces brochées, par des critères spécifiques à cette dernière.
- l'étude sur la coupe nous a démontré la possibilité de diminuer les efforts par une augmentation des vitesses de coupe. Cette voie améliorerait donc sensiblement la qualité des pièces produites et fortement la productivité. Mais elle nécessite le développement d'outils en carbure et une profonde reconsidération du procédé de brochage (conception des outils coupants, performance des machines actuelles). La méthode développée dans cette thèse serait extrapolable à ce nouveau contexte mais nécessiterait une nouvelle caractérisation des phénomènes de coupe comme de nombreux essais, à des vitesses bien supérieures aux 2 m/min de vitesse de coupe actuels,
- le développement d'un logiciel de simulation des efforts est vu par l'industriel comme un moyen de mieux maîtriser la conception des outils de brochage. Ce logiciel ce nomme 'ECoBroch' (Efforts de Coupe en Brochage) et il est en cours de déploiement par Turbomeca,
- la mesure automatique de la géométrie des broches serait, pour l'industriel, un gain de temps et un moyen de détecter par avance des outils ayant des défauts,
- la méthode de surveillance proposée pourrait être déployée sur toutes les brocheuses de Turbomeca mais surtout, elle pourrait être réfléchie en amont des prochains investissements pour placer des capteurs intégrés à la machine ou en utilisant la chaîne d'asservissement de celle-ci.

Références bibliographiques

[Abellan-Nebot2010] Abellan-Nebot, J. V., & Subirón, F. R. (2010). A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *47*(1-4), 237-257.

[Abu-Mahfouz2003] Abu-Mahfouz, I. (2003). Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *43*(7), 707-720.

[Albrecht1960] Albrecht, P. (1960). New Developments in the Theory of the Metal-Cutting Process: Part I. The Ploughing Process in Metal Cutting. *Journal of Engineering for Industry*, *82*, 348.

[Alvanos2012] Alvanos, I., & Oconnor, J. J. (2012). *U.S. Patent No. 8,221,083*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

[Antar2011] Antar, M. T., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Jones, D., & Perez, R. (2011). Productivity and workpiece surface integrity when WEDM aerospace alloys using coated wires. *Procedia Engineering*, *19*, 3-8.

[Armarego1985] Armarego, E. J. A., & Whitfield, R. C. (1985). Computer based modelling of popular machining operations for force and power prediction. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, *34*(1), 65-69.

[ASM 1995] ASM Handbook. " Volume 16: Machining " (1995). *ASM International, Metals Park, Ohio, USA*.

[Axinte2003] Axinte, D. A., & Gindy, N. (2003). Tool condition monitoring in broaching. *Wear*,*254*(3), 370-382.

[Axinte2004] Axinte, D. A., Gindy, N., Fox, K., & Unanue, I. (2004). Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *44*(10), 1091-1108.

[Axinte2006] Axinte, D. A. (2006). Approach into the use of probabilistic neural networks for automated classification of tool malfunctions in broaching. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *46*(12), 1445-1448.

[Axinte2007] Axinte, D. A. (2007). An experimental analysis of damped coupled vibrations in broaching. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *47*(14), 2182-2188.

[Bailon2000] Baillon, J. (2000). Des matériaux, 3e édition. *Presses Internationales Polytechniques, Montréal*.

[Beakaev2011] Bekaev, A. A., Mikhailov, V. A., & Kuz'minskii, D. L. (2011). Influence of the hole in the blank on the quality and precision of the hole obtained by broaching. *Russian Engineering Research*, *31*(4), 362-364.

[Bellais1997] BELLAIS, C. (1997). Outils coupants: Brochage. *Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique*, (B7087), B7087-1.

[Bellais1998] Bellais, C. (1998) *Brocheuses*. Ed. Techniques Ingénieur, (B7170), B7170-1.

[Berranger2012] Berranger, A. (2012).Optimisation de la tenue mécanique et des processus industriels de développement et fabrication des attaches pales – disques de roues de turbines (Doctoral dissertation, INSA Toulouse).

[Bertin1979] Bellais, C. (1979). Outils coupants: Brochage. *Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique*, (B7087), B7087-1.

[Bertok1983] Bertok, P., Takata, S., Matsushima, K., Ootsuka, J., & Sata, T. (1983). A system for monitoring the machining operation by referring to a predicted cutting torque pattern. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, *32*(1), 439-444.

[Bissey 2005] Bissey, S. (2005). Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable à des familles d'outils: cas du fraisage des aciers traités thermiquement (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).

[Bonnet2009] Bonnet, S. (2009). *Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite fibre de carbone* (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).

[Boothroy1963] Boothroyd, G. E. (1963). Temperatures in orthogonal metal cutting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, *177*(1), 789-810.

[Boud2006] Boud, F., & Gindy, N. N. (2008). Application of multi-sensor signals for monitoring tool/workpiece condition in broaching. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *21*(6), 715-729.

[Budak1996] Budak, E., Altintas, Y., & Armarego, E. J. A. (1996). Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data. *Journal of engineering for industry*,*118*(2), 216-224.

[Budak2001] Budak, E. (2001). Broaching process monitoring. In *Proceedings of Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining, Metz-France* (pp. 251-260).

[Byrne1995] Byrne, G., Dornfeld, D., Inasaki, I., Ketteler, G., König, W., & Teti, R. (1995). Tool condition monitoring (TCM)—the status of research and industrial application. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, *44*(2), 541-567.

[Campocasso2011] Campocasso, S., Poulachon, G., Costes, J. P., & Perez Duarte, A. (2011). Cutting forces modeling in finish turning of Inconel 718 alloy with round inserts.*Advanced Materials Research*, *223*, 75-84.

[Claudin2008] Claudin, C., & Rech, J. (2009). Development of a new rapid characterization method of hob's wear resistance in gear manufacturing—Application to the evaluation of various cutting edge preparations in high speed dry gear hobbing.*Journal of Materials Processing Technology*, *209*(11), 5152-5160.

[Connolley2004] Connolley, T., Starink, M. J., & Reed, P. A. S. (2004). Effect of broaching on high-temperature fatigue behavior in notched specimens of INCONEL 718.*Metallurgical and Materials Transactions A*, *35*(3), 771-783.

[Coste2007] Costes, J. P., Guillet, Y., Poulachon, G., & Dessoly, M. (2007). Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *47*(7), 1081-1087.

[Debard2010] Debard, P., Coulon, B., Batista, N. (2010) A description of a statistical approach for determination of relevant criteria on monitored milling tool life trials of Inconel 718, *Intercut 2010 Conference ,Cluny, France*.

[Derrien2006] Derrien, M . (2006) Brochage du TA6V, rapport stage Snecma.

[Devaux2004] Devaux, A. (2004) Amélioration des propriétés mécaniques de l'UDIMET 720, *Rapport de stage Turbomeca*.

[Dimla2000] Dimla, D. E., & Lister, P. M. (2000). On-line metal cutting tool condition monitoring.: II: tool-state classification using multi-layer perceptron neural networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *40*(5), 769-781.

[Dutilh2011] Dutilh, V. (2012).Maîtrise de l'intégrité de surface par la surveillance d'usinage sur les pièces critiques en superalliage de turbomoteurs aéronautiques (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse).

[El-wardany2008a] El-Wardany, T. I., Smith, P. G., Reynolds, W., Ng, E., & Adams, K. V. (2008).*U.S. Patent Application 12/164,311*.

[El-wardany2008b] El-Wardany, T. I., Zadrozny, G. P., Hoffman, L. A., Smith, P. G., & Wysocki, J. B. (2008). *U.S. Patent Application 12/164,350*.

[El-wardany2009] El-Wardany, T. I., Butler, S. L., Young Jr, B. B., Wusatowska-Sarnek, A. M., Campbell Jr, J. D., Elliott, J., ... & Cox, R. C. (2009). *European Patent Application 20090250881*.

[Engin2001] Altintas, Y., & Engin, S. (2001). Generalized modeling of mechanics and dynamics of milling cutters. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, *50*(1), 25-30.

[Everson1999] Everson, C. E., & Hoessein Cheraghi, S. (1999). The application of acoustic emission for precision drilling process monitoring. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *39*(3), 371-387.

[Ezugwu1999] Ezugwu, E. O., Wang, Z. M., & Okeke, C. I. (1999). Tool life and surface integrity when machining Inconel 718 with PVD-and CVD-coated tools.*Tribology transactions*, *42*(2), 353-360.

[Gea2012] Gea, A. (2012).Messure d'alvéoles pied de sapin sur machine Werth wisiocheck. *Rapport de stage Turbomeca.*

[Germain2011] Germain, D. (2005).Développement d'un modèle d'efforts de coupe intégrant le contact en dépouille : Application au tournage de superfinition du cuivre Cu-c2 (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).

[Hosseini2013] Hosseini, S. A. (2013). Model based simulation of broaching operation: cutting mechanics, surface integrity, and process optimization.

[Jantunen2002] Jantunen, E. (2002). A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,*42*(9), 997-1010.

[Jemielniak1995] Jemielniak, K., & Kosmol, J. (1995). Tool and process monitoring—state of art and future prospects. *Scientific papers of the institute of mechanical engineering and automation of the Technical University of Wroclaw*, *61*, 90-112.

[Jemielniak1999] Jemielniak, K. (1999). Commercial tool condition monitoring systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *15*(10), 711-721.

[Jeong2002] Jeong, Y. H., & Cho, D. W. (2002). Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *42*(14), 1559-1566.

[Kamat2009] Kamath, R. C., & Kuttan, A. K. (2009). Determination of proportionality constants from cutting force modelling experiments during broaching operation. *Maejo international journal of science and technology*, *3*(2), 343-351.

[Kamata2007] Kamata, Y., & Obikawa, T. (2007). High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools. *Journal of Materials Processing Technology*,*192*, 281-286.

[Kim1996] Kim, T. Y., & Kim, J. (1996). Adaptive cutting force control for a machining center by using indirect cutting force measurements. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *36*(8), 925-937.

[Kishawy2012] Kishawy, H. A., Hosseini, A., Moetakef-Imani, B., & Astakhov, V. P. (2012). An energy based analysis of broaching operation: Cutting forces and resultant surface integrity. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, *61*(1), 107-110.

[Kloke2010] Klocke, F., Brockmann, M., Veselovac, D.(2010) "Definition of surface integrity Process Window for milling based on Péclet Number," *Intercut 2010,* Conference ,*Cluny, France*.

[Klocke2012] Klocke, F., Gierlings, S., & Veselovac, D. (2012). Concept for Temperature Control in Broaching Nickel-Based Alloys. *Key Engineering Materials*, *523*, 469-474.

[Kloke2013] Klocke, F., Lung, D., & Buchkremer, S. (2013). Inverse Identification of the Constitutive Equation of Inconel 718 and AISI 1045 from FE Machining Simulations. *Procedia CIRP*, *8*, 211-216.

[Kokturk2004] Kokturk, U., & Budak, E. (2004). Optimization of broaching tool design. In*Proceedings of the Intelligent Computation in Manufacturing Engineering–4 Conference, CIRP ICME'04, Sorrento*.

[Kong 2011] Kong, X., Li, B., Jin, Z., & Geng, W. (2011). Broaching performance of puperalloy GH4169 Based on FEM. *Journal of Materials Science & Technology*, *27*(12), 1178-1184.

[Kovac2011] Kovač, P., Mankova, I., Gostimirović, M., Sekulić, M., & Savković, B. (2011). A review of machining monitoring systems. *Journal of Production Engineering, FTN, Novi Sad, Vol14*, 1-6.

[Krimmel1990] Krimmel, M. J. (1990):, "Turbineneschеiben in einer aufspannung raumen und messen."*Werkstatt und betrieb* 123(6), 469-471.

[Lee1995] Lee, J. M., Choi, D. K., Kim, J., & Chu, C. N. (1995). Real-time tool breakage monitoring for NC milling process. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*,*44*(1), 59-62.

[Lee1996] Lee, P., & Altintaş, Y. (1996). Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *36*(9), 1059-1072.

[Legutko2007] Legutko, S., Wieczorowski, K., & Kedzierski, T. Analysis of the Problem of Broach Wedges Wear.

[Legutko2010] Legutko, S., Kluk, P., & Stoić, A. (2011). Research of the surface roughness created during pull broaching process. *Metalurgija-Zagreb*, *50*(4), 245.

[Liang2004] Liang, M., Yeap, T., Hermansyah, A., & Rahmati, S. (2004). Fuzzy control of spindle torque for industrial CNC machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *43*(14), 1497-1508.

[Makarov2008] Makarov, V. F., Tokarev, D. I., & Tyktamishev, V. R. (2008). High speed broaching of hard machining materials. *International Journal of Material Forming*, *1*(1), 547-550.

[Maksimov2011] Maksimov, Y. V., Bekaev, A. A., Mikhailov, V. A., & Kuz'minskii, D. L. (2011). Predicting the quality of a machined surface under an impact load at the beginning of piercing. *Russian Engineering Research*, *31*(5), 435-438.

[Mandrile2012] Mandrile, S., Dessein, G., Denape, J., Paris, J-Y., Cazenave-Laroche, G., Vernault, C. .(2012) "Identification and modelization of cutting phenomena in broaching to understand tool wear," MUGV 2012, staint-etienne, France.

[Mandrile2013] Mandrile, S., Dessein, G., Denape, J., Paris, J-Y., Cazenave-Laroche, G., Vernault, C. (2013) Development of an in-house cutting forces simulation for fir tree broaching process , International Journal of Machining and Machinability of Materials. In press, http://www.inderscience.com/jhome.php?jcode=ijmmm.

[Manzano2013] Manzano, Q. (2013). Développement d'un simulateur d'efforts en brochage. *Rapport de stage Turbomeca.*

[Merchant 1945] Merchant, M. E. (1945). Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. *Journal of applied physics*, *16*(5), 267-275.

[Milfelner2003] Milfelner, M., & Cus, F. (2003). Simulation of cutting forces in ball-end milling.*Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *19*(1), 99-106.

[Mo2001] Mo, S. P. (2001). An experimental and finite element investigation of the broaching process (Doctoral dissertation, University of Nottingham).

[Mo2005] Mo, S. P., Axinte, D. A., Hyde, T. H., & Gindy, N. N. Z. (2005). An example of selection of the cutting conditions in broaching of heat-resistant alloys based on cutting forces, surface roughness and tool wear. *Journal of materials processing technology*, *160*(3), 382-389.

[Molokhov1980] Molokhov, I. F., & Makarov, V. F. (1980). Effectiveness of high-speed broaching of difficult-to-work materials. *Stanki i Instrumenty*, (4), 29-30.

[Monday1960] Monday, C. T. (1960). *Broaching*. Brighton, London.

[Moreau2010] Moreau, V. (2010). Etude dynamique de l'usinage et de l'interaction pièce-outil par mesure des déplacements (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).

[NF 66-520] NF-E66-520-1, *Couple-Outil-Matière: Présentation générale*. Norme

[NF E 66-620] NF-E66-620, *Brochage*. Norme

[Oxley1989] Oxley, P. L. B. (1989). The mechanics of machining: an analytical approach to assessing machinability Ellis Horwood. *Chichester, UK*.

[Özelkan2007] Özelkan, E., Öztürk, Ö., & Budak, E. (2007). Optimization of broaching design.

[Özelkan2011] Ozelkan, E. C., Ozturk, O., & Budak, E. (2011). Identifying parameters of a broaching design using non-linear optimisation. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, *12*(3), 244-252.

[Ozlu2010] Özlü, E., Engin, Ş., Cook, C., El-Wardany, T., & Budak, E. (2010). Simulation of broaching operations for tool design optimization, *Proceeding of the 2nd International CIRP Conference on Process Machine Interactions*, Vancouver, Canada.

[Ozturk2003] Ozturk, O. (2003). *Modelling of broaching process* (Doctoral dissertation, M. Sc. Thesis, Industrial Engineering, Sabanci University, Istanbul, Turkey).

[Perrin2007] Perrin, G. (2007).Etude métallurgique, mécanique et thermique de l'intégrité de surface des pièces percées au foret hélicoïdal dans l'inconel718tr -détection et quantification des anomalies par process monitoring (Doctoral dissertation, Mines de Paris).

[Popa2012] Popa, A. (2012).Proposition de stratégies de surveillance d'usinage en perçage de superalliage Base nickel, application à l'usure de l'outil (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse).

[Prickett1999] Prickett, P. W., & Johns, C. (1999). An overview of approaches to end milling tool monitoring. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *39*(1), 105-122.

[Rech2005] Rech, J. (2006). Influence of cutting edge preparation on the wear resistance in high speed dry gear hobbing. *Wear*, *261*(5), 505-512.

[Reed1999] Reed, R. C., Jackson, M. P., & Na, Y. S. (1999). Characterization and Modeling of the Precipitation of the Sigma Phase in UDIMET 720 and UDIMET 720LI. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *30*(3), 521-533.

[Ritou2006a] Ritou, M., Garnier, S., Furet, B., & Hascoet, J. Y. (2006). A new versatile in-process monitoring system for milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *46*(15), 2026-2035.

[Ritou2006b] Ritou, M. (2006). Surveillance d'usinage en fraisage de pièces complexes par un suivi de la broche (Doctoral dissertation, Ecole centrale de nantes-ECN).

[Sajeev1997a] Sajeev, V., Vijayaraghavan, L., & Rao, U. R. K. (2000). Effect of tool-work deflections on the shape of a broached hole. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, *28*(1), 88-92.

[Sajeev1997b] Sajeev, V., Vijayaraghavan, L., & Rao, U. R. K. (2000). An analysis of the effects of burnishing in internal broaching. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, *28*(2), 163-173.

[salgado2009] Salgado, D. R., Alonso, F. J., Cambero, I., & Marcelo, A. (2009). In-process surface roughness prediction system using cutting vibrations in turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *43*(1-2), 40-51.

[Saturley2000] Saturley, P. V., & Spence, A. D. (2000). Integration of milling process simulation with on-line monitoring and control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *16*(2), 92-99.

[Schulze2012] Schulze, V., Boev, N., & Zanger, F. (2012). Simulation of metal cutting process with variable cutting thickness during broaching. *Procedia CIRP*, *1*, 437-442.

[Shchedrin2008] Shchedrin, A. V., Ul'yanov, V. V., & Bekaev, A. A. (2008). Combined hole broaching with lubricant counterpressure. *Russian Engineering Research*, *28*(1), 35-38.

[Shchedrin2009] Shchedrin, A. V., Ul'yanov, V. V., Bekaev, A. A., & Chikhacheva, N. Y. (2009). Efficient hole broaching with regularized surface microgeometry of the deforming elements. *Russian Engineering Research*, *29*(9), 911-915.

[Shi2007a] Shi, D., & Gindy, N. N. (2007). Tool wear predictive model based on least squares support vector machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(4), 1799-1814.

[Shi2007b] Shi, D., & Gindy, N. N. (2007). Development of an online machining process monitoring system: Application in hard turning. *Sensors and Actuators A: Physical*, 135(2), 405-414.

[Shi2007c] Shi, D., Axinte, D. A., & Gindy, N. N. (2007). Development of an online machining process monitoring system: a case study of the broaching process.*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *34*(1-2), 34-46.

[Stephenson1997] Stephenson, D. A., & Bandyopadhyay, P. (1997). Process-independent force characterization for metal-cutting simulation. *Journal of engineering materials and technology*, *119*(1), 86-94.

[Sutherland1996] Sutherland, J. W., Salisbury, E. J., & Hoge, F. W. (1997). A model for the cutting force system in the gear broaching process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *37*(10), 1409-1421.

[Taricco1995] Taricco, F. (1995). Effect of machining and shot peening on the residual stresses of superalloy turbine discs. *AM SOC MECH ENG PAP*, 6.

[Terry1986] Terry, W. R., & Cutright, K. W. (1986). Computer aided design of a broaching process. *Computers & industrial engineering*, *11*(1), 576-580.

[Terry1992] Terry, W. R., Karny, R., & Huang, Y. J. (1992). Concurrent tool and production system design for a surface broach cutting tool: a knowledge-based systems approach. *The international journal of production research*, *30*(2), 219-240.

[Teti2010] Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G., & Dornfeld, D. (2010). Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*,*59*(2), 717-739.

[Tlusty1983] Tlusty, J., & Andrews, G. C. (1983). A critical review of sensors for unmanned machining. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, *32*(2), 563-572.

[Tönshoff1988] Tönshoff, H. K., Wulfsberg, J. P., Kals, H. J. J., König, W., & Van Luttervelt, C. A. (1988). Developments and trends in monitoring and control of machining processes. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, *37*(2), 611-622.

[Tounsi2002] Tounsi, N., Vincenti, J., Otho, A., & Elbestawi, M. A. (2002). From the basic mechanics of orthogonal metal cutting toward the identification of the constitutive equation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,*42*(12), 1373-1383.

[Tresca1878] Tresca, M. H. (1878). On further applications of the flow of solids. *Journal of the Franklin Institute*, *106*(6), 396-404.

[Vafaei2002] Vafaei, S., Rahnejat, H., & Aini, R. (2002). Vibration monitoring of high speed spindles using spectral analysis techniques. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *42*(11), 1223-1234.

[Valiorgue2008] Valiorgue, F. (2008). *Simulation des processus de génération de contraintes résiduelles en tournage du 316L. Nouvelle approche numérique et expérimentale* (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne).

[Vogtel2013] Vogtel, P., Klocke, F., Puls, H., Buchkremer, S., & Lung, D. (2013). Modelling of Process Forces in Broaching Inconel 718. *Procedia CIRP*, *8*, 408-413.

[Wagner2011] Wagner, V. (2011). Amélioration de la productivité en usinage d'un titane réfractaire : le Ti5553 (Doctoral dissertation,Institut National Polytechnique de Toulouse).

[Waldorf2006] Waldorf, D. J. (2006). A simplified model for ploughing forces in turning. *Journal of manufacturing processes*, *8*(2), 76-82.

[Zemzemi2007] Zemzemi, F. (2007). *Caracterisation de modèles de frottement aux interfaces piece-outil-copeau en usinage: Application au cas de l'usinage des aciers et de l'inconel 718* (Doctoral dissertation).

[Zhang2012] Zhang, Y. L., & Chen, W. Y. (2012). Finite element eodeling of the broaching process of Inconel718. In *Materials Science Forum* (Vol. 697, pp. 39-43).

Annexes

A.1 : Analyse des régressions linéaires issues des essais de brochage

Cette première annexe regroupe les résultats des régressions linéaires issues des trois modèles (Partie IV.2.c page 41) pour les essais de brochage:

- Le premier modèle empirique (équation (I-23) et (I-24) page 41) nécessite uniquement les coefficients K_t et K_r.
- Le deuxième modèle empirique prend en compte les efforts issus de la face de coupe (équation (I-25) et (I-26) page 41) avec les coefficients K_{tc} et K_{rc}, mais aussi les efforts dus à l'indentation de l'outil dans la pièce par les coefficients K_{te} et K_{re}.
- Le modèle mécanistique (équation (I-11) à (I-13) page 22), réutilise les coefficients K_{te} et K_{re} pour l'indentation mais nécessite aussi de modéliser la contrainte de cisaillement primaire (k_{ab}), l'angle de cisaillement (ϕ), et le coefficient de frottement sur la face de coupe (β).

Pour ces 8 coefficients, l'analyse des régressions linéaires se présente toujours de la même manière :

1. la loi modélisant le coefficient est donnée,
2. un premier tableau traite des statistiques de la régression linéaire en général, il fournit le coefficient de corrélation, l'écart-type des valeurs et le nombre de valeurs ayant servi aux calculs,
3. un deuxième tableau réalise l'analyse de variance de la régression linéaire, avec les degrés de liberté du modèle et les valeurs F et F-critique du test de Fisher,
4. le dernier tableau donne les valeurs des coefficients de la loi, et les statistiques sur les coefficients,
5. un premier graphique (à droite) trace les valeurs issues de la modélisation en fonction des mesures,
6. le deuxième graphique (à gauche) est un histogramme de la population en fonction du pourcentage d'erreur entre la modélisation et la mesure.

Analyse de la régression linéaire du coefficient *kt (brochage)* :

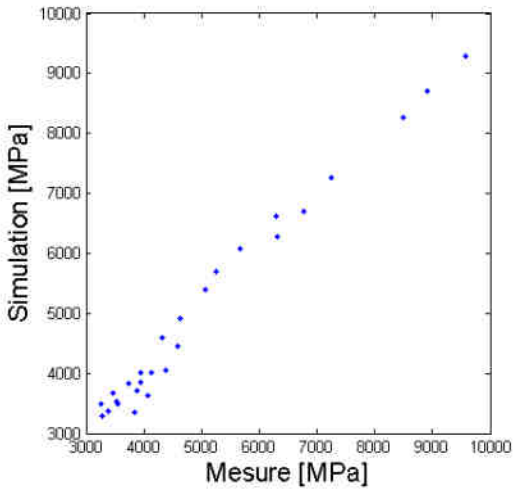
$$K_t = a_t\, V_c + b_t\, f + c_t\gamma + d_t\, V_c\, f + e_t\, V_c\, f + f_t\, V_c\, \gamma + g_t\, f\, \gamma + h_t\, V_c^2 + i_t\, f^2 + j_t\, \gamma^2 + cst_t$$

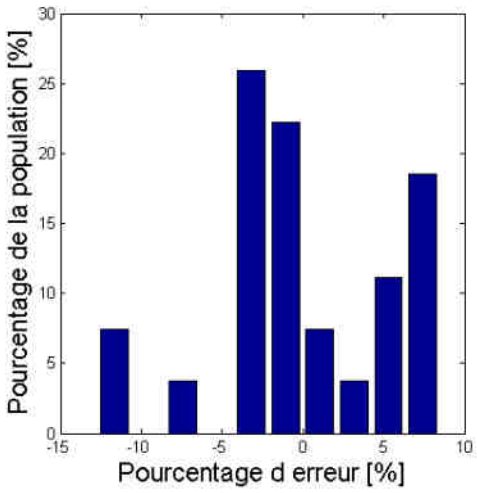
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,99
Ecart-type	313,07
Observations	27,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	9,00	83289996,20	9254444,02	94,4196009	9,94904E-13
Résidus	17,00	1666238,23	98014,01		
Total	26,00	84956234,43			

Variable	*Coefficients*	*ecart-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	17864,25	1189,92	15,01	0,00	15353,74	20374,77
Vc	-463,67	294,50	-1,57	0,13	-1085,02	157,67
f	-2541,92	167,16	-15,21	0,00	-2894,59	-2189,25
γ	-569,42	144,13	-3,95	0,00	-873,51	-265,33
Vc*f	19,47	14,79	1,32	0,21	-11,73	50,68
Vc*γ	1,24	9,04	0,14	0,89	-17,83	20,31
f*γ	36,50	6,03	6,06	0,00	23,78	49,21
Vc²	19,64	31,95	0,61	0,55	-47,78	87,05
f²	130,25	12,47	10,44	0,00	103,93	156,57
γ²	11,19	5,21	2,15	0,05	0,20	22,18





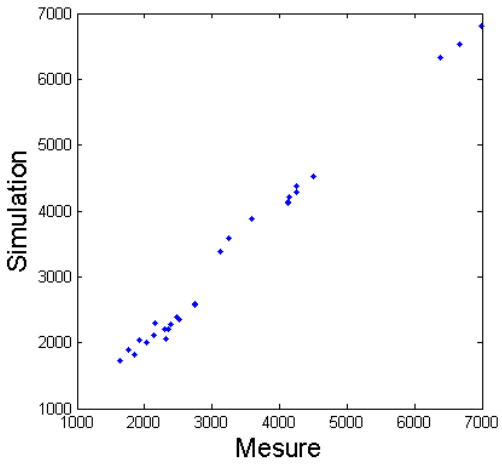
Analyse de la régression linéaire du coefficient *kr (brochage)* :

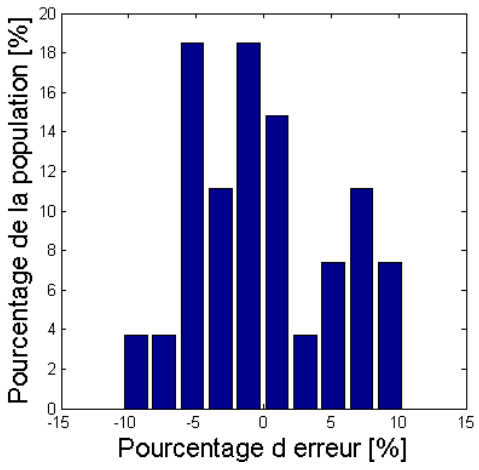
$$K_r = a_r\, V_c + b_r\, f + c_r\gamma + d_r\, V_c\, f + e_r\, V_c\, f + f_r\, V_c\, \gamma + g_r\, f\, \gamma + h_r\, V_c^2 + i_r\, f^2 + j_r\, \gamma^2 + cst_r$$

Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,99
Erreur-type	186,75
Observations	27,00

ANALYSE DE VARIANCE	df	SS	MS		
	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	9,00	58346116,30	6482901,81	185,89	3,51667E-15
Résidus	17,00	592879,64	34875,27		
Total	26,00	58938995,94			

Variable	*Coefficients*	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	13037,25	709,80	18,37	0,00	11539,71	14534,79
Vc	-259,76	175,67	-1,48	0,16	-630,39	110,88
f	-1855,73	99,71	-18,61	0,00	-2066,10	-1645,36
γ	-397,65	85,98	-4,63	0,00	-579,04	-216,25
Vc*f	-1,40	8,82	-0,16	0,88	-20,02	17,21
Vc*γ	5,62	5,39	1,04	0,31	-5,76	16,99
f*γ	31,04	3,59	8,64	0,00	23,46	38,62
Vc²	12,22	19,06	0,64	0,53	-28,00	52,43
f²	90,43	7,44	12,15	0,00	74,73	106,12
γ²	3,11	3,11	1,00	0,33	-3,44	9,67





Analyse de la régression linéaire du coefficient *ktc (brochage)* :

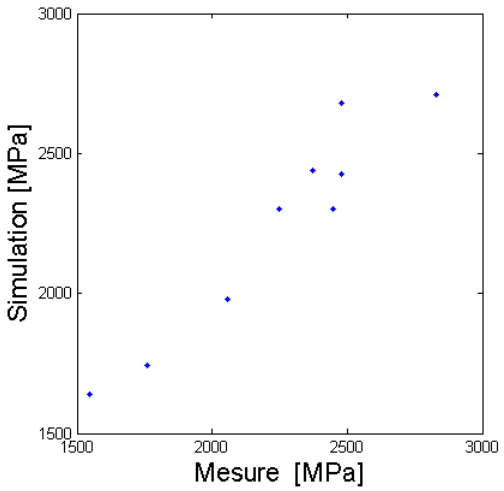
$$K_{tc} = a_{tc}\, V_c + + b_{tc}\gamma + c_{tc}\, V_c\, \gamma + + d_{tc}\, V_c^2 + e_{tc}\, \gamma^2 + + cst_{tc}$$

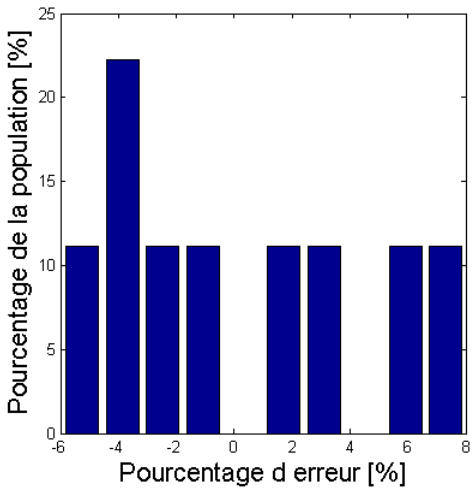
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,96
Erreur-type	183,16
Observations	9,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	5,00	1170845,00	234169,00	6,98006066	0,070303343
Résidus	3,00	100644,83	33548,28		
Total	8,00	1271489,83			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	-185,02	1048,74	-0,18	0,87	-3522,58	3152,55
γ	423,19	140,39	3,01	0,06	-23,58	869,97
Vc	-202,69	287,52	-0,70	0,53	-1117,71	712,33
Vc*γ	-1,72	9,16	-0,19	0,86	-30,87	27,42
γ^2	-13,33	5,18	-2,57	0,08	-29,82	3,15
Vc^2	16,40	32,38	0,51	0,65	-86,65	119,44





Analyse de la régression linéaire du coefficient *Krc (brochage)* :

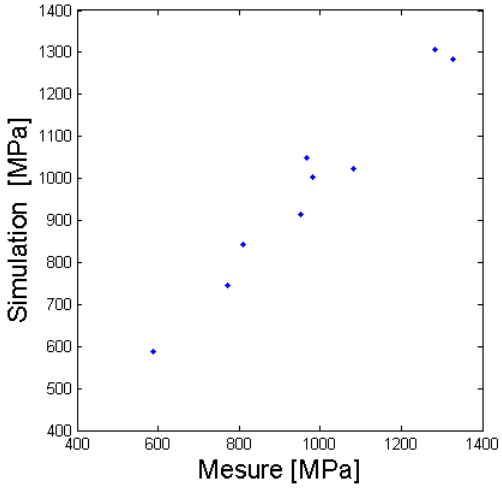
$$K_{rc} = a_{rc}\, V_c + + b\gamma + c_{rc}\, V_c\, \gamma + + d_{rc}\, V_c^2 + e_{rc}\, \gamma^2 + cst_{rc}$$

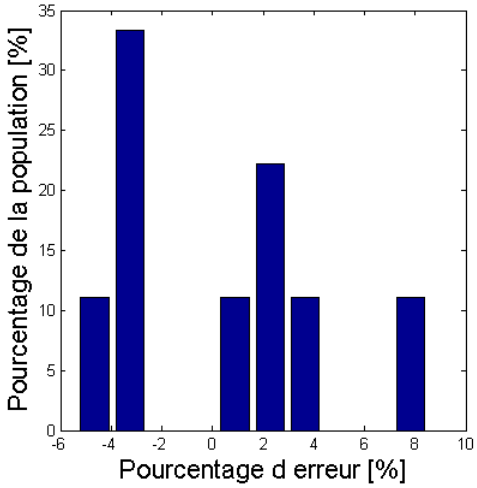
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,98
Erreur-type	73,84
Observations	9,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	5,00	435398,15	87079,63	15,9727977	0,022631872
Résidus	3,00	16355,24	5451,75		
Total	8,00	451753,39			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	3230,23	422,77	7,64	0,00	1884,80	4575,66
γ	-294,50	56,59	-5,20	0,01	-474,60	-114,39
Vc	-172,84	115,91	-1,49	0,23	-541,71	196,02
Vc*γ	-2,39	3,69	-0,65	0,56	-14,14	9,36
γ^2	11,60	2,09	5,55	0,01	4,95	18,25
Vc^2	12,50	13,05	0,96	0,41	-29,04	54,04





Analyse de la régression linéaire du coefficient *kte (brochage)* :

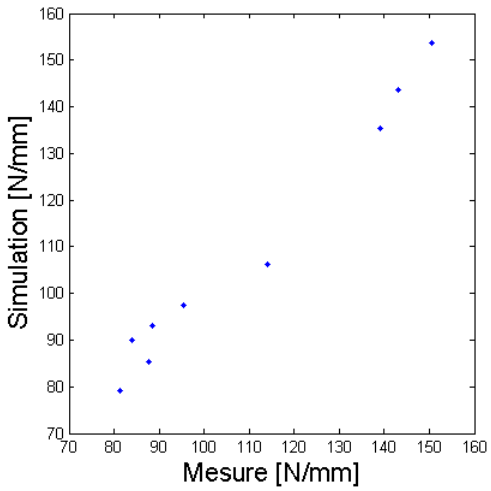
$$K_{te} = a_{te}\, V_c + + b_{te}\gamma + c_{te}\, V_c\, \gamma + + d_{te}\, V_c^2 + e_{te}\, \gamma^2 + cst_{te}$$

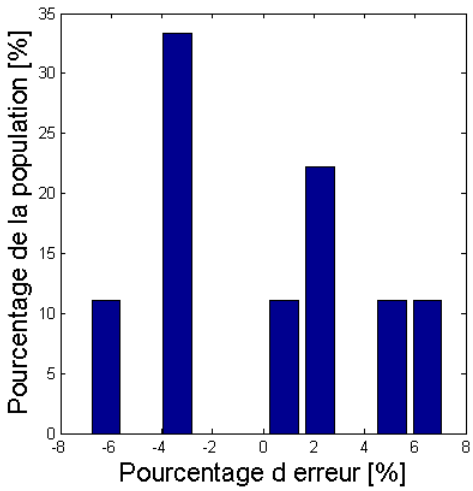
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,99
Erreur-type	7,30
Observations	9,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	5,00	6097,38	1219,48	22,8714399	0,013559215
Résidus	3,00	159,96	53,32		
Total	8,00	6257,33			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	314,12	41,81	7,51	0,00	181,06	447,17
γ	-24,12	5,60	-4,31	0,02	-41,94	-6,31
Vc	-6,97	11,46	-0,61	0,59	-43,45	29,51
Vc*γ	0,11	0,37	0,30	0,79	-1,05	1,27
γ^2	0,69	0,21	3,32	0,04	0,03	1,34
Vc^2	0,19	1,29	0,15	0,89	-3,91	4,30





Analyse de la régression linéaire du coefficient *Kre (brochage)* :

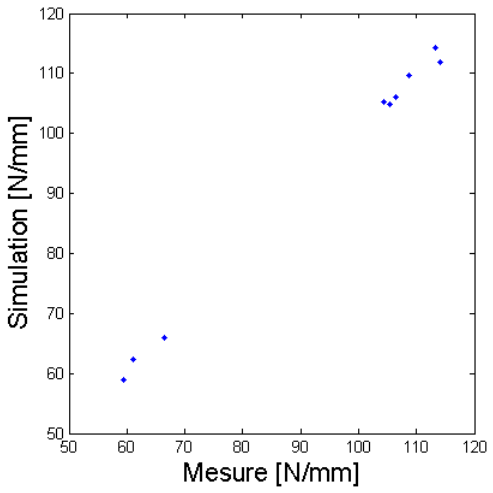
$$K_{re} = a_{re}\, V_c + + b_{re}\gamma + c_{te}\, V_c\, \gamma + + d_{re}\, V_c^2 + e_{re}\, \gamma^2 + cst_{re}$$

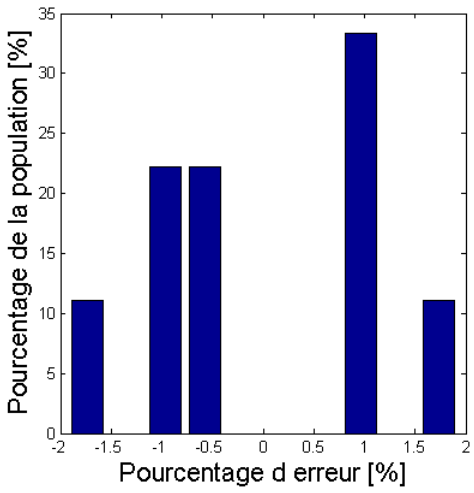
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,99
Erreur-type	1,91
Observations	9,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	5,00	4397,89	879,58	241,320865	0,000418433
Résidus	3,00	10,93	3,64		
Total	8,00	4408,82			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	61,27	10,93	5,61	0,01	26,48	96,06
γ	12,79	1,46	8,74	0,00	8,13	17,44
Vc	-3,69	3,00	-1,23	0,31	-13,23	5,84
Vc*γ	0,29	0,10	3,05	0,06	-0,01	0,59
γ^2	-0,73	0,05	-13,47	0,00	-0,90	-0,56
Vc^2	0,03	0,34	0,07	0,95	-1,05	1,10





Analyse de la régression linéaire de la contrainte de cisaillement *kab (brochage)* :

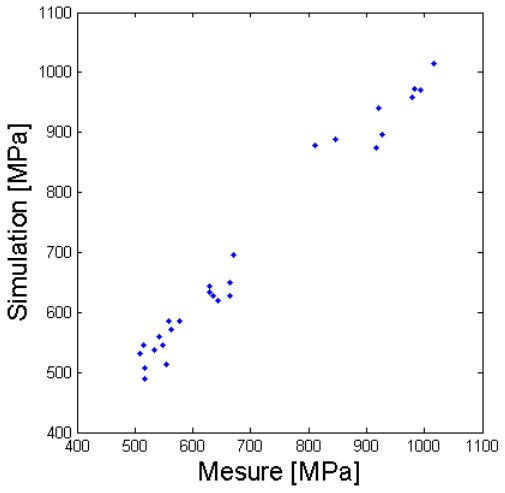
$$k_{ab} = a_{ab}\,V_c + b_{ab}\,f + c_{ab}\gamma + d_{ab}\,V_c\,f + e_{ab}\,V_c\,f + f_{ab}\,V_c\,\gamma + g_{ab}\,f\,\gamma + h_{ab}\,V_c^2 + i_{ab}\,f^2 + j_{ab}\,\gamma^2 + cst_{ab}$$

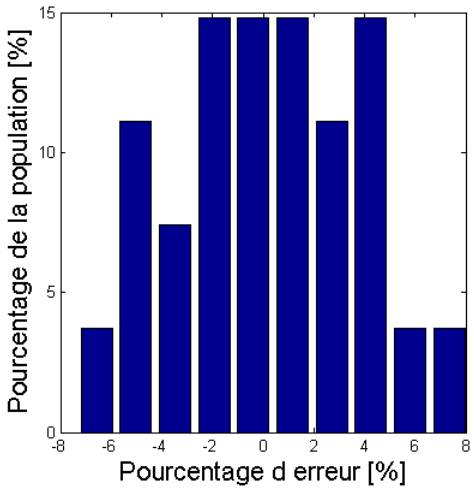
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,99
Erreur-type	32,74
Observations	27,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	9,00	817006,17	90778,46	84,6826176	2,44449E-12
Résidus	17,00	18223,74	1071,98		
Total	26,00	835229,91			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	833,70	124,44	6,70	0,00	571,15	1096,25
γ	-53,77	15,07	-3,57	0,00	-85,58	-21,97
Vc	-23,38	30,80	-0,76	0,46	-88,36	41,60
f	-3124,45	1748,14	-1,79	0,09	-6812,71	563,81
Vc*γ	-1,41	0,95	-1,49	0,15	-3,41	0,58
f*γ	-137,60	63,01	-2,18	0,04	-270,54	-4,66
Vc*f	-168,49	154,69	-1,09	0,29	-494,85	157,87
γ^2	4,09	0,54	7,50	0,00	2,94	5,24
Vc^2	5,17	3,34	1,55	0,14	-1,88	12,23
f^2	49996,31	13044,40	3,83	0,00	22475,04	77517,59





Analyse de la régression linéaire du coefficient β *(brochage)* :

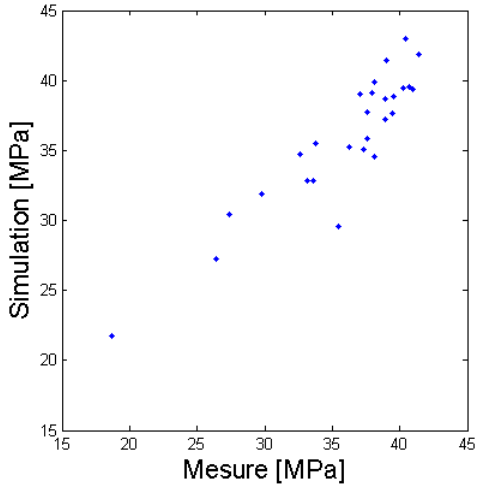
$$\beta = a_\beta V_c + b_\beta f + c_\beta \gamma + d_\beta V_c f + e_\beta V_c f + f_\beta V_c \gamma + g_\beta f \gamma + h_\beta V_c^2 + i_\beta f^2 + j_\beta \gamma^2 + cst_\beta$$

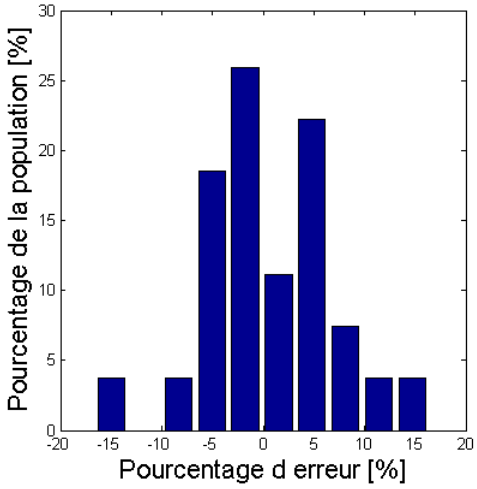
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,91
Erreur-type	2,68
Observations	27,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	9,00	599,42	66,60	9,30727135	5,25648E-05
Résidus	17,00	121,65	7,16		
Total	26,00	721,07			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	23,12	10,17	2,27	0,04	1,67	44,57
γ	1,09	1,23	0,89	0,39	-1,51	3,69
Vc	-4,31	2,52	-1,71	0,10	-9,62	0,99
f	552,41	142,83	3,87	0,00	251,07	853,75
Vc*γ	0,17	0,08	2,19	0,04	0,01	0,33
f*γ	-10,11	5,15	-1,96	0,07	-20,97	0,75
Vc*f	10,53	12,64	0,83	0,42	-16,13	37,20
γ²	-0,02	0,04	-0,49	0,63	-0,12	0,07
Vc²	0,00	0,27	-0,01	0,99	-0,58	0,57
f²	-3892,32	1065,77	-3,65	0,00	-6140,89	-1643,75





Analyse de la régression linéaire de l'angle de cisaillement $\boldsymbol{\phi}$ *(brochage)* :

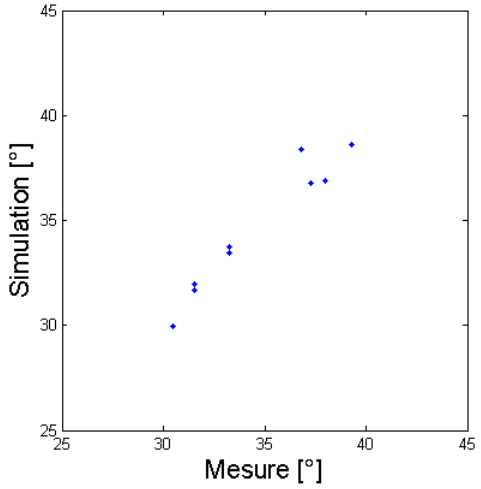
$$\phi = a_\phi V_c + b_\phi f + c_\phi \gamma + d_\phi V_c f + e_\phi V_c f + f_\phi V_c \gamma + g_\phi f \gamma + h_\phi V_c^2 + i_\phi f^2 + j_\phi \gamma^2 + cst_\phi$$

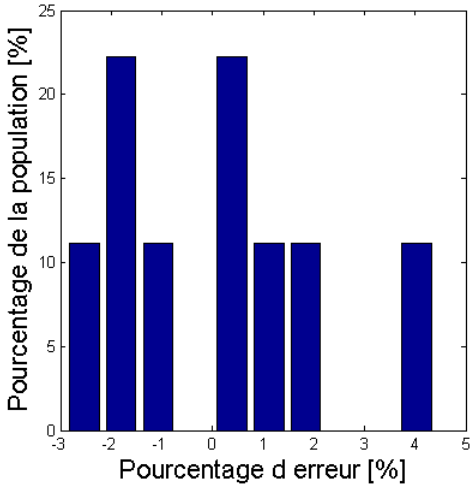
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,97
Erreur-type	0,97
Observations	27,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	9,00	238,04	26,45	28,113347	1,74572E-08
Résidus	17,00	15,99	0,94		
Total	26,00	254,04			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	18,93	3,69	5,14	0,00	11,16	26,71
γ	1,18	0,45	2,64	0,02	0,24	2,12
Vc	0,00	0,91	0,00	1,00	-1,93	1,93
f	547,35	51,79	10,57	0,00	438,08	656,61
Vc*γ	0,00	0,03	0,00	1,00	-0,06	0,06
f*γ	0,00	1,87	0,00	1,00	-3,94	3,94
Vc*f	0,00	4,58	0,00	1,00	-9,67	9,67
γ^2	-0,05	0,02	-3,25	0,00	-0,09	-0,02
Vc^2	0,00	0,10	0,00	1,00	-0,21	0,21
f^2	-5522,09	386,44	-14,29	0,00	-6337,41	-4706,78





A. 2 : Analyse des régressions linéaire issues des essais de tournage

Cette première annexe regroupe les résultats des régressions linéaires issues des trois modèles (Partie IV.2.c page 41) pour les essais de tournage:

- Le premier modèle empirique (équation (I-23) et (I-24) page 41) nécessite uniquement les coefficients K_t et K_r.
- Le deuxième modèle empirique prend en compte les efforts issus de la face de coupe (équation (I-25) et (I-26) page 41) avec les coefficients K_{tc} et K_{rc}, mais aussi les efforts dus à l'indentation de l'outil dans la pièce par les coefficients K_{te} et K_{re}.
- Le modèle mécanistique (équation (I-11) à (I-13) page 22), réutilise les coefficients K_{te} et K_{re} pour l'indentation mais nécessite aussi de modéliser la contrainte de cisaillement primaire (k_{ab}), l'angle de cisaillement (ϕ), et le coefficient de frottement sur la face de coupe (β).

Pour ces 8 coefficients, l'analyse des régressions linéaires se présente toujours de la même manière :

1. la loi modélisant le coefficient est donnée,
2. un premier tableau traite des statistiques de la régression linéaire en général, il fournit le coefficient de corrélation, l'écart-type des valeurs et le nombre de valeurs ayant servi aux calculs,
3. un deuxième tableau réalise l'analyse de variance de la régression linéaire, avec les degrés de liberté du modèle et les valeurs F et F-critique du test de Fisher,
4. le dernier tableau donne les valeurs des coefficients de la loi, et les statistiques sur les coefficients,
5. un premier graphique (à droite) trace les valeurs issues de la modélisation en fonction des mesures,
6. le deuxième graphique (à gauche) est un histogramme de la population en fonction du pourcentage d'erreur entre la modélisation et la mesure.

Analyse de la régression linéaire du coefficient *kt* (tournage) :

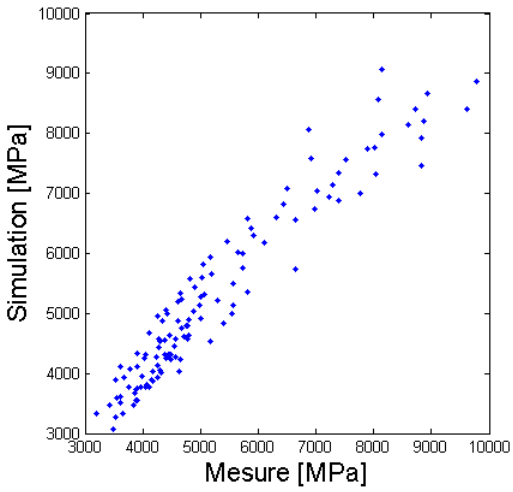
$$K_t = a_t\,V_c + b_t\,f + c_t\gamma + d_t\,V_c\,f + e_t\,V_c\,f + f_t\,V_c\,\gamma + g_t\,f\,\gamma + h_t\,V_c^2 + i_t\,f^2 + j_t\,\gamma^2 + cst_t$$

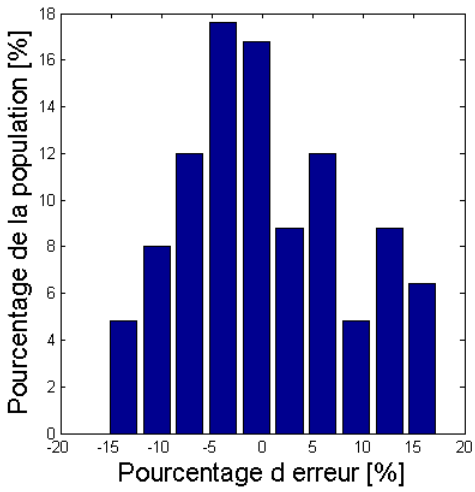
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,96
Erreur-type	462,27
Observations	125,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	9,00	279430306,96	31047811,88	145,292089	1,63253E-58
Résidus	115,00	24574623,32	213692,38		
Total	124,00	304004930,28			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	10258,32	269,76	38,03	0,00	9723,97	10792,67
γ	-107,69	25,08	-4,29	0,00	-157,38	-58,00
Vc	-33,00	31,20	-1,06	0,29	-94,80	28,80
f	-1192,71	62,40	-19,11	0,00	-1316,31	-1069,11
γ*Vc	1,08	0,92	1,18	0,24	-0,74	2,90
γ*f	5,73	1,84	3,12	0,00	2,09	9,37
Vc*f	-2,85	2,04	-1,40	0,17	-6,90	1,19
γ²	0,05	0,99	0,05	0,96	-1,90	2,01
Vc²	-0,70	1,22	-0,57	0,57	-3,12	1,72
f²	70,62	4,88	14,47	0,00	60,95	80,28





Analyse de la régression linéaire du coefficient *kr* (tournage) :

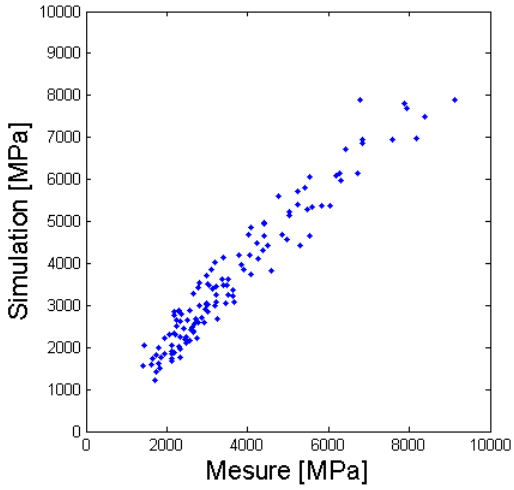
$$K_r = a_r\, V_c + b_r\, f + c_r\gamma + d_r\, V_c\, f + e_r\, V_c\, f + f_r\, V_c\, \gamma + g_r\, f\, \gamma + h_r\, V_c^2 + i_r\, f^2 + j_r\, \gamma^2 + cst_r$$

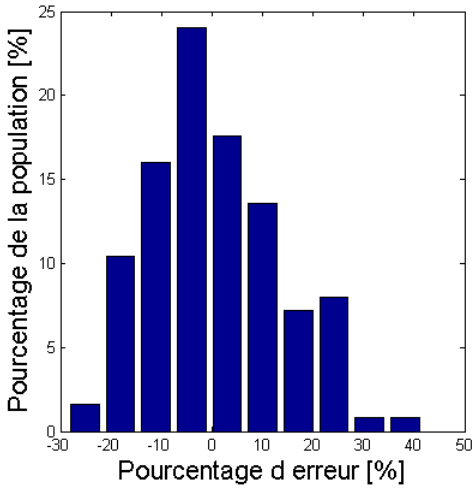
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,97
Erreur-type	452,97
Observations	125,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	9,00	335765470,95	37307274,55	181,826356	1,10885E-63
Résidus	115,00	23595790,35	205180,79		
Total	124,00	359361261,30			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	9042,82	264,34	34,21	0,00	8519,22	9566,42
γ	-204,72	24,58	-8,33	0,00	-253,41	-156,03
Vc	16,37	30,57	0,54	0,59	-44,18	76,93
f	-1237,08	61,14	-20,23	0,00	-1358,20	-1115,97
γ*Vc	1,70	0,90	1,89	0,06	-0,08	3,49
γ*f	10,12	1,80	5,62	0,00	6,55	13,69
Vc*f	-6,11	2,00	-3,05	0,00	-10,07	-2,14
γ²	0,90	0,97	0,93	0,35	-1,02	2,82
Vc²	-1,45	1,20	-1,21	0,23	-3,82	0,92
f²	73,86	4,78	15,44	0,00	64,39	83,33





Analyse de la régression linéaire du coefficient *ktc* (tournage) :

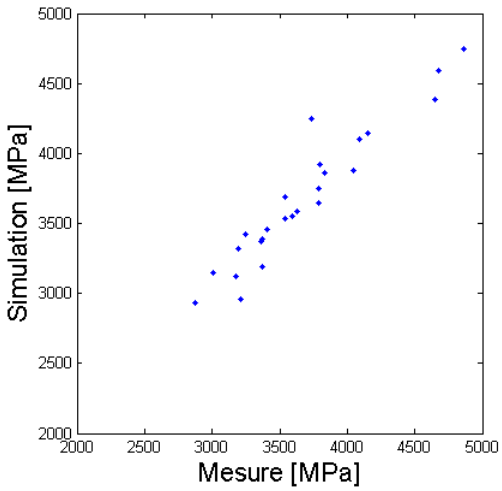
$$K_{tc} = a_{tc}\, V_c + + b_{tc}\gamma + c_{tc}\, V_c\, \gamma + + d_{tc}\, V_c^2 + e_{tc}\, \gamma^2 + + cst_{tc}$$

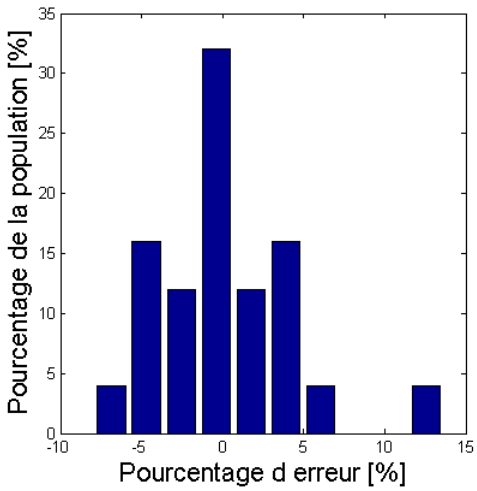
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,95
Erreur-type	179,74
Observations	25,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	5,00	5706627,57	1141325,51	35,3278087	5,52859E-09
Résidus	19,00	613827,62	32306,72		
Total	24,00	6320455,19			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	5017,92	156,84	31,99	0,00	4689,65	5346,19
γ	-29,16	19,96	-1,46	0,16	-70,94	12,62
vc	-140,96	25,31	-5,57	0,00	-193,93	-87,99
γ*vc	0,75	0,80	0,94	0,36	-0,92	2,42
γ^2	-0,84	0,86	-0,97	0,34	-2,63	0,96
vc^2	3,38	1,06	3,18	0,00	1,15	5,60





Analyse de la régression linéaire du coefficient *Krc* (tournage) :

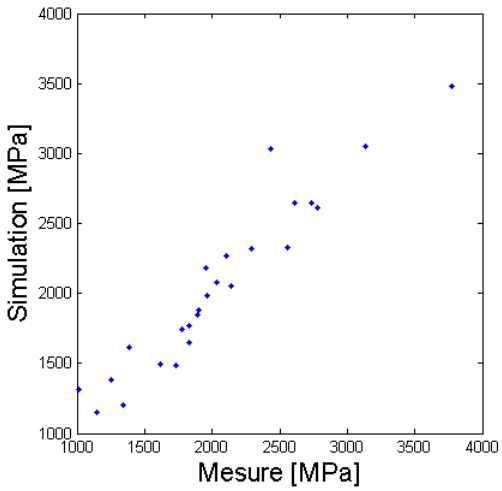
$$K_{rc} = a_{rc}\, V_c + + b\gamma + c_{rc}\, V_c\, \gamma + + d_{rc}\, V_c^2 + e_{rc}\, \gamma^2 + cst_{rc}$$

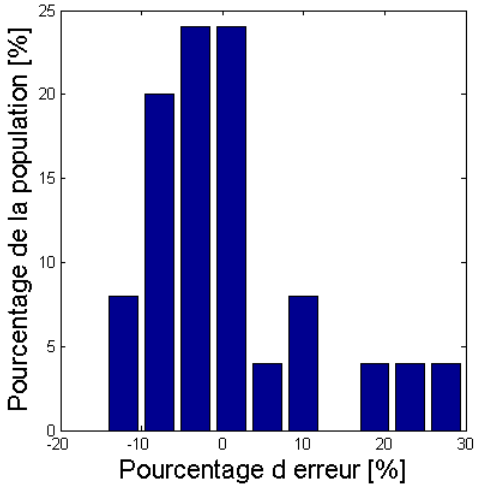
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,95
Erreur-type	221,02
Observations	25,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	5,00	9006502,82	1801300,56	36,8732209	3,84747E-09
Résidus	19,00	928172,53	48851,19		
Total	24,00	9934675,35			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	3703,99	192,86	19,21	0,00	3300,33	4107,66
γ	-91,08	24,55	-3,71	0,00	-142,46	-39,71
vc	-114,09	31,12	-3,67	0,00	-179,22	-48,96
γ*vc	2,23	0,98	2,27	0,04	0,17	4,29
γ^2	-0,01	1,06	-0,01	1,00	-2,22	2,21
vc^2	1,65	1,30	1,27	0,22	-1,08	4,38





Analyse de la régression linéaire du coefficient *kte* (tournage) :

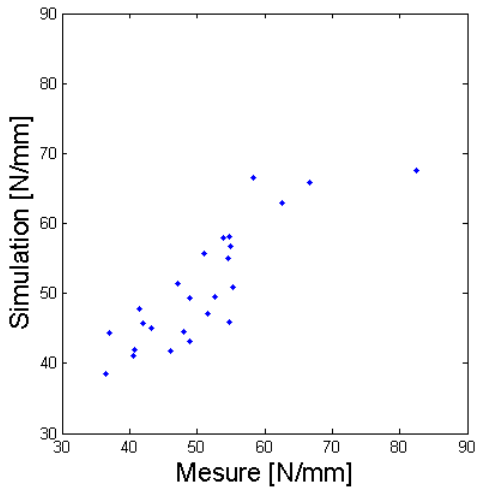
$$K_{te} = a_{te}\, V_c + + b_{te}\gamma + c_{te}\, V_c\, \gamma + + d_{te}\, V_c^2 + e_{te}\, \gamma^2 + cst_{te}$$

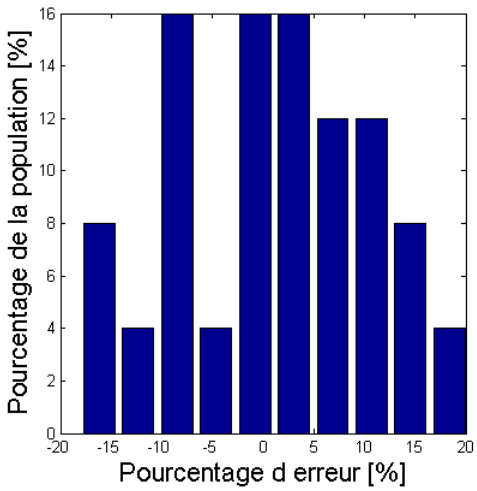
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,85
Erreur-type	5,97
Observations	25,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	5,00	1736,05	347,21	9,75252364	9,69367E-05
Résidus	19,00	676,44	35,60		
Total	24,00	2412,49			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	64,27	5,21	12,34	0,00	53,38	75,17
γ	-2,32	0,66	-3,51	0,00	-3,71	-0,94
vc	0,92	0,84	1,10	0,29	-0,84	2,68
γ*vc	0,03	0,03	1,24	0,23	-0,02	0,09
γ^2	0,04	0,03	1,56	0,14	-0,02	0,10
vc^2	-0,06	0,04	-1,84	0,08	-0,14	0,01





Analyse de la régression linéaire du coefficient *Kre* (tournage) :

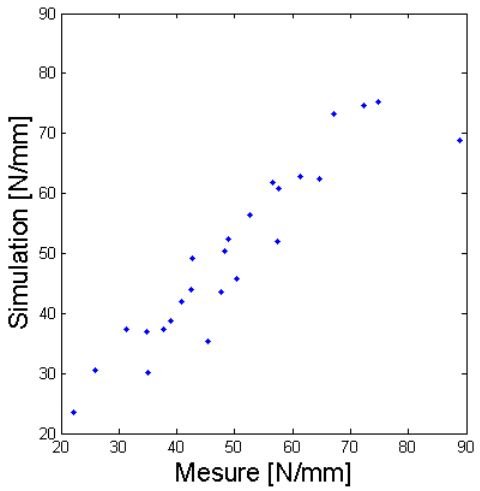
$$K_{re} = a_{re}\, V_c + + b_{re}\gamma + c_{te}\, V_c\, \gamma + + d_{re}\, V_c^2 + e_{re}\, \gamma^2 + cst_{re}$$

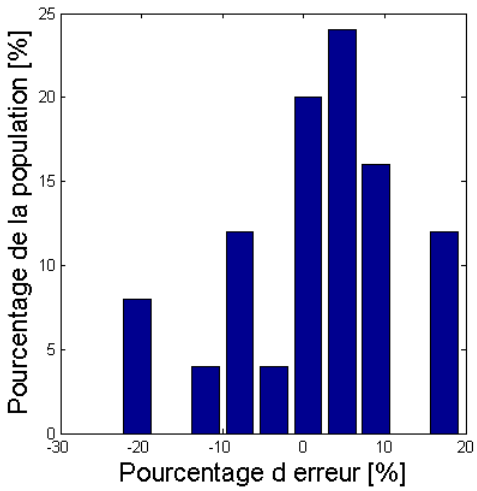
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,93
Erreur-type	6,62
Observations	25,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	5,00	5253,38	1050,68	23,9536702	1,35975E-07
Résidus	19,00	833,39	43,86		
Total	24,00	6086,78			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	57,82	5,78	10,01	0,00	45,73	69,92
γ	-2,69	0,74	-3,66	0,00	-4,23	-1,15
vc	2,10	0,93	2,25	0,04	0,15	4,05
γ*vc	0,00	0,03	0,05	0,96	-0,06	0,06
γ^2	0,04	0,03	1,22	0,24	-0,03	0,10
vc^2	-0,06	0,04	-1,60	0,13	-0,14	0,02





Analyse de la régression linéaire de l'angle de cisaillement $\boldsymbol{\phi}$ (tournage) :

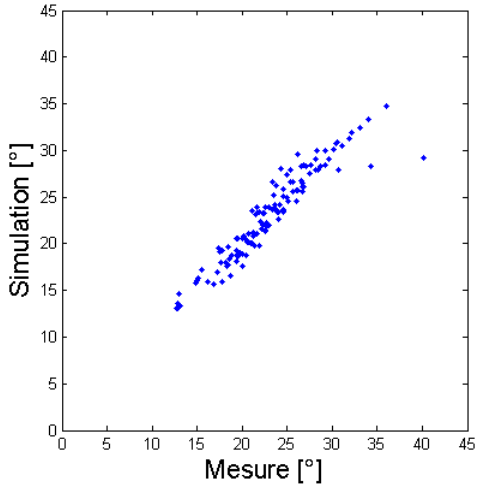
$$\phi = a_\phi V_c + b_\phi f + c_\phi \gamma + d_\phi V_c f + e_\phi V_c f + f_\phi V_c \gamma + g_\phi f \gamma + h_\phi V_c^2 + i_\phi f^2 + j_\phi \gamma^2 + cst_\phi$$

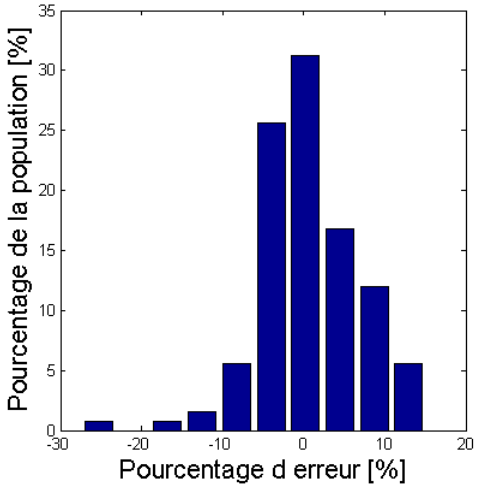
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,95
Erreur-type	1,73
Observations	125,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	9,00	2881,92	320,21	107,243054	1,11496E-51
Résidus	115,00	343,37	2,99		
Total	124,00	3225,29			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	14,62	1,01	14,50	0,00	12,62	16,62
γ	0,52	0,09	5,54	0,00	0,33	0,70
Vc	-0,36	0,12	-3,10	0,00	-0,59	-0,13
f	50,48	23,32	2,16	0,03	4,28	96,68
γ*Vc	0,00	0,00	0,32	0,75	-0,01	0,01
γ*f	-5,47	0,69	-7,97	0,00	-6,83	-4,11
Vc*f	7,50	0,76	9,83	0,00	5,99	9,01
γ^2	0,01	0,00	3,55	0,00	0,01	0,02
Vc^2	0,01	0,00	2,16	0,03	0,00	0,02
f^2	-175,87	182,45	-0,96	0,34	-537,27	185,52





Analyse de la régression linéaire du coefficient β (tournage) :

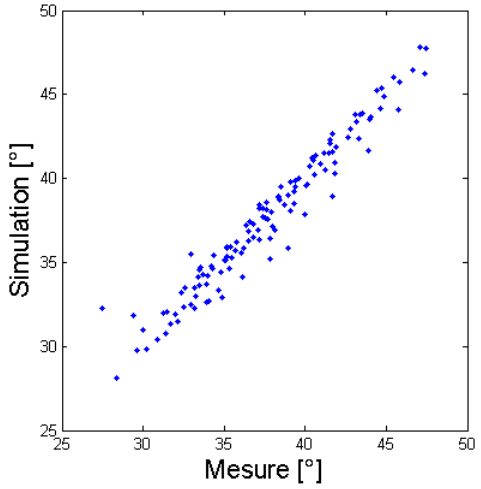
$$\beta = a_\beta V_c + b_\beta f + c_\beta \gamma + d_\beta V_c f + e_\beta V_c f + f_\beta V_c \gamma + g_\beta f \gamma + h_\beta V_c^2 + i_\beta f^2 + j_\beta \gamma^2 + cst_\beta$$

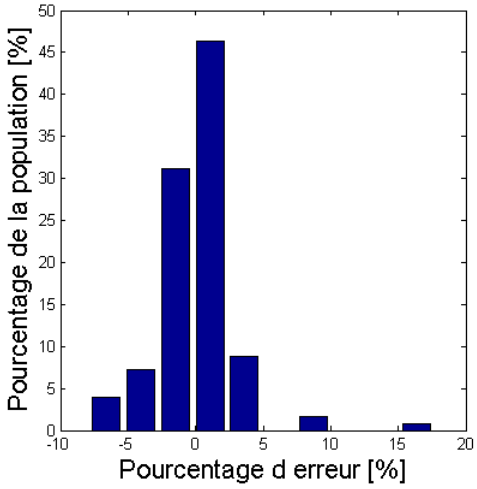
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,97
Erreur-type	1,06
Observations	125,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	9,00	2368,16	263,13	235,219192	1,03005E-69
Résidus	115,00	128,65	1,12		
Total	124,00	2496,80			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	32,38	0,62	52,46	0,00	31,16	33,60
γ	0,67	0,06	11,75	0,00	0,56	0,79
Vc	-0,15	0,07	-2,10	0,04	-0,29	-0,01
f	143,31	14,28	10,04	0,00	115,03	171,59
γ*Vc	-0,02	0,00	-7,69	0,00	-0,02	-0,01
γ*f	1,99	0,42	4,73	0,00	1,15	2,82
Vc*f	1,74	0,47	3,73	0,00	0,82	2,67
γ^2	-0,01	0,00	-3,57	0,00	-0,01	0,00
Vc^2	-0,01	0,00	-2,62	0,01	-0,01	0,00
f^2	-1383,11	111,67	-12,39	0,00	-1604,31	-1161,91





Analyse de la régression linéaire de la contrainte de cisaillement *kab* (tournage) :

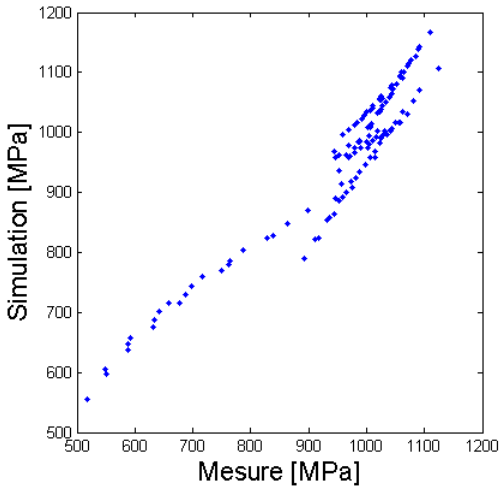
$$k_{ab} = a_{ab}\,V_c + b_{ab}\,f + c_{ab}\gamma + d_{ab}\,V_c\,f + e_{ab}\,V_c\,f + f_{ab}\,V_c\,\gamma + g_{ab}\,f\,\gamma + h_{ab}\,V_c^2 + i_{ab}\,f^2 + j_{ab}\,\gamma^2 + cst_{ab}$$

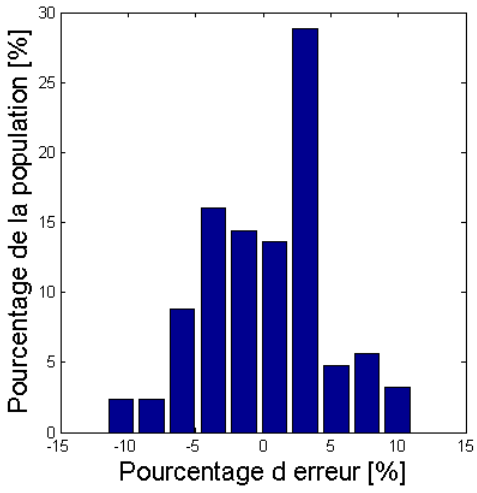
Statistiques de la régression	
Coefficient de détermination multiple	0,96
Erreur-type	41,64
Observations	125,00

ANALYSE DE VARIANCE

	Degré de liberté	*Somme des carrés*	*Moyenne des carrés*	*F*	*Valeur critique de F*
Régression	9,00	2119865,02	235540,56	135,843978	5,54093E-57
Résidus	115,00	199399,08	1733,91		
Total	124,00	2319264,09			

	Coefficients	*Erreur-type*	*Statistique t*	*Probabilité*	*Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%*	*Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%*
Constante	616,54	24,30	25,37	0,00	568,41	664,68
γ	11,61	2,26	5,14	0,00	7,14	16,09
Vc	-9,36	2,81	-3,33	0,00	-14,93	-3,79
f	12464,01	562,07	22,18	0,00	11350,66	13577,36
γ*Vc	-0,06	0,08	-0,68	0,50	-0,22	0,11
γ*f	-120,08	16,55	-7,25	0,00	-152,87	-87,29
Vc*f	77,57	18,39	4,22	0,00	41,14	114,00
γ²	0,09	0,09	1,05	0,29	-0,08	0,27
Vc²	-0,01	0,11	-0,12	0,91	-0,23	0,21
f²	-85743,56	4396,57	-19,50	0,00	-94452,31	-77034,81





Optimisation du brochage des alvéoles de disque de turbine

Résumé :

Le procédé de brochage est aujourd'hui, et depuis plus de cinquante ans, le procédé le plus utilisé par les motoristes aéronautiques pour usiner les alvéoles pied de sapin des disques de turbine. Les travaux présentés dans cette thèse visent à améliorer la compréhension du procédé de brochage dans le but d'améliorer la performance de ce procédé. Ils sont décomposés en quatre étapes, une étude sur la coupe de l'Udimet 720®, la modélisation des broches pied de sapin et des efforts de coupe, une étude expérimentale du brochage des alvéoles pied de sapin et finalement une proposition de surveillance de ce procédé.

Une étude de la coupe en brochage de l'Udimet 720® est réalisée pour pallier le manque d'études actuel sur ce superalliage et développer des lois de coupe pour la simulation des efforts. La simulation permet d'associer à chaque partie discrétisée de chaque dent de la broche des efforts spécifiques en fonction des différents paramètres d'usinage. Les essais de brochage d'alvéole pied de sapin instrumentés ont servi à vérifier la pertinence de la simulation et à proposer, à partir de cette dernière, des choix de conception visant à améliorer la performance du procédé. La surveillance en usinage propose une stratégie visant à détecter différentes anomalies d'usinage pour limiter le risque de rebut de pièces à fortes valeurs ajoutées.

Mots clef : Brochage, Udimet 720®, alvéole pied de sapin, simulation des efforts de coupe.

Optimization of fir-tree broaching process for turbine disc

Abstract :

From more than fifty years ago, the broaching process is what the aeronautic engine manufacturers use the most to machine turbine disc fir-tree slots. The aim of this thesis is to improve the understanding of the broaching process in order to optimize the efficiency of this process. This study is divided into four steps: a study of Udimet 720® machinability, the modelization of fir-tree slot broaches and of cutting forces, an experimental study of fir-tree slots broaching and finally, a proposed method of process monitoring.

A study of Udimet 720® machinability is made to fill the lack of current studies about this superalloy and to develop cutting forces model for the modelization of the broaching process. Modelization allows the association of specific forces to each discretized broach tooth according to various machining parameters. Fir tree slots broaching trials were used to check the accuracy of modelization and to suggest, according to the latter, conception choices aiming at improving the efficiency of the process. Process monitoring, in the broaching field, offers a strategy which purpose is to detect various machining disturbances and to limit the risk of rejected parts with high added value.

Keywords: Broaching, Udimet 720®, fir-tree slots, cutting forces simulation.