



HAL
open science

Proposition de stratégies de surveillance d'usinage en perçage de superalliage base nickel, application à l'usure de l'outil

Andrei Popa

► To cite this version:

Andrei Popa. Proposition de stratégies de surveillance d'usinage en perçage de superalliage base nickel, application à l'usure de l'outil. Génie mécanique [physics.class-ph]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2012. Français. NNT : 2012INPT0038 . tel-04266258

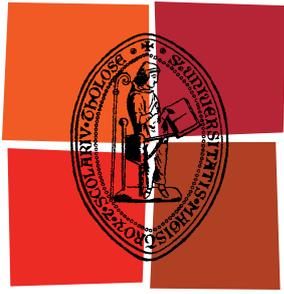
HAL Id: tel-04266258

<https://theses.hal.science/tel-04266258v1>

Submitted on 31 Oct 2023

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

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



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 :
Andrei POPA

le : 18/06/12

Titre :
Proposition de stratégies de surveillance d'usinage en perçage de superalliage
base nickel, application à l'usure de l'outil

Ecole doctorale :
Mécanique, Énergétique, 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

Rapporteurs :
Franck GIROT, Professeur des Universités, Fondation Ikerbasque,
Universidad del País Vasco, Arts et Métiers ParisTech
René LEROY, Maître de Conférences HDR, LMR, Ecole Polytechnique Tours

Membre(s) du jury :
Pierre LAGARRIGUE, Professeur des Universités, CUFR Champollion, Université Paul Sabatier
Philippe DARNIS, Maître des Conférences, I2M, IUT Bordeaux 1
Maher BAILI, Maître des Conférences, LGP, ENIT
Vincent DUTILH, Docteur-Ingénieur, Turbomeca

À mes parents,
À Iulian et Anca,
À Cristina.

« Ces avions que nous avons ne sont aujourd'hui pas plus qu'une perfection du jouet d'enfant
fait en papier. »

« Viitorul este suma pașilor pe care-i faceți, inclusiv a celor mici, ignorați sau luați în râs. »

Henri Coanda
*Ingénieur aéronautique roumain,
pionnier de l'aviation mondiale et du moteur
à réaction, savant et académicien roumain*

Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du Laboratoire Génie de Production de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes. À l'issue de cette étape, je souhaite remercier ici celles et ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail de thèse ainsi que les personnes qui ont partagé cette histoire avec moi.

Pour commencer, je remercie M. Pierre LAGARRIGUE, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse ainsi que pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Je remercie vivement M. Frank GIROT, Professeur à l'ENSAM de Bordeaux et M. René LEROY, Maître de conférences HDR à l'École Polytechnique de Tours pour avoir accepté le délicat travail de rapporteurs et pour l'intérêt minutieux porté sur mon travail.

Je tiens à remercier Philippe DARNIS, Maître de conférences à l'Université Bordeaux 1, pour avoir accepté de faire partie de ce jury et pour les remarques et les corrections rigoureuses qu'il a apportées au manuscrit.

J'adresse tout particulièrement ma gratitude à Gilles DESSEIN, Professeur à l'ENI de Tarbes, qui a su encadrer cette thèse avec beaucoup d'intelligence. Je lui suis très reconnaissant de m'avoir fait le cadeau d'un tel sujet de thèse. Pendant ces trois années de travail, il a toujours été présent pour répondre à mes nombreuses questions et je le remercie pour sa grande disponibilité, sa sympathie, sa bonne humeur ainsi que pour son professionnalisme qui a permis l'aboutissement de ce travail. Ce fut un réel plaisir de travailler avec lui.

Mes remerciements s'adressent également à Maher BAILI, Maître de conférences à l'ENI de Tarbes, pour avoir co-encadré ces travaux. Je lui suis reconnaissant de m'avoir guidé, soutenu et encouragé pendant cette étude.

Je voudrais exprimer toute ma sympathie et mon amitié à Vincent DUTILH. Merci pour toutes les discussions, les conseils, pour l'optimisme et pour les moments agréables passés ensemble. Je profite de cette occasion pour remercier aux partenaires du projet ACCENT, Géraldine, Colin, Drazen, Matthias, Sascha, Michael, Nicolas, Pierre Etienne, etc...

J'associe bien sûr ces remerciements à l'ensemble des membres de l'ENI de Tarbes et du LGP pour m'avoir accueilli au sein de ces institutions ainsi qu'à tous ceux qui ont rendu agréables ces trois années au LGP.

Je passe ensuite une dédicace spéciale à l'ensemble de mes collègues doctorants et plus particulièrement, Malik, Laurence, Julie, Vincent, Güralp, Christian, Romain, Eric, Mickaël, Sébastien, Adrien, Cristina, Benjamin, Babacar, Toufic, Sabeur, Hassen et à tous ceux que je n'ai pas cités.

Je ne peux oublier le soutien de ma famille. Je remercie mes parents, Dana et Gheorghe ainsi que mon frère Iulian et ma sœur Anca pour leur soutien et leur aide en toutes circonstances, pour les conseils et les discussions qui ont énormément contribué à la réussite de ce projet. Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance.

Enfin, ces derniers mots sont pour ma chère et tendre Cristina. Je lui consacre mes remerciements les plus sincères. Elle m'a apporté le meilleur soutien durant cette thèse, m'a toujours encouragé pendant cette période, parfois dans des moments très difficiles... Je te remercie du plus profond de mon cœur.

Pour conclure, je remercie à tous ceux qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années et que j'aurais pu oublier de mentionner. Sachez que vous avez tous participé à la réalisation de ce travail.

Vă mulțumesc !!!

Table des matières

Introduction générale.....	1
I. Contexte de l'étude.....	5
Introduction.....	6
I.1 Environnement de l'étude.....	7
I.1.2. Pièces à haute criticité.....	8
I.1.3. Cause des accidents aéronautiques.....	9
I.1.4. Projets.....	11
I.2. Projet européen ACCENT.....	12
I.2.1. Cadre et objectifs.....	13
I.2.2. Démarche.....	14
I.2.3. Organisation.....	15
I.3. Démarche de la thèse.....	16
Synthèse.....	19
II. État de l'art.....	21
Introduction.....	22
II.1. L'usinage de superalliages aéronautiques.....	23
II.1.1. Les superalliages.....	23
II.1.2. L'usinabilité de superalliages.....	24
II.1.3. L'usure de l'outil – paramètre important influant dans la fabrication des pièces aéronautiques.....	25
II.1.4. Dégradation de l'outil.....	26
II.1.4.1. Modes d'usure des outils.....	26
II.1.4.1.1. L'usure par abrasion.....	26
II.1.4.1.2. L'usure par adhésion.....	27
II.1.4.1.3. L'usure par diffusion.....	28
II.1.4.2. Les principales formes d'usure.....	28
II.1.4.2.1. Usures en dépouille, sur la face de coupe et des listels.....	29
II.1.4.2.2. L'arête rapportée.....	30
II.1.4.2.3. L'entaille.....	30
II.1.5. Paramètres influençant l'usure des outils.....	31
II.1.5.1. Les conditions de coupe.....	31
II.1.5.2. Le revêtement.....	32
II.1.5.3. La lubrification.....	35
II.1.5.4. Autres paramètres.....	36
II.2. Techniques de surveillance.....	37
II.2.1. Introduction.....	37
II.2.2. Systèmes de mesure.....	39
II.2.2.1. Les efforts de coupe.....	39
II.2.2.2. La puissance et le courant broche.....	41

II.2.2.3.	Les vibrations	42
II.2.2.4.	Les émissions acoustiques	43
II.2.2.5.	La température	44
II.2.3.	Traitements des signaux	46
II.2.3.1.	Analyse temporelle	47
II.2.3.2.	Analyse fréquentielle	48
Synthèse	51	
III.	Méthodologie expérimentale.....	55
Introduction.....	56	
III.1.	Dispositif expérimental.....	57
III.1.1.	Matière : Udimet® 720.....	57
III.1.2.	Les machines-outils	60
III.1.3.	L'outil.....	61
III.1.4.	La lubrification	62
III.1.5.	Les capteurs de surveillance	62
III.2.	Description des essais	64
III.2.1.	Essais basés sur le Couple-Outil-Matière	65
III.2.2.	Essais « cartographie »	67
III.2.3.	Essais « complémentaires »	68
III.2.4.	Essais avec variation du contexte d'usinage	69
III.2.4.1.	Essais « coupure de lubrification »	69
III.2.4.2.	Essais « perturbations d'usinage »	70
III.3.	Traitement des signaux enregistrés	71
III.3.1.	Analyse temporelle	71
III.3.2.	Analyse temporelle des signaux d'efforts	73
III.3.3.	Analyse fréquentielle	77
III.3.3.1.	Identification fréquentielle – l'outil	79
III.3.3.1.1.	Calculs par éléments finis	79
III.3.3.1.2.	Analyse modale.....	81
III.3.3.2.	Identification fréquentielle – la platine de mesure	82
III.3.3.2.1.	Essais sans la platine de mesures Kistler.....	82
III.3.3.2.2.	Sonnage.....	83
Synthèse	85	
IV.	Analyse des résultats.....	87
Introduction.....	88	
IV.1	Évolution des modes de dégradation en fonction des conditions de coupe.....	89
IV.1.1	L'usure des listels	90
IV.1.1.1	Analyse de l'usure des listels après plusieurs perçages	91
IV.1.1.2	Essais de vérification	91
IV.1.2	L'usure en dépouille	92
IV.1.2.1	Analyse de l'usure en dépouille après plusieurs perçages	93
IV.1.2.2	Essais de vérification	94
IV.1.3	L'entaille	94

IV.1.3.1	Analyse de l'usure en entaille après plusieurs perçages	95
IV.1.3.2	Essais de vérification	96
IV.1.4	L'usure « catastrophique »	97
IV.1.5	L'influence des perturbations d'usinage sur l'usure	97
IV.1.6	Conclusions	100
IV.2	Corrélation entre les grandeurs physiques et les modes de dégradation	102
IV.2.1	Évolution des signaux pour l'usure en dépouille	102
IV.2.1.1	Zone I	102
IV.2.1.2	Zone II	116
IV.2.2	Évolution des signaux pour les essais avec entaille	117
IV.2.3	Évolution des signaux pour l'usure catastrophique	121
IV.2.4	Évolution des signaux pour les essais avec variation du contexte d'usinage	124
IV.3	Modélisation de l'usure	128
Synthèse		134
V.	Proposition de stratégies de surveillance	137
Introduction		138
V.1	Problématiques	139
V.1.1	Surveillance	139
V.1.2	Décision	139
V.2	Précision de la méthode	140
V.2.1	Applicabilité	140
V.2.2	Robustesse	141
V.2.2.1	Aspect phénoménologique	141
V.2.2.2	Base de données	143
V.3	Détections envisageables	144
V.3.1	Choix de capteurs	144
V.3.2	Les perturbations d'usinage	145
V.3.3	L'usure en dépouille	148
V.3.4	L'usure en entaille	149
V.3.5	L'usure catastrophique	150
V.4	Proposition d'un algorithme de détection	151
Synthèse		153
	Conclusion générale et perspectives.....	155
	Références bibliographiques.....	159

Table de figures

Figure I.1.1 : Étude statistique sur l'évolution du trafic aérien et du nombre d'incidents [ManHIRP 04].....	7
Figure I.1.2 : Causes des accidents aéronautiques mortels enregistrés par EASA entre 1999 et 2008.....	8
Figure I.1.3 : Vue en coupe du moteur Turbomeca Arrius 2B.....	8
Figure I.1.4 : Les deux procédés de validation utilisés dans l'industrie aéronautique [ACCENT 09].....	9
Figure I.1.5 : Incident aérien de Pensacola (Floride, [ManHIRP 04]).....	10
Figure I.1.6 : Disque de turbine à pression intermédiaire de l'Airbus A380 (Qantas)	11
Figure I.2.1 : Boucle de contrôle des processus de conception et fabrication [ACCENT 09].....	13
Figure I.2.2 : Procédure standard pour la définition de la fenêtre de paramètres d'usinage selon ACCENT [ACCENT 09]	15
Figure I.2.3 : Organisation générale du projet [ACCENT 09].....	16
Figure II.1.1 : La répartition des alliages dans le moteur Arrius 2B	23
Figure II.1.2 : Relations entre le contexte d'usinage et l'intégrité de surface.....	26
Figure II.1.3 : (a) Présence du nickel sur l'outil [Dutilh 11], (b) : Adhérence de l'Inconel 718 [®] sur l'outil [Devillez 07]	27
Figure II.1.4 : Schéma du couple utilisé pour l'étude de la diffusion [Jianxin 08].....	28
Figure II.1.5 : Mécanisme de formation du copeau.....	29
Figure II.1.6 : Exemple d'usure par abrasion en dépouille observée dans le perçage de l'Inconel 718 [®] [Chen 03]	30
Figure II.1.7 : Mise en évidence du phénomène d'arête rapportée [Dutilh 11].....	30
Figure II.1.8 : Usure en entaille [Dutilh 11]	31
Figure II.1.9 : La température maximale sur l'arête de coupe dans le perçage des aciers en fonction du type de revêtement [Dörr 03]	33
Figure II.2.1 : Méthodes de surveillance de l'usure de l'outil [Kilundu 11].....	37
Figure II.2.2 : Capteurs utilisés pour la surveillance en usinage et leur emplacement [Teti 10]	39
Figure II.2.3 : Table dynamométrique Kistler	40
Figure II.2.4 : Utilisation des seuils pour suivre l'usure [Shi 07b].....	41
Figure II.2.5 : Exemples d'accéléromètres piézoélectriques	42
Figure II.2.6 : Les sources des émissions acoustiques dans l'usinage selon [Teti 10].....	43
Figure II.2.7 : Sources de chaleur pendant l'usinage	45
Figure II.2.8 : Système développé pour la mesure de températures sans contact avec une caméra thermographique et un miroir [Dörr 03].....	46
Figure II.2.9 : Le traitement des signaux [Teti 10].....	47
Figure II.2.10 : Diagramme Usure-Fréquence-Amplitude d'un accéléromètre [Dimla 00a].....	48
Figure II.2.11 : Diagramme Temps-Fréquence-Amplitude [Marinescu 09a]	49
Figure III.1.1 : Structure cristallographique de γ'	57
Figure III.1.2 : Forgeage de disques de turbine (a) disques HP et (b) disques TL [Devaux 04]	59
Figure III.1.3 : Microstructure de l'Udimet 720 (a) grains fins et (b) gros grains [Devaux 04]	60

Figure III.1.4 : Traitements thermiques de l'Udimet® 720 LI.....	60
Figure III.1.5 : Machine-Outil Huron KX10.....	61
Figure III.1.6 : Foret Iscar Chamdrill.....	62
Figure III.1.7 : Chaîne d'acquisition Kistler.....	63
Figure III.2.1 : Conditions de coupe pour les essais « COM ».....	65
Figure III.2.2 : Évolution (a) des coefficients spécifiques de coupe $K_{c,c}$ (P_c) et $K_{c,c}$ (M_z) en fonction de V_c et (b) coefficient spécifique $K_{c,f}$ en fonction de f	66
Figure III.2.3 : Évolution de (a) R_a/R_z et (b) coefficient de conicité et cylindricité du trou.....	66
Figure III.2.4 : Les nouvelles conditions de coupe choisis pour les essais « Cartographie » et l'A.S.I.D.....	67
Figure III.2.5 : Essais « Complémentaires ».....	68
Figure III.2.6 : Conditions de coupe pour les essais "coupure de lubrification".....	70
Figure III.3.1 : Exemples des signaux obtenues pour un essai à $V_c=30$ m/min et f 0,15 mm/tr (a) accélération suivant l'axe Z, (b) le couple M_z , (c) la puissance broche et (d) le courant broche.....	72
Figure III.3.2 : La profondeur de passe pour les cas sans défaut d'excentricité.....	74
Figure III.3.3 : Évolution des efforts de coupe pour le premier cas.....	74
Figure III.3.4 : La profondeur de passe réelle pour le deuxième cas.....	75
Figure III.3.5 : Évolution des efforts de coupe pour le deuxième cas.....	76
Figure III.3.6 : Schéma pour le troisième cas avec l'excentricité ayant l'angle β	76
Figure III.3.7 : Évolution des efforts de coupe pour le troisième cas.....	77
Figure III.3.8 : Exemple de diagramme temps-fréquence pour les conditions de coupe $V_c = 19$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr et la FFT associée pour la zone à 3 s.....	78
Figure III.3.9 : (a) Ensemble porte-outil ; (b) le modèle Catia et (c) la position de l'encastrement.....	79
Figure III.3.10 : Directions de modes propres obtenues par modélisation par éléments finis.....	81
Figure III.3.11 : Montage expérimental pour le sonnage.....	81
Figure III.3.12 : Comparaison des spectres obtenues pour les essais avec et sans platine pour les conditions de coupe :.....	83
Figure IV.1.1 : Usures caractéristiques du perçage de l'Udimet® 720 Li.....	89
Figure IV.1.2 : (a) Exemple d'usure en listel (b) L'usure des listels après le premier perçage.....	90
Figure IV.1.3 : Évolution de l'usure des listels après plusieurs perçages.....	91
Figure IV.1.4 : Reproductibilité des essais d'usure réalisés pour les conditions de coupe (a) $V_c = 19$ m/min ; $f = 0,1$ mm/tr et (b) $V_c = 22$ m/min ; $f = 0,15$ mm/tr.....	91
Figure IV.1.5 : (a) Exemple d'usure en dépouille (b) Les deux zones caractérisées uniquement par l'usure en dépouille (c) Le débit copeaux et (d) L'usure en dépouille après le premier trou.....	92
Figure IV.1.6 : (a) Évolution de l'usure en dépouille pour les essais de la zone I après plusieurs perçages et (b) Reproductibilité d'usure en dépouille pour les conditions de coupe $V_c = 19$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr.....	93
Figure IV.1.7 : (a) Exemple de l'usure en entaille (b) Répartition de l'usure en entaille sur l'ensemble de conditions de coupe testées (c) Évolution de la surface entaillée après le premier trou.....	95
Figure IV.1.8 : Évolution de a) l'usure en dépouille et b) la surface entaillée pour la deuxième fenêtre.....	96

Figure IV.1.9 : Reproductibilité d'usure pour les conditions de coupe $V_c = 22$ m/min et $f = 0,15$ mm/tr (a) en dépouille et (b) en entaille	96
Figure IV.1.10 : (a) Répartition des essais caractérisés par l'usure catastrophique et (b) Exemple de l'effondrement de l'arête de coupe	97
Figure IV.1.11 : Cartographie des modes de dégradation.....	100
Figure IV.2.1 : (a) Évolution de la puissance de coupe pour un perçage fait à $V_c = 19$ m/min et $f = 0,15$ mm/tr lors de la campagne « COM » et (b) copeau incrusté observé au MEB.....	103
Figure IV.2.2 : (a) Corrélation profil de rugosité - puissance de coupe pour un trou percé à $V_c = 19$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr et (b) Surfométrie réalisée au profilomètre optique sur la zone indiquée par le rectangle	104
Figure IV.2.3 : (a) Diagramme temps-fréquence et (b) L'évolution fréquentielle pour un « copeau coincé » illustrée avec des FFT successives.....	105
Figure IV.2.4 : Comparaison entre les efforts de coupe en x et y.....	106
Figure IV.2.5 : Évolution des signaux pour le point de production ($V_c = 19$ m/min ; $f = 0,1$ mm/tr) (a) diagramme temps-fréquence ; (b) le courant broche (c) le couple Mz et (d) l'effort d'avance Fz	107
Figure IV.2.6 : Spectre fréquentiel à (a) 4 s ; (b) 13 s et (c) à 50 s	108
Figure IV.2.7 : Évolution des signaux pour le deuxième perçage fait à $V_c = 19$ m/min ; $f = 0,1$ mm/tr avec le même outil (a) diagramme temps-fréquence, (b) le courant broche (c) le couple Mz et (d) l'effort d'avance Fz.....	109
Figure IV.2.8 : FFT associées aux zones indiquées par les lignes pointillés sur le diagramme temps-fréquence	109
Figure IV.2.9 : Évolution des efforts de coupe pour le deuxième perçage	110
Figure IV.2.10 : Comparaison entre les efforts de coupe mesurés et calculés à : a) $t = 54,8$ s et b) $t = 56,2$ s.	111
Figure IV.2.11 : Évolution des signaux pour un essai à $V_c = 15$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr (a) diagramme temps-fréquence (b) le courant de la broche (c) l'effort d'avance Fz et (d) le couple Mz	112
Figure IV.2.12 : FFT réalisées sur le signal de l'accéléromètre Y à différents moments de l'usinage.....	113
Figure IV.2.13 : Efforts de coupe pour le premier essai réalisé à $V_c = 15$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr	113
Figure IV.2.14 : Comparaison entre les efforts de coupe mesurés et calculés à $t = 10$ s, $t = 55$ s et $t = 59$ s....	114
Figure IV.2.15 : Efforts de coupe pour le deuxième perçage réalisé à $V_c = 15$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr	115
Figure IV.2.16 : Comparaison entre les efforts de coupe mesurés et calculés à $t = 10,1$ s, $t = 62,7$ s et $t = 63,4$ s	115
Figure IV.2.17 : (a) Évolution du courant de la broche une avance de 0,1 mm/tr et deux vitesses de coupe différentes (b) FFT sur tout le signal de l'accéléromètre Y pour $V_c = 40$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr	116
Figure IV.2.18 : Comparaison entre les niveaux du courant de la broche pour des essais réalisés à $V_c = 40$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr.....	117
Figure IV.2.19 : Évolution des signaux pour le perçage réalisé à $V_c = 22$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr.....	118
Figure IV.2.20 : FFT réalisées à différents moments de l'usinage	119
Figure IV.2.21 : Efforts de coupe Fx et Fy pour le perçage réalisé à $V_c = 22$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr.....	120

Figure IV.2.22 : Évolution des signaux pour le deuxième perçage réalisé avec la même plaquette à $V_c = 22$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr (a) diagramme temps-fréquence (b) FFT associée au signal de l'accéléromètre Y (c) le courant de la broche et (d) le couple Mz.....	121
Figure IV.2.23 : Évolution des signaux pour un perçage fait à $V_c = 30$ m/min et $f = 0,15$ mm/tr, (a) diagramme temps-fréquence, (b) le courant broche, (c) le couple Mz et (d) l'effort d'avance Fz.....	122
Figure IV.2.24 : Efforts de coupe pour le perçage réalisé à $V_c = 30$ m/min et $f = 0,15$ mm/tr.....	123
Figure IV.2.25 : Évolution du courant de la broche pour les essais avec et sans coupures de lubrification	125
Figure IV.2.26 : (a) Diagramme temps-fréquence pour un perçage à CL1 et (b) Couple Mz pour un essai réalisé dans les conditions CL3.....	126
Figure IV.2.27 : Évolution des signaux pour un perçage réalisé avec la variation du contexte d'usinage sur les conditions de coupe $V_c = 15$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr (a) diagramme temps-fréquence (b) courant de la broche.....	126
Figure IV.2.28 : Efforts de coupe pour un perçage réalisé avec la variation du contexte d'usinage sur les conditions de coupe $V_c = 15$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr.....	127
Figure IV.3.1 : (a) Diagramme temps-fréquence et (b) Évolution du courant de la broche pour un perçage réalisé à $V_c = 15$ m/min et $f = 0,2$ mm/tr.....	128
Figure IV.3.2 : Modélisation de l'usure en dépouille, (a) essais sur lequel a été défini le modelé et (b) essais de vérification.....	132
Figure IV.3.3 : Modélisation de l'usure des listels, (a) essais sur lequel a été défini le modelé et (b) essais de vérification.....	132
Figure IV.3.4 : Modélisation de l'usure en entaille (a) essais sur lequel a été défini le modelé et (b) essais de vérification.....	133
Figure V.3.1 : Comparaison des efforts de coupe sans et avec excentration.....	146
Figure V.3.2 : Comparaison des efforts de coupe avec deux valeurs d'excentration différentes	146
Figure V.3.3 : Évolution des signaux représentatifs pour l'usure en dépouille (conditions de coupe standards – production).....	148
Figure V.3.4 : Évolution des signaux représentatifs pour l'usure en entaille.....	149
Figure V.3.5 : Exemple de seuil utilisé pour détecter l'effondrement de l'arête de coupe.....	150
Figure V.4.1: Synopsis de stratégies de surveillance.....	152

Liste des tableaux

<i>Tableau I.2.1 : Partenaires du projet ACCENT</i>	14
<i>Tableau I.2.2 : Couples procédé/ matériau</i>	14
<i>Tableau III.1.1 : Composition de l'Udimet[®] 720 LI (% massique) utilisé par Turbomeca</i>	58
<i>Tableau III.1.2 : Succession des opérations nécessaires pour la réalisation des alésages des disques de turbine</i>	61
<i>Tableau III.1.3 : Fréquences propres de la platine Kistler</i>	63
<i>Tableau III.2.1 : Paramètres du plan d'expériences</i>	71
<i>Tableau III.2.2 : Structure de l'alias du plan d'expériences</i>	71
<i>Tableau III.3.1 : Tableau récapitulatif des fréquences obtenues par modélisation</i>	80
<i>Tableau III.3.2 : Fréquences propres de l'ensemble "broche+porte-outil+outil" obtenues par modélisation et sonnage</i>	82
<i>Tableau III.3.3 : Fréquences propres de la platine Kistler</i>	84
<i>Tableau IV.1.1 : Comparaison entre les usures pour des essais avec et sans coupure de lubrification</i>	98
<i>Tableau IV.1.2 : Effet des perturbations d'usinage sur l'usure</i>	99
<i>Tableau IV.1.3: Formes des copeaux en fonctions des conditions de coupe selon la Norme AFNOR E66-520-8</i>	101
<i>Tableau IV.3.1 : Filtres passe bande sur les signaux des accéléromètres</i>	129
<i>Tableau IV.3.2 : Critères statistiques relevés sur les signaux de surveillance</i>	130
<i>Tableau V.3.1 : Considérations sur les capteurs de surveillance</i>	145

Abréviations

ACCENT	Adaptive Control of Manufacturing Processes for a New Generation of Jet Engine Components	-
ASID	Acceptable Surface Integrity Domain	-
Ax	Accéléromètre placé suivant l'axe X	m/s ²
Ay	Accéléromètre placé suivant l'axe Y	m/s ²
Az	Accéléromètre placé suivant l'axe Z	m/s ²
Ap	Profondeur de passe	mm
CC	Cutting Conditions	-
CL	Coupure de lubrification	-
D	Diamètre de perçage	mm
d	Diamètre de l'avant-trou	mm
EASA	European Aviation Safety Agency	-
f	Avance par tour	mm/tr
FAA	Federal Aviation Administration	-
FFT	Fast Fourier Transform	-
f _{optimal}	Avance optimale selon la norme COM	mm/tr
Fx	Effort suivant l'axe X du repère machine	N
Fy	Effort suivant l'axe Y du repère machine	N
Fz	Effort suivant l'axe Z du repère machine	N
HHT	Hilbert Huang Transform	-

I broche	Courant consommé par la broche	A
Iz	Courant axe Z de la machine	A
Kc	Coefficient spécifique de coupe	N/mm ²
Kc,c	Coefficient spécifique de coupe associé au couple	N/mm ²
Kc,f	Coefficient spécifique de coupe associé à l'avance	N/mm ²
Kurt	Kurtosis d'un signal	-
LI	Low interstitial	-
ManHIRP	Integrating Process Controls with Manufacturing to produce High Integrity Rotating Parts for Modern Gas Turbines	-
Mz	Moment suivant l'axe Z du repère machine	N.m
N	Vitesse de rotation de la broche	tr/min
Pcalc	Puissance de coupe calculée à partir du couple Mz et de l'effort Fz (platine Kistler)	W
P broche	Puissance consommée par la broche	W
Q	Débit copeaux	mm ³ /min
R ²	Coefficient de détermination d'une régression	-
RISC	Rotor Integrity Sub-Committee	-
RMS	Root Mean Square	-
RoMan	Rotor Manufacturing	-
SD	Standard Deviation	-
SI	Surface Integrity	-
Sk	Skewness	-

STFT	Short Time Fourier Transform	-
Vb	Usure en dépouille	mm
Vc	Vitesse de coupe	m/min
Vc,min	Vitesse de coupe minimisant le KC selon la norme COM	m/min
WT	Wavelet Transform	-

Introduction générale

Aujourd'hui, le commerce mondial, le tourisme et la société moderne sont les facteurs qui engendrent une densité importante du trafic aérien. Certaines perspectives évoquent un accroissement de ce trafic par un doublement du nombre de décollage pour les dix années à venir. Malheureusement, les risques d'accident aérien sont liés aux nombres de vol et la sécurisation du trafic passe notamment par l'augmentation de la fiabilité des avions, et de leurs moteurs. Les organismes de certification aéronautique (FAA et EASA) imposent de nos jours un suivi de la fabrication des moteurs afin de répondre à ce besoin de fiabilité. Ils sont aussi les instigateurs de projets R&D pour dynamiser les activités des motoristes dans cet objectif. En parallèle, le développement du contexte aéronautique impose l'utilisation de nouveaux matériaux, présentant des performances et des propriétés mécaniques plus élevées, avec une réduction de la masse embarquée. Les constructeurs des moteurs d'avions sont donc confrontés à deux problématiques conjointes : la maîtrise de la tenue en service des organes d'un moteur et le développement de ces pièces sur de nouveaux matériaux.

L'intégrité de la surface usinée est le critère majeur pour la tenue en service des pièces mécaniques sollicitées. Pour un moteur aéronautique, les pièces sollicitées, et présentant un risque pour l'aéronef et les passagers, sont nommées pièces à haute criticité (par exemple, les disques de turbines). Les défauts introduits par les opérations d'usinage au niveau de ces pièces peuvent avoir des conséquences dramatiques et représentent l'une des causes principales des accidents aériens. Suite à plusieurs incidents, les enquêtes réalisées ont montré que les anomalies d'usinage, à la source de la rupture de pièces critiques, n'avaient pas été détectées lors du processus de fabrication.

Les préoccupations actuelles des motoristes visent donc à sécuriser la fabrication des pièces critiques et à simplifier le procédé de validation d'usinage sur les nouveaux matériaux, impliquant conjointement une réduction des coûts associés. Dans cette optique et suite aux conclusions des accidents aéronautiques, plusieurs projets ont été initiés sur cette problématique par les autorités de certification. Le concept du projet européen ACCENT vise à réduire l'incertitude dans la fabrication des pièces critiques en utilisant la surveillance d'usinage. Parmi les perturbations d'usinage influençant les défauts d'intégrité de surface, l'usure de l'outil est un paramètre intermédiaire qu'il ne faut pas négliger.

Les travaux de thèse présentés dans ce mémoire sont réalisés dans le cadre du projet ACCENT, et sont le fruit d'une collaboration entre le Laboratoire Génie de Production de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes et la société Turbomeca Groupe Safran. L'objectif global consiste à développer une méthode de surveillance de l'usure de l'outil dans l'usinage de l'alésage central d'un disque haute pression réalisé en superalliage à base nickel.

Afin de répondre à cet objectif, nous avons organisé nos travaux selon des phases expérimentales, de modélisation et de proposition de stratégies de surveillance. La rédaction de ce manuscrit est divisée en cinq chapitres :

- Le premier chapitre présente le *contexte du projet ACCENT* dans lequel se déroulent ces travaux de thèse. Il précise les risques introduits par les anomalies d'usinage sur les pièces critiques. Nous abordons ensuite les projets initiés par les autorités de certification, et en détaillant le cadre et les objectifs du projet européen ACCENT. Finalement, la démarche de la thèse est présentée.
- Le second chapitre rassemble les *notions bibliographiques*, regroupées selon plusieurs aspects : les problèmes liés à l'usinage des superalliages utilisés dans la fabrication des disques de turbines, l'usure des outils coupants dans le contexte des matériaux durs, les techniques de surveillance d'usinage et leurs stratégies. Il a été démontré que le perçage est synonyme d'usinage confiné où les contraintes thermomécaniques peuvent engendrer des défauts d'intégrité de surface. De plus, la dégradation de l'outil peut jouer un rôle prépondérant, accélérant les phénomènes responsables des défauts. Les mécanismes d'usure sont connus dans les cas des matériaux durs, mais restent à préciser dans le cadre de l'usinage des superalliages à base nickel. Enfin, les principales techniques de surveillance de l'usure de l'outil, les grandeurs physiques ainsi que les traitements de signaux pouvant être utilisés sont détaillées.
- Selon les résultats du chapitre précédent et afin de répondre aux interrogations, le troisième chapitre porte sur la *méthodologie expérimentale* utilisée pour cette étude. Nous présentons dans un premier temps les moyens expérimentaux employés et ensuite, une description des essais effectués. Pendant les campagnes expérimentales, les différents types d'usures possibles ont été générés et l'ensemble des grandeurs physiques mesurées a été enregistré, via les signaux de surveillance disponibles. La dernière partie présente le traitement de signaux préalablement enregistrés (soit par une analyse temporelle, soit fréquentielle). Les résultats ainsi obtenus permettent d'établir des relations entre les signaux et les modes de dégradation de l'outil, dans le chapitre suivant.
- Le quatrième chapitre est consacré à l'*analyse des résultats expérimentaux*. Il est composé de trois volets. Tout d'abord, l'étude de chaque type d'usure est réalisée selon les conditions de coupe, selon les évolutions après plusieurs perçages, selon

l'influence des perturbations d'usinage... avec des essais de vérification suivant les disponibilités matière. Ensuite, l'analyse s'oriente vers l'interprétation des relations entre l'évolution des signaux et chaque mode de dégradation observé, décrite ici par l'étude phénoménologique. L'apparition de fréquences, les pics de consommation de courant ou la variation des efforts radiaux sont corrélés aux modes de dégradation de l'outil. Par la suite, une exploitation de la base de données expérimentale permet de construire des modèles d'usure (dépouille, entaille et listel) afin d'obtenir de nouvelles modélisations, utilisables notamment dans les stratégies de surveillance.

- Le cinquième chapitre offre une proposition de *stratégies de surveillance* d'usinage construites à partir des résultats présentés dans le quatrième chapitre. Après avoir rappelé les points-clefs des techniques de surveillance et les décisions pouvant en découler, nous précisons l'application de notre méthodologie selon les deux aspects : approche phénoménologique et approche statistique (au sens de l'expression des modèles par matrice de corrélation dans la base de données). La robustesse des deux approches est exprimée par des taux de probabilité de détection, uniquement basés sur une indépendance des signaux dans un premier temps. Un bilan permet de conclure notre proposition de stratégies de surveillance avec un synopsis global du suivi de l'usure de l'outil.

Une conclusion, associée à quelques perspectives, termine ce manuscrit en rappelant les points importants de ce travail de thèse, son développement scientifique et son déploiement industriel possible.

Chapitre I

I. Contexte de l'étude

Introduction	6
I.1 Environnement de l'étude	7
I.1.2. Pièces à haute criticité	8
I.1.3. Cause des accidents aéronautiques	9
I.1.4. Projets	11
I.2. Projet européen ACCENT	12
I.2.1. Cadre et objectifs.....	13
I.2.2. Démarche	14
I.2.3. Organisation.....	15
I.3. Démarche de la thèse.....	16
Synthèse	19

Introduction

Les opérations de fabrication par enlèvement de matière (perçage, tournage, brochage, etc.) occupent une place importante dans l'industrie aéronautique. Les paramètres de coupe choisis pour chaque opération sont figés afin de garantir la qualité constante des pièces fabriquées, mais engendrent l'apparition de phénomènes complexes (thermiques, mécaniques, etc.), ayant un impact direct sur cette qualité. L'intégrité de surface générée après l'usinage est un enjeu majeur dans le contexte aéronautique actuel. La non-qualité de pièces critiques peut engendrer des conséquences néfastes sur l'avion et peut entraîner même des pertes humaines. L'investigation des différents incidents aéronautiques a mis en avant une problématique liée aux influences des anomalies d'usinage sur la tenue en fatigue des pièces tournantes. Suite aux accidents ayant comme principale cause la défaillance de pièces critiques, les autorités ont soutenu des projets de recherche et développement, pour maîtriser et réduire les risques associés aux opérations d'usinage. Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le projet ACCENT¹, réalisé par des motoristes et universitaires européens. Ce chapitre présentera premièrement la problématique liée à l'usinage de pièces critiques. Ensuite, une description des différents projets sera faite. Les objectifs, la démarche et l'organisation du projet ACCENT seront abordés de même que le travail effectué dans cette étude.

¹ Adaptive Control of Manufacturing Processes for a New Generation of Jet Engine Components

I.1 Environnement de l'étude

Le contexte aéronautique connaît un développement accéléré dans les dernières décennies. Une étude statistique (Figure I.1.1) réalisée en 1997 par la FAA (Federal Aviation Administration) montre une évolution croissante du trafic aérien. Mais, cette croissance risque d'être proportionnelle au nombre d'accidents. Si la tendance n'est pas modifiée, en 2015 il y aura un accident par semaine (dans la perspective où la flotte aérienne mondiale va doubler entre 1996 et 2015). Ce sujet est toujours d'actualité et les prévisions en 2011 de la FAA [FAA 11] évoquent maintenant un milliard de passagers en 2021. Ces chiffres sont d'autant plus significatifs car ce nombre des passagers était prévu pour 2023.

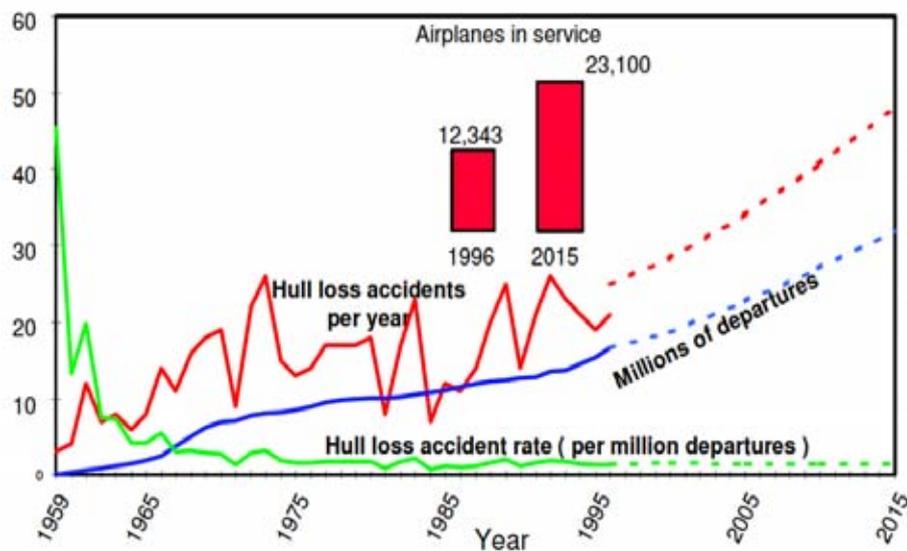


Figure I.1.1 : Étude statistique sur l'évolution du trafic aérien et du nombre d'incidents [ManHIRP 04]

Les accidents aéronautiques sont causés par plusieurs facteurs et ont rarement une cause unique. Le pourcentage le plus élevé des accidents est lié à des facteurs humains. Mais, dans cette catégorie, il ne faut pas impliquer uniquement les pilotes, mais aussi les contrôleurs aériens, les responsables de maintenance, etc. Les équipages doivent s'entraîner constamment pour éviter ces erreurs. Après les facteurs humains, la deuxième cause d'accidents mortels est représentée par la rupture des moteurs (Figure I.1.2). L'acronyme SCF-PP fait référence aux accidents au cours desquels un système ou un composant lié aux moteurs de l'aéronef est tombé en panne ou a subi un dysfonctionnement. La défaillance de certaines pièces, pendant l'exploitation, peut entraîner une impossibilité de décollage ou d'atterrissage, un endommagement de l'avion ou des pertes humaines. Ces problèmes sont aussi liés à différentes causes, mais le pourcentage le plus important (environ 25 %) correspond à des défauts des pièces introduits par les opérations d'usinage.

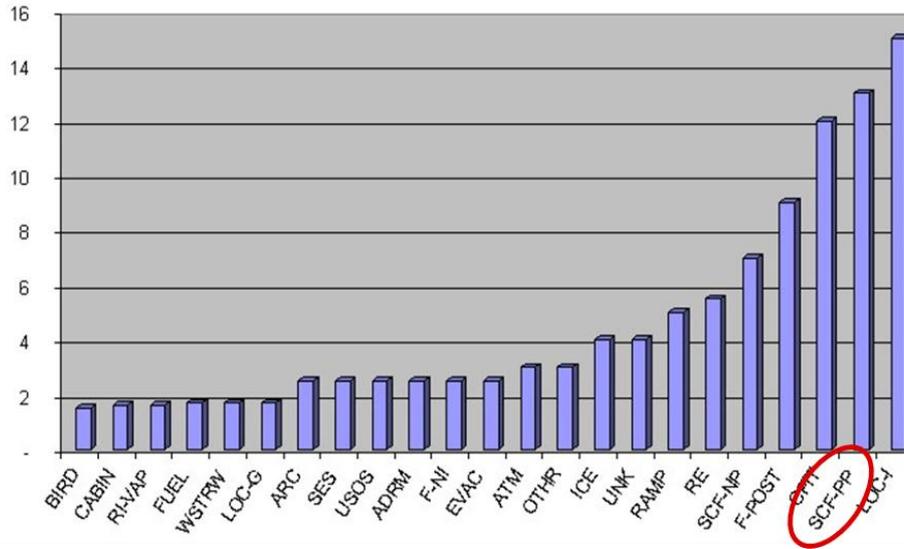


Figure I.1.2 : Causes des accidents aériens mortels enregistrés par EASA entre 1999 et 2008

I.1.2. Pièces à haute criticité

Le turboréacteur est un système de propulsion essentiellement utilisé pour les avions. Sa fonction principale est de fournir la poussée nécessaire pour la propulsion. Il s'agit de machines très complexes regroupant un grand nombre de sous-système, qui doivent supporter des sollicitations thermiques et mécaniques intenses pendant leur exploitation. Lors du fonctionnement, il est possible que la rupture de certaines pièces puisse arrêter le moteur, comme générer un impact majeur pour l'aéronef (si les débris ne peuvent pas être retenus par le carter). Ces pièces, appelées « critiques », fonctionnent à hautes températures (> 600 °C) et à très grande vitesse de rotation (~40000 tr/min). Les turbines à haute pression, ainsi que les turbines libres présentées dans la Figure I.1.3 sont deux exemples des pièces critiques.

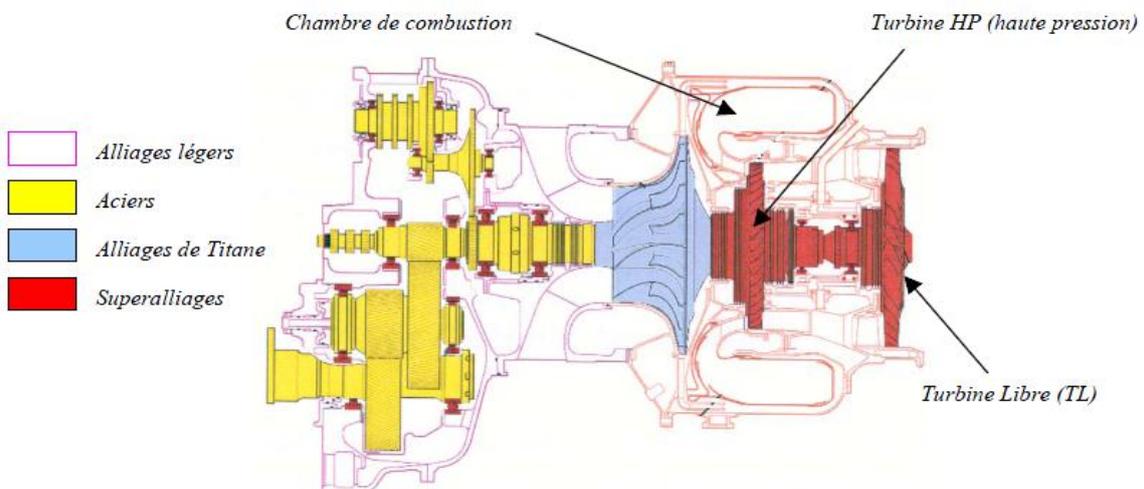


Figure I.1.3 : Vue en coupe du moteur Turbomeca Arrius 2B

L'intégrité de surface est l'un des plus importants paramètres influant sur la tenue en fatigue de ces pièces. Ce terme ne décrit pas seulement la topographie de la surface, mais aussi les propriétés métallurgiques des pièces obtenues après une opération d'usinage.

Les pièces tournantes pour lesquelles un haut niveau d'intégrité de surface est exigé sont soumises à des contrôles spéciaux et leur qualité est garantie par un processus de validation du procédé de fabrication. Pour celles-ci, toutes les méthodes de fabrication sont examinées afin d'établir les paramètres qui assureront la qualité requise. En ce qui concerne l'opération d'usinage, ces paramètres peuvent correspondre à une plage de vitesses de coupe et avances acceptables ou à une certaine géométrie de l'outil.

Dans l'industrie aéronautique, deux procédés de validation sont utilisés (Figure I.1.4):

- **Part Specific Process Validation (PSPV):** chaque première pièce est évaluée par rapport à la conception et la production ultérieure est contrôlée afin que le produit soit en accord avec le procédé de validation.
- **Generic Manufacturing Process Validation (GMPV) :** toutes les méthodes de fabrication identifiées comme « spéciales », c'est-à-dire exigeant un haut niveau de contrôle, sont examinées selon des spécifications et/ou des limites de paramètres validés.

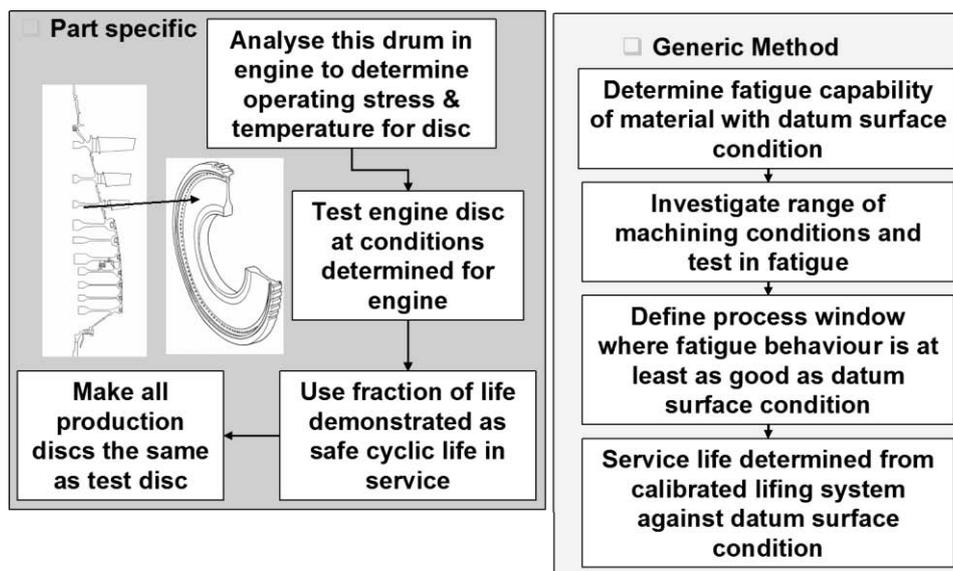


Figure I.1.4 : Les deux procédés de validation utilisés dans l'industrie aéronautique [ACCENT 09]

I.1.3. Cause des accidents aéronautiques

Malgré l'utilisation de ces deux procédés de validation qui est suivi par la détermination de paramètres du procédé, la qualité des pièces n'est pas assurée à 100 %. Pendant l'usinage, des phénomènes aléatoires peuvent apparaître et impacter d'une manière négative la santé matière des pièces usinées. Ils représentent le motif pour lequel le procédé d'usinage ne peut pas être complètement fixé. Les perturbations d'usinage peuvent correspondre à :

- la variation des propriétés du matériau (dureté, homogénéité, inclusion, etc.),
- la qualité des outils coupants (variabilité géométrique, du substrat et du revêtement),
- l'efficacité du lubrifiant (le pourcentage d'émulsion, pression, température),
- l'action ou l'inattention humaine.

Suite à l'impact de ces perturbations sur l'usinage des disques de turbines, plusieurs incidents aéronautiques ont été enregistrés dans le passé. Malheureusement, chaque accident a été accompagné d'un lourd bilan humain.

Le 19 juillet 1989, à Sioux City (USA) un avion DC10-10 équipé d'un moteur GE CF6-6D, a été impliqué dans un incident tragique. En vol, un moteur a subi un éclatement et les débris qui n'ont pas été retenus par le carter ont détruit les trois circuits hydrauliques, obligeant le pilote à effectuer un atterrissage d'urgence. Les enquêteurs ont découvert une fissure et des impuretés dans un disque de turbine. L'enquête a montré qu'il y avait un défaut de l'élaboration du matériau et plus précisément un défaut dans l'élimination des anomalies gazeuses lors de la purification du lingot disque de titane. Un excédent d'azote a été confiné dans le matériau, provoquant une inclusion « hard α » dans le disque en Ti6Al4V.

Un deuxième incident, avec un avion McDonnell-Douglas MD-88 équipé d'un moteur Pratt & Whitney JT8D-219, s'est produit à Pensacola (Floride, USA) le 6 juillet 1996 (Figure I.1.5). Pendant le décollage, le moteur gauche a subi une défaillance et les débris ont pénétré dans la cabine. Si l'incident s'était produit en vol, les conséquences auraient pu être désastreuses. Cette fois-ci, l'enquête a mis en évidence un défaut en « sous-couche » généré pendant l'usinage. Lors du perçage d'un disque en TA6V, une rupture de l'outil a provoqué une surchauffe locale, ce qui a entraîné la formation d'une « zone affectée thermo-mécaniquement ». Cette anomalie a été à l'origine de l'amorçage de fissures provoquant la rupture du disque.

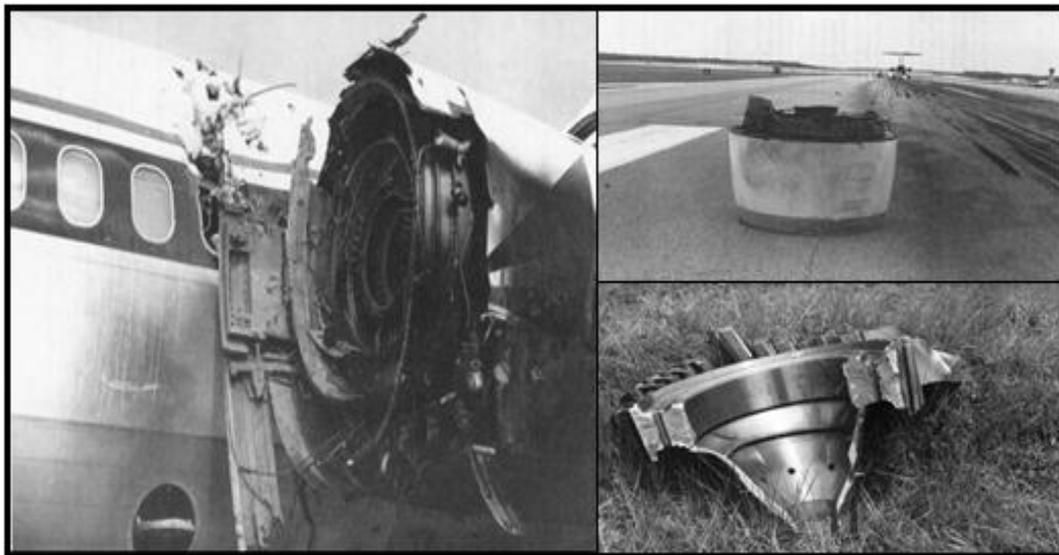


Figure I.1.5 : Incident aérien de Pensacola (Floride, [ManHIRP 04])

Plus récemment, un incident ayant comme objet principal la rupture de pièces critiques a été enregistré le 2 juin 2006, à l'aéroport de Los Angeles. En effet, pendant le vol, les pilotes ont observé un dysfonctionnement d'un moteur et ils ont décidé d'atterrir. Lors d'un essai au sol fait par le personnel d'entretien, le moteur a connu une rupture d'un disque haute pression. Les débris ont perforé le fuselage et se sont encastrés dans l'autre moteur, tandis que d'autres ont été retrouvés sur les pistes adjacentes.

L'incident le plus récent, a impliqué un avion Airbus A380-842 de la compagnie aérienne Qantas. Le 4 novembre 2010, l'avion est parti de Singapore pour la destination de Sydney. Après le décollage, un moteur a émis une forte détonation souffrant d'une défaillance non confinée. La cause a été attribuée à la défaillance d'un composant spécifique dans la zone de la turbine du moteur. Un problème de fabrication sur un tuyau d'alimentation d'huile a provoqué un feu d'huile, qui par la suite a engendré une rupture de pièce critique (le disque de turbine à pression intermédiaire (Figure I.1.6)).



Figure I.1.6 : Disque de turbine à pression intermédiaire de l'Airbus A380 (Qantas)

I.1.4. Projets

Étant donné l'augmentation prévue du transport aérien et la démonstration de l'influence des défaillances de pièces critiques, dues à des perturbations d'usinage pendant la fabrication, les autorités aériennes ont pris conscience de la nécessité d'agir en imposant des moyens de contrôle plus adéquats au contexte actuel de fabrication aéronautique. Suite aux accidents de Sioux City et Pensacola, les autorités de certification (FAA, EASA² et UE³) ont initié et financé des projets, décrits ci-dessous :

Projet RISC (Rotor Integrity Sub-Committee) : suite à l'incident de Sioux City, AIA (Aerospace Industrials Association) a créé sur la demande de la FAA un groupe de travail formé de GE Aircraft Engines, Honeywell, Pratt & Whitney, Hamilton, Rolls Royce Corporation, Snecma et MTU. Le projet a débuté en 1992 et avait comme objectif de définir « le draft d'une Advisory Circular » qui

² European Aviation Safety Agency

³ L'Union Européenne

oblige les motoristes à prendre en compte les défauts (e.g. inclusion « hard α ») non habituellement intégrés.

Projet RoMan (Rotor Manufacturing) : Le projet a commencé en 2004 en partenariat avec la FAA, l'AIA et les motoristes. Selon les résultats issus du projet RISC, un pourcentage d'environ 25 % des problèmes sur les disques est dû aux opérations d'usinage. Dans ce contexte, les objectifs du projet se sont orientés vers la définition de la sensibilité des pièces critiques à tout type d'usinage. Une recommandation très importante du projet était l'utilisation de la surveillance d'usinage dans le cas du perçage avec un ratio longueur/diamètre supérieur à trois pour l'usinage des pièces critiques.

Projet ManHIRP (Integrating Process Controls with Manufacturing to produce High Integrity Rotating Parts for Modern Gas Turbines) : six motoristes européens, cinq universités, un institut de recherche et une société de service se sont impliqués dans ce projet, entre 2001 et 2004, avec l'objectif principal de diviser par dix le nombre d'anomalies générées pendant l'usinage de pièces en TA6V et Inconel718. Ce projet a permis aussi d'investiguer l'utilisation de la surveillance d'usinage pour détecter les anomalies et l'impact des anomalies sur la fatigue. Un résultat important issu de ManHIRP a été la définition et la classification des anomalies introduites par l'usinage.

Projet ACCENT : représente le contexte dans lequel ces travaux de thèse ont été réalisés et il sera détaillé dans le paragraphe I.2.

Projet FAA (Development of a process monitoring strategy for drilling and broaching operations in critical aero components) : l'intérêt du projet FAA se porte vers la définition des moyens de surveillance d'usinage qui seront employés dans des applications industrielles. Les procédés d'usinage visés sont le brochage et le perçage des pièces critiques.

Projet STADMAP : projet actuellement en soumission à la communauté européenne. A la suite du projet ACCENT, STADMAP est orienté vers la définition des procédés, des outils et leurs optimisations, toujours dans le cadre d'une maîtrise absolue de l'intégrité des surfaces usinés.

I.2. Projet européen ACCENT

Suite à une nouvelle directive européenne qui oblige les motoristes à assurer la traçabilité des opérations d'usinage pour les pièces critiques ainsi que les nombreuses études dirigées par FAA, quatorze partenaires (motoristes et universitaires européens) se sont associés dans ce projet d'envergure.

I.2.1. Cadre et objectifs

La Figure I.2.1 présente la boucle de contrôle de la fabrication d'une pièce critique. L'objectif majeur de la conception des pièces de haute performance, comme celles utilisées dans l'aéronautique, est de garantir la durée de vie. En parallèle, elles doivent présenter un design innovant (toujours moins chères et plus légères, tout en développant une puissance importante). Les méthodes de fabrication sont influencées dans une mesure très importante par l'opération d'usinage. Cela conduit à certaines caractéristiques métallurgiques de pièces, qui ensuite vont influencer leur durée de vie. Dans ce contexte, la surveillance d'usinage s'avère être un élément important pour sécuriser et optimiser la production des pièces critiques.

Le concept ACCENT vient du besoin d'enrichir les connaissances acquises pendant les projets européens précédents (par exemple, projet ManHIRP), afin d'utiliser la surveillance d'usinage comme moyen de contrôle non destructif. De plus, il va permettre aussi de fiabiliser le processus de fabrication des pièces critiques.

L'objectif principal du projet ACCENT est de réduire l'incertitude dans la fabrication des pièces critiques en utilisant la surveillance d'usinage. La réalisation de cet objectif garantira une haute qualité des pièces et un niveau de performance du moteur plus élevé.

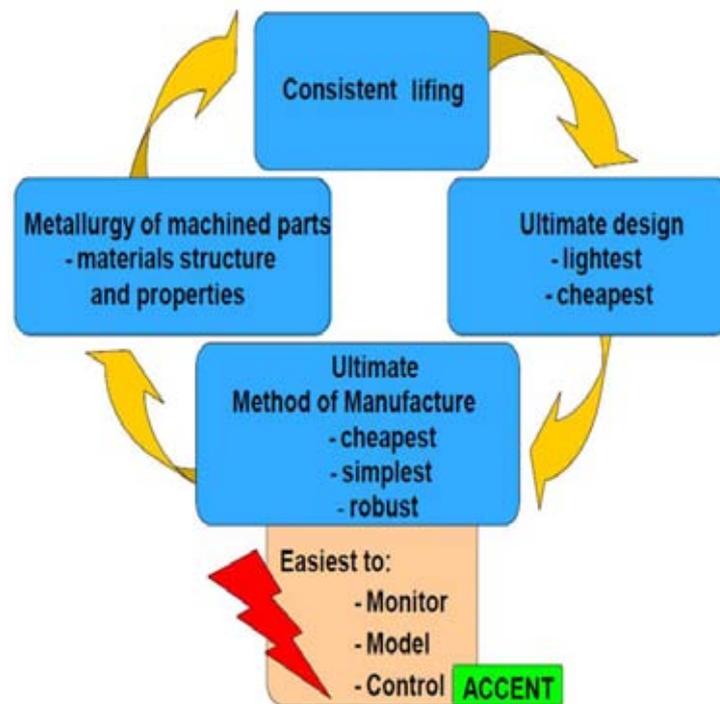


Figure I.2.1 : Boucle de contrôle des processus de conception et fabrication [ACCENT 09]

Les quatorze partenaires (Tableau I.2.1) sont impliqués dans l'étude de quatre procédés de fabrication, notamment le brochage, le tournage, le fraisage et le perçage de deux familles de matériaux (alliages de titane et superalliages à base nickel).

Tableau I.2.1 : Partenaires du projet ACCENT

<i>Constructeurs aéronautiques européens :</i>	<i>Laboratoires de recherche :</i>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rolls-Royce (RR) ▪ Volvo Aero Corporation (VAC) ▪ Turbomeca (TM) ▪ Industria de Turbo Propulsores S.A. (ITP) ▪ Avio SpA (AVIO) ▪ Snecma (SN) ▪ MTU Aero Engines GmbH (MTU) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ WZL – RTWH Aachen (WZL) ▪ Advanced Prototype Research (APR) ▪ Laboratoire Génie de Production de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT) ▪ Mondragon Goi Eskola Politeknikoa S. Coop. (MGEP) ▪ University of Naples (UNINA) ▪ Société d'Etudes et de Recherches de l'ENSAM (SERAM) ▪ Technical University of Kosice (TUKE)

Chaque couple procédé/matériau est associé à une équipe formée par un motoriste et une université (Tableau I.2.2) avec le but de mettre en place une méthodologie spécifique. Toutes les démarches scientifiques et expérimentales sont en forte relation avec le contexte industriel.

Tableau I.2.2 : Couples procédé/ matériau

	Perçage	Tournage	Fraisage	Brochage
Udimet 720[®]	<i>TM - ENIT</i>	<i>TM - ENIT</i>		
Inconel 718[®]	MTU - WZL	ITP - MEGP AVIO - UNINA	SN - ENSAM	RR - VAC - AVIO - WZL
TA6V		SN - ENSAM	RR - WZL	

Le Laboratoire Génie de Production de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes travaille en collaboration avec Turbomeca sur le perçage et le tournage de l'Udimet 720[®]. L'application industrielle choisie est l'usinage de l'alésage central des disques de turbine haute pression.

I.2.2. Démarche

La démarche adoptée dans le projet est présentée dans la Figure I.2.2. Elle comporte cinq étapes :

1. développer une procédure standard qui définira la fenêtre des paramètres d'usinage pour la fabrication des pièces critiques ;
2. développer des méthodes permettant aux pièces fabriquées dans la fenêtre définie antérieurement d'être validées selon les spécifications de conception et les critères d'intégrité de surface ;
3. fournir aux motoristes une méthodologie qui permette une réduction importante des coûts pour le procédé de validation de l'usinage ;

4. développer une nouvelle procédure pour un contrôle adaptatif, basée sur la surveillance d'usinage, intégrant les perturbations d'usinage ;
5. fournir aux partenaires industriels une méthodologie qui permettra une optimisation de la conception et de la fabrication des pièces critiques.

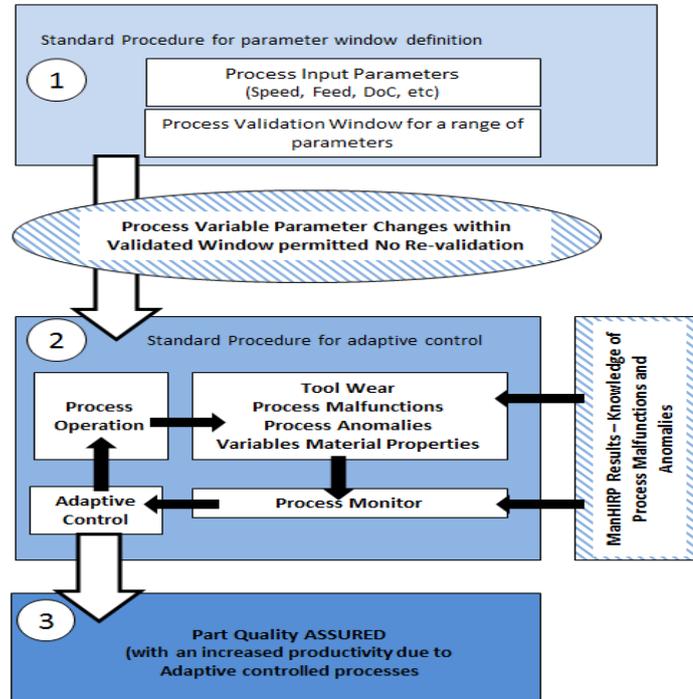


Figure I.2.2 : Procédure standard pour la définition de la fenêtre de paramètres d'usinage selon ACCENT [ACCENT 09]

I.2.3. Organisation

Le projet est organisé dans cinq Lots (Figure I.2.3). Une brève description est faite pour chaque partie:

- WP 1 : « *Project Management* » (responsable RR). Le principal rôle correspond à l'organisation et la gestion du projet.
- WP 2 : « *Standardization of multi-dimensional processes* » (responsable MTU). L'objectif est de fournir une procédure standard qui définit la manière avec laquelle un processus d'usinage doit être établi et contrôlé afin de satisfaire un niveau d'intégrité de surface acceptable.
- WP 3: « *Adaptive Control and Monitoring* » (responsable WZL). Il permet de définir les systèmes de surveillance qui vont permettre de développer une boucle de contrôle garantissant que l'usinage reste dans une fenêtre acceptable en termes d'intégrité de surface. Le WP3 est basé sur les spécifications et les exigences définies en WP2.

- WP 4: « *Component integrity definition and data storage* » (responsable TM). Son objectif est d'étudier l'intégrité de surface générée lors de l'usinage et générer les bases de données.
- WP 5: « *Exploitation and Dissemination* » (responsable SN). L'objectif est d'assurer que les partenaires industriels peuvent intégrer les résultats dans leurs procédés de fabrication et que la recherche scientifique générée par le projet peut être publiée, avec l'accord du consortium.

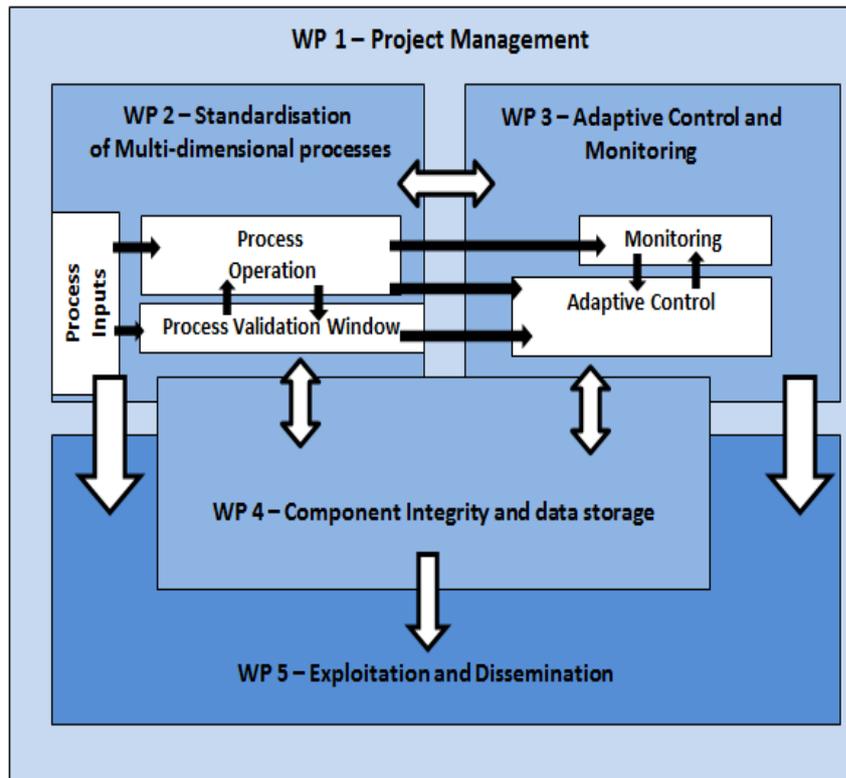


Figure I.2.3 : Organisation générale du projet [ACCENT 09]

I.3. Démarche de la thèse

Pour répondre aux besoins du projet et selon l'implication du LGP dans les lots WP2, WP3 et WP4, différentes activités ont été initiées. La première était orientée vers la caractérisation de la qualité de la surface usinée, en utilisant la surveillance en usinage lors du perçage et du tournage de disques de turbines en Udimet[®] 720 ([Dutilh 11]). Les différents critères d'intégrité de surface ont été définis, ainsi que les signaux de surveillance d'usinage les plus adéquats. Ensuite, des relations entre ces critères et ces signaux ont été identifiées pour la prédiction ou l'anticipation de certaines anomalies générées lors de l'usinage.

En parallèle avec ces premiers résultats, les travaux qui font l'objet de ce mémoire s'inscrivent dans les étapes 2, 3, 4 du projet ACCENT (§ I.2.2) et sont orientés sur le suivi de l'usure d'outil dans le cas du perçage de superalliages à base nickel. Différents objectifs intermédiaires peuvent être annoncés :

- fiabiliser les relations entre les perturbations d'usinage, les signaux mesurés et les défauts d'intégrité de surface. Pour cela, une première phase s'intéresse à l'aspect phénoménologique des interactions entre paramètres d'entrée (conditions de coupe, etc.) et de sortie (intégrité matière, etc.). Ceci permet d'expliquer et de comprendre l'évolution des signaux de surveillance en fonction des conditions de coupe, perturbations d'usinage ou même de défauts d'intégrité de surface. Mais, il est possible que certains cas soient difficiles à identifier (à cause du nombre importants des paramètres, fluctuations, fiabilité, perturbations d'usinage, etc.) et nécessiteront une deuxième phase : l'approche statistique. À l'aide d'outils mathématiques, les relations entre les critères statistiques relevés sur les signaux enregistrés et les critères d'intégrité de surface ou d'usure seront modélisées. Nous nous appuierons donc sur deux approches complémentaires, phénoménologique et « boîte noire »,
- définir la robustesse de moyens de surveillance d'usinage et les signaux et critères à employer selon les défauts d'intégrité de surface visés,
- extrapoler la méthode au suivi de l'usure (qui représente une perturbation d'usinage à influence majeure sur l'intégrité de surface).

Le domaine d'application des travaux est centré sur le perçage de zones classées zones critiques. Ce procédé de fabrication est un usinage confiné et qui peut engendrer une mauvaise évacuation de copeaux, des surchauffes locales, des copeaux adhérents, etc. Pour ces zones, une défaillance peut provoquer un dysfonctionnement irréversible du moteur lorsqu'elles sont soumises à de fortes sollicitations thermo-mécaniques en fonctionnement. L'objectif final est de proposer une technique de surveillance de l'usure d'outil basée sur la mesure des grandeurs physiques, avec la prise en compte des perturbations d'usinage, comme par exemple une mauvaise évacuation des copeaux en perçage. Cette direction représente un enjeu important pour l'intégrité de surface, ainsi que pour la rentabilité du procédé.

Dans notre démarche nous pouvons distinguer trois grandes étapes. Tout d'abord, nous nous sommes intéressés à identifier les modes de dégradation de l'outil caractéristiques pour notre procédé d'usinage. Afin d'étudier cet aspect et répondre au besoin du projet ACCENT, un protocole expérimental a été défini (qui sera détaillé dans le troisième chapitre). Cette méthodologie nous a permis de tester une plage importante de paramètres de coupe (vitesse de coupe et avance) et les influences sur le comportement de l'outil (avec et sans perturbations d'usinage).

La deuxième étape consiste à déterminer les relations entre les modes de dégradation de l'outil et les signaux des systèmes de surveillance correspondants. Pendant tous les essais, les signaux correspondant à des grandeurs physiques (efforts, couple, puissance, vibrations, etc.) ont été enregistrés. Cette partie de la démarche a montré la sensibilité de chaque grandeur physique pour détecter les éventuels problèmes et l'adéquation de ces systèmes avec l'application industrielle.

Basé sur ces résultats, la troisième partie propose une solution de surveillance de l'outil. La compréhension des phénomènes identifiés nous permet d'établir des relations ou modèles employés pour le suivi des signaux et le traitement statistique nous permet de fiabiliser cette approche.

Tous ces travaux de thèse apportent une compréhension plus approfondie de l'influence des modes de dégradation sur l'évolution des signaux mesurés pendant l'usinage. L'identification des phénomènes liés à des perturbations (par exemple, les problèmes d'évacuation des copeaux), corroborés avec les résultats issus de la première activité dans le projet ACCENT (thèse DUTILH) doivent permettre de faire avancer la surveillance des procédés de fabrication de pièce critique.

Synthèse

Les défauts d'usinage des pièces tournantes représentent une des causes principales d'incidents aéronautiques. Sachant que le nombre d'avions en circulation ne cesse de s'accroître, les autorités de certification ont organisé et financé plusieurs programmes afin de réduire les risques liés à la fabrication de pièces critiques.

L'un de ces projets (ACCENT), représente le contexte dans lequel ces travaux de thèse se sont déroulés. Des constructeurs européens de moteurs aéronautiques et des universitaires se sont engagés dans ce projet, afin de définir une démarche pour sécuriser les opérations d'usinage en utilisant des méthodes de surveillance.

L'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes travaille en collaboration avec Turbomeca dans le cadre du projet ACCENT pour étudier les opérations d'usinage de l'alésage central d'un disque haute pression en Udimet 720[®]. L'approche est basée sur une étude expérimentale permettant l'identification et la compréhension des relations entre les modes de dégradation de l'outil et les signaux enregistrés avec la prise en compte de perturbations d'usinage. À partir de ces résultats, les signaux les plus représentatifs des modes de dégradation de l'outil sont énumérés dans un objectif global de proposition d'une technique de surveillance de l'usure de l'outil. En conclusion, les résultats de ces travaux de thèse s'intègrent parfaitement dans les objectifs du projet ACCENT, notamment le développement d'une procédure de contrôle basée sur la surveillance en intégrant les perturbations d'usinage ainsi qu'une réduction des coûts lors d'une nouvelle procédure de validation d'usinage.

Chapitre II

II. État de l'art

Introduction	22
II.1. L'usinage de superalliages aéronautiques	23
II.1.1. Les superalliages	23
II.1.2. L'usinabilité de superalliages	24
II.1.3. L'usure de l'outil – paramètre important influant dans la fabrication des pièces aéronautiques	25
II.1.4. Dégradation de l'outil	26
II.1.4.1. Modes d'usure des outils	26
II.1.4.1.1. L'usure par abrasion	26
II.1.4.1.2. L'usure par adhésion	27
II.1.4.1.3. L'usure par diffusion	28
II.1.4.2. Les principales formes d'usure	28
II.1.4.2.1. Usures en dépouille, sur la face de coupe et des listels	29
II.1.4.2.2. L'arête rapportée	30
II.1.4.2.3. L'entaille	30
II.1.5. Paramètres influençant l'usure des outils	31
II.1.5.1. Les conditions de coupe	31
II.1.5.2. Le revêtement	32
II.1.5.3. La lubrification	35
II.1.5.4. Autres paramètres	36
II.2. Techniques de surveillance	37
II.2.1. Introduction	37
II.2.2. Systèmes de mesure	39
II.2.2.1. Les efforts de coupe	39
II.2.2.2. La puissance et le courant broche	41
II.2.2.3. Les vibrations	42
II.2.2.4. Les émissions acoustiques	43
II.2.2.5. La température	44
II.2.3. Traitements des signaux	46
II.2.3.1. Analyse temporelle	47
II.2.3.2. Analyse fréquentielle	48
Synthèse	51

Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter les principales notions et travaux sur lesquels nous nous sommes appuyés pour effectuer cette étude. Ces éléments peuvent être mis en relation avec les étapes définies (lors du premier chapitre) pour ces travaux de thèse :

- tout d'abord, nous présenterons les superalliages utilisés dans l'industrie aéronautique pour la réalisation des disques de turbines. Nous nous attacherons dans un premier temps à leurs propriétés ainsi que sur les problèmes liés au procédé d'usinage,

- l'usure des outils représente un aspect important dans l'usinage et donc, dans une seconde partie, nous exposons les modes de dégradation caractéristiques des outils coupants dans l'usinage des superalliages et les différents types d'usures rencontrés dans ce contexte. L'usure est une conséquence des interactions entre les conditions de coupe, les paramètres liés à l'outil (le substrat, le revêtement, la géométrie, etc.), à lubrification (pression, type de liquide de coupe, etc.) et la matière à usiner. Parmi tous ces facteurs, les plus influents sont exposés,

- la dernière partie de l'état de l'art est dédiée à la surveillance de l'usure de l'outil. Ce paragraphe a pour but d'apporter une présentation plus détaillée des méthodes de surveillance existantes dans la littérature. Ensuite, les principales grandeurs physiques et les traitements des signaux (par l'analyse temporelle ou fréquentielle) représentatifs de l'usure de l'outil sont exposés.

II.1. L'usinage de superalliages aéronautiques

Nous présentons dans ce qui suit quelques notions (définition, classification, utilisation et propriétés) des superalliages utilisés dans l'industrie aéronautique. Ensuite, nous exposons les aspects liés à l'usinage de superalliages, à l'impact du procédé sur l'intégrité de surface et au rôle de l'usure dans le contexte de l'usinage (cet aspect permet de montrer l'intérêt de faire un suivi de l'usure).

II.1.1. Les superalliages

Les superalliages sont des alliages de matériaux métalliques, essentiellement à base de nickel ou de cobalt, dotés d'une bonne tenue mécanique à haute température (au-delà de 550 °C) et d'une certaine résistance à l'oxydation ou à la corrosion à chaud.

Le développement et la croissance des superalliages ont commencé après la Seconde Guerre mondiale suite à une demande croissante de pièces soumises à des sollicitations thermomécaniques de plus en plus importantes ainsi qu'à l'expansion dans le monde entier de l'industrie aéronautique. L'application n'est cependant pas réservée seulement aux moteurs, qu'ils soient d'avions (environ 60 %) ou de systèmes terrestres de production d'énergie, mais aussi aux équipements pour les réacteurs nucléaires, les installations chimiques et pétrochimiques, des dispositifs médicaux, des pièces de moteur-fusée, des applications cryogéniques, etc.

Selon les éléments d'alliages, ces matériaux se classifient en trois groupes : les bases nickel, les bases cobalt et les bases fer.

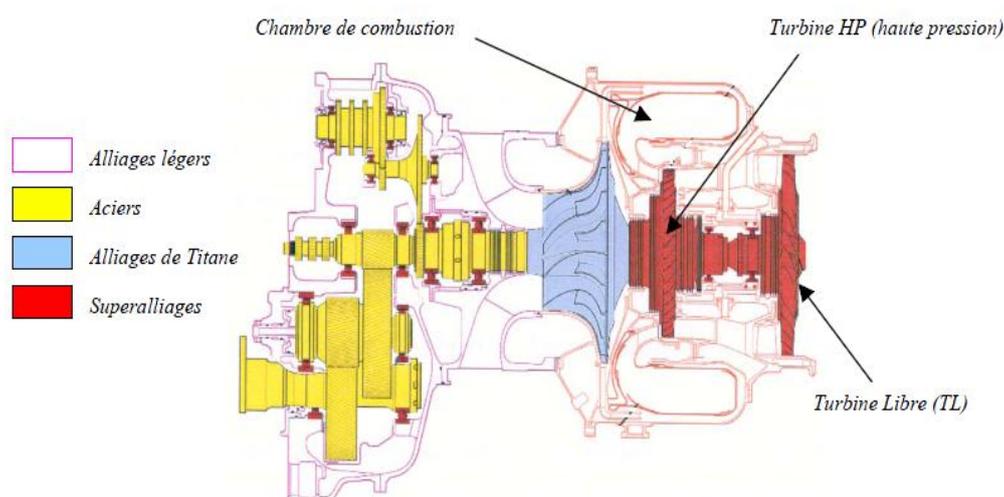


Figure II.1.1 : La répartition des alliages dans le moteur Arrius 2B

Les superalliages à base nickel représentent environ 50 % du poids de moteurs aéronautiques [Arunachalam 04]. Ces matériaux sont particulièrement répandus dans la chambre de combustion et la

turbine (en rouge sur la Figure II.1.1) où de hautes températures de fonctionnement sont généralement atteintes. Pour ces parties de moteurs, les superalliages à base nickel offrent les meilleures propriétés pour une utilisation à des températures comprises entre 600 °C et 750 °C.

Grâce à ses bonnes caractéristiques mécaniques et métallurgiques, l'Inconel[®] 718 est largement utilisé pour des pièces principales de turboréacteur. Toutefois et malgré les développements actuels, les besoins de matériaux présentant des niveaux de résistance plus élevés avec des poids moins importants, c'est-à-dire un fort ratio performance mécanique sur masse embarquée réduira le poids dans l'avion et permettra une économie de combustible. Par conséquent, l'utilisation des alliages de nickel plus avancés a accru.

Un exemple dans ce sens est l'Udimet[®] 720 LI. Ce dernier a été élaboré par la société « Special Metals » aux USA et est aujourd'hui fabriqué en France par « Aubert & Duval ». Il possède une limite d'utilisation en température (750°C) supérieure à celle de l'Inconel[®] 718 (650°C). Pour ce motif, il est utilisé par Turbomeca pour la fabrication des disques de turbine, en remplacement de l'Inconel[®] 718.

II.1.2. L'usinabilité de superalliages

D'après Ezugwu et *al.* [Ezugwu 03], le terme « usinabilité » est décrit comme la facilité ou la difficulté avec laquelle un matériau peut être usiné sous différentes conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, etc.). Cette opération est une fonction de la durée de vie de l'outil, de la qualité de la surface usinée et aussi de la puissance consommée par le processus. Les superalliages ont une « mauvaise usinabilité », due principalement aux propriétés pour lesquels ces matériaux ont été choisis pour des applications aéronautiques.

Dans la littérature il existe des nombreux travaux qui réalisent un état de l'art sur l'usinabilité des superalliages utilisés dans l'industrie aéronautique. Ces articles citent plusieurs aspects communs sur la mauvaise usinabilité de superalliages :

- le soudage et l'adhérence des alliages de nickel sur l'outil génèrent fréquemment une dégradation de l'outil [Ezugwu 95] [Jawaid 01],
- les copeaux longs, continus et durs conduisent à une dégradation de l'outil par une usure en cratère [Ezugwu 95],
- les particules en carbure très abrasives contenues dans leur microstructure mènent à une usure accélérée de l'outil [Axinte 06a],
- l'affinité chimique de ces alliages avec certains matériaux des outils mène à l'usure par diffusion ou à la formation d'une arête rapportée [Sharman 01a],
- la matrice γ a tendance à s'écrouir facilement ce qui peut conduire à la formation d'une arête rapportée,

- la faible conductivité thermique (11 W/m °C) de ces matériaux conduit à des températures élevées dans la zone de coupe (jusqu'à 1200 °C [Kitagawa 97]), ce qui engendre une usure prématurée de l'outil,
- les efforts de coupe peuvent atteindre des valeurs très importantes pendant l'usinage, en excitant le système Machine-Outil-Pièce. La génération des vibrations compromet la qualité de surface.

En plus des problèmes énumérés ci-dessus, le contexte de ces travaux de thèse apporte une couche supplémentaire de difficulté de l'usinabilité de ces matériaux. En effet, l'opération de perçage dans un avant-trou est identique au tournage intérieur, mais avec deux dents. Ce procédé est contraignant pour l'intégrité de surface et pour l'usure des outils. Plusieurs aspects peuvent être détaillés dans ce sens :

- le problème de guidage des outils,
- le frottement des listels de l'outil générant un échauffement du matériau,
- l'usinage confiné peut engendrer une mauvaise évacuation des copeaux et une lubrification difficile dans la zone de coupe,
- la vitesse de coupe au centre de l'outil est nulle, créant un phénomène d'indentation.

II.1.3. L'usure de l'outil – paramètre important influant dans la fabrication des pièces aéronautiques

En considérant la mauvaise usinabilité de ces matériaux, le choix de la stratégie d'usinage est un élément clé pour la réussite du procédé. *Les conditions de coupe* (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe), *les paramètres de l'outil* (le substrat, le revêtement, la géométrie, etc.), *la lubrification* (le type de lubrifiant, la pression, la température, etc.), *le matériau de la pièce* à usiner (la microstructure, la dureté, etc.) représentent les facteurs qui ont un impact sur la qualité de l'usinage. Tous ces paramètres réunis constituent le **contexte de l'usinage**, qui, avec des éventuelles perturbations influent sur les phénomènes thermo-mécaniques générés lors de l'usinage. Par suite, **l'intégrité de surface** de la pièce usinée est affectée par tous ces paramètres. Le terme « *intégrité de surface* » décrit les propriétés mécaniques (contraintes résiduelles, dureté, etc.), l'état métallurgique (par exemple, la microstructure) ou bien la topographie de la surface usinée [Ulutun 10]. Dans le cadre de l'industrie aéronautique, la qualité ainsi que les performances d'une pièce critique sont directement liées à l'intégrité de surface générée après l'opération d'usinage. L'importance de cet aspect est montrée par la préoccupation continue des autorités, des chercheurs ou des industriels qui ont organisé et soutenus des projets afin d'identifier les anomalies d'usinage et comprendre leur impact sur la tenue en fatigue des pièces aéronautiques (partie évoquée dans le premier chapitre). Pour rappel, le contexte actuel de ces travaux, le projet ACCENT, a comme objectif principal la mise en place de techniques de surveillance afin de sécuriser la fabrication des pièces critiques de moteurs aéronautiques. L'intégrité

de surface obtenue pour les différents couples procédés/matériaux a été l'objet de plusieurs travaux dans le cadre de ce projet. Un résultat très important a été la définition des critères (et des valeurs correspondantes pour chacun) pour lesquels l'intégrité de surface de la pièce est acceptable. Dans ce cadre, nous avons choisi de maîtriser *l'usure de l'outil* (qui est une variation de la géométrie de l'outil), afin d'éviter les possibles problèmes introduits par ce paramètre. Évidemment, ce travail se déroule sous les contraintes introduites par les critères d'intégrité de surface.

L'usure est fortement influencée par le contexte d'usinage. Par suite, elle constitue un paramètre intermédiaire entre celui-ci et l'intégrité de surface comme présenté dans la Figure II.1.2.



Figure II.1.2 : Relations entre le contexte d'usinage et l'intégrité de surface

Une dégradation de l'outil (écaillage, arête rapportée, etc.) peut avoir un impact négatif sur la l'intégrité matière (échauffement local, mauvais profil de rugosité, etc.). Un niveau plus important d'usure génère une déformation plastique de la microstructure, une augmentation de la micro-dureté en sous-couche ou des contraintes résiduelles de traction [Sharman 06].

Par la suite, nous nous sommes intéressés à faire un bilan sur les modes de dégradation de l'outil générés par l'usinage des superalliages ainsi que les principales formes d'usure des outils coupants. Ensuite, nous décrirons les facteurs jouant un rôle significatif sur l'usure de l'outil.

II.1.4. Dégradation de l'outil

L'Udimet 720[®] est un matériau qui n'est pas courant. Il est dédié à la fabrication de certaines pièces aéronautiques (notamment les disques de turbines) dont le nombre est très réduit par rapport au reste des pièces mécaniques. Ceci explique le nombre réduit d'études s'intéressant à ce matériau. Toutefois, de nombreux articles traitent de l'usure de l'outil dans le cas de l'usinage de l'Inconel[®] 718, un matériau plus répandu. Dans la suite, les différentes modes d'usure qui sont caractéristiques pour l'usinage de superalliages seront exposées. Il s'agit de : l'usure par abrasion, l'usure par adhésion et l'usure par diffusion.

II.1.4.1. Modes d'usure des outils

II.1.4.1.1. L'usure par abrasion

L'usure par abrasion est la forme d'usure la plus répandue dans les opérations d'usinage. C'est un phénomène mécanique qui se produit à faible température, due à la présence de particules dures et

d'impuretés dans le matériau de la pièce [Ezugwu 99], tels que les composés du carbone, de nitrure et d'oxyde, etc. L'abrasion se caractérise par la présence de rayures, d'arrachements, etc.

II.1.4.1.2. L'usure par adhésion

Un nombre important de travaux s'intéressent à l'usure des outils en carbure de tungstène, ayant un phénomène commun : l'adhérence du matériau de la pièce sur l'outil. Les alliages base nickel ont une affinité pour certains matériaux d'outil et causent souvent la formation d'une couche d'adhésion sur la face de coupe provoquant une usure prématurée. Il est possible que ce phénomène soit présent aussi sur la face en dépouille ou sur les listels, en fonction de phénomènes générés par le processus de coupe. Lors du contact entre l'outil et la pièce, des phénomènes mécaniques et thermiques sont mis en jeu. L'usinage des alliages par enlèvement de matière apporte des déformations plastiques et des frottements intenses à l'interface de contact entre l'outil et la pièce. Dans cette zone, et à cause de la faible conductivité thermique des alliages base nickel qui ne permet pas une diffusion de la chaleur, les températures générées peuvent atteindre 1200 °C, selon Kitagawa [Kitagawa 97]. Sous l'action de contraintes mécaniques et les hautes températures, l'adhésion peut se produire. Dans le tournage de l'Inconel 718[®] avec des outils ayant un revêtement en carbure cémenté, Liao et *al.* [Liao 96] montrent la formation d'une couche adhérente proche de l'arête de coupe. Les analyses ont montré que les particules déposées proviennent du matériau usiné et que les causes du collage sont les contraintes importantes générées lors de l'usinage ou l'affinité chimique entre l'outil et le matériau. Les travaux de Dutilh [Dutilh 11] mettent en évidence un dépôt de nickel au niveau de l'arête de coupe et des listels (Figure II.1.3.a), dans le perçage de l'Udimet 720[®]. Ce phénomène est illustré aussi par Devillez et *al.* [Devillez 07] dans le tournage de l'Inconel 718[®] (Figure II.1.3.b).

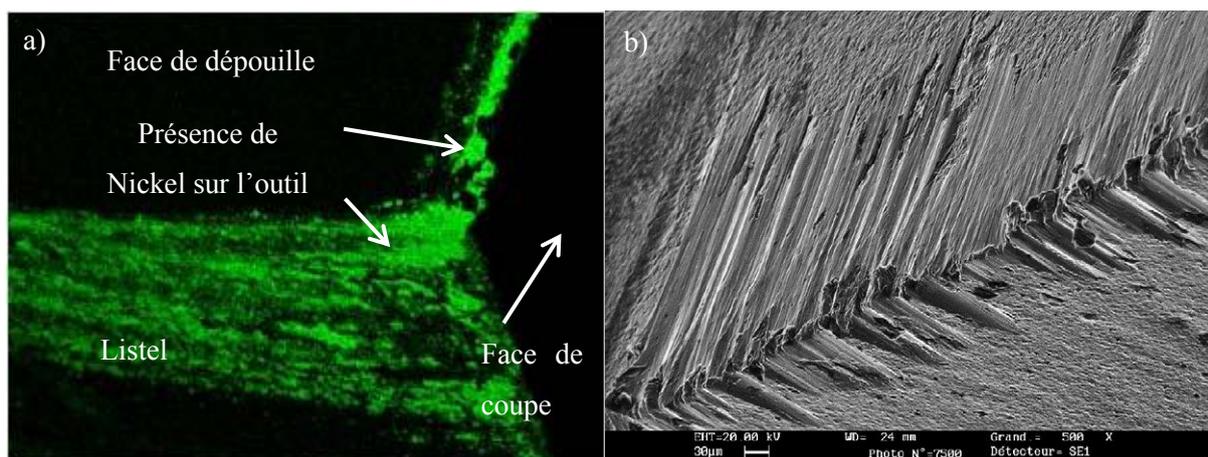


Figure II.1.3 : (a) Présence du nickel sur l'outil [Dutilh 11], (b) : Adhérence de l'Inconel 718[®] sur l'outil [Devillez 07]

II.1.4.1.3. L'usure par diffusion

L'usure par diffusion est un autre phénomène qui limite la durée de vie de l'outil. Des études réalisées sur plusieurs matériaux et procédés : le fraisage d'un alliage de titane [Zhang 09], le tournage de l'Inconel 718[®] [Liao 96] ou de l'alliage GH4169 [Xue 11] mettent en évidence ce phénomène. Les grains de carbure et d'autres constituants migrent de la surface de l'outil vers le copeau. L'écoulement continu du copeau favorise les échanges des constituants à travers la diffusion. Ce type d'usure est favorisé par les hautes températures de coupe, des fortes pressions de contact ainsi que par la composition chimique des matériaux (de l'outil et de la pièce à usiner). Jianxin et *al.* [Jianxin 08] ont réalisé des essais en statique pour étudier le phénomène de diffusion. Le dispositif utilisé est décrit dans la Figure II.1.4 et suppose le contact entre le Ti-6Al-4V et le WC/Co (matériau de l'outil utilisé pour l'usinage du titane) sous une pression de 10 MPa et différentes températures. Les résultats ont montré que la diffusion des atomes de titane vers l'outil se fait à partir d'une température de 600 °C.

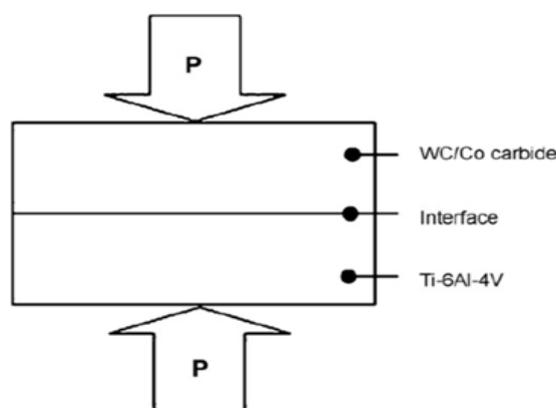


Figure II.1.4 : Schéma du couple utilisé pour l'étude de la diffusion [Jianxin 08]

Une autre étude menée par Jawaid et *al.* [Jawaid 99] dans le tournage du Ti-6246, montre que l'usure sur la face de coupe est favorisée par la diffusion des éléments de l'outil vers la pièce ou le copeau. Par cette analyse, les auteurs confirment que la diffusion est favorisée par la pression du contact et la température élevée (dans ce cas, plus grande de 800 °C).

II.1.4.2. Les principales formes d'usure

Les études (bilans sur l'usinage des superalliages) menées par Choudhury et *al.* [Choudhury 98], Ezugwu et *al.* [Ezugwu 99] [Ezugwu 03], Devillez et *al.* [Devillez 07] et [Khamsehzhadeh 91] mettent en évidence que l'entaille, l'usure en dépouille et l'usure catastrophique sont les principaux modes de dégradation dans l'usinage de superalliages à base-nickel.

II.1.4.2.1. Usures en dépouille, sur la face de coupe et les listels

La Figure II.1.5 montre les principales zones lors de la coupe. Sur ce schéma, nous pouvons identifier les principaux types d'usure (fortement abrasive) d'un foret :

- dans la zone de cisaillement secondaire : *l'usure sur la face de coupe* qui est due à l'action abrasive des particules dures contenues dans le matériau usiné ou bien aux fragments provenus de l'arête rapportée brisée sur la face de coupe,
- dans la zone de cisaillement tertiaire : *l'usure en dépouille*, générée par le frottement entre la face en dépouille et la surface de la pièce usinée,
- *l'usure des listels*, qui provient du frottement entre la paroi de la pièce et les listels.

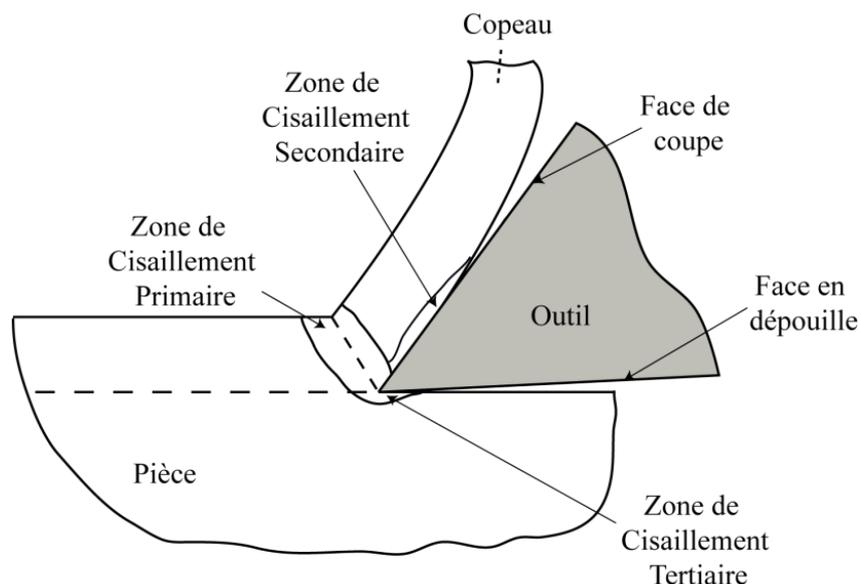


Figure II.1.5 : Mécanisme de formation du copeau

La Figure II.1.6 montre un exemple d'usure par abrasion (usure sur la face de dépouille) dans le perçage de l'Inconel 718[®] avec des outils en carbure de tungstène. L'usure en dépouille se présente sous la forme de bandes striées et brillantes sensiblement perpendiculaires à l'arête de coupe. Ce mode d'usure se caractérise à l'aide du critère V_b . Le critère de réforme ($V_b = 0,3$ mm) a été confirmé par l'étude de Perrin [Perrin 07] (dans le cadre du projet ManHIRP) sur le perçage de l'Inconel 718[®] avec un foret hélicoïdal. Par contre, même si ce critère est bien adapté pour optimiser la durée de vie de l'outil, il ne garantit pas l'intégrité matière de la pièce.

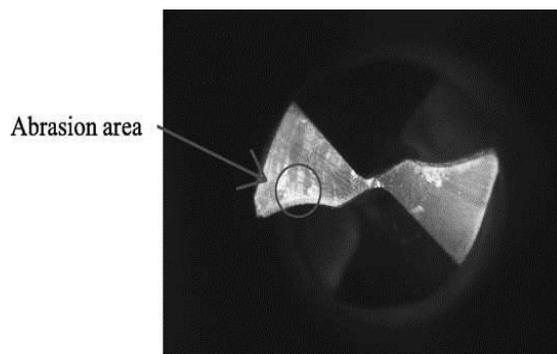


Figure II.1.6 : Exemple d'usure par abrasion en dépouille observée dans le perçage de l'Inconel 718® [Chen 03]

II.1.4.2.2. L'arête rapportée

L'arête rapportée est caractérisée par un dépôt de matière usinée sur l'arête de coupe. Le mécanisme de formation d'une arête rapportée est identique à celui de l'usure par adhésion.

Dans le tournage à sec, Devillez et *al.* [Devillez 07] montrent que l'adhésion de l'Inconel® 718 sur l'outil forme une arête rapportée, qui est nuisible à l'état de surface [Ezugwu 05]. Ce phénomène a été observé aussi par Sharman et *al.* [Sharman 08] (dans le perçage du même matériau), par Cantero et *al.* [Cantero 05] et Wagner [Wagner 11] respectivement sur les superalliages base titane Ti6Al4V et Ti5553. En fonction des conditions de coupe, l'arête rapportée qui est plus ou moins stable, va s'agrandir et finit par se briser entraînant avec elle des fragments de l'arête. La Figure II.1.7 présente un exemple d'une arête rapportée formée dans le perçage de l'Udimet 720®.

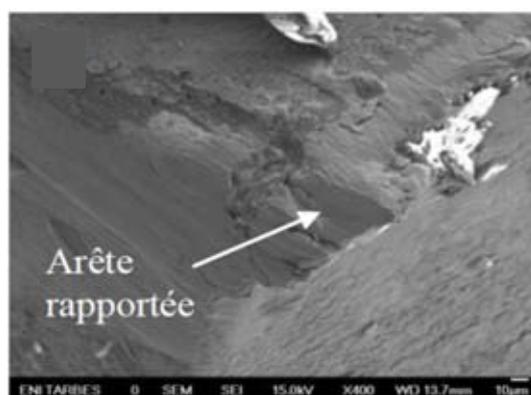


Figure II.1.7 : Mise en évidence du phénomène d'arête rapportée [Dutilh 11]

II.1.4.2.3. L'entaille

L'entaille est une forme d'usure sévère localisée sur l'arête de coupe. Le substrat de l'outil coupant est un matériau dur (par exemple, le carbure de tungstène) qui n'accepte pas de déformations importantes. Quand il est soumis à des pressions très élevées, des fissures se produisent et le résultat final est la génération d'une usure en entaille. Dutilh [Dutilh 11] observe une usure en entaille sur l'arête de coupe, au niveau de l'avant trou. Le phénomène est expliqué par les travaux de Corduan et

al. [Corduan 03], qui montre que l'entaille est principalement due à la différence de pressions localisées de part et d'autre de la limite de la zone de coupe.

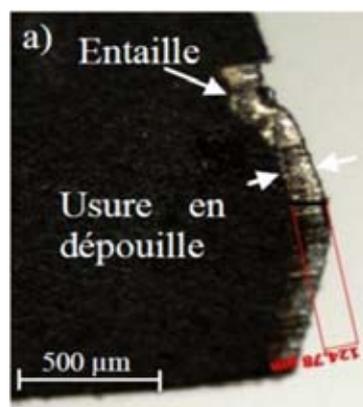


Figure II.1.8 : Usure en entaille [Dutilh 11]

Pour conclure, les différents types d'usure sont très bien évoqués par Chen et *al.* [Chen 03] dans le perçage de l'Inconel 718[®]. Les outils sont en carbure de tungstène avec un revêtement multicouche de TiAlN. Les auteurs établissent quatre étapes d'usure du foret, ce qui correspond aux modes de dégradation déjà présentés. Dans un premier temps la couche de revêtement est enlevée par l'action abrasive des particules dures. Ensuite, elle est suivie par une usure en dépouille et un écaillage sur l'extrémité de l'arête de coupe. Puis, des microfissures apparaissent dans la zone d'écaillage, ce qui conduit à des fissures de fatigue en sous-couche. Une abrasion importante et un écrouissage de la matrice γ , engendre la formation d'une arête rapportée. Finalement, l'action de tous ces types d'usures peut conduire à l'effondrement de l'arête.

II.1.5. Paramètres influençant l'usure des outils

Il existe un grand nombre d'éléments qui peuvent avoir un impact sur l'usure. Nous limiterons notre analyse aux influences apportées par les conditions de coupe, le choix de revêtements des outils, la lubrification, le matériau de la pièce à usiner et le procédé d'usinage. Dans la suite, ces facteurs seront détaillés.

II.1.5.1. Les conditions de coupe

Les conditions de coupe présentent une forte influence sur l'usure de l'outil. La vitesse de coupe est l'un des facteurs les plus importants. Dans le tournage de l'Inconel 718, Rahman et *al.* [Rahman 97] montrent que l'augmentation de la vitesse de coupe provoque une élévation de la température pendant l'usinage (à cause d'un frottement plus important). Cette action provoque une usure accélérée, ce qui se traduit ensuite par une diminution de la durée de vie de l'outil. Une autre conséquence due à l'augmentation de la vitesse de coupe (donc implicitement de la température) est

démontrée par Nouari *et al.* [Nouari 05]. Dans le perçage à sec de l'aluminium 2024, les auteurs mettent en évidence qu'une haute température à l'interface outil-copeau provoque le transfert de l'aluminium sur l'outil, c'est-à-dire une usure par diffusion. Les vitesses de coupe trop élevées peuvent provoquer le durcissement de la surface usinée, ce qui conduit à une usure prématurée de l'outil [de Lacalle 00].

De la même façon, l'augmentation de l'avance joue un rôle sur les températures générées lors de la coupe par le biais de l'augmentation du volume de matière enlevée. Une avance plus importante entraîne une augmentation de la section de copeau et donc, une augmentation des efforts de coupe et des contraintes au niveau de l'arête de coupe [de Lacalle 00]. La conséquence principale de ce phénomène pourra être une instabilité de l'outil et de possibles microfissures (ce qui va générer un écaillage ou bien de l'usure en entaille).

Les exemples présentés jusqu'à maintenant montrent l'influence des conditions de coupe inadaptées sur l'usure de l'outil. Ainsi, en fonction de chaque contexte d'usinage, il est nécessaire de trouver un point de fonctionnement optimal pour l'outil. Une technique très utilisée par les chercheurs est la méthode Couple-Outil-Matière (COM), décrite par la Norme Afnor E66-520.

II.1.5.2. Le revêtement

Le revêtement des outils de coupe est une technique courante dans le domaine de l'usinage afin de limiter les phénomènes d'adhésion du matériau usiné sur l'outil en facilitant l'écoulement du copeau. Avant de choisir le revêtement, quelques considérations doivent être prises en compte :

- la résistance aux températures élevées,
- une dureté importante,
- le coefficient de frottement,
- la stabilité chimique à haute température.

Généralement les matériaux utilisés en tant que revêtement ont une dureté élevée, assurant une bonne protection contre l'abrasion. Certains auteurs ont montré que les revêtements peuvent créer une barrière contre la diffusion des éléments chimiques contenus dans le matériau à usiner vers l'outil. Cependant, leurs épaisseurs d'environ quelques microns, restent trop faibles pour limiter la diffusion thermique. Rech *et al.* [Rech 04] montre que l'utilisation d'un revêtement peut diminuer la production de chaleur à l'interface outil-matière usinée. D'après Dörr *et al.* [Dörr 03], le type de revêtement a une influence importante sur les températures générées sur l'arête de coupe.

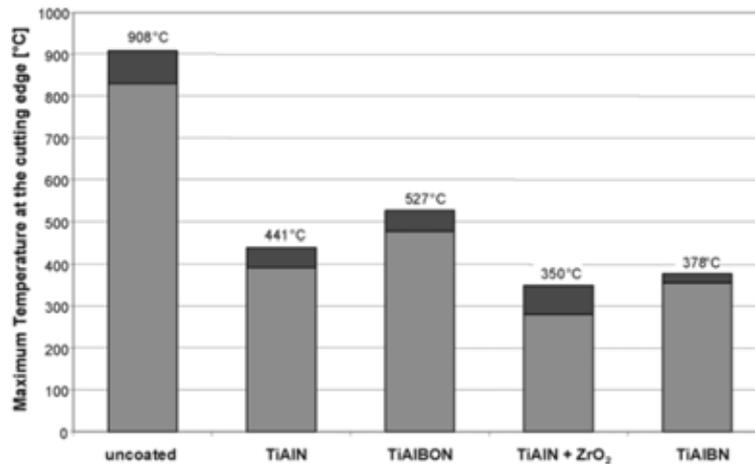


Figure II.1.9 : La température maximale sur l'arête de coupe dans le perçage des aciers en fonction du type de revêtement

[Dörr 03]

La Figure II.1.9 montre les résultats en termes de températures, obtenues pour les essais de perçage à sec des aciers en utilisant différents types de revêtement. Les perçages ont été répétés quatre fois et la partie supérieure (en noir) représente la température maximale obtenue pour chaque type d'essai. Les résultats issus de ces travaux montrent le rôle important du revêtement sur la réduction des températures générées au niveau de l'arête de coupe.

Les revêtements peuvent être monocouches ou multicouches avec les matériaux TiC, TiN, TiCN, TiAlN, TiZrN, TiB₂ et plus récemment le diamant [Ezugwu 03]. L'étude des performances de différents revêtements montre que dans l'usinage des superalliages base-nickel, le TiAlN semble le meilleur choix. Jindal et *al.* [Jindal 99] ont étudié les performances de trois revêtements monocouches (TiN, TiCN et TiAlN avec une épaisseur de 3-3,5 μm) dans le tournage de l'Inconel[®] 718 sous lubrification. Ils ont choisi deux vitesses de coupe (46 et 76 m/min), une avance de 0,15 mm/tr et une profondeur de coupe de 1,5 mm. Sur l'ensemble des essais, les meilleures performances, en termes de durée de vie, ont été atteintes par les outils revêtus avec le TiAlN. Comme le matériau de base des outils était identique, ils ont attribué les différences des résultats aux revêtements. Ils expliquent les performances du TiAlN par :

- lors d'une exposition à hautes températures, l'aluminium réagit avec l'air pour former une couche d'oxyde stable chimiquement d'Al₂O₃ à l'interface,
- pour des températures supérieures à 750 °C, les valeurs obtenues pour la micro-dureté Vickers des trois types de revêtement sont : TiN – 950 Kg/mm² ; TiCN – 1250 Kg/mm² ; TiAlN – 1350 Kg/mm². Ces chiffres traduisent une résistance plus importante à l'usure par abrasion du revêtement TiAlN. Kadirgama et *al.* [Kadirgama 11] confirment cette tendance dans le tournage de Hastelloy C-22HS.

La durée de vie de l'outil a été influencée principalement par l'usure en dépouille.

Ces résultats sont confirmés par les travaux de Bhatt et *al.* [Bhatt 10] dans le tournage du même matériau. Pour une vitesse de coupe de 75 m/min et une épaisseur de revêtement de 3 μm , le TiAlN a un meilleur comportement vis-à-vis du revêtement multicouche TiCN/Al₂O₃/TiN en ce qui concerne la durée de vie de l'outil (14 m pour le premier et seulement 6 m pour le deuxième). Outre les deux raisons énumérées ci-dessus, les auteurs rajoutent deux explications en faveur des hautes performances du TiAlN :

- le TiAlN contient des contraintes résiduelles de compression qui sont bénéfiques contre l'usure par abrasion et l'entaille,
- la résistance à l'usure par abrasion et la faible conductivité thermique peuvent réduire la tendance de former une usure en cratère, ce qui va prolonger la durée de vie de l'outil.

L'utilisation des revêtements multicouches (TiN/TiCN/TiAlN, TiN et TiAlN, TiN/TiCN/TiN ou TiN/TiCN/Al₂O₃) a été étudiée par plusieurs auteurs. Pour donner quelques exemples, nous pouvons citer les travaux menés par Ezugwu et *al.* [Ezugwu 00], Prengel et *al.* [Prengel 01], Bhatt et *al.* [Bhatt 10] ou Kadirgama et *al.* [Kadirgama 11]. Les revêtements multicouches offrent aux outils une protection plus étendue contre l'usure et peuvent apporter une amélioration de la durée de vie de l'outil. Par exemple, Prengel et *al.* [Prengel 01] ont testé plusieurs type de revêtements dans le fraisage et le tournage (à sec et avec lubrification) des différents matériaux (Inconel[®] 718, acier, aluminium A390, etc.), afin d'établir leurs performances. Les résultats les plus intéressants de notre point de vue concernent le tournage de l'Inconel[®] 718 et montrent que le revêtement multicouche TiAlN offre une durée de vie légèrement supérieure au revêtement monocouche TiAlN (7 min et 6 min). Ce comportement est expliqué par la différence de dureté entre les deux types de revêtement, qui influence la résistance à l'usure par abrasion.

Tous les travaux analysés jusqu'à maintenant montrent que le revêtement a une influence importante sur les aspects tribologiques, sur la réduction de températures générées au niveau de l'arête de coupe. Par contre, dans certaines situations, comme dans le cas de matériaux ayant une mauvaise usinabilité ou pour des conditions de coupes agressives, il est possible que le revêtement ne tienne pas longtemps et l'outil se retrouve dans le cas sans revêtement. Dans l'usinage de superalliages base nickel Nabhani et *al.* [Nabhani 01] concluent que la présence du revêtement semble ne pas avoir une influence positive sur la coupe, car celui-ci est rapidement enlevé par les particules abrasives. Un autre aspect intéressant est démontré par Wagner [Wagner 11]. Le substrat de l'outil est réalisé par affûtage, ce qui offre une très bonne acuité d'arête, pas de zone morte ou bien, une réduction des efforts de coupe. Cependant, dans le cas sans le revêtement, l'usure de l'outil est très rapide. En revanche, la présence du revêtement changera l'acuité d'arête, ce qui va augmenter les efforts de coupe. Donc, en fonction de chaque contexte d'usinage, un choix doit être fait (une acuité d'arête parfaite qui va réduire les efforts ou l'utilisation du revêtement pour protéger l'outil). Même en considérant les

nuances évoquées par ces auteurs, les bénéfices apportés par le revêtement dans l'usinage de superalliages ne peuvent pas être négligés.

II.1.5.3. La lubrification

Un autre paramètre important dans l'usinage est la lubrification. Le refroidissement, le dégagement de copeaux ainsi que la réduction du frottement à l'interface outil-pièce usinée sont les principales caractéristiques demandées à un lubrifiant. Pour améliorer l'usinabilité des superalliages, le fluide doit être injecté au niveau de l'interface outil-copeau. Pendant plusieurs années, grâce à sa grande capacité calorifique, l'eau a été utilisée pour la lubrification. Mais, des inconvénients, comme la corrosion et la faible lubrification, ont poussé les usineurs vers la recherche des nouvelles solutions. Selon El Baradie [Baradie 96], plusieurs solutions sont envisagées :

- **les fluides à base aqueuse** – leur utilisation est préférée pour les opérations d'usinage ayant une vitesse de coupe élevée et des faibles pressions sur l'outil,
- **les huiles minérales** – leur utilisation est souhaitable lorsque les pressions de coupe entre le copeau et l'outil deviennent très élevées. Ces huiles sont largement utilisées dans la production principalement grâce à leur stabilité chimique et leur réutilisation fréquente,
- **les lubrifiants gazeux** – leur emploi devient important quand les fluides de coupe ne peuvent pas pénétrer l'interface outil-copeau. Toutefois, les coûts importants des gaz représentent un obstacle majeur pour l'utilisation dans des applications industrielles. Les lubrifiants gazeux peuvent être utilisés en conjonction avec les fluides de coupe traditionnels afin d'améliorer leur capacité de lubrification. L'argon, l'hélium ou le nitrogène sont les gaz le plus utilisés. Néanmoins, les gaz sont des mauvais conducteurs thermiques et leurs capacités de refroidissement sont réduites. Pour améliorer leurs qualités, plusieurs solutions ont été développées : la compression, le refroidissement ou bien la liquéfaction. Brandão et al. [Brandão 08] ont comparé trois types de lubrifications (à sec, avec l'air comprimé et l'air refroidi) dans le fraisage des aciers. Les auteurs montrent que l'air comprimé représente la meilleure solution car la température pendant la coupe reste presque constante (proche de la température ambiante). Cependant, les usinages à sec et à l'air refroidi peuvent entraîner des modifications des dimensions effectives de la pièce (expansion ou contraction). Une autre solution est proposée par l'étude menée par Hong et al. [Hong 01] dans le tournage de Ti-6Al-4V. Les auteurs proposent différentes méthodes d'application du nitrogène liquide comme lubrifiant. Les résultats montrent qu'en appliquant ce gaz au niveau de la face en dépouille et sur la face de coupe, une réduction de l'usure (induite par les hautes températures) et de la réactivité chimique du matériau de la pièce.

Finalement, ces facteurs jouent un rôle important sur l'augmentation de la durée de vie de l'outil.

L'intégrité matière et l'usure des outils sont les deux aspects qui rendent importante l'utilisation de la lubrification dans l'usinage des superalliages. L'absence de lubrification peut entraîner des variations de diamètres [Bono 01], le collage de copeaux, des arrachements [Sadat 87] et de l'écaillage [Sadat 92]. Un autre paramètre lié à lubrification, le pourcentage d'émulsion, joue un rôle important sur l'usure des outils. Diniz et *al.* [Diniz 08] observent que l'augmentation du pourcentage d'émulsion lors du fraisage d'un acier inoxydable, produit une augmentation de l'usure en dépouille. Dans le tournage de finition d'un alliage de titane, Sharman et *al.* [Sharman 01b] montrent à partir d'une analyse statistique, ANOVA (analyse de la variance), que la lubrification à haute pression est le paramètre ayant la plus grande contribution sur l'augmentation de la rugosité. De plus, ces derniers observent une augmentation de la micro-dureté en sous-couche. Celle-ci est expliquée par le fait que l'usinage apporte une traction par la coupe et une compression provoquée par le refroidissement. Dans ce cas, l'utilisation de la lubrification à haute pression va refroidir rapidement la surface usinée et il est possible que la micro-dureté augmente. La lubrification à haute pression a une influence positive sur la fragmentation des copeaux. Pour conclure sur cet aspect, Vigneau [Vigneau 99] évoque les mérites de la pression de lubrification sur l'augmentation de la durée de vie des outils dans le tournage de l'Inconel® 718.

En résumé, l'utilisation des fluides de coupe permet une augmentation de la durée de l'outil par la réduction des efforts de coupe (lubrification) et des températures générées sur l'arête de coupe (grâce au refroidissement, ce qui va entraîner aussi une meilleure protection contre l'usure par adhésion et par diffusion). Par contre, un refroidissement rapide de la pièce à usiner peut entraîner une augmentation de la dureté et également une hausse des efforts de coupe, de la puissance consommée, donc une réduction de la durée de vie de l'outil. Le choix du lubrifiant ainsi que ses paramètres doit être fait en fonction de chaque contexte d'usinage.

II.1.5.4. Autres paramètres

Les facteurs qui influent sur l'usure des outils ne se limitent pas aux conditions de coupe, à la lubrification ou au type de revêtement. Par exemple, Olovsjö et *al.* [Olovsjö 10] mettent en évidence l'impact de la microstructure du matériau à usiner sur l'usure. Ils réalisent des traitements thermiques différents afin de générer deux types de tailles de grains et de duretés différentes dans l'Inconel 718®. La conclusion des essais de tournage est qu'une taille de grains plus grande a une influence très importante sur l'augmentation de l'entaille, tandis que la dureté est corrélée avec l'usure en dépouille (par une action abrasive plus importante). Le procédé d'usinage a aussi une influence sur l'usure. [Rancic 10] montre dans l'étude en tournage du Ti-6Al-4V que le niveau d'usure en dépouille est plus

important pour les essais interrompus que pour les essais continus. Cette observation est attribuée aux contraintes thermomécaniques élevées générées lors de l'entrée et de la sortie de l'outil.

II.2. Techniques de surveillance

II.2.1. Introduction

Pendant les opérations d'usinage, plusieurs phénomènes physiques surviennent en raison de l'interaction entre l'outil coupant et la pièce (efforts de coupe, flux thermique, vibrations, etc.). Dans ce contexte, il peut être opportun de suivre ces phénomènes afin de surveiller le procédé. La surveillance d'usinage représente l'utilisation des capteurs (efforts, température, etc.) afin de déterminer l'état du processus. Le schéma de fonctionnement d'une technique de surveillance de l'outil est décrit dans la Figure II.2.1. Une telle approche est basée sur la mesure des grandeurs physiques lors de l'usinage. Ensuite, par l'intermédiaire des techniques de traitement, d'analyse et d'interprétation, les informations pertinentes contenues dans les signaux sont dévoilées. Finalement, ces indications vont servir à la compréhension des phénomènes rencontrés lors de l'usinage. Donc, l'utilisation des signaux, apportera des informations sur les différentes réponses. Selon le cas, la réponse recherchée est liée à un problème de l'outil (usure, rupture, collision, etc.), de l'intégrité de surface (état de surface, bavure, etc.) ou de la machine-outil (vibrations, défauts au niveau des roulements, etc.).

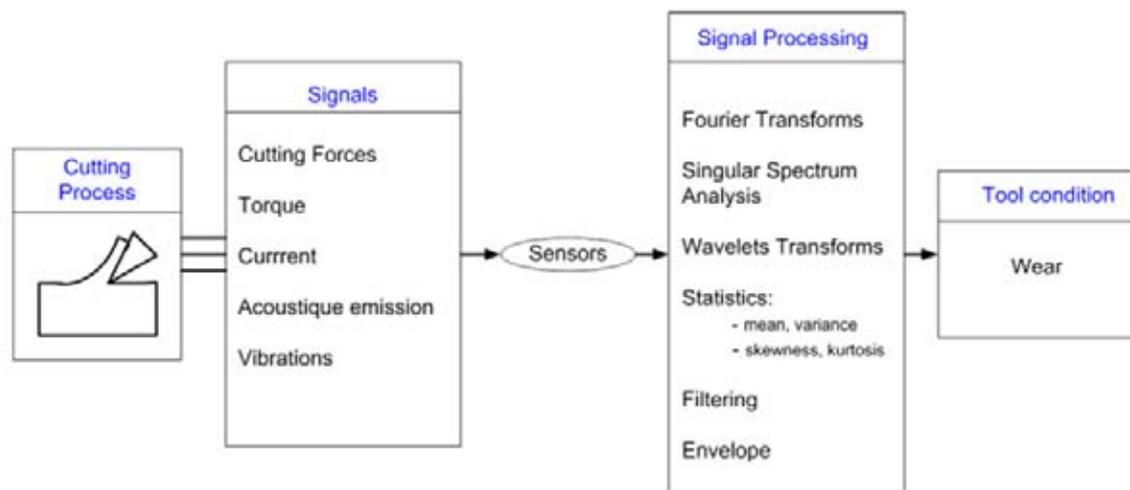


Figure II.2.1 : Méthodes de surveillance de l'usure de l'outil [Kilundu 11]

Une fois que les relations entre les signaux et les critères recherchés sont définies, un deuxième aspect pourra être rajouté à cette technique de surveillance : l'action. Cette étape comprend l'intervention directe sur les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, etc.) afin d'éviter toute dérive du processus, suite à changement du contexte d'usinage (perturbations, rupture de l'outil, etc.).

Ce paragraphe (II.3) présente un bilan de différentes techniques de surveillance et il est structuré comme suit. Après une brève introduction, les principales grandeurs physiques ainsi que les méthodes de traitement des signaux sont présentées. Finalement, quelques exemples d'application sont exposés.

Au cours des dernières décennies, d'importants travaux s'intéressent au contrôle et à la surveillance en usinage. Plusieurs capteurs ont été développés afin de surveiller l'usure des outils, les problèmes d'intégrité matière, les vibrations, etc.

Byrne et al. [Byrne 95], Dimla et al. [Dimla 00b], Jantunen et al. [Jantunen 02], Liang et al. [Liang 04] et Teti et al. [Teti 10] montrent les avancées dans ce domaine dans les vingt dernières années. Généralement, deux types de méthodes de surveillance en usinage sont appliqués :

- **les méthodes directes** : elles sont principalement utilisées dans les laboratoires de recherche, car elles offrent une très bonne précision et représentent un support pour l'étude des phénomènes rencontrés pendant la coupe. Le prix élevé ainsi que les divers problèmes de mise en œuvre (e.g. l'accès difficile pendant l'usinage, le faible éclairage ou l'utilisation de la lubrification) rendent leur application dans le milieu industriel difficile. En ce qui concerne des exemples pour la surveillance de l'usure de l'outil, nous pouvons mentionner les caméras pour l'inspection visuelle ou les faisceaux laser,
- **les méthodes indirectes** : en mesurant des grandeurs physiques, ces procédés sont capables de détecter un changement (e.g. l'usure de l'outil) pendant l'usinage. Elles sont plus adaptées pour des applications pratiques, malgré le fait qu'elles sont moins précises que les méthodes directes.

La Figure II.2.2 illustre les différents types de capteurs de surveillance. Il est possible d'identifier des capteurs qui sont proches de la zone de coupe (grandeurs physiques liées à la coupe) et d'autres qui sont plus éloignés (mesurent les grandeurs physiques d'un composant du système). Liang et al. [Liang 04] font remarquer d'une manière générale que la surveillance et le contrôle d'usinage en temps réel sont confrontés à plusieurs problèmes. L'environnement de l'usinage (copeaux, lubrification, vibrations, etc.) ou la robustesse des capteurs sont deux aspects qui rendent difficile la mise en œuvre de ces méthodes dans un milieu industriel. Dans la suite, une étude concernant les différents types de capteurs sera réalisée.

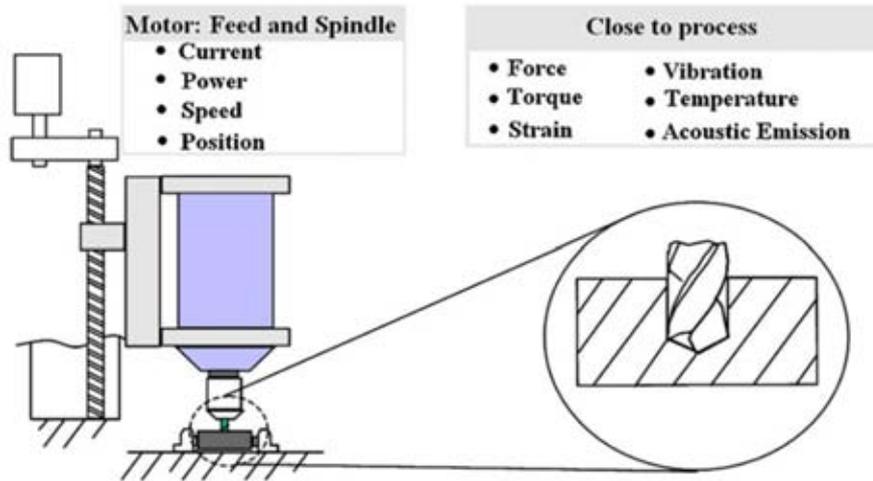


Figure II.2.2 : Capteurs utilisés pour la surveillance en usinage et leur emplacement [Teti 10]

II.2.2. Systèmes de mesure

Toute technique de surveillance est basée sur les signaux acquis pendant l'usinage, correspondant à des grandeurs physiques. Les plus utilisés sont :

- les efforts de coupe,
- la puissance et le courant consommés par la broche,
- la mesure de vibrations,
- les émissions acoustiques,
- la température.

II.2.2.1. Les efforts de coupe

L'usinage des matériaux durs génère des grandeurs physiques (thermo-mécaniques) entre l'outil et la pièce à usiner. Les efforts de coupe représentent une source intéressante d'informations, car ils sont liés à la mécanique de la coupe (par exemple, le changement de la géométrie affecte les efforts de coupe). Les chercheurs utilisent souvent ces systèmes pour la surveillance d'usinage ([Teti 10]), et aussi comme indicateur de l'usure de l'outil [Ertunc 01] [Balazinski 02]. Ces capteurs sont basés sur la mesure de la déformation d'un élément soumis aux efforts de coupe, élément qui doit être inséré dans le système usinant. Les deux principales technologies de capteurs sont :

- **les jauges de déformations** : le principe physique selon lequel elles fonctionnent, indique que la résistance électrique d'un fil se modifie proportionnellement à sa déformation lorsque ce fil est étiré ou comprimé par une force exercée. Ces capteurs dépendent principalement de la raideur du fil. Les avantages de leur utilisation

concernent plusieurs aspects, parmi lesquels : la sensibilité, l'absence de la dérive des mesures pour des essais avec un temps important, le faible encombrement, etc.

- **les piézoélectriques** (Figure II.2.3) : les cristaux de quartz génèrent une charge électrique lorsqu'on les soumet à une charge mécanique. Ce phénomène physique est connu sous le nom d'effet piézoélectrique. Ces types de capteurs possèdent des avantages en ce qui concerne la plage de mesure importante, la sensibilité élevée (<1 N), la fréquence d'acquisition (0-20 kHz), la rigidité importante ou la capacité d'obtention d'efforts selon les trois directions. L'inconvénient est lié à l'apparition d'une dérive importante pour les mesures sur des longues durées.



Figure II.2.3 : Table dynamométrique Kistler

Les tables dynamométriques restent un outil dédié aux travaux de recherche expérimentaux. Leurs propriétés en font l'un des plus performants systèmes pour la surveillance. Par contre, leur utilisation dans un cadre industriel est peu probable, car ils ajoutent un prix considérable (entre 20000 et 50000 euros). En même temps, un autre inconvénient de ces systèmes est apporté par les risques de perturbations du montage (l'insertion d'un élément supplémentaire dans le système usinant).

Une alternative moins coûteuse que les tables dynamométriques est constituée par les capteurs intégrés dans le montage. Une solution proposée est représentée par les bagues d'efforts à la broche. Elles permettent de mesurer les efforts de coupe selon les trois directions ainsi que le couple : signaux faciles à mesurer et sensibles aux changements lors de la coupe. Dans le perçage de l'aluminium AISi9Cu3 avec des outils en carbure de tungstène et revêtus en TiN [Shi 07a] ou dans le cas du brochage de l'Inconel 718 [Byrne 07], l'utilisation de ces capteurs offre des bons résultats pour la surveillance de l'usure. Les efforts de coupe obtenus avec ce type de capteurs sont très bien corrélés avec les signaux issus du dynamomètre. Par suite, les bagues d'efforts représentent une option pour la surveillance de l'usure de l'outil dans le milieu industriel.

Jantunen [Jantunen 02] dresse un état des lieux sur les méthodes de surveillance de l'usure en perçage et montre qu'un nombre important de chercheurs utilisent les efforts de coupe comme source d'informations.

II.2.2.2. La puissance et le courant de broche

Les moteurs de broches ou d'entraînement fournissent la puissance nécessaire à la coupe. De nos jours, la grande majorité de machines-outils peuvent permettre l'acquisition de la puissance de coupe et du courant broche par l'intermédiaire des systèmes intégrés à la commande numérique. Il existe d'autres capteurs permettant de mesurer la puissance entre le variateur et le moteur (les wattmètres). Ces systèmes de mesure ont un avantage majeur par rapport aux autres systèmes, c'est-à-dire qu'ils ne perturbent pas l'usinage. Cette simplicité ainsi que les coûts relativement faibles rendent ces systèmes intéressants pour un suivi de l'usure dans le milieu industriel. Mais, en contre partie, il faut prendre en compte les inconvénients apportés par ces mesures. Certains auteurs [Byrne 95] [Jeong 02] [Teti 10] parlent de l'influence de plusieurs paramètres comme la température, l'état du moteur et/ou des axes, la limite de la bande passante qui peuvent entraîner une perte d'informations.

La surveillance de la puissance de broche dans le cadre du perçage est la principale méthode de surveillance adoptée dans l'industrie aéronautique. Les seuils sur le signal de puissance sont utilisés afin de détecter une éventuelle dégradation de l'outil (bris ou usure prématurée). Shi et *al.* [Shi 07b] définissent les signaux de référence pour plusieurs niveaux d'usure (chaque essai a été répété quatre fois pour avoir une bonne reproductibilité) et par comparaison obtiennent une estimation de l'usure pour les nouveaux essais (Figure II.2.4). La définition de limites hautes et basses permet de vérifier que les signaux se trouvent entre ces limites. Les mesures de puissances regroupent un nombre important de travaux [Kim 02], [Jeong 02], [Brophy 02] et [Axinte 04] représente une solution fiable pour un suivi de l'usure.

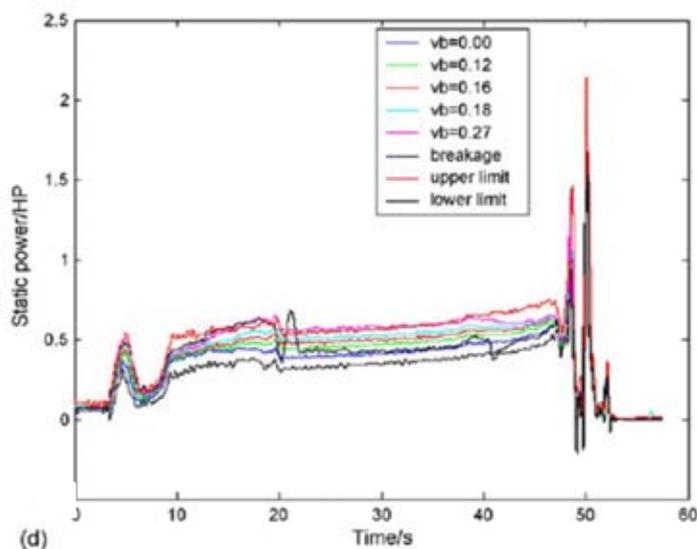


Figure II.2.4 : Utilisation des seuils pour suivi l'usure [Shi 07b]

II.2.2.3. Les vibrations

Les accéléromètres sont des capteurs (le plus souvent piézoélectriques - Figure II.2.5) qui mesurent les vibrations mécaniques générées par le processus de coupe. Les capteurs sont fréquemment utilisés pour diagnostiquer la machine-outil, pour surveiller la broche, l'endommagement des roulements, etc. L'intérêt de mesurer les vibrations vient aussi de leur relation avec l'état de surface [Seguy 08]. Les principaux avantages de ces mesures sont : la facilité de mise en œuvre (installés à divers endroits de la machine grâce à leur taille réduite), la plage de mesure (jusqu'à 20 kHz), la sensibilité et la robustesse par rapport à l'environnement (copeaux, lubrification, etc.).



Figure II.2.5 : Exemples d'accéléromètres piézoélectriques

Les signaux issus des accéléromètres sont souvent utilisés comme source d'informations pour surveiller l'outil. Dans le tournage de l'Inconel[®] 718, Li et *al.* [Li 97] développent une méthode pour surveiller le niveau d'usure. Cette technique est basée sur la fonction cohérence de deux signaux vibratoires perpendiculaires. Ces auteurs obtiennent une corrélation entre l'augmentation de l'usure et la hausse de la fonction cohérence au niveau des fréquences correspondant aux premiers modes propres. Abu-Mahfouz [Abu-Mahfouz 03] propose un réseau de neurones pour la prédiction et la classification de différents types d'usure (en dépouille, en cratère, listel, etc.) dans le perçage d'un acier rapide C1040. Plusieurs critères extraits des signaux d'accélération mesurés sont considérés dans cette étude comme des entrées du réseau de neurone. El-Wardany et *al.* [El-Wardany 96] réalisent la surveillance du niveau d'usure et de l'usure catastrophique en utilisant uniquement la mesure de vibrations et leur approche est renforcée par la définition de critères afin d'éviter les fausses alarmes.

La mesure des vibrations représente une solution viable pour obtenir des informations sur l'intégrité de surface. À titre d'exemple, les travaux menés par Abouelatta et *al.* [Abouelatta 01] s'intéressent à la prédiction de l'état de surface usinée, basée seulement sur les paramètres de coupe et le signal vibratoire. Les quatre modèles proposés offrent des résultats prometteurs.

Pour conclure sur les mesures de vibrations, grâce à leurs caractéristiques (énumérées ci-dessus), elles représentent un moyen de surveillance pouvant être utilisé aussi dans des applications

industrielles. Par contre, l'inconvénient majeur est l'exploitation laborieuse dans le domaine fréquentiel. Cet aspect suppose des études préliminaires pour connaître les caractéristiques dynamiques du système usinant.

II.2.2.4. Les émissions acoustiques

Un capteur d'émissions acoustiques mesure les énergies à hautes fréquences produites par le processus de coupe. L'entrée d'une dent dans la matière, les frottements entre l'outil et la pièce à usiner sont deux exemples des sources qui génèrent des ondes de contraintes élastiques. D'autres sources sont décrites dans la Figure II.2.6. Le principe de mesure est le même que celui des accéléromètres, mais à des fréquences plus importantes (de 1 kHz à 1 MHz). Les capteurs sont la plupart du temps des piézoélectriques et ils peuvent être installés facilement dans la machine-outil. Par contre, le signal est influencé par la position où le trou est percé [Everson 99]. Donc, pour pouvoir comparer deux signaux d'émissions acoustiques, les deux doivent avoir des positions identiques par rapport au trou.

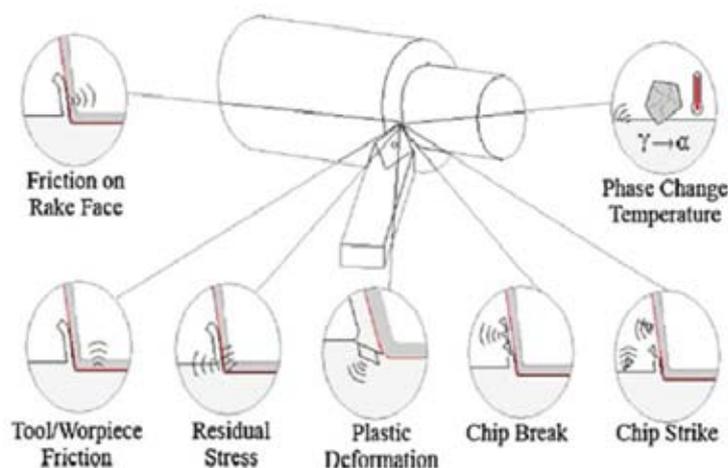


Figure II.2.6 : Les sources des émissions acoustiques dans l'usinage selon [Teti 10]

Ces capteurs sont les plus sensibles pour surveiller l'usinage. Malheureusement, cet avantage peut être considéré comme un inconvénient, car certains événements (les copeaux qui tombent sur la surface de la pièce) peuvent perturber facilement l'analyse [Byrne 95]. Quel que soit le procédé d'usinage, les émissions acoustiques sont largement utilisées comme mesure indirecte pour surveiller l'usure d'outil. Dans le brochage de titane, Axinte et *al.* [Axinte 03] réalisent une étude comparative afin de vérifier la sensibilité des grandeurs physiques pour la surveillance de l'usure. Dans le domaine temporel, les meilleurs résultats ont été obtenus avec les efforts de coupe, tandis que dans le domaine fréquentiel, les émissions acoustiques offrent les résultats les plus intéressants pour détecter les différents types d'endommagement des dents. Dans ce cas, l'aspect fréquentiel nécessite une étude préliminaire, afin de connaître les modes propres de vibration du système. Dans le fraisage de

l'Inconel 718® ([Marinescu 08]) et le perçage d'un acier SAE 1040 ([Gómez 10]), l'utilisation de ces capteurs semble être un choix pertinent pour le suivi de l'usure.

Ces capteurs peuvent être intégrés dans une approche pour surveiller l'usure, mais, comme dans le cas de mesures de vibrations, une identification fréquentielle de chaque composante du système doit être réalisée. Un autre aspect apporté par l'étude bibliographique, montre que les informations données par le signal des émissions acoustiques doit être mis en relation avec d'autres grandeurs physiques (par exemple le couple ou les efforts) pour accroître la fiabilité de la démarche.

II.2.2.5. La température

Le but de toute opération d'usinage est la réalisation d'une pièce qui respecte les critères de qualité demandés par les concepteurs. Dans ce contexte, la mesure de la température pendant le processus est une préoccupation permanente des chercheurs car cette grandeur physique peut offrir des informations importantes sur l'intégrité de surface ou sur l'outil [Davies 07]. Afin de mesurer les températures générées pendant l'usinage, plusieurs capteurs ont été développés et quelques exemples sont illustrés dans la suite :

- **les thermocouples** – un thermocouple est réalisé lorsque deux métaux différents sont en contact, ce qui va générer un courant variable en fonction de la température. Ces capteurs ne mesurent pas une température, mais une différence de température. Afin de mesurer une température inconnue, il est nécessaire que l'une des deux jonctions soit maintenue à une température connue (par exemple, la température ambiante),
- **les thermistances** – sont des résistances qui varient avec la température, en oxyde métallique ou semi-conducteurs. Il existe deux types : CTN (coefficient de température négatif – la résistance diminue de façon uniforme avec la température) et CTP (coefficient de température positif – la résistance augmente avec la température),
- **la fibre optique** – est un capteur permettant la mesure sans contact des températures élevées. L'augmentation de la température lors de l'usinage provoque un rayonnement électromagnétique. La fibre optique doit être montée proche de la zone de coupe, afin de mesurer ce rayonnement,
- **la caméra infrarouge** – une caméra infrarouge ne mesure pas une température, mais le rayonnement émis par la surface d'un corps. Le capteur convertit ce rayonnement, invisible à l'œil, dans une image visible. Cette conversion est effectuée par le capteur I.R. La quantité de rayonnement dépend essentiellement de la température de l'objet et sa propriété d'émettre un rayonnement, en fonction du type de matériau et de la qualité de surface.

Un aspect qui doit être considéré dans la mesure de la température est que les capteurs ne mesurent pas une température ponctuelle, mais un flux thermique. La Figure II.2.7 montre les sources principales de chaleur pendant l'usinage : la chaleur qui provient de la zone de cisaillement primaire, celle qui provient de la zone de cisaillement secondaire et celle provenant de la zone de cisaillement tertiaire. La chaleur générée est ensuite diffusée soit dans la pièce, dans l'outil et dans le copeau. Dans ce cas, les capteurs offrent une estimation qui provient de toutes ces zones et il est difficile de distinguer l'apport de chaque zone dans la température finale mesurée.

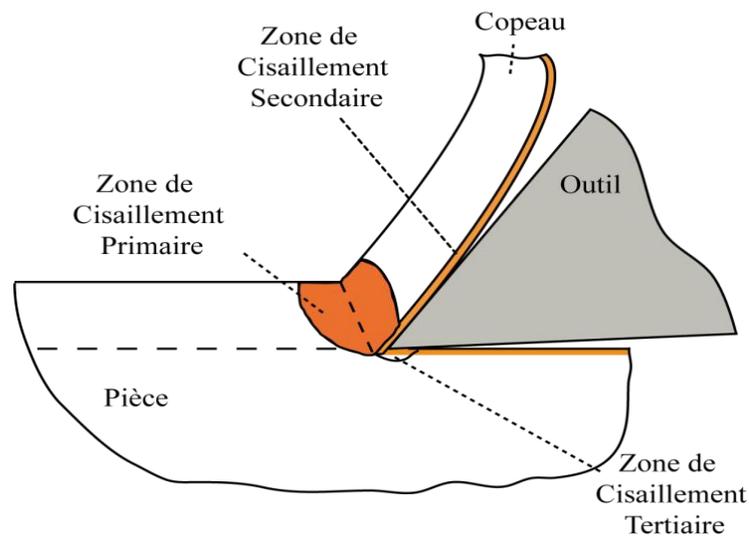


Figure II.2.7 : Sources de chaleur pendant l'usinage

La plupart des techniques employées par les chercheurs sont basées sur des thermocouples insérés dans l'outil. Un tel exemple est utilisé dans le perçage du Ti6Al4V par Bonnet et *al.* [Bonnet 09]. Ils disposent d'un système Actarus[®] et le résultat de ce travail souligne que le revêtement n'as pas d'influence sur l'adhésion du titane sur l'outil. Le même système est utilisé par Baili et *al.* [Baili 11] pour la mesure de la température dans le tournage à chaud du Ti-5553.

L'application de ces techniques dans un perçage devient un défi, car cette opération offre un accès limité. Dörr et *al.* [Dörr 03] proposent une technique pour mesurer la température avec un miroir et une caméra thermographique. Le système est décrit dans la Figure II.2.8 et il permet de mesurer le chauffage progressif de la pièce ainsi que la température de l'outil (à la sortie de la pièce). En effet, en utilisant un miroir (permettant un réglage en hauteur) à 45°, le rayonnement est guidé vers la caméra thermographique et ensuite enregistré.

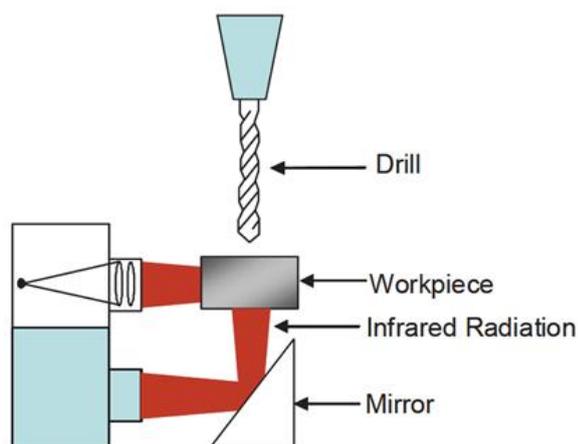


Figure II.2.8 : Système développé pour la mesure de températures sans contact avec une caméra thermographique et un miroir [Dörr 03]

Les résultats fournis par ces mesures sont difficiles à interpréter. Par exemple, dans le perçage de Ti6Al4V, Marinescu et *al.* [Marinescu 09b] dévoilent qu'il n'y a pas de corrélation immédiate entre les efforts de coupe et les températures. Une comparaison entre deux forets différents a été faite en ce qui concerne la température, les efforts de coupe et le couple. Les résultats d'essais montrent que l'outil ayant le couple et les efforts de coupe le plus importants, génère une température maximale plus petite par rapport au deuxième foret. Dans ce cas, ces conclusions sont surprenantes en tenant compte du fait que l'augmentation du couple se traduit par une hausse du frottement entre l'outil et la pièce, donc une température plus importante.

La mesure de température reste un moyen indirect intéressant pour la compréhension de l'usure dans un cadre expérimental. Par contre, l'application dans un milieu industriel est peu probable, car il s'agit de systèmes difficiles à mettre en œuvre ayant une inertie importante. Ils peuvent être perturbés par l'utilisation de la lubrification. En plus, l'utilisation des outils instrumentés par des thermocouples génère des coûts très élevés.

II.2.3. Traitements des signaux

Pour définir une technique de surveillance, tous les signaux considérés doivent être analysés. Face à la complexité des phénomènes mis en jeu pendant l'usinage, il est évident qu'un seul signal n'est pas suffisant pour surveiller l'usure de l'outil en perçage. La conjugaison de différents signaux permet de redonder les informations, donc de fiabiliser la méthode. Chaque capteur est adapté pour un certain aspect de la coupe. Donc, il ne faut extraire que les informations significatives données par les différents signaux grâce à un traitement spécial, comme décrit dans la Figure II.2.9.

Le traitement des signaux représente l'ensemble de techniques permettant d'analyser et de transformer les signaux mesurés en vue de les rendre exploitables et d'en établir des relations avec le

suivi d'usure. Le traitement des signaux comprend premièrement un prétraitement (définition de filtres, amplification ou découpe de signaux). Les signaux sont étudiés dans le domaine temporel et ensuite, subissent une transformation fréquentielle. Finalement, des méthodes spécifiques sont utilisées afin d'extraire les caractéristiques pertinentes.

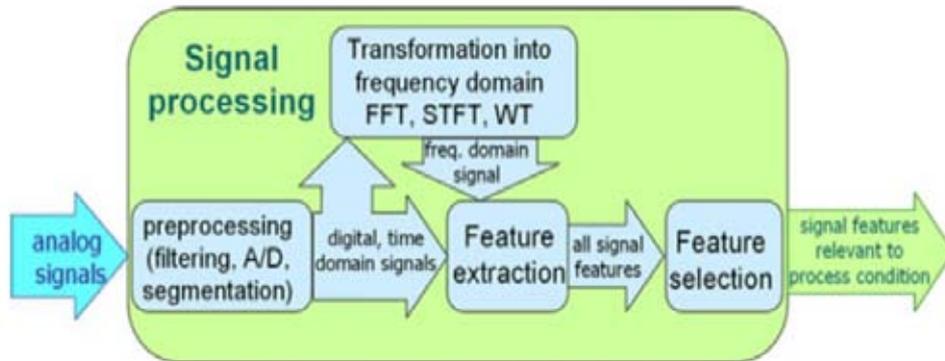


Figure II.2.9 : Le traitement des signaux [Teti 10]

II.2.3.1. Analyse temporelle

L'analyse temporelle des signaux enregistrés consiste à expliquer leurs évolutions au cours du temps. La forme brute des signaux (le domaine temporel) offre un nombre limité d'informations. Plusieurs étapes sont nécessaires pour pouvoir analyser, comparer ou utiliser les signaux comme source d'informations dans une technique de surveillance de l'usure de l'outil. Tout d'abord il faut filtrer les signaux afin d'enlever le bruit, et puis extraire les critères importants. Parmi toutes ces informations il y en a certaines qui sont redondantes ou d'autres qui ne sont pas représentatives des phénomènes rencontrés lors de la coupe. Par suite, une deuxième étape consiste à cibler les informations pertinentes en utilisant différentes techniques. D'une manière générale, tous les signaux doivent être filtrés pour pouvoir séparer la partie « statique » (filtres passe-bas) de la partie « dynamique » (filtres passe-haut). La fréquence de coupure utilisée est en dessous de la fréquence de rotation. Puis, des critères statistiques peuvent être appliqués sur chaque composante du signal :

- composante statique : valeur moyenne, valeur maximale, aire sous la courbe, etc.
- composante dynamique : écart type, RMS, skewness, kurtosis, etc.

Dans la suite, quelques exemples des paramètres statistiques qui peuvent être calculés seront illustrés afin de montrer leurs utilités pour un suivi de l'usure.

Le couple et les efforts de coupe augmentent avec l'usure, à cause d'un frottement plus important entre l'outil et la pièce à usiner. La valeur moyenne de ces signaux est souvent utilisée comme indicateur de l'usure. Par exemple, Lin et al. [Lin 95] utilisent la valeur moyenne du couple et de l'effort d'avance afin de proposer des modèles estimant l'usure dans le perçage d'un alliage de cuivre.

En théorie des probabilités et statistiques, le *skewness* est le moment d'ordre 3 et mesure l'asymétrie d'une distribution. Le *kurtosis* est défini comme le moment d'ordre 4 (ou le coefficient d'aplatissement) d'une distribution Gaussienne. Par exemple, le kurtosis est calculé pour identifier les changements brusques dans les signaux. Ce critère n'est affecté par les conditions de coupe ou par la dureté du matériau [El-Wardany 96] et il est souvent utilisé comme entrée dans des réseaux de neurones afin de surveiller l'usure des outils de tournage en diamant pour la réalisation des pistons en cuivre [Scheffer 01], détecter et classifier l'usure dans le brochage de superalliages base nickel [Axinte 06b], etc.

Pour conclure sur cette partie, l'analyse temporelle offre des critères statistiques qui peuvent être calculés et utilisés afin de modéliser l'usure.

II.2.3.2. Analyse fréquentielle

L'analyse de Fourier FFT (Fast Fourier Transform) est un outil de base dans le traitement fréquentiel du signal. Elle permet de décomposer l'amplitude du signal en fonction de ses fréquences. El-Wardany et *al.* [El-Wardany 96] utilisent la FFT pour analyser les signaux vibratoires obtenus dans le perçage d'un acier. En utilisant cette technique, les auteurs mettent en évidence une augmentation d'une certaine fréquence avant la rupture de l'outil. Dans le tournage d'un acier, Dimla et *al.* [Dimla 00a] confirme que la FFT permet d'établir des relations avec l'usure des outils. La Figure II.2.10 présente le spectre obtenu sur le signal de l'accéléromètre suivant l'axe Z. Les auteurs obtiennent une très bonne corrélation entre l'augmentation du premier pic de fréquence (2-4 KHz, mode propre du porte-outil) et la rupture de l'outil. De même, le pic à 9-11 KHz augmente avec l'usure et indique que la FFT peut être une solution intéressante pour le suivi de l'usure.

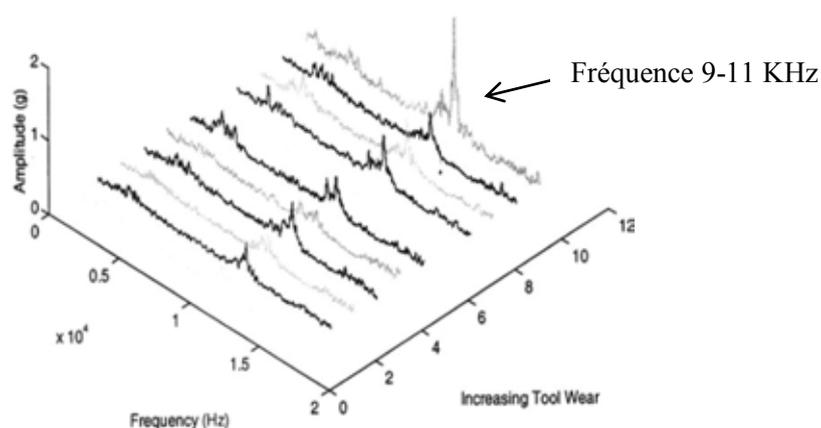


Figure II.2.10 : Diagramme Usure-Fréquence-Amplitude d'un accéléromètre [Dimla 00a]

Malheureusement, cette méthode montre des limites quand les signaux analysés sont non-stationnaires. Pour ce contexte, dans l'analyse de Fourier, tous les aspects temporels deviennent

illisibles dans le spectre (la FFT fait une moyenne sur tout le signal). L'étude de signaux non stationnaires nécessite une analyse plus approfondie afin de connaître le temps associé à l'apparition d'une certaine fréquence.

Une première approche dans ce sens est l'utilisation de STFT (Short Time Fast Fourier). Il s'agit d'une succession de FFT sur de petits intervalles (où le signal est considéré stationnaire). La STFT est présentée sous la forme de diagrammes temps-fréquence.

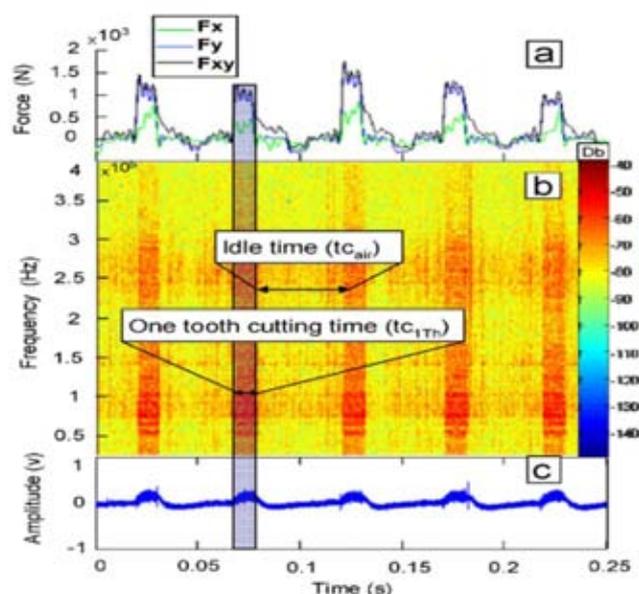


Figure II.2.11 : Diagramme Temps-Fréquence-Amplitude [Marinescu 09a]

Marinescu et al. [Marinescu 09a] ont appliqué cette analyse sur les signaux d'émissions acoustiques afin d'étudier des différents aspects liés au procédé de fraisage (par exemple, le moment où l'outil est en contact avec la pièce (Figure II.2.11)).

En effet la STFT est une transformation de Fourier à fenêtre glissante. Le choix de la taille de la fenêtre est très important, car une dimension trop grande va offrir une bonne résolution fréquentielle et une mauvaise résolution temporelle. Par contre, une petite taille de la fenêtre augmente la résolution temporelle et diminue celle fréquentielle. Ces observations mettent en évidence un compromis entre la résolution fréquentielle et la résolution temporelle correspondant au principe d'incertitude d'Heisenberg. La difficulté de l'analyse STFT est liée au fait que la taille de la fenêtre est fixe et ne dépend pas des fréquences analysées.

Pour éviter cet inconvénient, une autre technique a été développée par Jean Morlet en 1975 : la transformation en ondelettes WT (Wavelet Transform). Au lieu d'analyser le signal avec une fenêtre glissante, il propose une fenêtre de taille dépendant de la fréquence analysée. Il existe deux familles d'ondelettes : continues et discrètes.

La transformée en ondelettes dépend de deux paramètres :

- un paramètre d'échelle, " a " qui joue le rôle de la fréquence dans la transformée de Fourier à fenêtre. Un paramètre d'échelle petit correspond à des fréquences élevées et inversement.
- le paramètre de translation, " b " qui joue le rôle de la position de la fenêtre dans la transformée de Fourier à fenêtre. Ce paramètre correspond donc à l'axe des temps.

Kamarthi et *al.* [Kamarthi 97] ont analysé les efforts de coupe et les vibrations avec les FFT et WT pour étudier l'usure en dépouille dans le tournage d'un acier avec des outils non-revêtus. Les auteurs utilisent un filtrage par bande passante sur les deux types de signaux afin d'extraire des coefficients qui seront utilisés dans un réseau de neurones pour prédire l'usure en dépouille. Les résultats obtenus sont très bons et les auteurs recommandent d'utiliser la WT sur les signaux des efforts de coupe et la FFT sur les signaux de vibrations.

Une autre analyse fréquentielle utilise la fonction « cohérence », qui donne une mesure du degré de similarité en fréquence entre deux séries temporelles. Par exemple, si pour une fréquence donnée, la fonction cohérence est égale à 1, ça veut dire que les deux signaux correspondent parfaitement pour cette fréquence. Par contre, si la cohérence est 0, les signaux ne sont pas corrélés. Li et *al.* [Li 97] utilise cette approche pour étudier l'usure de l'outil (méthode présentée dans le paragraphe II.2.2.3).

Kalvoda et *al.* [Kalvoda 10] ont développé une nouvelle méthode d'analyse : la transformation de Hilbert Huang HHT (Hilbert-Huang Transform). La HHT est une méthode semi-empirique qui utilise l'analyse spectrale de Hilbert (HSA) afin de décomposer le signal en signaux mono-composante, en supprimant les harmoniques. L'auteur montre que l'utilisation de la HHT facilite l'analyse et donne des informations sur l'usure de l'outil. Cette méthode permet un nettoyage du spectre fréquentiel et les auteurs mettent en évidence la diminution de la fréquence de dent lors de l'augmentation de l'usure. Cette évolution est expliquée par un changement de la géométrie de l'outil, qui va générer un phénomène de talonnage.

Cette étude bibliographique a montré que l'aspect fréquentiel des signaux est une source importante d'informations. Plusieurs approches de surveillance de l'usure de l'outil basées sur l'évolution de fréquences ont été proposées dans la littérature. La transformée de Fourier est un outil fondamental dans le traitement de signaux. C'est la méthode la plus utilisée par les chercheurs pour remonter au contenu fréquentiel. Dans le cas où les signaux sont non-stationnaires ou pour une analyse ponctuelle (par exemple, le changement fréquentiel généré par un copeau coincé entre l'outil et la pièce à usiner), la FFT n'est pas utilisable. La STFT représente dans cette situation une solution plus adaptée. En fonction des besoins, ce sont ces deux méthodes qui seront utilisées pour le traitement fréquentiel des signaux dans le cadre de nos travaux.

Synthèse

Ce chapitre nous a permis de définir les notions théoriques et les travaux qui seront utilisés dans la suite.

La première partie présente une description des superalliages et met en avant les problèmes liés à leurs usinages. Le contexte aéronautique actuel impose l'utilisation des moteurs de plus en plus fiables. Les composants de ceux-ci doivent supporter des sollicitations thermomécaniques intenses lors de leur fonctionnement. Les superalliages sont utilisés dans les différentes parties d'un moteur aéronautique. Grâce aux caractéristiques présentées au début du chapitre, les superalliages à base-nickel ont été choisis pour la réalisation des disques de turbines.

L'usinage de ces matériaux ainsi que le type du procédé (le perçage dans un avant-trou) représente un enjeu important pour les motoristes, car ils doivent assurer l'intégrité de la surface usinée. Le contexte d'usinage joue un rôle important sur les phénomènes thermomécaniques et par conséquent sur l'intégrité de surface de la pièce à usiner. Dans cette relation, un paramètre intermédiaire intervient : l'usure de l'outil. La dégradation de l'outil coupant peut entraîner des conséquences négatives sur l'intégrité de surface (l'exemple le plus parlant est l'accident de Pensacola illustré au premier chapitre). Le suivi de l'usure par une technique de surveillance est une connaissance importante permettant d'éviter les éventuelles anomalies et donc, de fiabiliser et sécuriser la fabrication de pièces critiques.

L'usure de l'outil dans l'usinage de superalliages est forcément influencée par ces matériaux. Les particules dures contenues dans les matériaux, les températures élevées atteintes au niveau du contact outil-pièce ou l'affinité chimique avec certains matériaux d'outils sont les éléments principaux à considérer afin de comprendre les mécanismes d'usure (l'usure par abrasion, par adhésion ou par diffusion). Dans la littérature, l'usure en dépouille, l'entaille, l'arête rapportée et l'usure catastrophique sont citées comme les plus importants modes de dégradation pour les superalliages base-nickel.

Le bon fonctionnement de l'outil ainsi que sa durée de vie sont directement corrélés avec plusieurs facteurs. Les plus importants ont été exposés dans le paragraphe II.1.5. Le choix des paramètres de coupe (vitesse, avance, etc.) influe principalement sur la température générée lors de l'usinage et joue donc un rôle sur l'usure par adhésion ou par diffusion. Dans notre contexte d'étude, l'augmentation de l'avance peut entraîner une usure en entaille (différence de pressions sur l'arête de coupe). L'existence d'un revêtement protège l'outil par une diminution de la quantité de chaleur produite et peut se présenter comme une barrière contre le phénomène d'adhésion. La lubrification a un impact direct sur la réduction des températures dans la zone de coupe et sur la diminution du

frottement à l'interface outil-pièce. De plus, si une haute pression est utilisée, la lubrification entraîne une meilleure fragmentation de copeaux. Il existe d'autres facteurs (comme la taille des grains, la dureté du matériau, le procédé, etc.) qui ont une influence sur la durée de vie d'outil.

Un nombre important de travaux se concentre sur le suivi de l'usure. La plupart des techniques est basée sur la mesure de grandeurs physiques pendant l'usinage pouvant détecter un changement dans le processus (la génération d'une entaille, l'effondrement de l'arête de coupe, etc.). L'analyse de ces études a montré la sensibilité des capteurs ainsi que ceux pouvant être utilisés dans une technique de surveillance. En fonction de plusieurs aspects considérés (le coût des outils, la complexité de mise en œuvre, etc.), il semble que les mesures de la puissance, du courant de la broche ainsi que les vibrations soient les meilleurs choix pour définir une approche pour un suivi de l'usure. Ensuite, la mesure des efforts de coupe représente l'un de plus performant système et peut servir à la compréhension des phénomènes rencontrés lors de la coupe. En effet, si les efforts sont mesurés en utilisant des tables dynamométriques, le coût significatif de celles-ci et le risque de modifier le comportement dynamique de l'ensemble Machine-Outil-Pièce (représentent un élément ajouté dans la machine-outil, donc une possible source de perturbations) sont des inconvénients qui rendent difficile leur utilisation. Par contre, les capteurs intégrés dans le montage d'usinage peuvent constituer une alternative intéressante pour la mesure des efforts de coupe.

Par rapport à toutes les informations issues de cette analyse, les capteurs qui mesurent la puissance (courant) de la broche, les efforts de coupe et les vibrations ont été choisis comme moyens de surveillance pour les campagnes expérimentales (aspect qui sera détaillé dans le troisième chapitre). Ce choix nous permet de couvrir une plage fréquentielle assez importante et une complémentarité des signaux afin de relever les informations importantes.

Les capteurs qui mesurent la température représentent une direction très importante pour la compréhension des phénomènes, mais la complexité de mise en œuvre et le prix élevé des outils instrumentés avec des thermocouples le rendent difficile à être utilisé dans une technique de surveillance.

Une fois que les signaux sont enregistrés, ils nécessitent un traitement afin d'obtenir les informations nécessaires. L'analyse de signaux (temporelle ou fréquentielle) offre la possibilité d'expliquer l'évolution des signaux en fonction des modes d'usures ou des perturbations par des phénomènes physiques. La transformée de Fourier (FFT) ou l'utilisation de STFT sont les techniques que nous pouvons utiliser sur les signaux afin de connaître le contenu fréquentiel.

Pour les cas les plus complexes (les paramètres intervenant dans l'usinage sont nombreux, situations avec des grandes fluctuations ou quand l'influence des facteurs est conjuguée), il est nécessaire que l'aspect phénoménologique soit combiné avec une approche de type « boîte noire ».

Les modèles basés sur des critères statistiques (la valeur moyenne, l'écart type, le RMS, le skewness, le kurtosis, etc.) sont utilisés pour avoir une estimation de l'usure.

L'objectif de ce travail est de développer une méthode de surveillance de l'usure de l'outil basée sur la mesure des grandeurs physiques, avec la prise en compte des perturbations d'usinage. Dans ce contexte et en tenant compte de l'analyse bibliographique, nous proposons une approche expérimentale (détaillée dans le troisième chapitre) afin d'identifier les modes de dégradation dans le perçage de l'Udimet® 720 LI. La température générée pendant l'usinage et les efforts de coupe sont les facteurs les plus importants sur l'usure. Donc, la plage des conditions de coupes testées nous offre la possibilité de générer plusieurs types d'usures. Nous privilégions deux techniques (FFT et STFT) pour analyser les signaux enregistrés et les corrélérer avec l'usure.

Chapitre III

III. Méthodologie expérimentale

Introduction	56
III.1. Dispositif expérimental.....	57
III.1.1. Matière : Udimet® 720.....	57
III.1.2. Les machines-outils.....	60
III.1.3. L'outil.....	61
III.1.4. La lubrification.....	62
III.1.5. Les capteurs de surveillance.....	62
III.2. Description des essais.....	64
III.2.1. Essais basés sur le Couple-Outil-Matière.....	65
III.2.2. Essais « cartographie ».....	67
III.2.3. Essais « complémentaires ».....	68
III.2.4. Essais avec variation du contexte d'usinage.....	69
III.2.4.1. Essais « coupure de lubrification ».....	69
III.2.4.2. Essais « perturbations d'usinage ».....	70
III.3. Traitement des signaux enregistrés.....	71
III.3.1. Analyse temporelle.....	71
III.3.2. Analyse temporelle des signaux d'efforts.....	73
III.3.3. Analyse fréquentielle.....	77
III.3.3.1. Identification fréquentielle – l'outil.....	79
III.3.3.1.1. Calculs par éléments finis.....	79
III.3.3.1.2. Analyse modale.....	81
III.3.3.2. Identification fréquentielle – la platine de mesure.....	82
III.3.3.2.1. Essais sans la platine de mesures Kistler.....	82
III.3.3.2.2. Sonnage.....	83
Synthèse	85

Introduction

Le deuxième chapitre a mis en avant la complexité des phénomènes rencontrés pendant la coupe. En tenant compte de tous les problèmes introduits par l'usinage de superalliages base-nickel et en particulier pour le cas du perçage, une étude exclusivement théorique semble difficile, ne permettant pas d'obtenir des résultats applicables au contexte. L'usure des outils dans le perçage de l'Udimet® 720 représente la première étape de ces travaux de thèse. Afin de réaliser cette étude, il est nécessaire de définir une méthodologie expérimentale. Cette approche permettra de répondre aux besoins du projet ACCENT et de plus, d'étudier la possibilité de transposer la méthode de surveillance définie dans un cadre industriel.

La première partie de ce chapitre présente une description des moyens expérimentaux utilisés : la matière, les machines – outils, l'outil et la lubrification. Ensuite, les différents capteurs utilisés pour la surveillance sont représentés.

La deuxième partie comprend une description des essais réalisés (dans un contexte d'usinage sans perturbation et ensuite avec des perturbations). Une première approche est basée sur le Couple-Outil-Matière, ayant comme critère principal la minimisation du coefficient spécifique de coupe. Cette méthode ne prend pas en compte les critères d'intégrité matière, et donc, d'autres campagnes expérimentales ont été rajoutées afin d'identifier l'influence des conditions de coupe sur ces nouveaux critères. Les derniers essais sont centrés sur l'étude de l'influence des perturbations d'usinage (baisse de pression dans le système de lubrification, changement de la dureté du matériau, etc.).

La troisième partie présente le traitement de signaux enregistrés. Des analyses temporelles sont utilisées pour extraire les critères statistiques qui serviront à générer une base de données. Après, une analyse fréquentielle des signaux issus des accéléromètres est proposée. Une identification des fréquences va nous apporter les informations nécessaires pour une compréhension de l'évolution des signaux en fonction de l'usure ou des perturbations d'usinage. Pour cela, trois méthodes sont employées : modélisation par éléments finis, analyse modale – sonnage et essais sans la platine de mesures.

III.1. Dispositif expérimental

Afin de réaliser l'ensemble des essais qui seront ensuite utilisés pour définir les relations entre les modes de dégradation et les grandeurs physiques mesurées pendant le processus, différents moyens expérimentaux et capteurs de surveillance ont été utilisés. Chaque dispositif va être brièvement décrit dans les paragraphes suivants.

III.1.1. Matière : Udimet[®] 720

Les superalliages base-nickel sont utilisés depuis les années 1970 pour la fabrication des composants des moteurs aéronautiques. L'Inconel[®] 718 (AFNOR NC19FeNb) a permis de répondre aux premiers besoins pour les disques de turbines. Mais, les nécessités sans cesse croissantes de tenue en température au-delà de 650 °C ont poussé à l'apparition de nouveaux matériaux, comme l'Udimet[®] 720 (AFNOR NC18K15TDA). L'Udimet[®] 720 fait partie des superalliages réfractaires et a été élaboré par la société « Special Metals » aux USA. Aujourd'hui, en France, il est développé par « Aubert & Duval ». Pour la réalisation de ses disques de turbines, Turbomeca a choisi d'utiliser l'Udimet[®] 720, en remplacement de l'Inconel[®] 718, pour garantir un meilleur comportement à haute température. Ceci est dû à la structure cubique à faces centrées (CFC) de la matrice γ qui offre une résistance plus importante pour des températures proches du point de fusion. Le coefficient de dilatation du nickel est relativement faible. Par suite, ses alliages permettent d'assurer des tolérances dimensionnelles sévères même à haute température.

La matrice γ est renforcée par précipitation d'une phase intermétallique cohérente γ' , ainsi que de carbures et de borures qui précipitent lors de la solidification ou durant les traitements thermiques ultérieurs. La phase γ' correspond à une structure de type A_3B où les atomes A sont du nickel (Ni), tandis que les atomes B sont du titane (Ti) et de l'aluminium (Al).

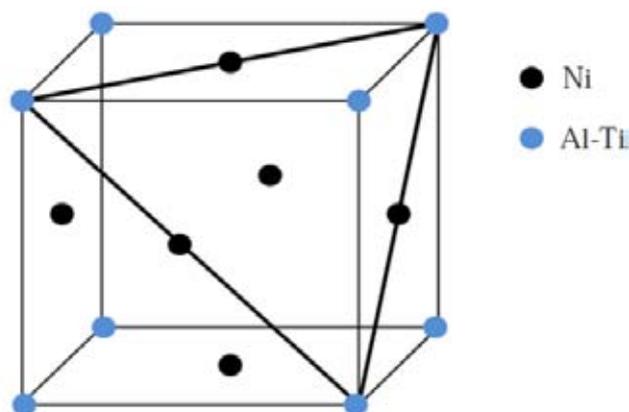


Figure III.1.1 : Structure cristallographique de γ'

La Figure III.1.1 montre la répartition des différents atomes dans la structure cristallographique de la phase γ' (le nickel se trouve au centre des faces, tandis que l'Al et Ti occupent les sommets du cube). Le taux de chrome présent dans la composition de l'Udimet[®] 720 confère une bonne résistance à l'oxydation. Néanmoins, un pourcentage élevé contribue à la formation de la phase σ (fragilisante par sa structure). Afin de limiter cet inconvénient et d'améliorer les propriétés de l'Udimet[®] 720, les teneurs en chrome, en carbone et en bore ont été limitées. Ceci a conduit à l'apparition d'un nouvel alliage : l'Udimet[®] 720 LI où LI signifie « Low Interstitial » (utilisé par Turbomeca pour la fabrication de certaines pièces). D'après l'étude de [Reed 99], cette configuration améliore la stabilité métallurgique à haute température. La composition chimique est présentée dans le Tableau III.1.1.

Tableau III.1.1 : Composition de l'Udimet[®] 720 LI (% massique) utilisé par Turbomeca

Élément	Ni	Cr	Co	Ti	Mo	Al	W	Fe	B	Si	Mn	Cu	C	P	S
min	Base	17,5	14	4,75	2,75	2,25	1		0,015						
max		18,5	15,5	5,25	3,25	2,75	1,5	0,5	0,040	0,2	0,1	0,1	0,05	0,015	0,01

Il est important de remarquer que parmi les éléments d'addition, le molybdène et le tungstène procurent un durcissement par solution solide, le cobalt augmente la température de mise en solution de la phase γ' et procure également un durcissement par solution solide. Le carbone, le bore et le zirconium permettent quant à eux d'augmenter les propriétés à chaud du matériau notamment celles des joints de grain.

Afin d'aboutir à une composition chimique précise, l'élaboration de l'Udimet[®] 720 comporte deux étapes, qui regroupent trois séquences (triple fusion) :

- dans la première étape les différents éléments d'addition sont incorporés à l'alliage de base qui est fondu par **VIM** (fusion par induction sous vide),
- ensuite, le matériau est refondu par **ESR** (refusion sous laitier) et **VAR** (refusion à l'arc sous vide). Cette étape permet d'améliorer la propreté du matériau, de le dégazer et de le rendre plus homogène.

Une première transformation de l'Udimet[®] 720 est obtenue par une opération de forgeage en barres (ou lopins), de différentes sections en fonction de besoins ultérieures. Ensuite, ces barres sont matricées en pièces de forme (disques HP, Figure III.1.2.a) ou en galettes (disques TL, Figure III.1.2.b).

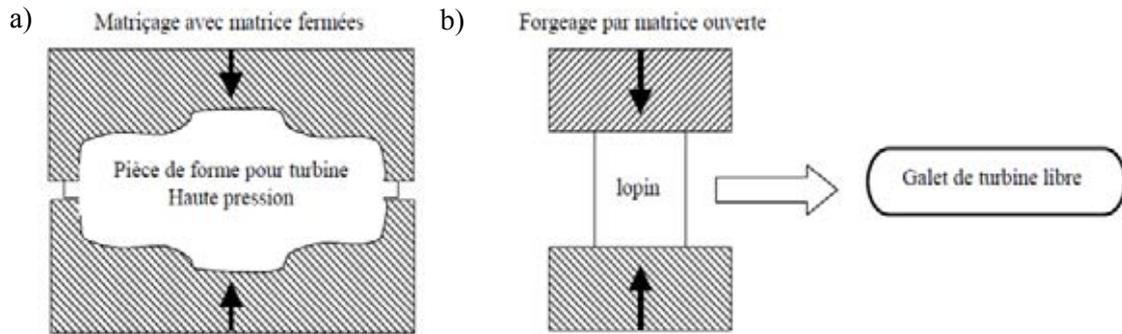


Figure III.1.2 : Forgeage de disques de turbine (a) disques HP et (b) disques TL [Devaux 04]

Les propriétés mécaniques des superalliages base-nickel peuvent être améliorées par l'optimisation de la composition chimique et des procédés d'élaboration, mais également par les traitements thermiques. Après le forgeage, les disques subissent donc un traitement thermique. Il comporte dans un premier temps une mise en solution, suivi d'une trempe à l'huile. La dernière étape suppose un traitement de vieillissement qui a pour but de précipiter le maximum de phases durcissantes et d'optimiser leur morphologie nécessaire pour des applications de longues durées. L'étude de Jackson *et al.* [Jackson 99] met en évidence trois tailles différentes de γ' , obtenues après un traitement de vieillissement standard : les γ' primaires (1 à 10 μm), les γ' secondaires (70 à 120 nm) et les γ' tertiaires (15 à 50 nm). Le même auteur fait une corrélation entre les étapes classiques d'un traitement thermique et la taille de γ' de l'Udimet[®] 720 LI. La taille des γ' primaires est influencée par l'opération de forgeage à chaud tandis que les γ' secondaires sont en relation avec la vitesse de refroidissement spécifique de la trempe à l'huile. En ce qui concerne les γ' tertiaires, leur taille est donnée uniquement par le traitement de vieillissement.

Plusieurs types de traitements thermiques sont disponibles en fonction de l'application pour laquelle les pièces sont destinées. Deux exemples de traitements thermiques sont présentés :

- traitement « standard » pour **grains fins** - Figure III.1.3.a - (mise en solution à 1080°C et vieillissement : 650°C/24h + 760°C/16h),
- traitements pour **gros grains** - Figure III.1.3.b - (mise en solution à 1150°C et vieillissement : 700°C/24h + 815°C/16h).

Une structure à grains fins améliore la tenue à la fatigue. Par conséquent, les disques de turbine en UDIMET[®] 720 très sollicités thermo-mécaniquement bénéficient d'un traitement « grains fins », contrairement aux pales où le fluage prédomine, et où une structure à gros grains est préférable pour limiter ce phénomène.

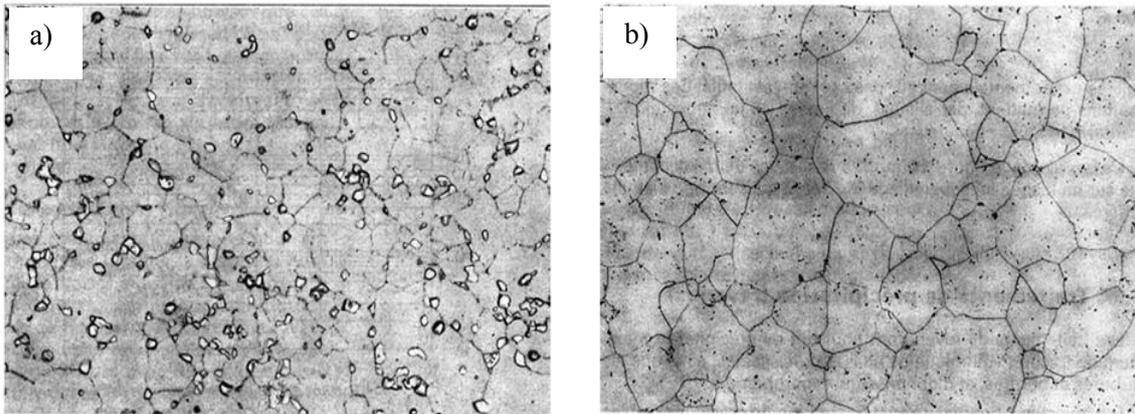


Figure III.1.3 : Microstructure de l'Udimet 720 (a) grains fins et (b) gros grains [Devaux 04]

Dans notre cas, il faut préciser que deux traitements thermiques de vieillissement (Figure III.1.4) ont été utilisés afin de générer les niveaux de dureté différents. Les deux types de traitement seront employés afin de vérifier l'impact de la dureté sur l'intégrité matière et l'usure de l'outil.

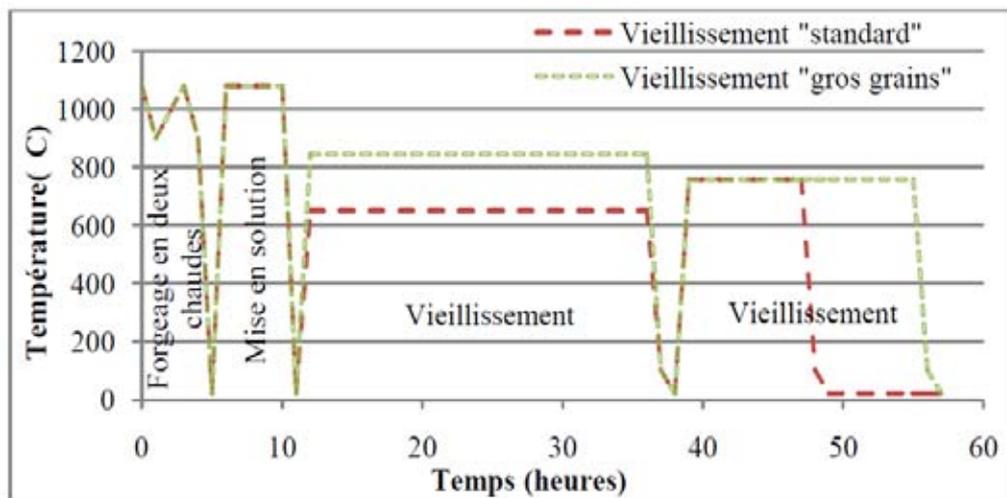


Figure III.1.4 : Traitements thermiques de l'Udimet® 720 LI

III.1.2. Les machines-outils

Les essais de perçage qui font l'objet de différentes campagnes expérimentales ont été réalisés sur deux machines :

- la première série d'essais a été exécutée dans le contexte industriel et a impliqué une machine-outil Olympic VK1055, qui se trouve dans les ateliers de production de Turbomeca Tarnos,
- pour des raisons de disponibilité et pour continuer l'étude dans un contexte expérimental plus complet, des essais supplémentaires ont été réalisés sur une Huron KX10 (Figure III.1.5), au Laboratoire Génie de Production de l'ENIT. Elle est munie d'une commande numérique SIEMENS 840D.



Figure III.1.5 : Machine-Outil Huron KX10

Dans les deux cas, le maintien de l'outil dans le porte-outil est réalisé par frettage, garantissant ainsi un défaut de coaxialité lors du montage inférieur au centième. Ensuite, un cône HSK63 assure la liaison entre le porte-outil et la broche. Les deux machines utilisent des électro-broches (puissance maximale de 15 kW – l'Olympic et 18 kW – la Huron), la même huile de coupe (Rhenus r.meta FU 53 W) et sont dotées également d'un système de lubrification externe ou interne par l'outil.

III.1.3. L'outil

Plusieurs opérations d'usinage sont nécessaires afin de réaliser l'alésage central d'un disque de turbine à haute pression : un avant trou de $\text{\O}13$ mm est réalisé par électroérosion. Ensuite, une opération de perçage avec un foret à tête interchangeable est effectuée. La dernière opération est effectuée en tournage en deux passes (opérations présentées dans le Tableau III.1.2).

Tableau III.1.2 : Succession des opérations nécessaires pour la réalisation des alésages des disques de turbine

Opération	Outil	Diamètre fini [mm]
Carottage	Électroérosion	13
Ébauche	Foret ISCAR	15,5
Semi-finition	Plaquette tournage	15,8
Finition	Plaquette tournage	16

L'opération d'ébauche qui fait l'objet de cette étude est un perçage dans un avant-trou de $\text{\O}13$ mm. L'outil utilisé est un foret à tête interchangeable Iscar Chamdrill $\text{\O}15,5$ mm et il est présenté dans la Figure III.1.6. Le corps du foret est en acier et possède un canal pour la lubrification interne.

L'arrosage se fait au niveau des listels et pas sur la face de dépouille comme dans le cas des forets monoblocs. Cette spécificité de l'outil est nécessaire dans le cas du perçage dans un avant-trou pour lubrifier et refroidir la zone de coupe. Un autre aspect intéressant de cet outil est la longueur réduite des listels (environ 4 mm). Ces faibles dimensions réduisent les phénomènes de frottement au long du trou [Bonnet 09]. La tête de l'outil est en carbure de tungstène revêtue d'une couche TiAlN.

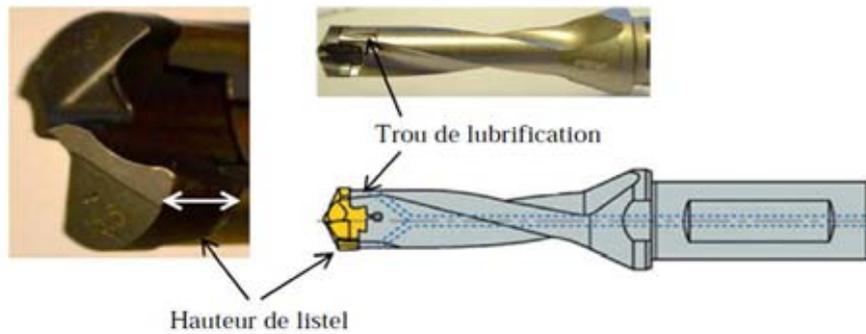


Figure III.1.6 : Foret Iscar Chamdrill

III.1.4. La lubrification

Une lubrification interne par le centre de l'outil a été utilisée pour tous les essais. Le lubrifiant est une émulsion, composée d'eau avec un pourcentage de 6% à 8% d'huile soluble Rhenus r.meta FU 53 W. Pour les essais concernant la variation du contexte d'usinage, le pourcentage a été modifié jusqu'à 12,5 %, afin de vérifier son impact sur l'intégrité matière et l'usure de l'outil. Ces chiffres correspondent à la variation possible rencontrée dans le milieu industriel durant une année. La pression en sortie de la pompe est réglée à 17 bars.

III.1.5. Les capteurs de surveillance

Les efforts de coupe et le couple de perçage sont mesurés avec une platine Kistler quatre composantes de type 9272A. Les signaux sont conditionnés avec un amplificateur Kistler de type 5019A et traités avec le logiciel Dynoware[®] (Figure III.1.7). La platine a une plage de mesure importante (jusqu'à 5 kN pour F_x et F_y , 20 kN pour F_z et 200 Nm pour M_z). Le dynamomètre possède une grande rigidité et par conséquent une première fréquence propre élevée. Les fréquences propres de la platine sont présentées dans le Tableau III.1.3. La limite en fréquence est donnée par la 1^{ère} fréquence propre de la platine afin d'éviter les phénomènes de rebond dans la mesure. Pour tous les essais, la fréquence d'acquisition a été de 1000 Hz.



Figure III.1.7 : Chaîne d'acquisition Kistler

Tableau III.1.3 : Fréquences propres de la platine Kistler

Directions	$f_0(x,y)$	$f_0(z)$	$f_0(M_z)$
Fréquence propre de la platine installé sur brides [kHz]	$\approx 3,1$	$\approx 6,3$	$\approx 4,2$

Les mesures de vibration sont réalisées avec des accéléromètres piézoélectriques uni-axiaux Brüel & Kjør de type 4508. Le conditionneur est composé d'un module d'entrée-sortie et d'un module réseau Brüel & Kjør de type 3109 et 7533. Les données sont enregistrées et traitées à l'aide du logiciel Brüel & Kjør Pulse[®]. La plage de mesure des accéléromètres est : 0,3 Hz - 8 kHz en fréquence et $\pm 700 \text{ ms}^{-2}$ en accélération.

La puissance et le courant broche ont été mesurés avec deux systèmes. Pour les premiers essais réalisés sur la machine Olympic de Turbomeca, un capteur de puissance WattPilote[®] a été utilisé afin de mesurer la puissance active de la broche. La fréquence d'acquisition a été fixée à 12,5 Hz (fréquence maximale pour la durée d'usinage la plus longue). Pour tous les autres essais, l'acquisition se fait par l'intermédiaire du profibus Siemens et du logiciel Sinucom NC[®]. Ce système permet d'enregistrer la puissance active et le courant consommé par la broche, la position de l'axe Z et les courants des moteurs d'axes. La mesure de toutes ces grandeurs se fait à une fréquence d'acquisition de 250 Hz.

L'ensemble de capteurs choisis assure une plage importante de mesure aux niveaux des efforts de coupe et des aspects fréquentiels.

III.2. Description des essais

La première étape du projet ACCENT consiste à développer une procédure standard afin de définir une fenêtre de paramètres d'usinage pour la fabrication de pièces critiques. En effet, cette fenêtre, appelée « **A.S.I.D** » (**A**ceptable **S**urface **I**ntegrity **D**omain) doit assurer que l'intégrité de surface est acceptable. Les exigences (critères) selon lesquelles le domaine est jugé comme acceptable ou non sont définies dans le WP4, par les constructeurs européens des moteurs aéronautiques. Quelques exemples peuvent être énoncés dans cette direction : le coefficient de conicité, l'épaisseur des couches thermo-mécaniquement affectées, l'épaisseur de la bavure, la rugosité, les contraintes résiduelles, etc.

Le point de départ de l'étude expérimentale est donné par les conditions de coupe utilisées dans la production par le partenaire industriel. Le but des premiers essais est de vérifier les paramètres d'usinage choisis par Turbomeca et de définir un premier domaine optimal par rapport à des critères et mesures non destructives (coefficient spécifique de coupe, état de surface, l'usure, etc.). Pour intégrer la problématique de l'intégrité de surface dans l'étude, d'autres essais ont été réalisés. Pour rappel, tous les essais ont été surveillés avec les capteurs définis ci-dessus. L'ensemble des conditions de coupe testées nous permet de déterminer :

- les limites de l'A.S.I.D,
- les anomalies d'usinage générées autour du domaine acceptable,
- les modes de dégradation de l'outil.

Comme déjà évoqué dans le premier chapitre, deux activités de recherche ont été initiées afin de répondre aux différentes tâches du projet ACCENT, concernant l'implication du LGP et Turbomeca. Les travaux de Dutilh [Dutilh 11] sont axés sur les relations « conditions de coupe - intégrité de matière – signaux », tandis que ceux qui font l'objet de ce mémoire sont orientés vers « conditions de coupe – usure – signaux ». À ce point-là, les deux thèses se séparent et une autre série d'essais traite des modes de dégradation et leurs répartitions sur la plage des conditions de coupe, l'évolution de chaque mode après plusieurs perçages avec la même plaquette et la répétabilité des essais.

La dernière problématique qui est prise en compte dans l'étude expérimentale est l'influence des perturbations d'usinage sur l'usure des outils. L'étude des éventuelles perturbations d'usinage qui peuvent apparaître lors du perçage et leur détection avec les moyens de surveillance est associée à la quatrième étape du projet ACCENT. Dans la suite, toutes les campagnes expérimentales seront détaillées.

III.2.1. Essais basés sur le Couple-Outil-Matière

La première série d'essais représente le point de départ de cette étude et les conditions de coupe sont présentées dans la Figure III.2.1. Nous nous sommes appuyés sur la méthode COM, décrite dans la norme AFNOR NF E66-520-8, comme une première approche. Cette méthodologie est basée principalement sur le coefficient spécifique de coupe K_c . Dans un premier temps, nous avons cherché les conditions de coupe qui permettent de le minimiser. Un outil neuf a été utilisé pour chaque essai.

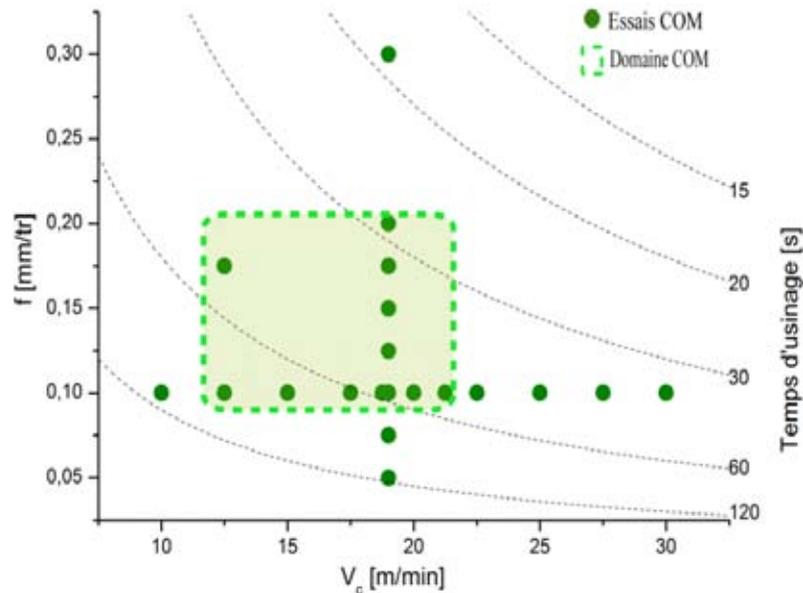


Figure III.2.1 : Conditions de coupe pour les essais « COM »

La première étape du COM consiste à déterminer la $V_{c,min}$, en s'appuyant sur l'avance utilisée dans la production, $f = 0,1$ mm/tr. Pendant tous les essais, la puissance consommée par la broche ainsi que le couple M_z et l'effort d'avance F_z ont été enregistrés. En utilisant ces mesures et les équations III.2.1, nous pouvons calculer les coefficients spécifiques de coupe et tracer les courbes $K_{c,c}$ et $K_{c,f}$ en fonction de V_c . Sur la Figure III.2.2.a, la $V_{c,min}$ est indiquée par le point où le coefficient spécifique de coupe diminue avant de remonter dans une courbe de type « cuvette », très bien souligné sur la courbe $K_{c,c}$ (P_c). Donc, de cette manière : $V_{c,min} = 19$ m/min.

$$\text{équations III.2.1} \quad : k_{c,c}(P_c) = \frac{240 \times P_c}{D \times V_c \times f} \quad k_{c,c}(M_z) = \frac{8000 \times M_z}{D^2 \times f} \quad k_{c,f} = \frac{2 \times F_z}{D \times f}$$

La deuxième partie consiste à trouver l'avance optimale. Cette fois-ci, la vitesse de coupe définie antérieurement reste fixe et différentes avances sont testées. Conformément à la norme, la Figure III.2.2.b présente les courbes $K_{c,c}$ et $K_{c,f}$ en fonction de l'avance. Sur cette figure, l'avance optimale est déterminée par le point situé après le point d'inflexion, donc $f_{optimal}$ est donnée par **0,1 mm/tr**.

L'évolution des coefficients spécifiques de coupe $K_{c,c}$ et $K_{c,f}$ en fonction de la vitesse de coupe et d'avance (Figure III.2.2.a et Figure III.2.2.b.) montre des différences en ce qui concerne le niveau et la forme des courbes. Entre les $K_{c,c}$ la différence de niveau s'explique par la prise en compte de l'effort d'avance pour la puissance et non par le couple. Ensuite, entre $K_{c,f}$ et les $K_{c,c}$ la différence est plus évidente et provient de la méthode de calcul, ainsi que l'effort d'indentation liée à l'âme du foret n'existe pas dans notre cas précis (perçage dans un avant trou).

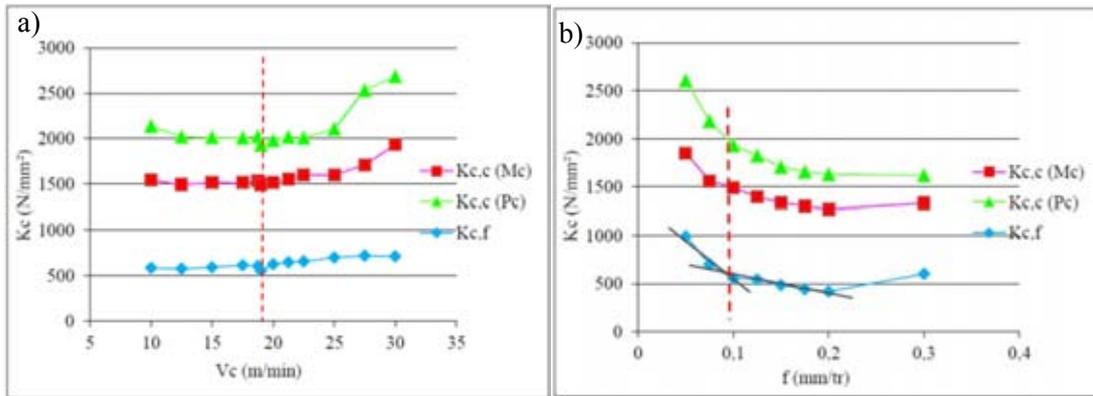


Figure III.2.2 : Évolution (a) des coefficients spécifiques de coupe $K_{c,c}$ (Pc) et $K_{c,c}$ (Mc) en fonction de V_c et (b) coefficient spécifique $K_{c,f}$ en fonction de f

Cette campagne expérimentale nous a permis de trouver le point de fonctionnement stable ($V_c = 19$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr), qui confirme les conditions de coupe de production utilisées par Turbomeca. Ensuite, en fonction de l'usure de l'outil (cette partie sera détaillée dans le quatrième chapitre), le niveau des efforts de coupe, l'état de surface et d'autres mesures non destructives, nous avons défini un premier domaine de fonctionnement (illustré dans la Figure III.2.1). La Figure III.2.3 montre comment ont été fixées les limites du domaine COM. Pour la vitesse de coupe, les valeurs ont été choisies par rapport à l'augmentation brusque de la rugosité au-delà de 22 m/min. En ce qui concerne l'avance, le domaine COM a été délimité par rapport à l'augmentation du défaut de conicité (à partir de 0,02 mm/tr).

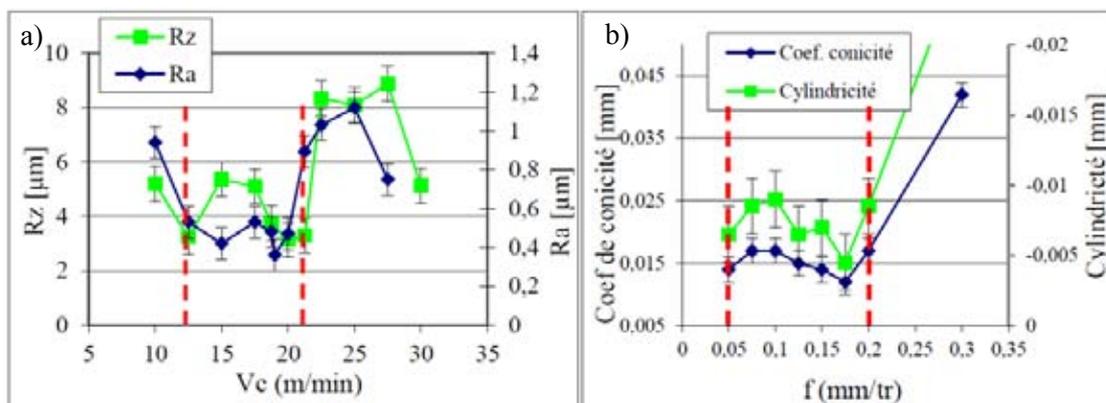


Figure III.2.3 : Évolution de (a) R_a / R_z et (b) coefficient de conicité et cylindricité du trou

III.2.2. Essais « cartographie »

La méthode COM est une méthode simple et rapide pour déterminer les conditions optimales de coupe. Elle peut être considérée comme une « première approche » pour définir un domaine de fonctionnement de l'outil coupant. Mais, le COM ne s'intéresse pas à l'intégrité de matière générée par l'opération d'usinage. Cet aspect est très important pour la définition du domaine acceptable, qui peut être associé à la première étape de la démarche ACCENT. Donc, cette campagne expérimentale rajoute la problématique de l'intégrité de surface, en considérant les critères qui répondent aux exigences imposées par les constructeurs aéronautiques européens (par exemple, l'épaisseur des couches affectées thermo mécaniquement, les contraintes résiduelles, la bavure, etc.).

Les nouvelles conditions de coupe sont présentées dans la Figure III.2.4. Ces points ont été choisis pour :

- confirmer que le domaine COM assure l'intégrité matière,
- délimiter d'une manière exacte les limites du domaine A.S.I.D,
- vérifier la limite en vitesse de coupe définie pour le domaine COM ($V_c = 22$ m/min),
- générer des anomalies d'usinage (le résultat des conditions de coupe élevées),

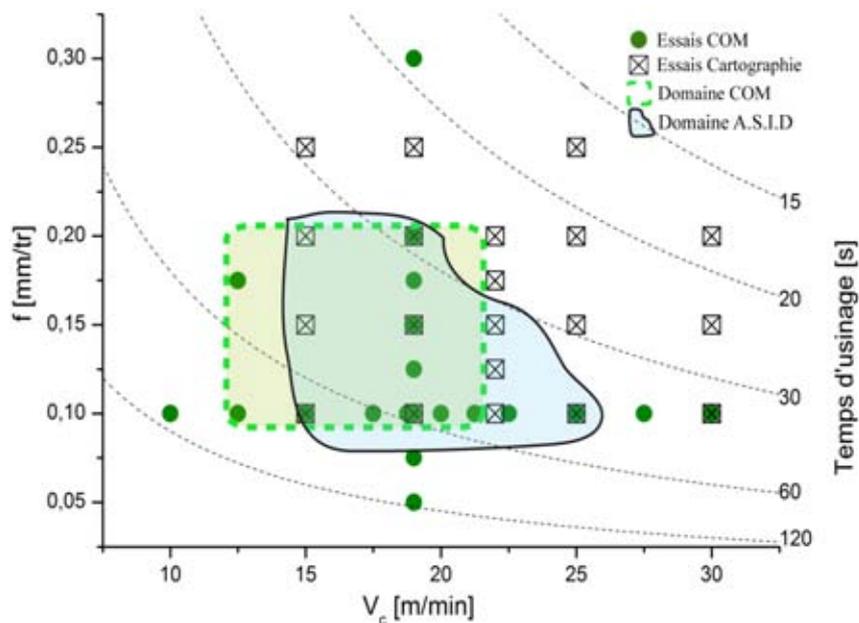


Figure III.2.4 : Les nouvelles conditions de coupe choisies pour les essais « Cartographie » et l'A.S.I.D

Indirectement, tous ces essais permettront de produire différents modes de dégradation de l'outil et des signaux caractéristiques correspondants.

Deux résultats peuvent être retenus après cette campagne expérimentale :

- la définition de l'A.S.I.D (domaine bleu sur la Figure III.2.4.) [Dutilh 11]. Ce domaine est déterminé après un seul perçage réalisé avec un outil neuf et dans un contexte « normal » (sans perturbations d'usinage). Les limites ont été imposées principalement par la

formation d'une couche affectées thermiquement (caractérisée par une dissolution de γ primaire) pour des vitesses de coupe plus grandes de 25 m/min. La limite supérieure de l'avance a été considérée en fonction de l'épaisseur de la couche des grains enchâssés (dû à l'effet mécanique important). Il est intéressant de mentionner la différence entre le domaine COM et l'A.S.I.D, ce qui remet en cause les techniques classiques d'optimisation en usinage. En effet, la méthode COM n'assure pas totalement l'intégrité de surface des pièces,

- la répartition des modes de dégradation sur l'ensemble des essais (cette partie sera abordée et détaillée dans le quatrième chapitre).

III.2.3. Essais « complémentaires »

Lors des campagnes « COM » et « Cartographie », nous avons délimité une zone représentant l'effondrement de la plaquette correspondant à un temps d'usinage inférieur à 20 s (les trois essais présentés dans la Figure III.2.5). Dans ce contexte, quelques conditions de coupe (pour les hautes vitesses de coupe) ont été choisies afin de vérifier cette limite. Pour les autres conditions de coupe (décrites dans la Figure III.2.5), plusieurs buts peuvent être énoncés :

- définir la répartition exacte de modes de dégradation sur la plage de conditions de coupe testées,
- étudier l'évolution de chaque mode de dégradation et l'influence de l'usure sur l'A.S.I.D [Dutilh 11] (les points qui se trouvent sur les limites du domaine),
- étudier la reproductibilité des résultats.

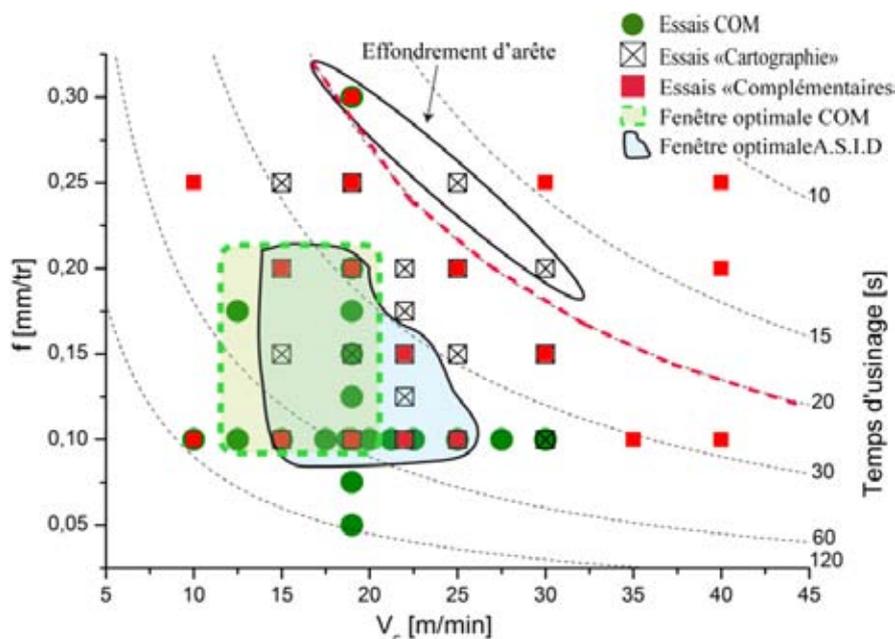


Figure III.2.5 : Essais « Complémentaires »

III.2.4. Essais avec variation du contexte d'usinage

Jusqu'à maintenant, nous avons présenté les conditions de coupe testées pour un contexte d'usinage « normal », c'est-à-dire sans perturbation d'usinage. Dans le premier chapitre, nous avons évoqué la possibilité que des phénomènes aléatoires puissent intervenir pendant l'usinage, ayant des conséquences négatives sur l'intégrité de surface ou la durée de vie des outils. Ces perturbations peuvent être antérieures à l'opération d'usinage ou pendant l'usinage. À partir de ces constatations nous avons identifié plusieurs paramètres pouvant influencer l'usinage :

- une variation des paramètres liés à la lubrification : une baisse de pression (coupure de lubrification) ou un changement du pourcentage d'émulsion,
- une variation du matériau au niveau de la dureté,
- notre contexte est représenté par une opération de perçage dans un avant-trou. Une influence de l'opération précédente (un défaut de positionnement) suite à une erreur de réglage de la machine est un autre facteur pris en compte pour cette étude.

Afin de quantifier l'impact de ces paramètres sur les deux aspects (intégrité de surface et usure), deux campagnes expérimentales ont été définies et seront présentées dans la suite.

III.2.4.1. Essais « coupure de lubrification »

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à perturber temporairement l'usinage avec une coupure de lubrification (qui correspond finalement à une baisse de pression dans l'installation). La coupure a été générée par une commande sur le programme après 10 mm de l'entrée du perçage sur une distance de 4 mm. Les conditions de coupe correspondant à ces essais sont illustrées dans la Figure III.2.6.

Les conditions de coupes testées avec la coupure de lubrification sont :

- CL1 (V_c 19 m/min et f 0,1 mm/tr) - est le point de production,
- CL2 et CL4 (V_c 30 m/min ; f 0,1 et 0,2 mm/tr) – conditions de coupe qui se trouvent dehors de l'A.S.I.D et qui permettent d'étudier l'impact de cette perturbation pour des phénomènes thermo-mécaniques plus importants,
- CL3 (V_c 19 m/min et f 0,2 mm/tr) – la limite en avance de l'A.S.I.D.

Tous les essais ont été répétés afin d'assurer que les phénomènes rencontrés sont reproductibles et comme énoncé précédemment, à chaque nouvel essai, un outil neuf a été utilisé.

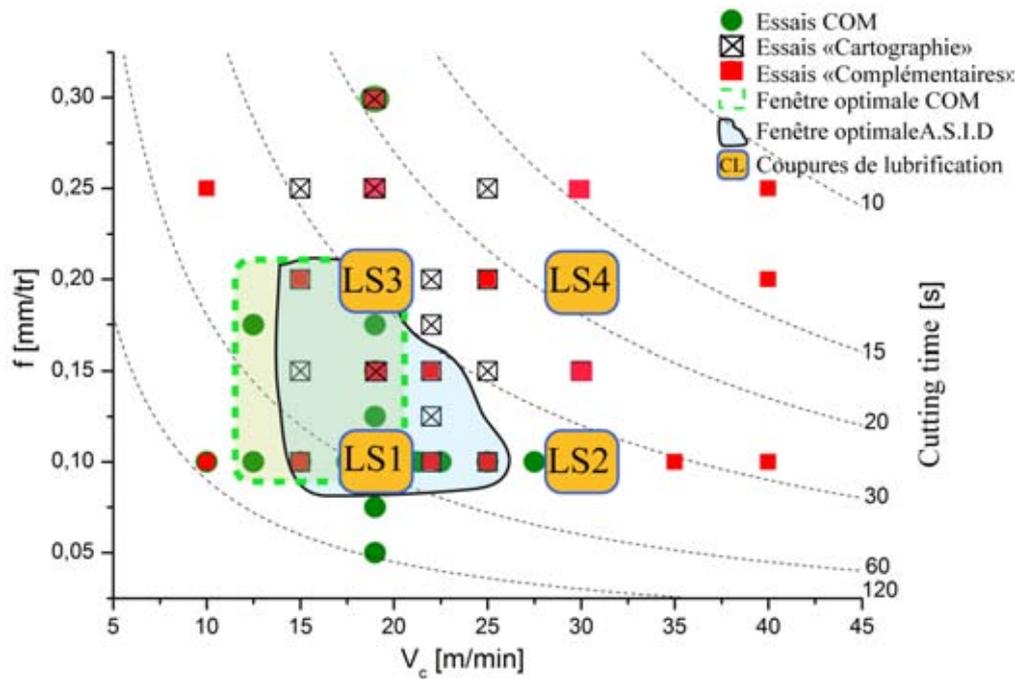


Figure III.2.6 : Conditions de coupe pour les essais "coupure de lubrification"

III.2.4.2. Essais « perturbations d'usinage »

Pour les cinq paramètres identifiés comme possibles sources de perturbations d'usinage (présentés dans le Tableau III.2.1), les deux niveaux ont été choisis de la manière suivante :

- les vitesses de coupe ont été choisies par rapport à la vitesse optimale (\pm une variation d'environ 25 %),
- les vitesses d'avance représentent les limites du domaine A.S.I.D,
- les deux valeurs du pourcentage d'émulsion correspondent à la variation périodique rencontrée dans le contexte industriel,
- lors des analyses métallurgiques sur les essais « COM » et « Cartographie », nous avons identifié une faible différence de dureté (environ 6 % moins importante sur les pièces « COM ») provenant de la variabilité du traitement thermique. Donc, pour ces essais nous avons décidé d'utiliser des pièces ayant deux niveaux de dureté (500 HV₃₀ et 470 HV₃₀). La différence a été obtenue par un changement du traitement de vieillissement (voir le paragraphe III.1.1),
- dans le contexte industriel, le défaut de positionnement de l'outil par rapport à l'avant-trou est fixé à 0,02 mm. Nous avons choisi une valeur plus importante (0,05 mm) afin de symboliser un défaut d'excentricité, de faux-rond ou de programmation de la machine.

Tableau III.2.1 : Paramètres du plan d'expériences

Paramètres					
Niveau	V _c [m/min]	f [mm/tr]	Émulsion [%]	Dureté [HV ₃₀]	Position par rapport à l'avant trou [mm]
-1	15	0,1	7,5	470	0
1	25	0,2	12,5	500	0,05

En considérant ces paramètres et leurs niveaux, un premier choix est un plan complet 2^5 (32 essais). Toutefois, afin de réduire le nombre d'essais par moitié, nous avons choisi d'utiliser un plan d'expériences fractionnaire 2^{5-1} de résolution V. Les expériences de résolution V permettent d'estimer tous les effets principaux et toutes les interactions de deux facteurs. Le paramètre pourcentage d'émulsion a été aliasé à l'interaction d'ordre 4. La structure finale de l'alias est illustrée dans le Tableau III.2.2.

Tableau III.2.2 : Structure de l'alias du plan d'expériences

Paramètres					Interactions									
A (V _c)	B (f)	C (dureté)	D (position)	E (émulsion)	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE
BCDE	ACDE	ABDE	ABCE	ABCD	CDE	BDE	BCE	BCD	ADE	ACE	ACD	ABE	ABD	ABC

III.3. Traitement des signaux enregistrés

La deuxième partie concerne l'identification des relations entre les grandeurs physiques mentionnées dans le paragraphe III.1.5 et les modes de dégradation. Pour cela, une analyse des signaux enregistrés lors de l'usinage a été mise en place. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à une étude temporelle, puis dans un second temps à une analyse fréquentielle.

III.3.1. Analyse temporelle

L'analyse temporelle des signaux permet d'examiner l'évolution des signaux en fonction du temps. La Figure III.3.1 présente l'évolution des signaux (l'accélération suivant l'axe Z, le courant de la broche, le couple Mz et l'effort d'avance Fz) pour un perçage réalisé à Vc 30 m/min et f 0,1 mm/tr.

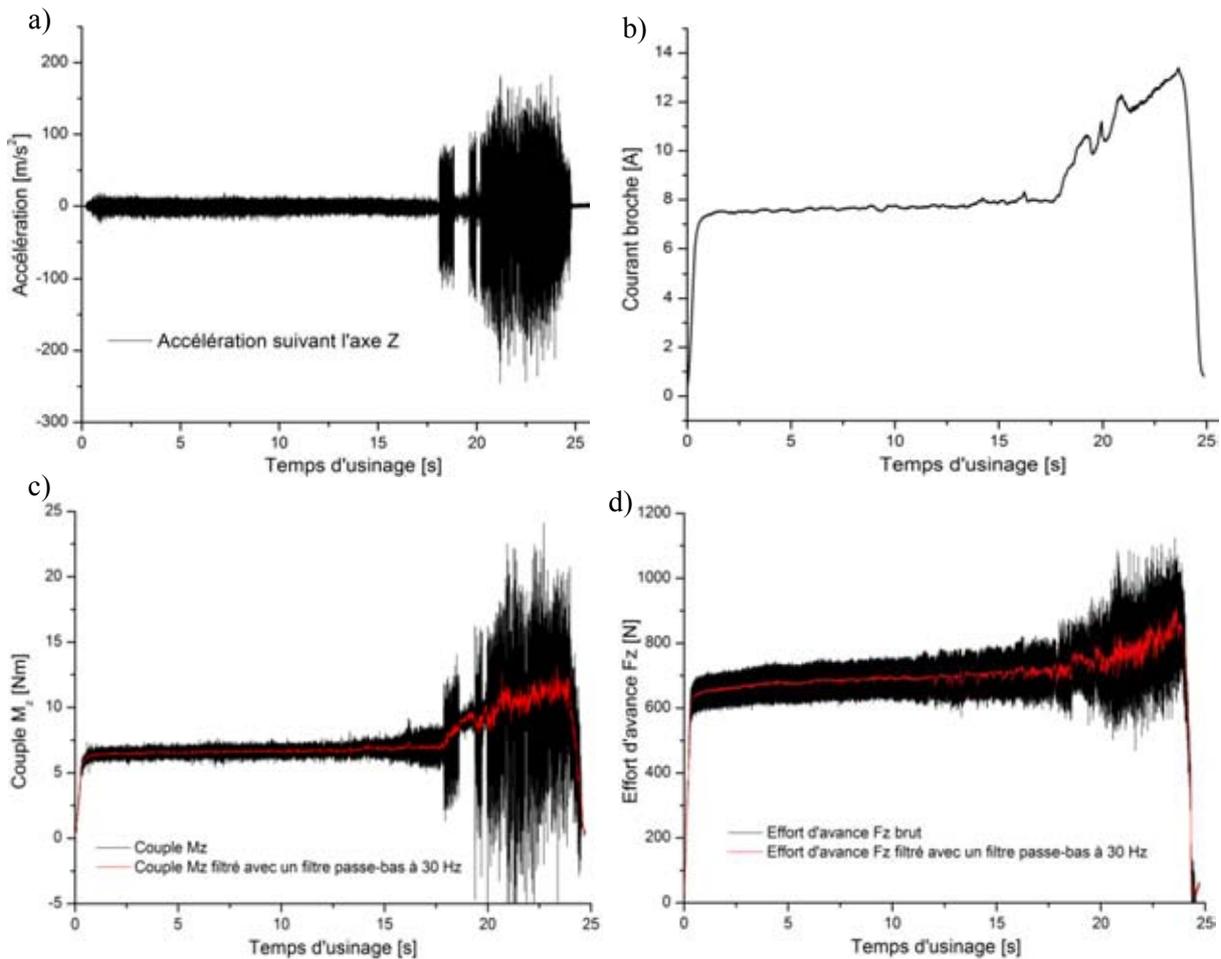


Figure III.3.1 : Exemples des signaux obtenues pour un essai à V_{30} m/min et $f_{0,15}$ mm/tr (a) accélération suivant l'axe Z, (b) le courant de broche, (c) le couple M_z et (d) l'effort d'avance

Cet exemple a été choisi parce qu'il génère une usure catastrophique et les signaux de surveillance présentent une évolution qui mettent en évidence une typologie spéciale des courbes : suite à la pénétration du foret dans la matière, les efforts de coupe augmentent (ou le couple, courant de broche, etc.) et ensuite se stabilisent et restent à un niveau presque constant jusqu'à l'effondrement de l'arête.

Les signaux du couple et de l'effort d'avance sont filtrés avec un filtre fréquentiel passe-bas à 30 Hz (la fréquence de coupe est trois fois plus grande que la fréquence de rotation) afin d'extraire la partie « statique » du signal. La Figure III.3.1 montre aussi que les composantes statiques du courant consommé par la broche, du couple et de l'effort F_z ont des évolutions similaires. De même, les composantes dynamiques du couple brut et de l'accéléromètre présentent des évolutions identiques.

Pour tous les signaux, des critères statistiques (la moyenne, l'écart type, le RMS, le Skewness et le Kurtosis) correspondant à la partie « statique » et « dynamique » sont relevés. Pour donner un exemple, l'usure en dépouille influencera la partie statique du signal, tandis qu'une usure en entaille est un phénomène brusque, qui sera visible sur la partie dynamique [Shi 07a].

Tous ces critères permettront de définir une base de données qui sera ensuite utilisée pour modéliser l'usure ou même pour établir des seuils. Cette approche de type « boîte noire » sera complémentaire à l'aspect phénoménologique. En effet, sur la plage de conditions de coupe testées, certains phénomènes ne peuvent pas être expliqués à cause de l'influence de différents facteurs (la variabilité importante de l'outil, les perturbations d'usinage, le nombre de paramètres mis en jeu, etc.). Dans ce cas, l'utilisation de modèles expérimentaux ou de seuils permettra une surveillance efficace.

III.3.2. Analyse temporelle des signaux d'efforts

La partie précédente a montré l'approche globale utilisée pour l'extraction des critères statistiques à partir des signaux de surveillance. Dans la suite, une analyse portant sur les efforts de coupe est proposée, afin d'identifier leurs évolutions pour certains cas. Par une modélisation du travail de chaque dent, qui est une fonction de la profondeur de passe réelle, les efforts (tangential et radial) sont tracés.

Ce travail sera ensuite intégré dans un logiciel développé permettant de retrouver le contexte d'usinage qui a généré cette évolution des signaux. Par conséquent, cette étude permettra de distinguer l'impact de l'usure et des défauts (de centrage, faux-rond, etc.) sur les efforts de coupe. En fonction de paramètres, le programme calcule les courbes F_x et F_y et ensuite il les compare avec les valeurs mesurées pendant l'usinage. La configuration finale est obtenue quand l'erreur entre les courbes a une valeur imposée (par exemple 5%).

Nous avons imaginé plusieurs situations susceptibles d'être retrouvées lors de l'usinage :

Cas I :

Le premier cas suppose que l'usinage se réalise dans des conditions parfaites (il n'y a pas de défaut de battement, de faux-rond, de positionnement de l'outil par rapport à l'avant-trou, etc.). Les éléments caractéristiques pour ce cas sont illustrés dans la Figure III.3.2. La profondeur de passe est donnée par :

équation III.3.1 :

$$A_{p_{\text{théorique}}} = A_{p_{\text{réelle}}} = \frac{D_2 - D_1}{2}$$

où : D_1 représente le diamètre de l'avant-trou et D_2 est le diamètre de l'outil. L'effort sur chaque dent est calculé à partir de la valeur moyenne du couple mesuré.

équation III.3.2 :

$$F_1 = F_2 = \frac{M_z}{\frac{D_2 + D_1}{4}}$$

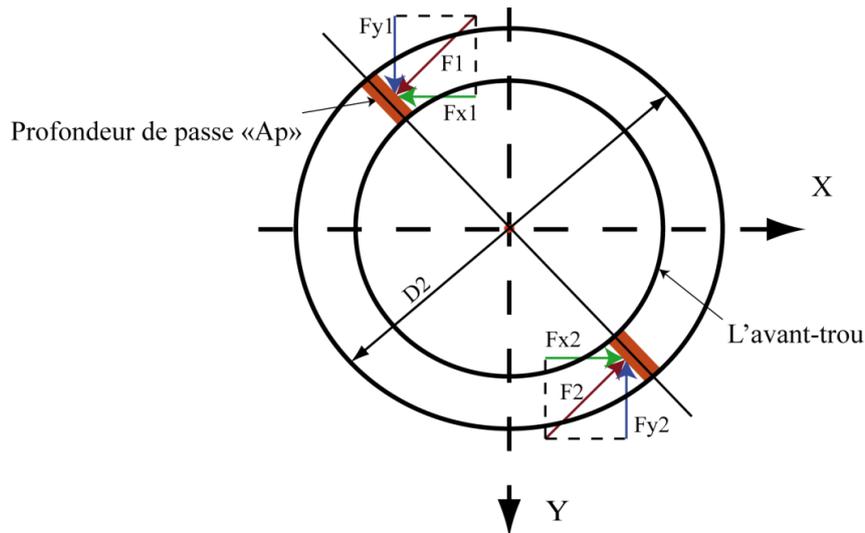


Figure III.3.2 : La profondeur de passe pour les cas sans défaut d'excentricité

Si les efforts sur les deux dents sont identiques, leur résultante doit être nulle. Seulement, d'un point de vue géométrique, les deux dents ne sont pas identiques. Par suite, cette différence de géométrie a été prise en compte sur nos calculs par un pourcentage d'effort, qui est rajouté sur une dent. Le résultat se présente sous la forme d'une évolution de type « sinusoïdale », comme illustré dans la Figure III.3.3. Les signaux sont décalés de 45° , c'est-à-dire un quart de tour et leur amplitude est forcément liée à la différence d'effort entre les deux dents. Les valeurs numériques sont données à titre d'exemple.

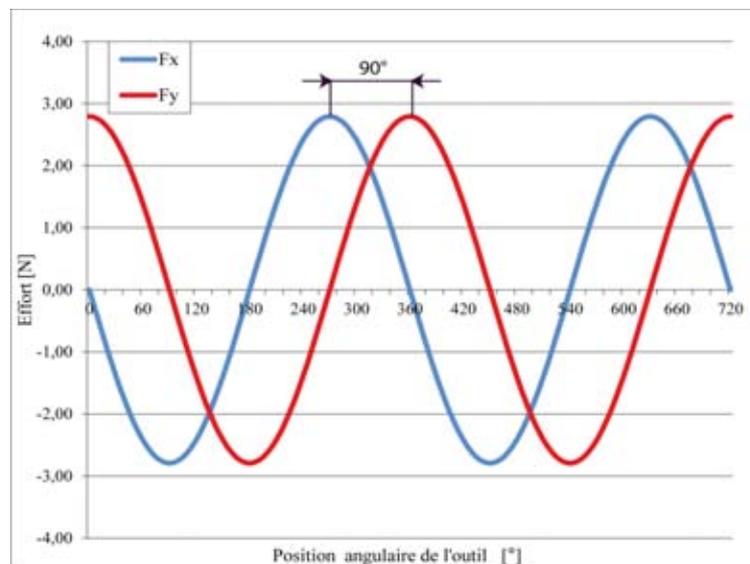


Figure III.3.3 : Évolution des efforts de coupe pour le premier cas

Cas II :

Lors de l'usinage, il est possible que certains défauts exercent une forte influence sur les efforts de coupe. Un défaut de battement, un défaut de faux-rond ou une erreur de positionnement de

l'outil par rapport à l'avant-trou auront le même impact sur la coupe : un changement de la profondeur de passe sur chaque dent. Dans cette situation, la profondeur de passe réelle sera différente de celle théorique. Pour chaque dent, elle est calculée de la manière suivante :

$$\text{équation III.3.3 : } Ap_1 = \frac{D_2 - D_1}{2} - e \cdot \cos(\alpha - \beta) \quad Ap_2 = \frac{D_2 - D_1}{2} - e \cdot \cos(\alpha - \beta + 180)$$

où : e est l'excentricité, α représente la position angulaire de l'outil et β est l'angle de l'excentration. Dans ce cas, les efforts deviennent :

$$\text{équation III.3.4 } F_1 = \frac{Ap_1}{Ap_{th}} \cdot \frac{M_z}{\frac{D_2 + D_1}{4}} \quad F_2 = \frac{Ap_2}{Ap_{th}} \cdot \frac{M_z}{\frac{D_2 + D_1}{4}}$$

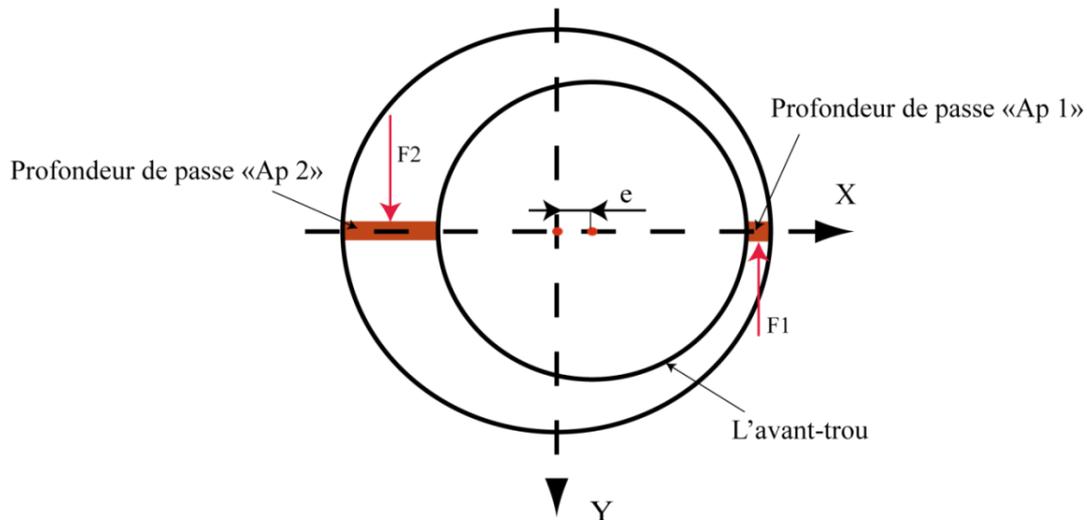


Figure III.3.4 : La profondeur de passe réelle pour le deuxième cas

Dans ce cas, pour $\beta = 0^\circ$, les efforts de coupe ont une évolution comme montrée dans la Figure III.3.5. L'effort radial et l'effort tangentiel sont toujours décalés de 45° . La valeur moyenne de l'effort suivant l'axe X est dans cette situation négative (forcé par l'excentration). L'effort F_y est centré autour de zéro, mais cette fois-ci le passage de la deuxième dent est visible sur les signaux. Cette évolution est la conséquence de la différence des efforts sur les deux dents, en fonction de l'excentration.

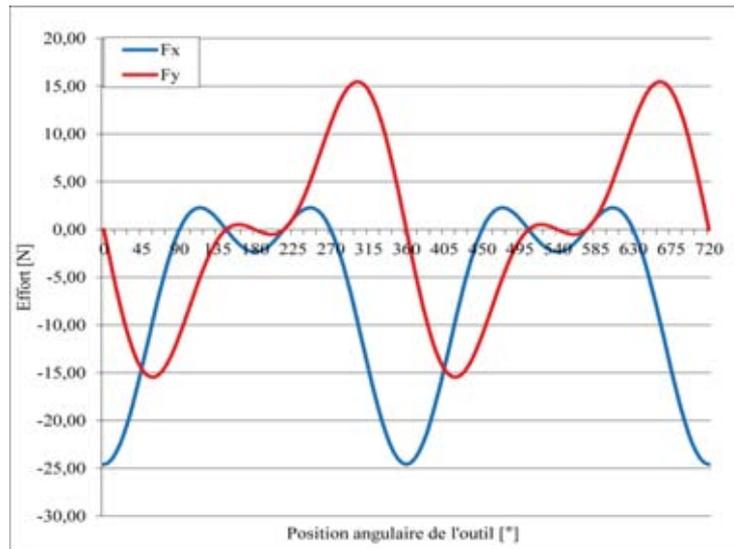


Figure III.3.5 : Évolution des efforts de coupe pour le deuxième cas

Cas III :

En fonction de l'angle de l'excentricité, la forme des signaux peut varier et donc, le troisième cas suppose une excentricité ayant un angle quelconque β (Figure III.3.6).

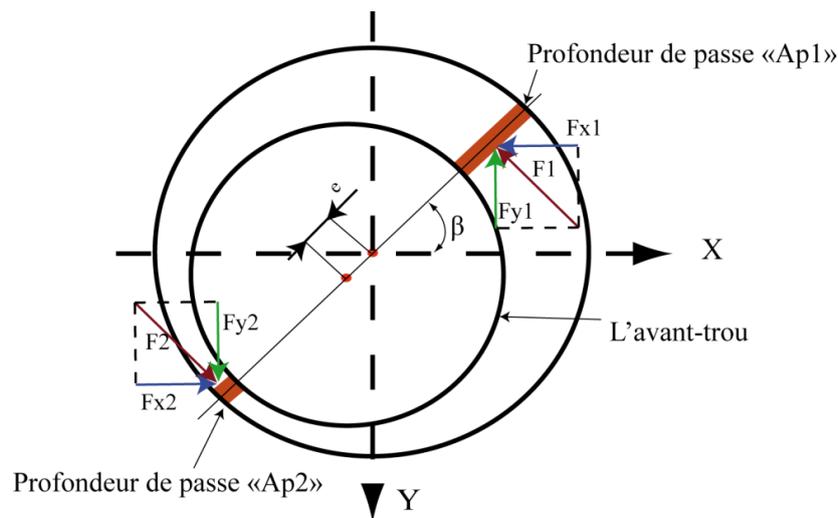


Figure III.3.6 : Schéma pour le troisième cas avec l'excentricité ayant l'angle β

L'influence de l'excentricité amène un changement de la forme simple du signal théorique (les sinusoides), en résultant des formes de plus en plus complexes. Pour un cas particulier, considérant une excentricité quelconque de l'outil et une différence des efforts sur les deux dents, ces derniers ont une évolution représentée dans la Figure III.3.7. Les valeurs moyennes des deux efforts ne sont pas centrées sur zéro (valeurs positifs ou négatifs en fonction de l'excentricité) et l'apport de la deuxième dent est toujours visible.

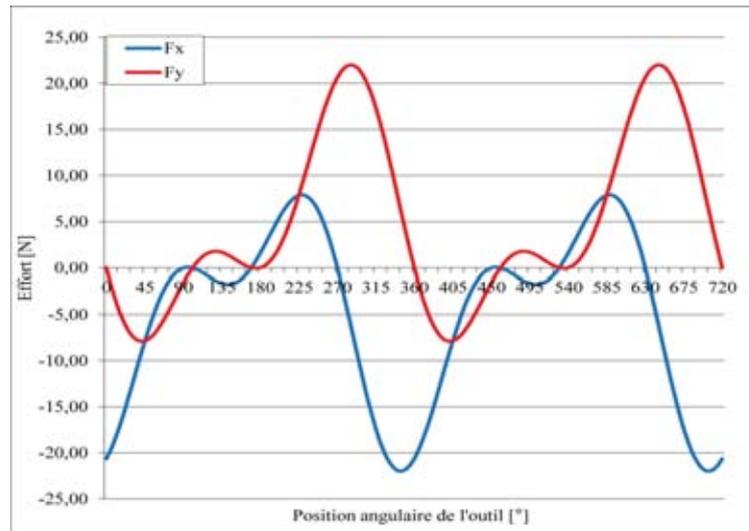


Figure III.3.7 : Évolution des efforts de coupe pour le troisième cas

En réalité, il existe d'autres défauts qui n'ont pas été traités dans les trois cas particuliers et par suite ils risquent de modifier l'évolution des efforts de coupe. Nous pouvons citer :

- un défaut de rectitude de l'avant-trou,
- un défaut de diamètre de l'outil,
- etc.

Tous ces défauts influencent plus ou moins les efforts et les éloignent des courbes théoriques qui ne prennent pas en compte ces éléments perturbateurs. Dans le quatrième chapitre, cette méthode sera employée afin d'identifier les paramètres responsables d'une évolution particulière des efforts dans l'objectif de différencier l'impact de chaque mode d'usure sur les signaux.

III.3.3. Analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle s'appuie sur la transformation de Fourier (sous différentes formes : FFT, STFT, etc.) afin de connaître le contenu fréquentiel du signal, ce qui permet de distinguer les fréquences excitées pendant l'usinage. Les signaux des accéléromètres sont présentés sur des diagrammes temps-fréquence afin de souligner les spectres fréquentiels de chaque essai. Avant toute analyse fréquentielle, il est important de connaître les fréquences propres mises en jeu par les éléments du système (l'outil monté dans le porte-outil et la platine de mesure). Pour cela, l'identification fréquentielle concerne deux composantes et sera effectuée par plusieurs méthodes :

- **L'outil monté dans le porte-outil :**
 - modélisation par élément finis,
 - sonnage.
- **La platine de mesure Kistler :**
 - des essais sans platine,

- sonnage.

En soustrayant les deux spectres (pour les essais avec et sans la platine), les fréquences propres apportées par le dynamomètre seront mises en évidence. Ensuite, ces résultats seront confirmés par une deuxième analyse : le sonnage.

L'analyse fréquentielle est effectuée sur les signaux issus des accéléromètres. Ils sont traités en utilisant la fonction STFT (Short Time Fourier Transform). Il s'agit d'une analyse par transformation de Fourier au cours du temps avec des diagrammes temps-fréquence. La Figure III.3.8 montre un exemple de diagramme temps-fréquence obtenu pour un perçage effectué dans les conditions de coupe optimales ($V_c = 19$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr).

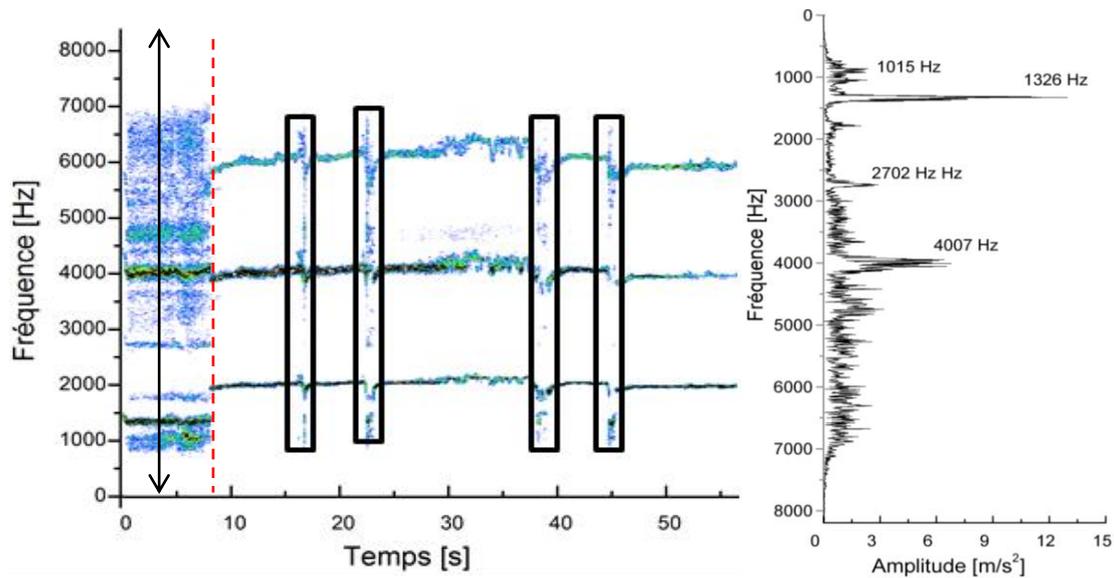


Figure III.3.8 : Exemple de diagramme temps-fréquence pour les conditions de coupe $V_c = 19$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr et la FFT associée pour la zone à 3 s

Sur ce diagramme représenté sur Figure III.3.8, quelques fréquences caractéristiques sont illustrées :

- la première zone correspond à la pénétration de l'outil dans la matière (jusqu'à 8s). Pendant cette phase, l'outil n'est pas guidé et tous les déplacements sont possibles. Cette situation détermine l'apparition des plusieurs fréquences et les pics ayant les amplitudes les plus importantes sont à : ~ 1015 Hz ; ~ 1326 Hz ; ~ 4007 Hz et d'autres ont des amplitudes moins importantes (cette réponse fréquentielle est illustrée sur la FFT à droite qui est réalisée dans la zone indiquée avec la double flèche sur le diagramme temps-fréquence),
- une fois que l'outil est guidé dans la matière par les listels (à partir de 8 s), seulement trois pics de fréquence sont visibles : ~ 2000 Hz, ~ 4000 Hz et ~ 6000 Hz (il est possible qu'un mode propre unique de l'outil soit excité lors de cette étape du perçage et les deux autres seront alors des harmoniques),

- pendant l'usinage, dans les quatre zones marquées sur le diagramme avec les rectangles noirs, les fréquences principales changent brusquement. À l'aide d'une FFT tracée pour chaque zone, les résultats montrent que la fréquence du pic le plus important est à ~ 1330 Hz.

Pour résumer, cet essai met en évidence plusieurs fréquences et des possibles harmoniques. Par exemple, le pic à 4000 Hz peut être considéré comme la 2^{ème} harmonique du pic à 2000 Hz ou bien la 3^{ème} harmonique du pic à 1330 Hz. De même, la fréquence à 6000 Hz peut être la troisième harmonique du pic à 2000 Hz. Dans la suite, pour chaque composante, une étude fréquentielle sera réalisée.

III.3.3.1. Identification fréquentielle – l'outil

III.3.3.1.1. Calculs par éléments finis

Le logiciel Catia[®] a été utilisé pour réaliser un modèle de l'ensemble porte-outil – outil (Figure III.3.9.b). La géométrie a été maillée avec des éléments tétraédriques. Les conditions aux limites sont délicates à exposer sans simplification. En effet, la position réelle de l'encastrement n'est pas connue. Pour le système HSK 63, le serrage se fait par l'intérieur du cône. Dû à différents facteurs (comme par exemple, l'état de surface de pièces), le contact entre les deux cônes n'est jamais parfait. Ceci peut entraîner une déformation autour de l'encastrement. En revanche, la simulation ne permet pas la prise en compte d'une déformation autour de l'encastrement. Dans cette zone, la seule variable à ajuster est la position de l'encastrement. La Figure III.3.9.c montre la position réelle de l'encastrement. Nous avons recalé cette position pour retrouver les résultats expérimentaux fournis par les accéléromètres.

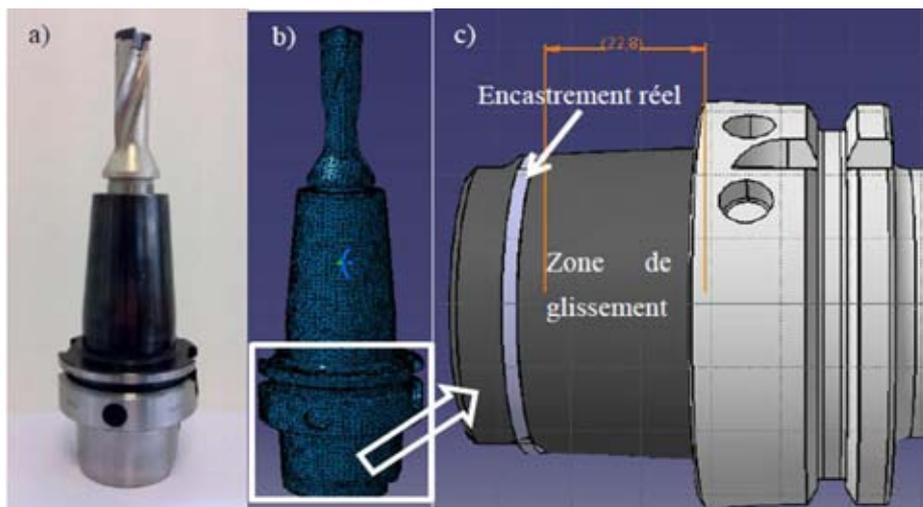


Figure III.3.9 : (a) Ensemble porte-outil outil ; (b) le modèle Catia et (c) la position de l'encastrement

Les modes propres de l'ensemble ont été calculés en considérant plusieurs situations :

- « encastré-libre » : suppose l'ensemble encastré seulement sur la bande définie sur la Figure III.3.9 et libre au niveau des listels,
- « encastré-encastré » : le deuxième cas rajoute un autre encastrement au niveau des listels. Il correspond à la situation où l'outil se trouve dans la matière.
- le troisième cas considère un contact circulaire entre l'outil et la pièce au niveau de l'avant-trou. Le porte-outil et la pièce sont supposés encastrés. Dans ce cas, les résultats de la simulation ont montré une légère différence (d'environ 45 Hz) par rapport à la situation « encastré – encastré ».

Pour la suite, les résultats de deux premiers cas seront utilisés.

Le Tableau III.3.1 récapitule les cinq premiers modes propres de l'ensemble obtenus avec les deux premières configurations. La modélisation par éléments finis offre ces résultats, mais en réalité, il est possible que les modes propres obtenus pour le cas « encastré – encastré » soient différents. Pour cette configuration, le modèle suppose un encastrement parfait des listels. En revanche, la nature du contact entre les listels et les parois de la pièce est difficile à préciser. Lors de l'usinage, l'encastrement ne respecte pas le terme strict du mot et tend à s'éloigner de cette définition à cause de plusieurs facteurs : l'asymétrie de dents, la rotation de l'outil, le diamètre réel de l'avant-trou, etc.

Tableau III.3.1 : Tableau récapitulatif des fréquences obtenues par modélisation

Modes	Outil encastré - libre		Outil encastré - encastré	
Mode 1 (Hz) – flexion	1340		1975	
Mode 2 (Hz) – flexion	1523		2120	
Mode 3 (Hz) – flexion	2139		6120	
Mode 4 (Hz) – flexion	3037		6233	
Mode 5 (Hz) – torsion	5910		6408	

Un autre résultat est donné par les directions principales selon lesquelles l'outil vibre, associées à chaque mode propre. La Figure III.3.10 montre qu'il existe deux directions privilégiées. Le deuxième et le quatrième mode ont la direction indiquée par la flèche blanche tandis que la direction du troisième mode propre est perpendiculaire (la flèche bleue).

Dans le cas du tournage, lorsque l'outil vibre à cause de la différence d'amortissements et de raideurs selon les deux axes, il décrit une spirale. Bisu et *al.* [Bisu 09] confirment que le déplacement le plus grand est obtenu selon l'axe où la raideur est minimale. Dans notre cas, le foret est non-symétrique et tourne à des faibles vitesses (nous pouvons estimer qu'il est dans un cas quasi-statique). Tenant compte de ces considérations, il est possible que le processus de coupe excite deux modes perpendiculaires. Donc, en fonction des phénomènes générés pendant la coupe, l'outil peut vibrer

selon ces deux directions. Pour la suite, cette justification de l'existence de modes perpendiculaires sera utilisée pour analyser les résultats dans le quatrième chapitre.

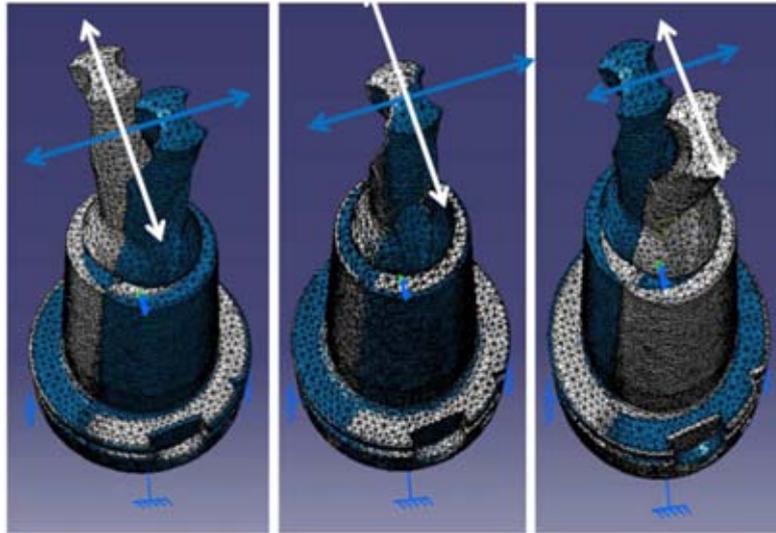


Figure III.3.10 : Directions de modes propres obtenues par modélisation par éléments finis

III.3.3.1.2. Analyse modale

Les caractéristiques dynamiques de l'outil monté dans le porte-outil ont été obtenues par une deuxième méthode : sonnage à l'aide d'un marteau d'impact et de mesure de vibrations par vélocimétrie Laser. Le montage expérimental est décrit dans la Figure III.3.11. Les analyses par sonnage ont été réalisées sur l'ensemble « broche + porte-outil + outil », suivant les deux directions de l'outil (à 0° et à 90°).

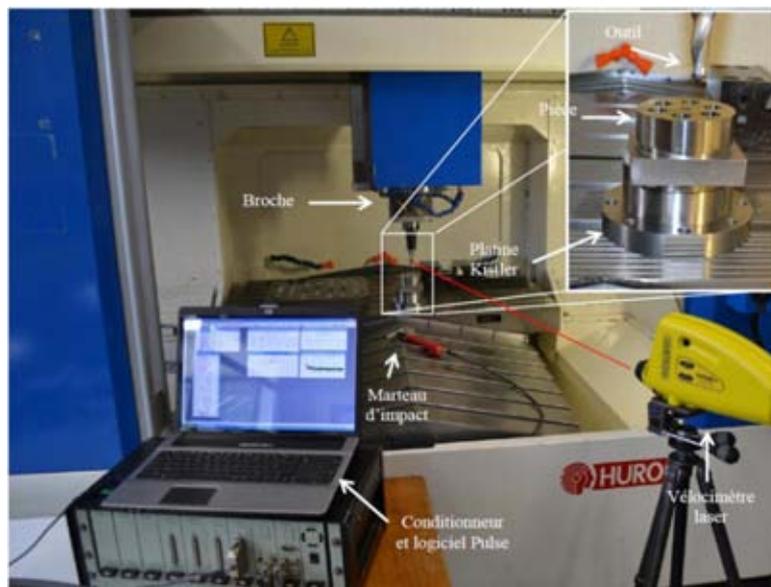


Figure III.3.11 : Montage expérimental pour le sonnage

Tableau III.3.2 : Fréquences propres de l'ensemble "broche+porte-outil+outil" obtenues par modélisation et sonnage

Modes	Fréquences obtenues par modélisation (encastré-libre) (Hz)	Fréquences mesurées par sonnage (Hz)	
		0°	90°
Mode 1		712	700
Mode 2	1340	1300	1280
Mode 3	1523	1500	1556
Mode 4	2139	1860	1860
Mode 5	3037		2284
Mode 6	5910		

Le Tableau III.3.2 présente une comparaison entre les fréquences propres obtenues par les deux méthodes. Ces analyses nous ont permis d'identifier le deuxième et le troisième mode propre de l'outil respectivement à ~ 1300 Hz et à ~ 1500 Hz. Le quatrième mode propre peut être défini pour une fréquence d'environ 1900 Hz, même si par rapport aux résultats de la modélisation il existe un écart de 13 %. Ceci peut être expliqué par les conditions aux limites et la présence de la broche, car dans la modélisation le porte-outil est supposé encastré. La fréquence à 700 Hz peut être attribuée à un mode propre du porte-outil + outil + broche, car la broche n'était pas considérée dans la modélisation.

III.3.3.2. Identification fréquentielle – la platine de mesure

III.3.3.2.1. Essais sans la platine de mesures Kistler

Cette méthode a été utilisée afin d'isoler l'apport fréquentiel amené par la platine d'efforts Kistler. Les essais ont été réalisés sur quatre conditions de coupe (V_c 19 et 30 m/min ; f 0,1 et 0,2 mm/tr). La Figure III.3.12 montre une comparaison des signaux issus des accéléromètres entre les essais avec et sans platine, pour les conditions de coupe testées. Les résultats sont exprimés sous la forme des FFT globales (pour connaître seulement les fréquences excitées lors de l'usinage et pas à l'instant quand elles apparaissent). Pour simplifier et faciliter la comparaison entre deux signaux, les FFT ont été traitées en utilisant la fonction « Smooth ». Cette fonction est basée sur la méthode Savitzky-Golay, qui effectue une régression polynomiale locale autour de chaque point et crée une nouvelle valeur lissée pour chaque point de données. Cette méthode tend à préserver les caractéristiques des données, telles que la hauteur et la largeur de pointe.

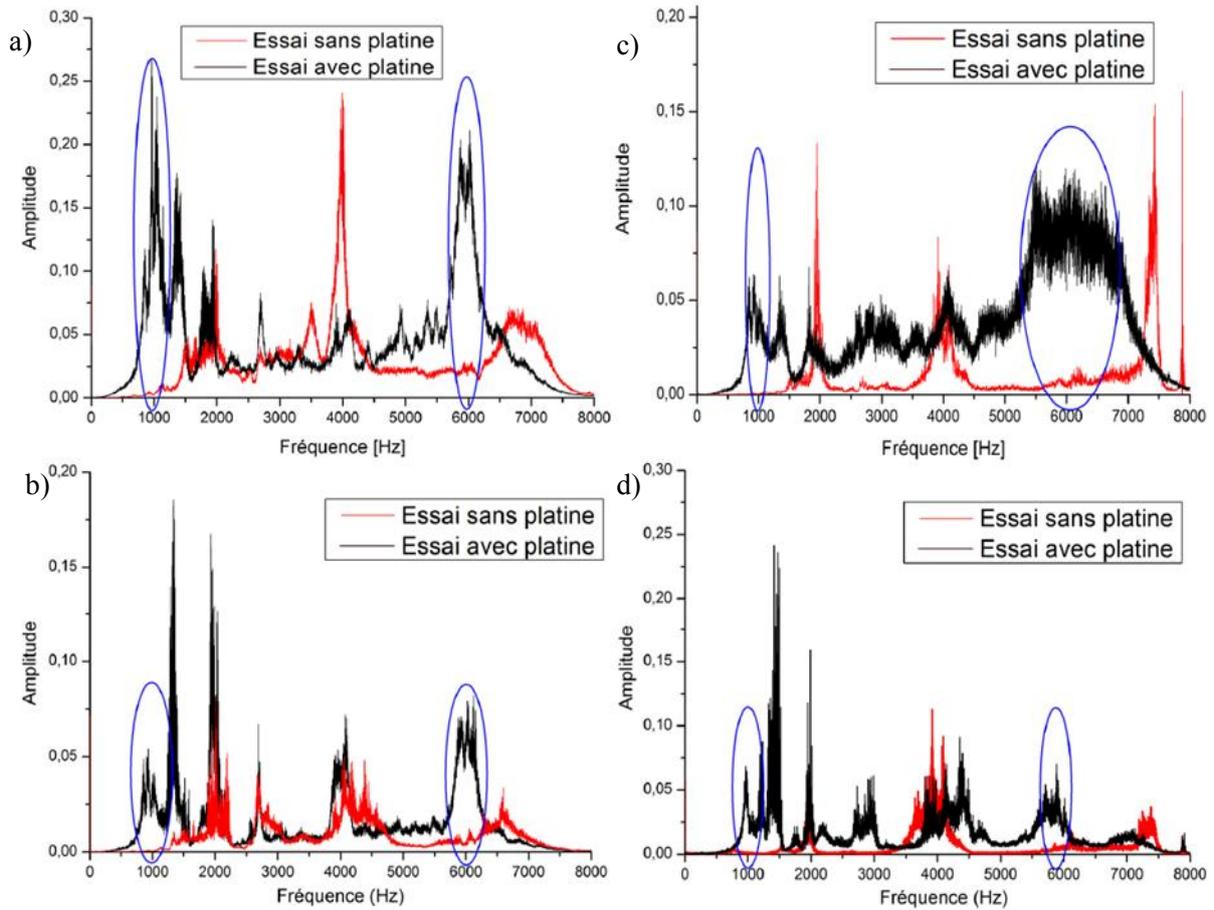


Figure III.3.12 : Comparaison des spectres obtenus pour les essais avec et sans platine pour les conditions de coupe :

a) $V_c 19, f 0,2$; b) $V_c 19, f 0,1$; c) $V_c 30, f 0,1$ et d) $V_c 30, f 0,2$

Sur les quatre graphiques, la contribution fréquentielle apportée par la platine est mise en évidence par les pics encerclés en bleu. Ils correspondent aux fréquences qui se trouvent à la proximité de 1000 et 6000 Hz. En dehors de ces deux fréquences, d'autres pics sont marqués sur la Figure III.3.12 : à 1300 Hz, 2000 Hz ou même 4000 Hz. Mais, ces fréquences ne peuvent pas être associées à un mode propre de la platine de mesure car elles ont été déjà identifiées comme modes propres de l'outil monté dans le porte-outil.

III.3.3.2.2. Sonnage

Le Tableau III.3.3 présente les fréquences propres de la platine de mesure d'efforts Kistler lors du sonnage. Ces valeurs sont comparées avec celles fournies par Kistler. Une différence significative entre ces valeurs peut être observée. Mais, sachant que sur la platine il y a le montage et la pièce, la masse totale augmente de 62 % (masse platine = 4,2 kg ; masse montage + pièce = 2,6 kg). Cette situation peut expliquer la différence considérable entre les résultats.

Tableau III.3.3 : Fréquences propres de la platine Kistler

Directions	Fréquences propres théoriques (Hz)	Fréquences essais sans platine (Hz)	Fréquences mesurées (Hz)
f (x,y)	~ 3100	~ 1000	912
f (z)	~ 6300	6000	-
f (M _z)	~ 4200		2176

Pour confirmer ces résultats, nous utiliserons l'équation III.3.5 :

équation III.3.5
$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$$

où : K est la raideur et m la masse.

Avec la première fréquence propre de la platine $f_0(x,y) = 3100$ Hz et $K(x,y) = 0,4$ KN/ μ m, nous les remplaçons dans l'équation III.3.5 afin de trouver la masse « déformable » de la platine, soit $m = 1,05$ Kg. Ensuite, en rajoutant la masse $m_2 = 2,6$ Kg (masse montage + pièce), nous obtenons la fréquence théorique $f \approx 1600$ Hz. Dans ce cas, la fréquence trouvée est inférieure à celle fournie par Kistler et donc, confirme la tendance de diminution observée lors de l'identification fréquentielle. Effectivement, ne sont pas les mêmes résultats, mais les différences peuvent être expliquées par une imprécision de la fréquence théorique, ou par la masse.

Ce paragraphe met en évidence la difficulté de l'analyse fréquentielle pour les signaux des accéléromètres. Chaque composante du système influence le spectre fréquentiel en fonction de l'excitation et des nombreux pics peuvent apparaître. Les analyses réalisées (modélisation par élément finis, sonnage et les essais avec et sans platine) sur les deux composantes (l'outil monté dans le porte-outil et la platine de mesure) nous ont permis d'identifier leurs modes propres de vibration. Cette étape est nécessaire pour pouvoir ensuite étudier l'évolution des grandeurs physiques en fonction des phénomènes rencontrés (perturbations d'usinage, usure de l'outil, etc.).

Synthèse

Le troisième chapitre présente dans la première partie l'ensemble des moyens expérimentaux mis en œuvre permettant d'établir le lien entre les signaux mesurés et l'usure des outils. Les pièces utilisées pour l'étude sont en Udimet® 720 LI, un superalliage base-nickel qui a remplacé l'Inconel® 718 pour des applications aéronautiques (e.g. les disques de turbines). Une brève description de la microstructure, des méthodes d'élaboration et des traitements thermiques est faite pendant le premier paragraphe. Deux traitements de vieillissement ont été choisis afin de générer une légère différence de la dureté dans l'objectif d'étudier son impact sur l'usure et sur l'intégrité de surface. Ensuite, les machines-outils, le système de lubrification et les spécificités de l'outil ont été présentés. Dans la dernière partie de ce paragraphe, nous avons montré les caractéristiques des systèmes utilisés pour la surveillance. Ces capteurs ont été choisis pour leur plage importante de mesure en termes d'efforts de coupe et d'étendue fréquentielle.

La deuxième partie présente les essais sur lesquels nous nous sommes attachés afin d'identifier les modes de dégradation de l'outil. Pour répondre à ces objectifs, nous avons proposé plusieurs campagnes expérimentales (pour un usinage en contexte « normal » et puis « perturbé »). En s'appuyant sur la méthode du Couple-Outil-Matière comme technique initiale de définition des conditions de coupe optimales, nous avons cherché des résultats sur les deux aspects considérés (intégrité de surface et usure de l'outil). Même si la méthode « COM » est une méthode assez simple pour identifier les conditions de coupe optimales, elle ne tient pas compte des critères d'intégrité de surface. Cette contrainte supplémentaire a été rajoutée, permettant ainsi la définition d'un domaine de fonctionnement assurant l'intégrité de surface. À partir de ces essais, une cartographie des modes de dégradation de l'outil peut être représentée. Les derniers essais ont eu pour objectif de définir et de confirmer la répartition des modes de dégradation sur la plage de conditions de coupe testées. Finalement, nous avons étudié l'influence des perturbations d'usinage (coupure de lubrification, variation du pourcentage d'émulsion, variation de la dureté ou position par rapport à l'avant-trou) sur l'usure des outils.

La dernière partie du chapitre concerne le traitement des signaux. L'analyse temporelle est centrée vers le filtrage de signaux et ensuite l'extraction de critères statistiques représentatifs de l'évolution des signaux. Cette étape aura comme perspective la création d'une base de données. À l'aide des méthodes statistiques, nous pourrons établir les relations entre des signaux mesurés et le suivi de l'usure. Ensuite, l'analyse fréquentielle sera dédiée à la compréhension et l'identification des phénomènes rencontrés lors de l'usinage. Pour cela, une caractérisation des fréquences mises en jeu par les différents éléments du système est nécessaire. À l'aide d'une modélisation par éléments finis et d'une analyse modale par sonnage, nous avons identifié les modes propres de l'ensemble porte-outil –

outil. Le spectre fréquentiel est influencé par la platine de mesure d'efforts Kistler. Pour isoler son apport, des essais avec et sans platine ont été effectués.

L'ensemble des essais nous a permis de définir le domaine A.S.I.D qui assure l'intégrité de surface, ainsi que la répartition des modes de dégradation sur la plage des conditions de coupe testées (sans et puis avec des perturbations d'usinage). Tous les résultats issus de ces campagnes expérimentales seront analysés dans le quatrième chapitre, afin de proposer des relations entre les signaux et les modes de dégradation.

Chapitre IV

IV. Analyse des résultats

Introduction	88
IV.1 Évolution des modes de dégradation en fonction des conditions de coupe	89
IV.1.1 L'usure des listels	90
IV.1.1.1 Analyse de l'usure des listels après plusieurs perçages	91
IV.1.1.2 Essais de vérification	91
IV.1.2 L'usure en dépouille	92
IV.1.2.1 Analyse de l'usure en dépouille après plusieurs perçages	93
IV.1.2.2 Essais de vérification	94
IV.1.3 L'entaille	94
IV.1.3.1 Analyse de l'usure en entaille après plusieurs perçages	95
IV.1.3.2 Essais de vérification	96
IV.1.4 L'usure « catastrophique »	97
IV.1.5 L'influence des perturbations d'usinage sur l'usure	97
IV.1.6 Conclusions	100
IV.2 Corrélation entre les grandeurs physiques et les modes de dégradation	102
IV.2.1 Évolution des signaux pour l'usure en dépouille	102
IV.2.1.1 Zone I	102
IV.2.1.2 Zone II	116
IV.2.2 Évolution des signaux pour les essais avec entaille	117
IV.2.3 Évolution des signaux pour l'usure catastrophique	121
IV.2.4 Évolution des signaux pour les essais avec variation du contexte d'usinage	124
IV.3 Modélisation de l'usure	128
Synthèse	134

Introduction

Dans ce chapitre nous nous attachons à analyser les résultats issus des campagnes expérimentales décrites dans le chapitre précédent. Dans un premier temps, nous présentons les modes de dégradation rencontrés lors du perçage de l'Udimet[®] 720 LI. Chaque type d'usure fait l'objet d'une analyse en fonction des conditions de coupe, de son évolution après plusieurs perçages et d'une vérification de la reproductibilité des résultats. Ensuite, nous nous intéressons à l'influence de perturbations d'usinage sur l'usure de l'outil.

Une deuxième partie montre l'évolution des grandeurs physiques mesurées en fonction de chaque type d'usure. Dans le même temps, cette partie permet une comparaison entre les différents systèmes de mesure afin de vérifier leur sensibilité pour détecter un problème au niveau de l'outil. L'analyse est réalisée selon un aspect phénoménologique (explication directe de l'évolution des signaux par des phénomènes physiques).

Pour améliorer la prédiction des phénomènes ou pallier à une interprétation physique dans les situations difficiles, une analyse à partir de critères statistiques est effectuée sur la base de données expérimentales et met en exergue des lois d'usure selon des signaux identifiés représentatifs.

Enfin, l'utilisation des deux approches (phénoménologique ou "statistique") peut être couplée afin d'offrir les informations nécessaires pour la définition des stratégies de surveillance.

IV.1 Évolution des modes de dégradation en fonction des conditions de coupe

Les différentes campagnes expérimentales, décrites dans le troisième chapitre, nous ont permis de générer une importante base de données afin d'étudier les modes de dégradation de l'outil et également, les perturbations d'usinage qui peuvent apparaître lors du perçage. La compréhension physique de ces phénomènes et de leurs influences sur l'évolution des signaux permet l'identification de relations entre les modes de dégradation de l'outil et les grandeurs physiques mesurées pendant la coupe. Ce quatrième chapitre est structuré de la manière suivante :

- la première partie est centrée sur la caractérisation de l'usure du foret dans le perçage de l'Udimet[®] 720 LI. Pour cela, tout d'abord, nous présentons les modes de dégradation de l'outil et leurs évolutions, tandis que la deuxième partie traite les influences introduites par les perturbations d'usinage (voir paragraphe III.2.4),
- ensuite, pour chaque mode de dégradation identifié, l'ensemble des mesures (efforts, vibrations, puissance consommée à la broche, etc.) est étudié. Les résultats attendus de cette étape concernent la définition des moyens de mesure et de contrôle les plus efficaces pour un suivi de l'usure de l'outil et des éventuelles perturbations d'usinage, ainsi qu'une méthodologie de détection basée sur les signaux définis,
- la dernière partie propose un modèle d'usure basé exclusivement sur des critères statistiques extraits des signaux. La compréhension de l'évolution des signaux en fonction de différents modes de dégradation permettra de cibler les critères statistiques définis dans la base de données afin de les utiliser pour modéliser l'usure.

Les résultats issus de l'étude expérimentale indiquent quatre types d'usure pour le foret Iscar (Figure IV.1.1). Il s'agit d'une usure des listels, une usure en dépouille, une usure en entaille et une usure sur la face de coupe.

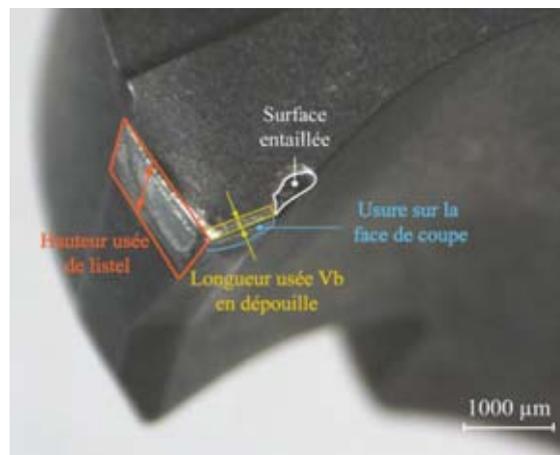


Figure IV.1.1 : Usures caractéristiques du perçage de l'Udimet[®] 720 Li

Pour mesurer les différents types d'usure d'outil, un microscope optique a été utilisé. Afin de quantifier l'usure, les critères suivants ont été choisis:

- longueur usée en dépouille V_b avec une incertitude de mesure de 0,01 mm,
- hauteur usée des listels (incertitude identique),
- surface entaillée avec une incertitude sur ces mesures d'environ 10 %,
- l'usure sur la face de coupe n'a pas été étudiée dans ces travaux, car elle est négligeable et semble ne pas avoir d'influence directe sur l'intégrité de surface de la pièce usinée.

IV.1.1 L'usure des listels

Le premier type d'usure analysé est l'usure en listel, majoritairement présente sur tous les essais. C'est une usure par abrasion, dû au frottement entre le listel du foret et la paroi du trou. Un exemple est donné dans la Figure IV.1.2.a. Un diagramme Vc-f est réalisé par interpolation linéaire à partir des valeurs mesurées après le premier perçage (Figure IV.1.2.b). Les essais qui ont généré à la fin du perçage l'effondrement de la plaquette ne sont pas pris en compte. Sur cette figure, les résultats pour des vitesses de coupe jusqu'à 25 m/min montre une augmentation de la vitesse de coupe impliquant l'augmentation de l'usure. Ensuite, avec l'augmentation de la vitesse de coupe, cette tendance s'inverse. La construction du graphique par interpolation linéaire doit être rappelée, les zones de couleurs dégradées qui montreraient une réduction progressive de l'usure en dépouille sont à prendre "avec précaution" puisque l'on ne dispose pas de suffisamment de points dans cette zone. Globalement, nous constatons que l'usure en dépouille est plus importante pour Vc comprises entre 15 et 25 m/min, avec f supérieure à 0,15 mm/tr. L'influence de l'avance est logique, considérant qu'elle augmente les efforts et donc le battement radial de l'outil s'il existe un déséquilibre entre les deux lèvres du foret.

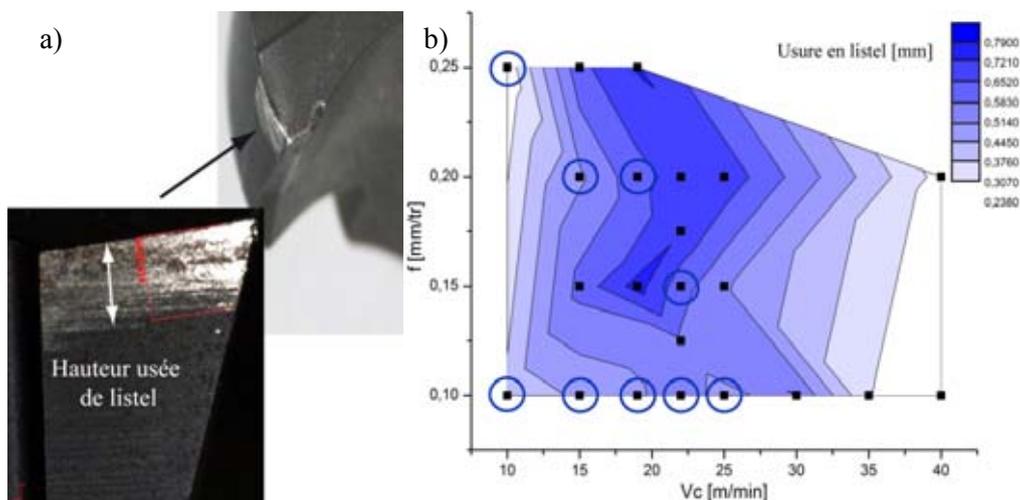


Figure IV.1.2 : (a) Exemple d'usure en listel (b) L'usure des listels après le premier perçage

IV.1.1.1 Analyse de l'usure des listels après plusieurs perçages

La Figure IV.1.3 montre l'évolution de l'usure en listel après plusieurs perçages pour différentes conditions de coupe testées (les cercles bleus sur la Figure IV.1.2.b.). En considérant l'erreur de mesure, ce résultat montre une évolution quasi-linéaire de l'usure des listels.

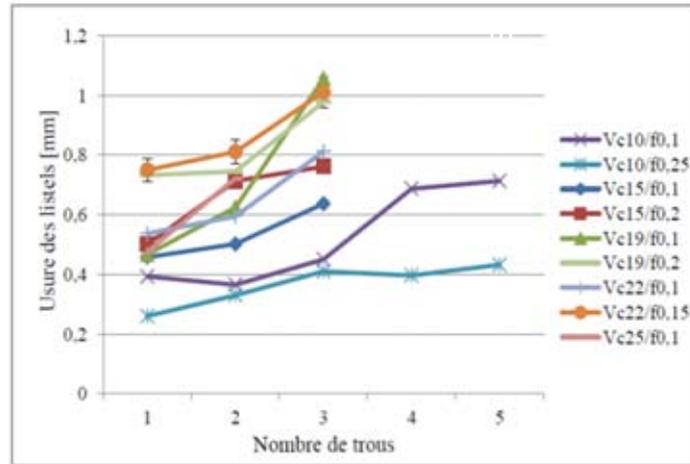


Figure IV.1.3 : Évolution de l'usure des listels après plusieurs perçages

IV.1.1.2 Essais de vérification

Le nombre d'essais utilisés afin de vérifier la reproductibilité des résultats obtenus pour chaque type d'usure (listel, en dépouille ou l'entaille) est faible, car le matériau étudié (l'Udimet 720® LI) a des coûts très élevés et une disponibilité limitée pour les activités de recherche.

La Figure IV.1.4.a montre les trois essais réalisés pour les conditions de coupe $V_c = 19$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr avec des outils différents.

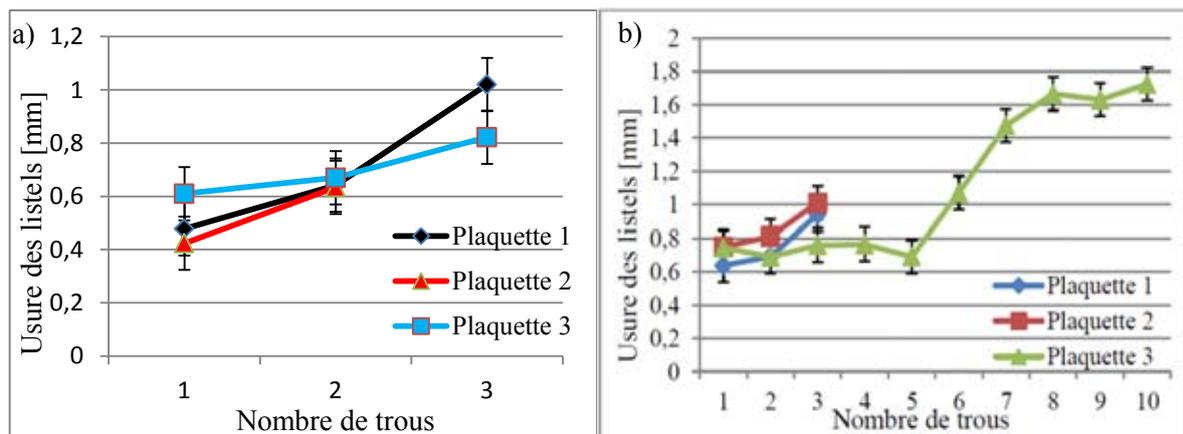


Figure IV.1.4 : Reproductibilité des essais d'usure réalisés pour les conditions de coupe (a) $V_c = 19$ m/min ; $f = 0,1$ mm/tr et (b) $V_c = 22$ m/min ; $f = 0,15$ mm/tr

En ce qui concerne le deuxième outil (plaquette 2), les dernières mesures ne sont pas disponibles (la même remarque est valable pour la Figure IV.1.6.b avec plaquette 2). Dans ce cas, nous considérons que la reproductibilité est correcte.

Sur la Figure IV.1.4.b sont présentés les résultats des essais réalisés avec une vitesse de coupe de 22 m/min et une avance de 0,15 mm/tr. Avec la troisième plaquette, nous avons percé dix trous pour étudier l'évolution de l'usure jusqu'à l'effondrement de l'arête. Pendant ce nombre important d'essais, l'outil présentait principalement une usure en entaille (détaillée dans le paragraphe IV.1.3)

IV.1.2 L'usure en dépouille

Le deuxième type d'usure de l'outil rencontré lors des campagnes expérimentales est l'usure en dépouille, générée par l'enlèvement du revêtement par abrasion (exemple présenté dans la Figure IV.1.5.a). Sur l'ensemble des essais considérés, nous pouvons délimiter deux zones où l'usure en dépouille est le mode principal de dégradation (Figure IV.1.5.b). Les limites de la première zone peuvent être mises en relation avec un débit copeaux d'environ 2750 mm³/min (Figure IV.1.5.c).

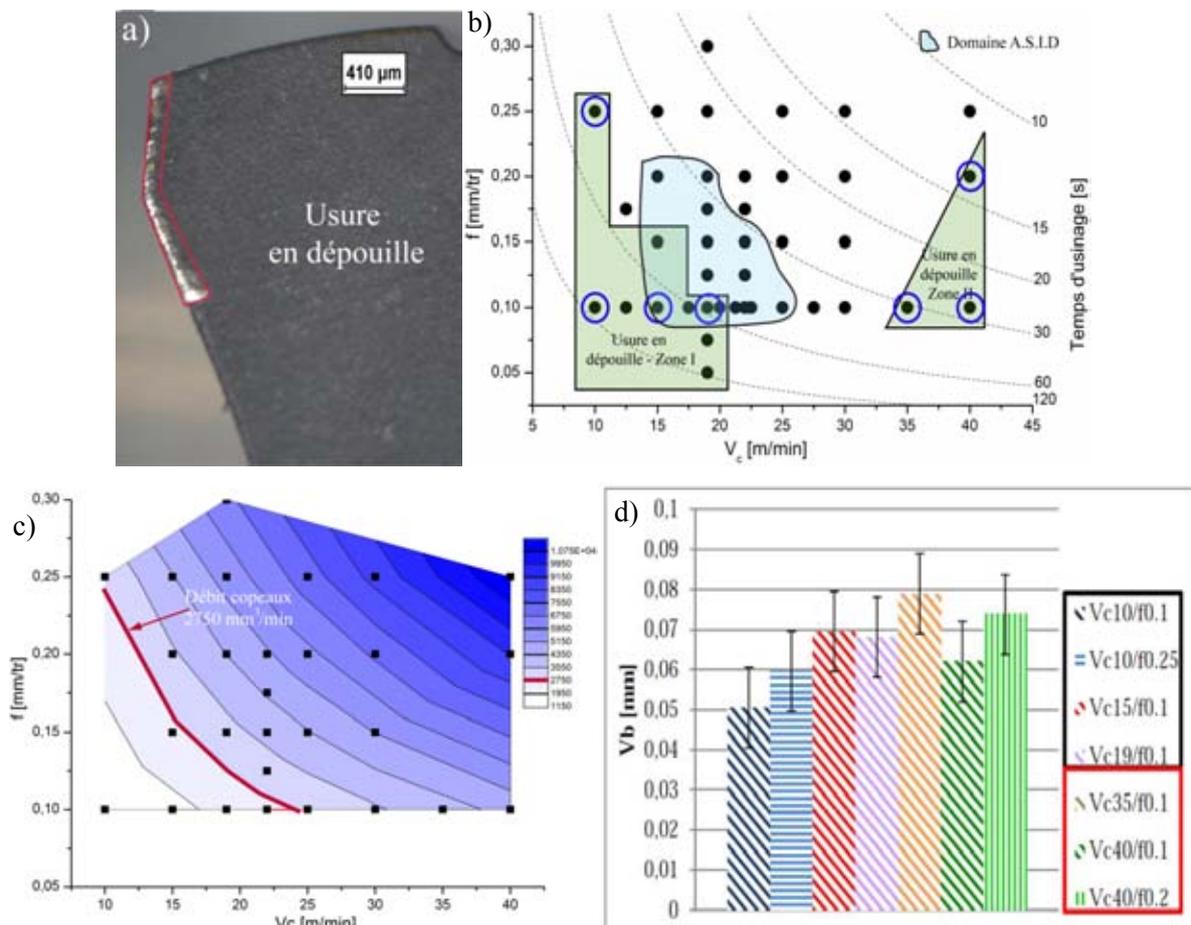


Figure IV.1.5 : (a) Exemple d'usure en dépouille (b) Les deux zones caractérisées uniquement par l'usure en dépouille (c) Le débit copeaux et (d) L'usure en dépouille après le premier trou

Les essais correspondants aux conditions de coupe indiquées avec les cercles bleus mettent en évidence une légère influence de la vitesse de coupe (Figure IV.1.5.d). Pour une avance de 0,1 mm/tr et une augmentation de la vitesse de coupe de 90 % (de 10 m/min à 19 m/min), le V_b augmente de 40 % (de 0,05 mm à 0,07 mm).

Un résultat intéressant dans le même temps est de retrouver l'usure en dépouille comme le seul mode de dégradation pour les conditions de coupe à des vitesses élevées (supérieures à 35 m/min – zone II sur la Figure IV.1.5.b) et à avance faible. Effectivement, une comparaison entre ces deux zones confirme l'influence de la vitesse de coupe. Pour une avance de 0,1 mm/tr, l'augmentation du V_b est d'environ 20 % entre $V_c = 10$ m/min et 40 m/min. En considérant l'incertitude de mesure et la variabilité de l'outil, nous constatons que les niveaux d'usure en dépouille pour les deux zones sont quasi – identiques.

IV.1.2.1 Analyse de l'usure en dépouille après plusieurs perçages

Pour la première zone (Figure IV.1.5.b), cinq trous ont été réalisés pour les essais ayant une vitesse de coupe de 10 m/min et trois trous pour les $V_c = 15$ m/min et 19 m/min. Pour rappel, en production, la durée de vie de l'outil est limitée à deux perçages par plaquette (par mesure de sécurité pour assurer l'intégrité des surfaces usinées). Les résultats sont montrés dans la Figure IV.1.6.a. L'usure a une évolution linéaire et ne dépasse pas 0,13 mm. Après trois trous, la vitesse de coupe la plus importante (ayant aussi le débit copeaux le plus élevé) génère l'usure en dépouille la plus élevée.

Dans l'industrie aéronautique, une usure en dépouille de 0,3 mm peut être considérée comme une limite de réforme de l'outil. Par rapport aux résultats obtenus, ces conditions de coupe (encadrées en bleu sur la Figure IV.1.5.b) génèrent une usure plutôt lente et la limite du $V_b = 0,3$ mm sera atteinte seulement après un nombre plus important de trous.

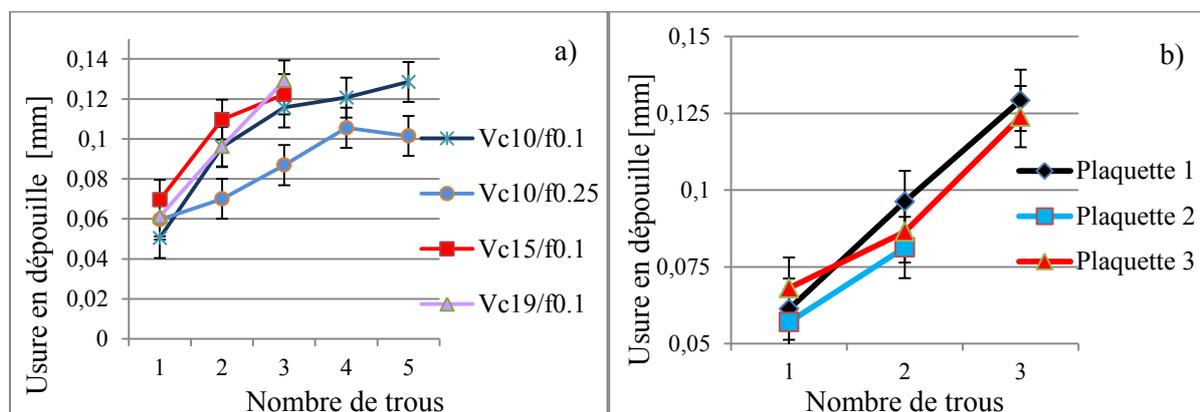


Figure IV.1.6 : (a) Évolution de l'usure en dépouille pour les essais de la zone I après plusieurs perçages et (b) Reproductibilité d'usure en dépouille pour les conditions de coupe $V_c = 19$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr

Pour la deuxième zone, le comportement de l'outil est différent. Le premier perçage génère une faible usure en dépouille, tandis que la conséquence du deuxième essai est l'effondrement d'une arête de coupe. L'effondrement intervient dès le début du deuxième perçage (observation montrée par les signaux de surveillance et analysée par la suite dans le paragraphe IV.2.1.2). Le comportement rencontré pendant ces essais est très proche de celui observé par Rancic et *al.* [Rancic 10] dans le tournage du titane. À partir d'une étude expérimentale, les auteurs comparent les résultats des essais continus et interrompus et mettent en évidence le rôle majeur de l'entrée dans la matière sur la durée de vie de l'outil. Les essais à $V_c = 40$ m/min ont été répétés deux fois et les résultats confirment ce comportement de l'outil.

IV.1.2.2 Essais de vérification

Les conditions de coupe utilisées dans la production ($V_c = 19$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr) ont été choisies afin de répéter les essais avec trois outils neufs. Les résultats sont présentés dans la Figure IV.1.6.b et montre une bonne reproductibilité. En ce qui concerne l'évolution du V_b pour les vitesses de coupe élevées, testées dans la deuxième zone, les résultats montrent aussi une bonne reproductibilité pour deux essais, uniquement.

IV.1.3 L'entaille

Le troisième mode de dégradation de l'outil identifié est l'usure en dépouille accompagnée d'une entaille, localisée sur l'arête de coupe à la profondeur de passe. Un exemple est donné dans la Figure IV.1.7.a et le domaine délimité dans ce cas est illustré dans la Figure IV.1.7.b. L'évolution de la surface entaillée après le premier perçage est présentée à partir d'un diagramme V_c - f , réalisé par interpolation linéaire à partir de valeurs mesurées (Figure IV.1.7.c). Les résultats montrent l'influence majoritaire de l'avance sur la surface entaillée. Les avances plus importantes influent sur la section du copeau, donc amènent une augmentation des contraintes sur la face de coupe. Par voie de conséquence, les pressions sur l'arête de coupe augmentent et ce contexte favorise la génération de l'entaille.

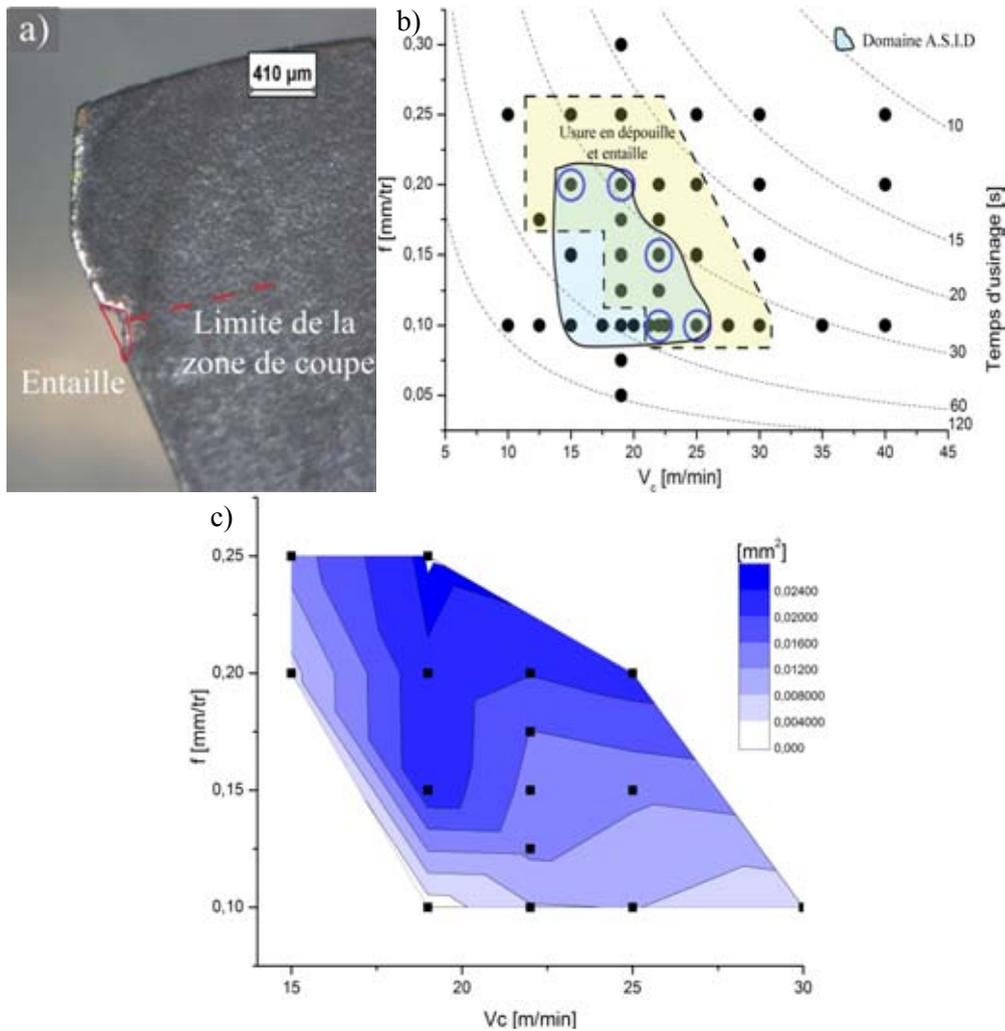


Figure IV.1.7 : (a) Exemple de l'usure en entaille (b) Répartition de l'usure en entaille sur l'ensemble de conditions de coupe testées (c) Évolution de la surface entaillée après le premier trou

IV.1.3.1 Analyse de l'usure en entaille après plusieurs perçages

De même que dans le cas de l'usure en dépouille, quelques conditions de coupe ont été choisies pour étudier l'évolution de ce mode de dégradation (encadrées en bleu sur la Figure IV.1.7.b). L'usure en dépouille suit le même schéma d'évolution que dans le cas précédent et les résultats sont présentés dans la Figure IV.1.8.a. Par exemple, pour $V_c = 22$ m/min et $f = 0,15$ mm/tr, l'augmentation du V_b est lente (d'environ 50% après dix trous). La vitesse de coupe la plus élevée ($V_c = 25$ m/min) génère une croissance significative après chaque perçage. Dans ce cas, le V_b augmente de 0,05 mm jusqu'à 0,18 mm après le deuxième essai. Ensuite, le troisième perçage amène l'effondrement de la plaquette.

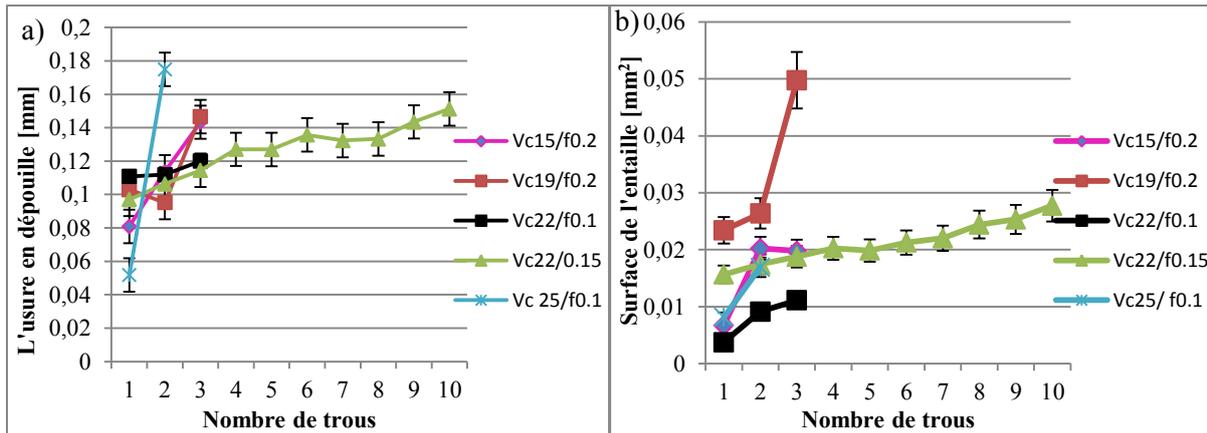


Figure IV.1.8 : Évolution de a) l'usure en dépouille et b) la surface entaillée pour la deuxième fenêtre

Les résultats de l'évolution de l'usure en entaille sont présentés dans la Figure IV.1.8.b. Pour une vitesse de coupe de 22 m/min et une avance de 0,15 mm/tr, la surface entaillée augmente progressivement (50% après dix trous). En revanche, pour les essais réalisés avec une avance de 0,2 mm/tr, l'augmentation de l'entaille est beaucoup plus prononcée. Donc, l'avance joue un rôle significatif sur l'usure en entaille.

IV.1.3.2 Essais de vérification

Les conditions de coupe $V_c = 22$ m/min et $f = 0,15$ mm/tr ont été répétées trois fois avec des outils neufs. Les Figure IV.1.9.a et b dévoilent l'évolution de l'usure en dépouille et de la surface entaillée pour ces trois outils. Ces figures confirment l'évolution quasi linéaire pour ces deux types d'usure. Dans ce cas, les résultats pour l'usure en dépouille, ne montrent pas une bonne reproductibilité (variation de l'ordre de 200%). Par contre, au niveau de la surface entaillée, les résultats indiquent une bonne répétabilité pour ces trois essais.

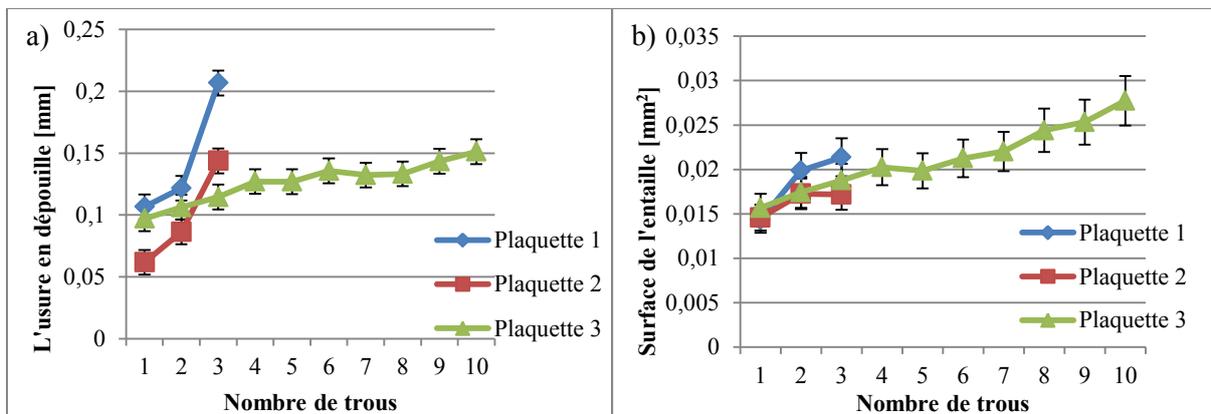


Figure IV.1.9 : Reproductibilité d'usure pour les conditions de coupe $V_c = 22$ m/min et $f = 0,15$ mm/tr (a) en dépouille et (b) en entaille

IV.1.4 L'usure « catastrophique »

Les conditions de coupe sévères (zone rouge sur la Figure IV.1.10.a) génèrent un effondrement de l'arête de coupe dès le début de l'usinage. Une fois que les pressions sur l'arête de coupe deviennent trop importantes, l'augmentation de l'entaille amène probablement l'effondrement. La rupture se fait au niveau de la limite de la profondeur de passe (exemple présenté dans la Figure IV.1.10.b). Cette dégradation rapide et irrémédiable de l'outil sera appelée dans notre contexte « usure catastrophique ». La répartition des conditions de coupe qui génèrent systématiquement une usure catastrophique sur la cartographie des modes de dégradation peut être associée à un débit copeau important où les phénomènes thermo-mécaniques ont une influence néfaste sur l'outil.

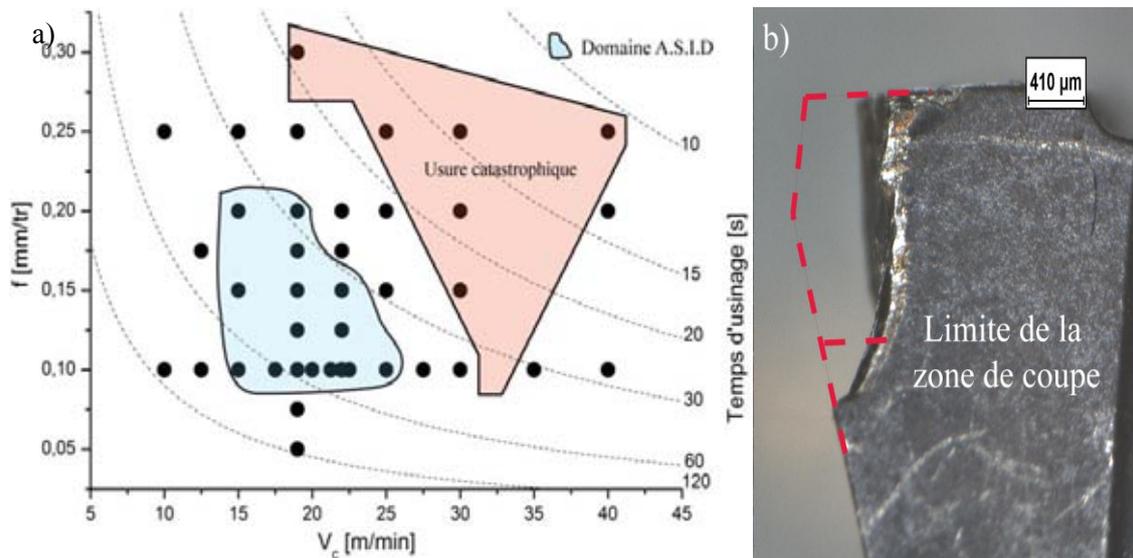


Figure IV.1.10 : (a) Répartition des essais caractérisés par l'usure catastrophique et (b) Exemple de l'effondrement de l'arête de coupe

IV.1.5 L'influence des perturbations d'usinage sur l'usure

Pour rappel, l'influence des perturbations d'usinage sur l'usure de l'outil a été analysée dans deux campagnes expérimentales :

- la première correspond à une baisse de pression dans le circuit de lubrification, donc une perturbation momentanée pendant la coupe,
- la deuxième cherche à identifier l'influence de cinq facteurs sur l'usure de l'outil. Ces paramètres représentent des perturbations antérieures au perçage.

Le Tableau IV.1.1 réalise un bilan des résultats obtenus pour les essais sans et avec coupe de lubrification. Les mesures de différentes usures sont données pour les deux dents de l'outil. Chaque essai a été doublé afin de vérifier sa reproductibilité et les résultats correspondants aux conditions de

coupe (« CL ») sont comparés avec un essai en « mode normal » (les lignes bleues du tableau). La condition CL1 génère une usure en dépouille presque identique sur les deux dents avec des faibles valeurs (par exemple, $V_b = 0,066$ sur dent 1).

Tableau IV.1.1 : Comparaison entre les usures pour des essais avec et sans coupure de lubrification

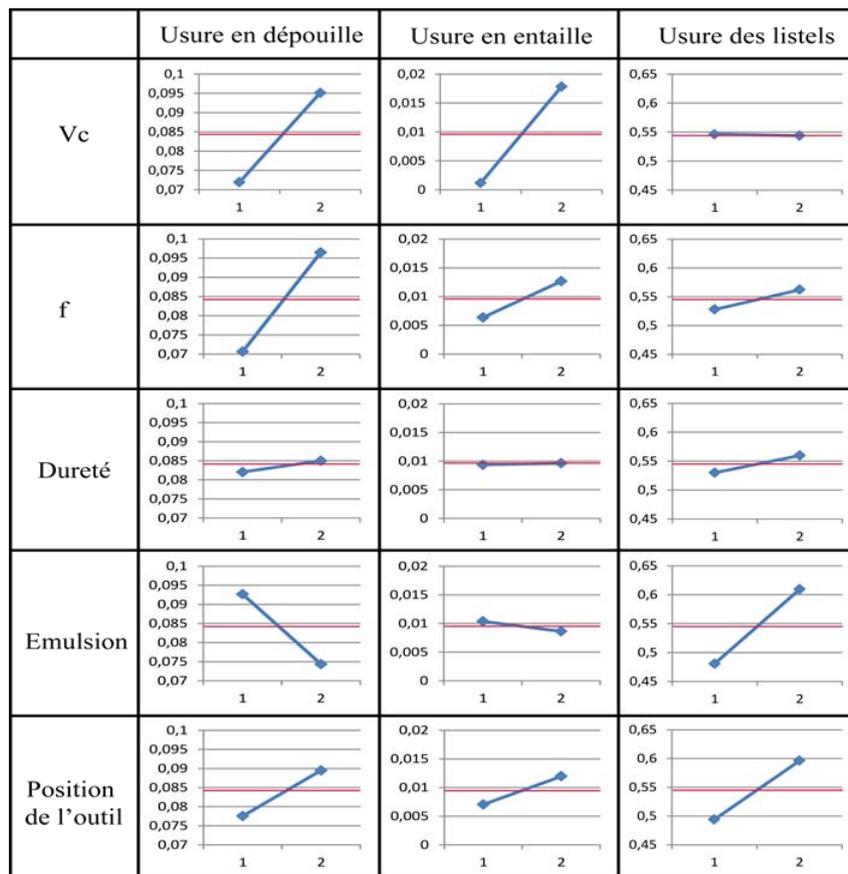
	Conditions de coupe		Usure en dépouille [mm]		Usure des listels [mm]		Usure en entaille [mm ²]	
	Vc [m/min]	f [mm/tr]	Dent 1	Dent 2	Dent 1	Dent 2	Dent 1	Dent 2
CL1 avec coupure lub.	19	0,1	0,066	0,064	0,566	0,477	0	0
	19	0,1	0,066	0,061	0,438	0,401	0	0
Sans coupure lub.	19	0,1	0,074	0,0623	0,499	0,502	0	0
CL2 avec coupure lub.	30	0,1	0,064	0,063	0,418	0,441	0,0199	0,014
	30	0,1	0,068	0,069	0,496	0,486	0,015	0,012
Sans coupure lub.	30	0,1	0,06	0,12	0,443	0,398	0,01	0
CL3 avec coupure lub.	19	0,2	0,067	0,062	0,473	0,470	0,0144	0,013
	19	0,2	0,075	0,072	0,393	0,428	0,01	0,007
Sans coupure lub.	19	0,2	0,068	0,138	0,76	0,730	0,0099	0,036
CL4 avec coupure lub.	30	0,2	Effondrement					
	30	0,2	Effondrement					
Sans coupure lub.	30	0,2	Effondrement					

Les conditions CL2 et CL3 se trouvent dans la zone caractérisée par une usure en entaille accompagnée d'une usure en dépouille. Le V_b et la surface entaillée présentent des valeurs faibles et il est important de remarquer que pour les essais avec coupure de lubrification, les deux dents présentent des valeurs identiques, quel que soit le type d'usure. Pour ces deux dernières conditions de coupe, une légère différence peut être observée au niveau de l'usure en dépouille de la dent 2 avec coupure de lubrification. Enfin, pour les conditions de coupe les plus sévères (CL4), les deux essais génèrent l'effondrement d'une arête de coupe.

Les conclusions de cette campagne expérimentale montrent qu'une baisse de pression momentanée dans le circuit de lubrification n'a pas d'influence majeure sur l'usure de l'outil et que ces essais s'intègrent parfaitement dans le cadre des analyses réalisées jusqu'à ce moment, concernant la cartographie des modes de dégradation.

En ce qui concerne les essais avec la variation du contexte d'usinage, les résultats sont présentés dans le Tableau IV.1.2 sous la forme des graphes des effets par rapport à la moyenne des résultats. Ce type de présentation, bien que simpliste et n'intégrant pas l'influence des paramètres entre les deux niveaux présentés, a le mérite de donner une vue globale rapide des diverses influences.

Tableau IV.1.2 : Effet des perturbations d'usinage sur l'usure



Parmi les paramètres du plan d'expériences, la vitesse de coupe a un effet important sur l'usure en dépouille et l'entaille. Ensuite, la position de l'outil est très influente sur les trois types d'usures. Par exemple concernant l'usure des listels, ce résultat est logique si on considère qu'une excentration de l'outil dans le porte-outil va générer des efforts radiaux plus élevés.

L'usure des listels est favorisée par un pourcentage d'émulsion élevé. Cette observation a été déjà montrée dans le cas du fraisage d'un acier inoxydable par Diniz et *al.* [Diniz 08]. De plus, le pourcentage élevé d'émulsion diminue le niveau d'usure en dépouille.

Finalement, la dureté du matériau dans la plage étudiée a un effet négligeable sur les usures. Mais, ces résultats sont discutables, car le plan d'expériences choisi (fractionnaire avec paramètre aliasé) ne permet pas l'étude des effets purs de la dureté et donc, d'autres essais seront nécessaires afin de confirmer ces premières influences.

Une autre conclusion issue de ces essais concerne la répartition identique des trois modes de dégradation par rapport au contexte "normal", c'est-à-dire sans perturbation, sauf deux essais réalisés à $V_c = 25$ m/min et $f = 0,2$ mm/tr. Ces deux perçages se trouvent à la limite du domaine pour l'usure en entaille. Dû probablement à la variabilité importante de l'outil, ces essais génèrent un effondrement de la plaquette.

IV.1.6 Conclusions

Les résultats présentés ci-dessus ont été regroupés dans un même graphique pour obtenir une cartographie des modes de dégradation (Figure IV.1.11). Les conditions de coupe les moins sévères provoquent une usure en dépouille de l'outil. Dû à la spécificité de l'usinage (perçage dans un avant-trou) et au fur et à mesure que les conditions de coupe augmentent, une entaille est générée. Ensuite, une fois que les pressions de coupe sur chaque arête deviennent trop importantes, l'augmentation de l'entaille peut produire l'effondrement de la plaquette. Finalement, pour les vitesses de coupe les plus élevées, une nouvelle zone caractérisée uniquement par l'usure en dépouille est définie.

De plus, le niveau du V_b est quasi-identique avec celui obtenu pour les vitesses de coupe faibles. Une possible explication est donnée par l'adoucissement thermique du matériau. En effet, les fortes vitesses de coupe favorisaient un échauffement dans la zone de coupe et donc à la fois une réduction des efforts mais une augmentation de la température de l'arête, influençant aussi la dégradation de l'outil.

Cette cartographie met en avant la nécessité de définir des techniques de surveillance de l'usure de l'outil appropriées à chaque mode de dégradation. À la vue de nos résultats, il n'est pas envisageable de proposer une stratégie de surveillance globale sur la plage entière des conditions de coupe, mais plutôt de cibler des stratégies selon chaque mode de dégradation rencontré, donc selon chaque zone.

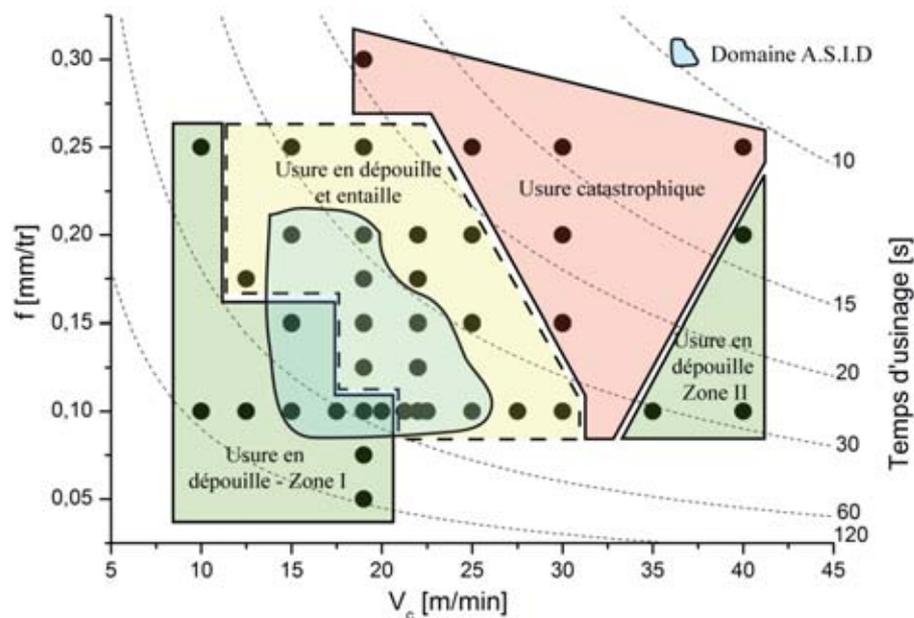


Figure IV.1.11 : Cartographie des modes de dégradation

Un autre résultat associé à cette cartographie des modes de dégradation est donné par le Tableau IV.1.3, qui récapitule les formes des copeaux sur l'ensemble des essais. Selon la norme NF-E66-520-8, trois typologies de copeaux ont été retrouvées durant ces essais :

- Plats : élémentaires (A4), mi-longs (C4) et longs (D4),
- Hélicoïdaux : élémentaires (A6), détachés (A3) et courts (B6),
- Torsadés : mi-longs (C2) et longs (D2).

Nous pouvons distinguer trois zones en fonction des formes de copeaux (plats, hélicoïdaux et torsadés). Les copeaux hélicoïdaux (synonymes de fortes contraintes thermomécaniques dans la zone de coupe) semble correspondre aux conditions de coupe qui ont généré une usure catastrophique, tandis que les plats peuvent être associés à l'usure en dépouille et en entaille.

Tableau IV.1.3: Formes des copeaux en fonctions des conditions de coupe selon la Norme AFNOR E66-520-8

0,3				A4					
0,25	A3			D2		C2	A6		A6
0,2			C4	A4	C2	A6			A3
0,15			C4	C4	C4	C2	C4		
0,1	B6	B6	D4	D4	C4	D4	D4	D4	D4
f/Vc	10	12	15	19	22	25	30	35	40

L'analyse approfondie des relations forme du copeau - modes de dégradation n'est pas aisée dans le contexte du perçage confiné avec lubrification haute pression, mais elle pourrait être intéressante en focalisant l'étude sur les contraintes dans la zone de coupe.

Les essais avec une coupure de lubrification (baisse de pression momentanée dans le système de lubrification) n'offrent pas des résultats significatifs et donc cette perturbation n'a pas vraiment d'influence sur l'usure de l'outil. En revanche, ces essais confirment la cartographie des modes de dégradation définie antérieurement.

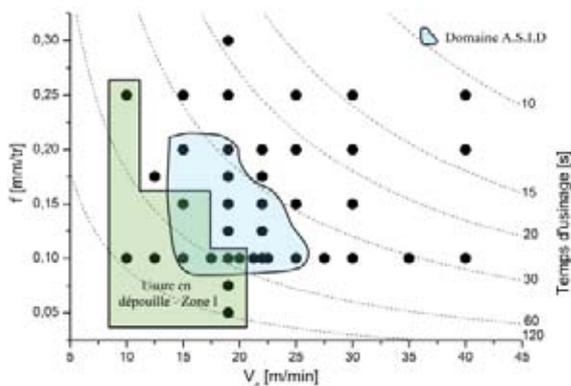
La position de l'outil par rapport à l'avant-trou ainsi que le pourcentage d'émulsion sont les paramètres qui ont une influence sur l'usure de l'outil.

IV.2 Corrélation entre les grandeurs physiques et les modes de dégradation

Les résultats des essais montrent les modes de dégradation en fonction des conditions de coupe (présentés dans la première partie de ce chapitre). Nous nous intéressons maintenant à la compréhension de l'évolution des signaux de surveillance en fonction des différentes usures. Pour chaque zone définie antérieurement, des exemples caractéristiques seront détaillés, en expliquant la réponse des grandeurs physiques enregistrées en fonction des phénomènes générés.

IV.2.1 Évolution des signaux pour l'usure en dépouille

IV.2.1.1 Zone I



Avant cette analyse des signaux, il est nécessaire d'explicitier un phénomène redondant pour plusieurs essais : les pics rencontrés sur les signaux (courant de la broche, puissance, couple, etc.). L'ensemble des essais a montré que l'apparition de ces pics est irrégulière. De plus, ce phénomène ne peut pas être associé à l'usure de l'outil, car le niveau de puissance (ou l'intensité du courant) revient ensuite au niveau antérieure. Dans ce cas, nous proposons l'hypothèse que cette apparition de pics est liée à un problème d'évacuation copeau. Pendant l'usinage, les copeaux sont fragmentés et des petits morceaux peuvent se coincer aléatoirement entre les listels et la pièce, et donc générer un « *copeau incrusté ou coincé* ». L'arrosage à haute pression se fait derrière les listels et dans ce contexte la lubrification ne favorise pas l'évacuation des copeaux. Si le coincement des copeaux se fait pendant plusieurs tours, nous pouvons privilégier une deuxième explication, un « *bourrage de copeaux* ». Ces pics ont un impact direct sur :

- **L'intégrité de surface**

- Par exemple, la Figure IV.2.1.a, présente l'évolution de la puissance calculée à partir de la platine de mesure pour un essai fait lors de la campagne « COM ». La vitesse de coupe a été de 19 m/min avec une avance de 0,15 mm/tr. Le pic qui se trouve au début de l'usinage (indiqué par le cercle bleu) est corrélé en distance avec un copeau incrusté, mise en évidence par des observations MEB (Figure IV.2.1.b). Cette anomalie d'usinage a été déjà observée par Pawade [Pawade 07] dans le tournage à sec de l'Inconel 718.

Lors de l'usinage à sec, la température de la surface usinée reste élevée, provoquant l'adhésion des copeaux. L'étude de Perrin [Perrin 07] dans le cadre du projet européen ManHIRP montre que les copeaux incrustés sont toujours associés aux anomalies en sous-couche (bandes de matière cisailées ou zones thermo-mécaniquement affectées).

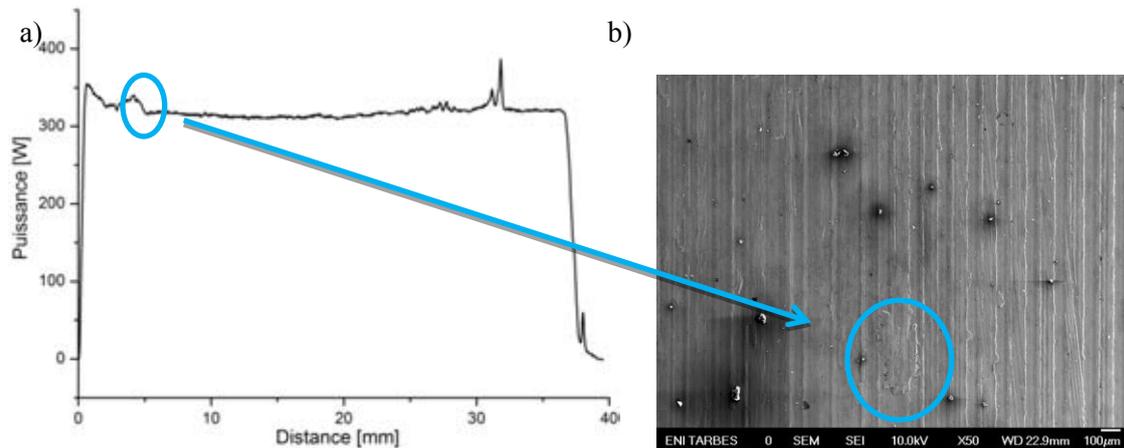


Figure IV.2.1 : (a) Évolution de la puissance de coupe pour un perçage fait à $V_c = 19$ m/min et $f = 0,15$ mm/tr lors de la campagne « COM » et (b) copeau incrusté observé au MEB

- Un deuxième exemple dans ce sens est représenté par la corrélation entre le profil de rugosité et la puissance de coupe (Figure IV.2.2.a). Le dégagement du copeau coincé va engendrer une vibration de l'outil. Pendant cette vibration, un défaut de surface sera généré. Cette relation a été montrée aussi par [Dutilh 10]. Le profil a été mesuré à l'aide d'un profilomètre optique Veeco NT 1100 en fond du perçage sur une bande d'environ 1 mm sur toute la longueur du trou. Ensuite, les deux courbes ont été superposées pour souligner l'augmentation de puissance et leur parfaite corrélation avec les pics de puissance de coupe. La Figure IV.2.2.b montre l'état de surface obtenue avec le profilomètre optique sur la zone qui correspond au quatrième pic de puissance (le rectangle indiqué dans la Figure IV.2.2.a).

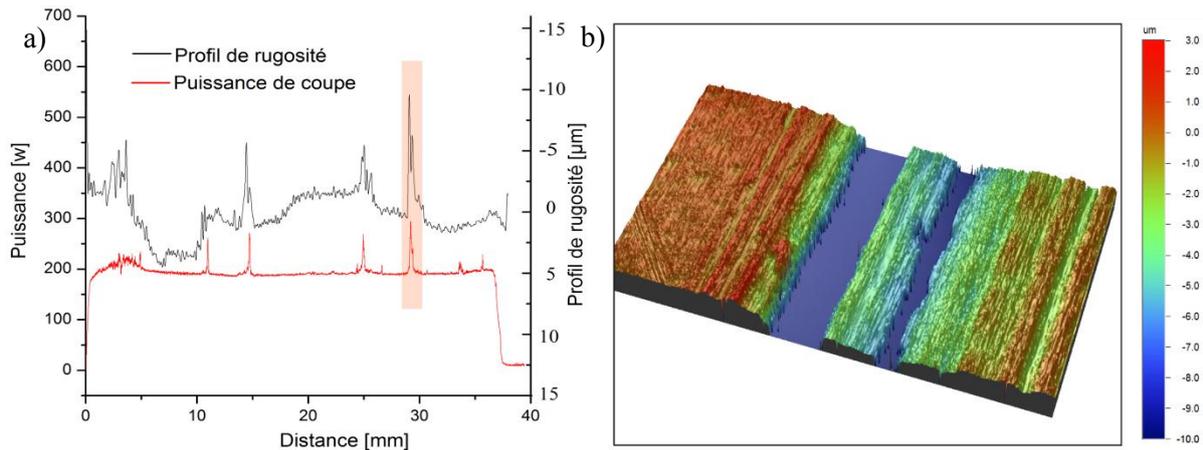


Figure IV.2.2 : (a) *Corrélation profil de rugosité - puissance de coupe pour un trou percé à $V_c = 19$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr et (b) Surfométrie réalisée au profilomètre optique sur la zone indiquée par le rectangle*

- **la perturbation amenée sur les critères statistiques issus des signaux de surveillance.** Une technique souvent utilisée pour la surveillance de l'usure dans l'industrie est basée sur l'établissement des seuils (bas et hauts) sur le signal de puissance consommée. Pour une telle application, l'apparition de ces pics peut perturber le système et informer d'une manière erronée sur une usure de l'outil.

Afin d'étudier l'effet des copeaux coincés, collés ou enroulés et mal évacués, nous prenons un exemple pour analyser la réponse des signaux. Il s'agit d'un perçage réalisé dans les conditions de coupe de production ($V_c = 19$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr).

La Figure IV.2.3.a présente le diagramme temps-fréquence obtenu sur le signal de l'accéléromètre Y (dans la direction Y, le plus près de la zone de coupe). Sur le diagramme, nous nous intéressons seulement aux quatre pics où les fréquences changent brusquement, mises en évidence par les rectangles orange. Ce changement est focalisé à l'aide des FFT successives (Figure IV.2.3.b) sur la partie du signal qui correspond au quatrième pic. L'intervalle choisi est d'environ 1 s (suffisant pour montrer les fréquences avant, pendant et après le pic). La fenêtre de temps de chaque FFT est de 0,15 s, ce qui correspond à un tour fait par l'outil.

Sur la première FFT, le pic de 2033 Hz (le quatrième mode propre de l'outil) et ses harmoniques (à 4046 Hz et 6079 Hz) sont visibles. Suite à un problème d'évacuation de copeaux, le coincement de ceux-ci entre le listel et la pièce génère un choc. Dans ce cas, un effort radial important est généré, ce qui va exciter par définition tous les modes. La réponse des accéléromètres est donnée sur les FFT n°2 à n°6, qui montrent le même comportement (au niveau fréquentiel). Sur ces graphiques, nous pouvons identifier le deuxième mode propre de l'outil (le pic à 1345 Hz sur la deuxième FFT) et le mode propre (en x,y) de la platine de mesure entre 1019 et 1055 Hz, ainsi que leurs harmoniques.

La mauvaise fragmentation des copeaux entraîne la formation d'un copeau long et enroulé, ce qui va finalement générer aussi le phénomène décrit ci-dessus.

Quand le copeau est finalement évacué, les fréquences reviennent aux mêmes valeurs qu'au début (la dernière FFT). Ici, le quatrième mode (à 1912 Hz) et ses harmoniques sont visibles (3957 Hz et 5756 Hz).

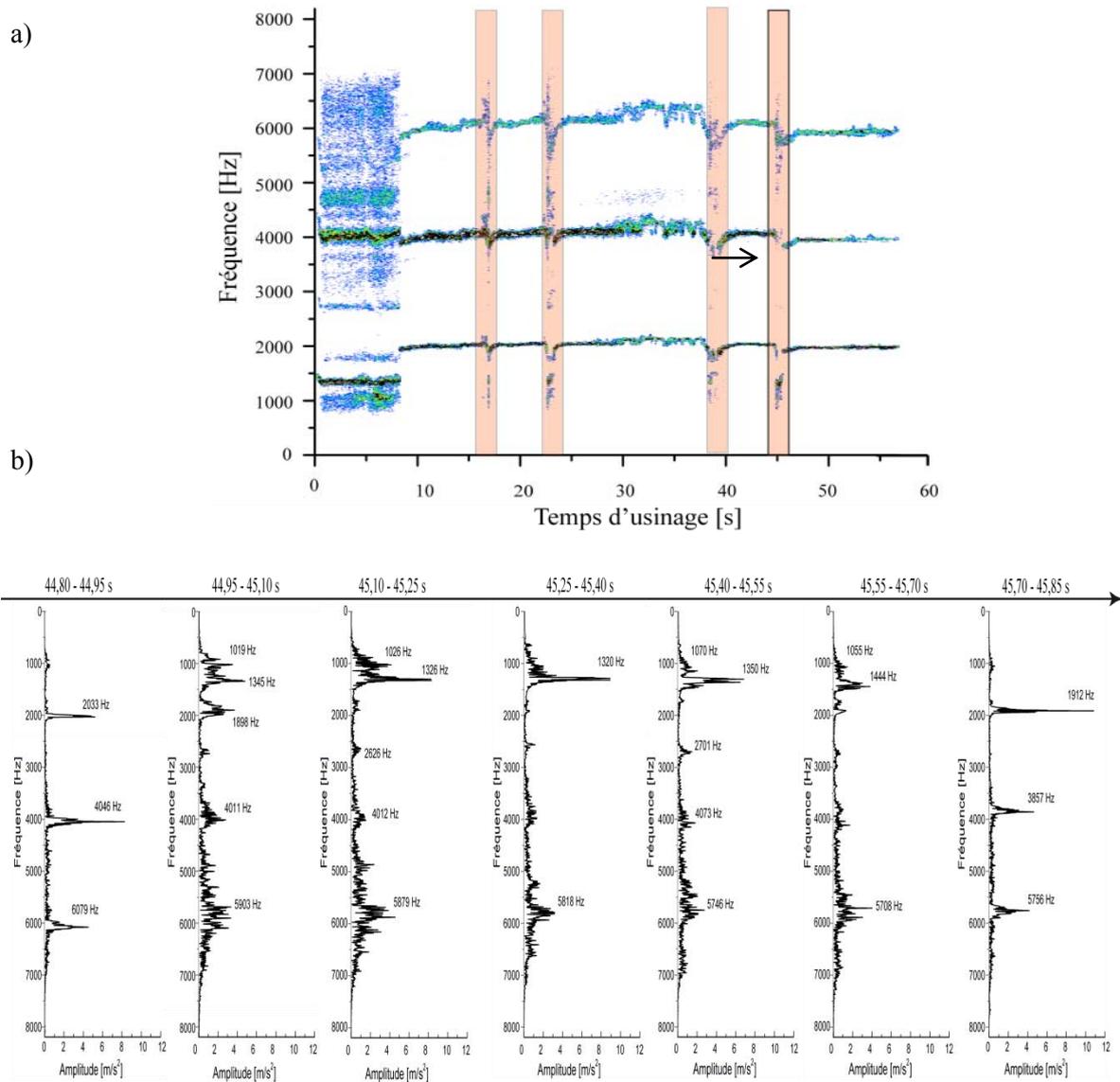


Figure IV.2.3 : (a) Diagramme temps-fréquence et (b) L'évolution fréquentielle pour un « copeau coincé » illustrée avec des FFT successives

La Figure IV.2.4 présente les efforts de coupe superposés (en x et y) issus de la platine de mesure. Afin de comprendre la réponse de ces signaux pendant le phénomène d'un « copeau coincé », un zoom sur la zone qui correspond en temps au quatrième pic a été fait. Ensuite, les deux signaux ont été filtrés avec un filtre passe-bas à 20 Hz (trois fois la fréquence de rotation) pour souligner le

comportement de l'outil. La courbe bleue correspond au signal F_x filtré, tandis que la courbe verte est le signal F_y filtré.

Les signaux filtrés sont des sinusoïdes du fait des légères différences de géométrie entre les deux dents et de l'excentration de l'outil (cf. chapitre 3). La période de 0,15 s, retrouvée sur les signaux confirme le temps nécessaire pour que l'outil fasse un tour. Aussi, les signaux sont décalés de 90° (c'est-à-dire un quart de tour), aspect illustré par le temps de 0,04 s mesuré sur le graphique.

Quand le copeau vient se coincer entre le listel et la pièce à usiner, le seul impact sur les efforts est donné par une faible augmentation (en X positif et Y négatif). Le niveau des efforts dans ce cas est dépendant de la taille de copeau coincé. Une fois que le copeau est évacué, les efforts reviennent au niveau initial, sauf si la géométrie de l'outil est affectée. Cet aspect montre que cette perturbation d'usinage n'a pas une influence sur l'usure de l'outil.

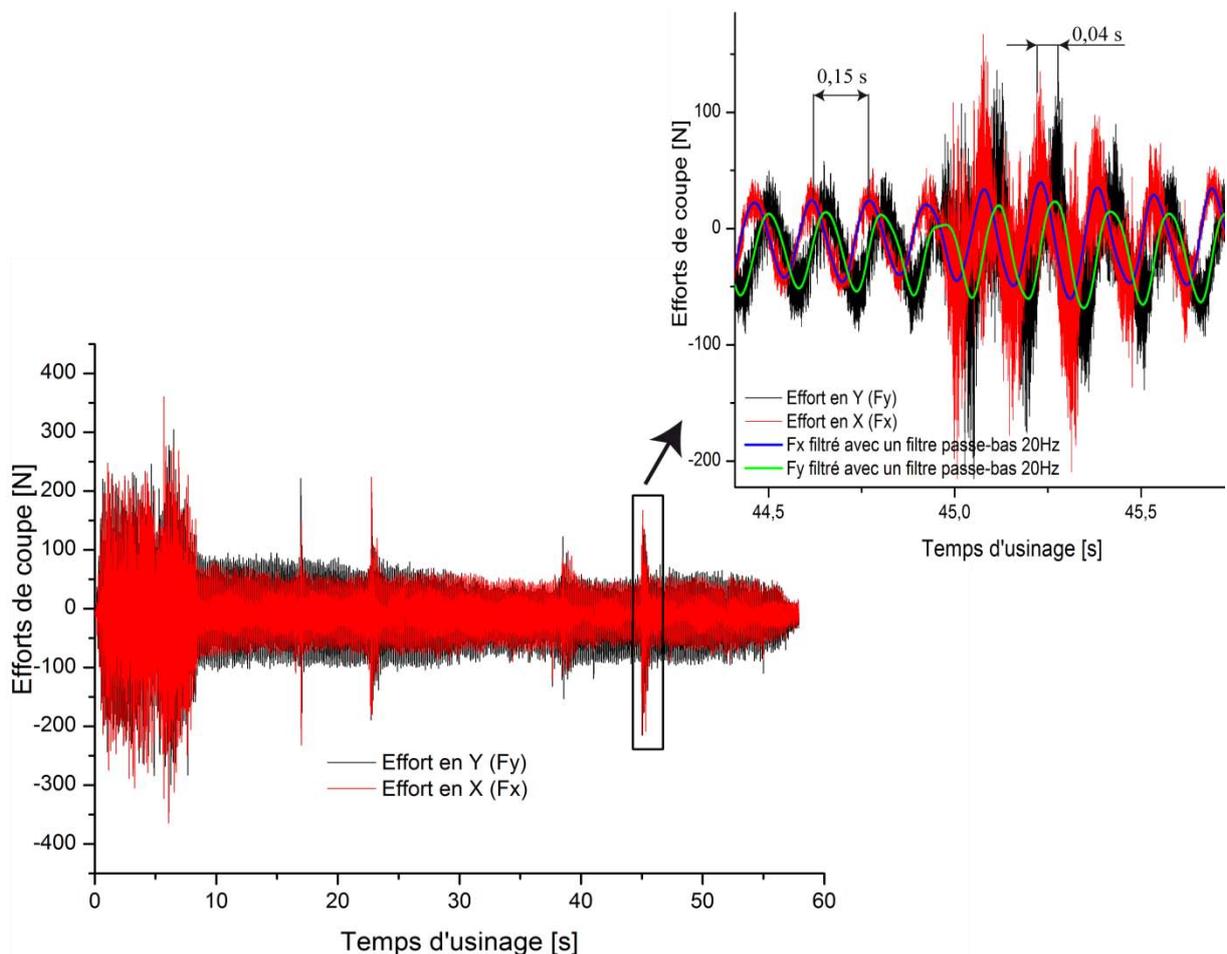


Figure IV.2.4 : Comparaison entre les efforts de coupe en x et y

La signature de cette perturbation d'usinage (le phénomène de « copeau coincé ») a été clairement identifiée en utilisant le signal du courant de la broche, les accéléromètres et aussi avec les efforts de coupe.

Le même exemple (le trou fait dans les conditions de coupe de production) sera utilisé pour analyser l'évolution des signaux en fonction de l'usure en dépouille. Pour ce perçage, le deuxième trou avec la même plaquette sera analysé afin de comprendre l'impact sur les signaux. De même, cet essai est choisi dans la zone I, sur la cartographie de modes de dégradation. La Figure IV.2.5 regroupe les trois types de signaux (les vibrations présentées dans la Figure IV.2.5.a, le courant de la broche enregistré par le profibus Siemens (b), le couple (c) et l'effort d'avance F_z (d) de la platine de mesure Kistler) pour ce perçage. L'usure en dépouille de deux dents est symétrique (avec une valeur moyenne d'environ $0,057 \mu\text{m}$).

Les signaux de la platine Kistler (Figure IV.2.5.c. et d.) sont filtrés avec un filtre passe-bas à 30 Hz, ce qui correspond à 3 fois la fréquence de rotation. Le signal du couple filtré et le courant de la broche présentent la même typologie et confirment les résultats obtenus par Dutilh [Dutilh 10].

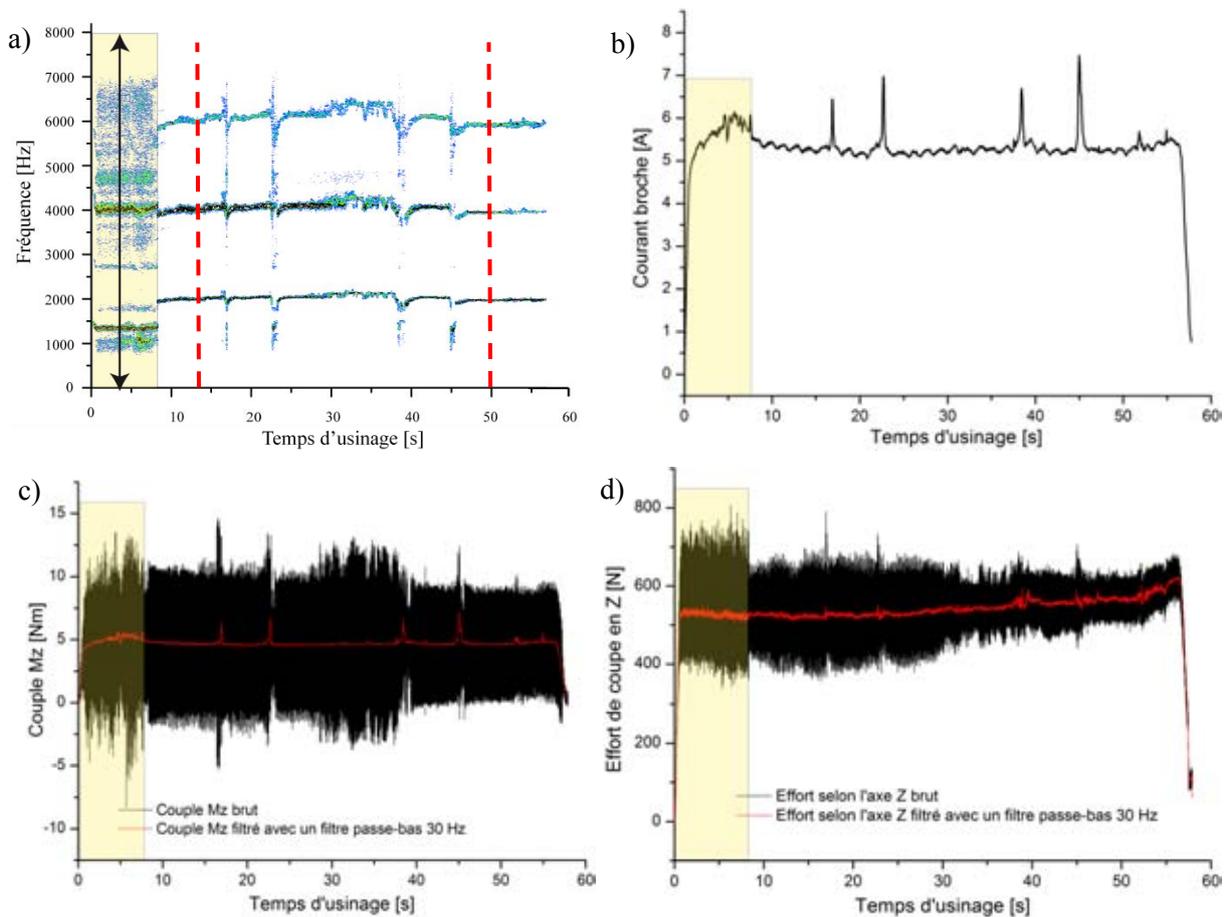


Figure IV.2.5 : Évolution des signaux pour le point de production ($V_c = 19 \text{ m/min}$; $f = 0,1 \text{ mm/tr}$) (a) diagramme temps-fréquence ; (b) le courant broche (c) le couple M_z et (d) l'effort d'avance F_z

La première phase d'un perçage (entrée de l'outil dans la matière) peut être identifiée facilement sur tous les signaux. Les rectangles jaunes sur la Figure IV.2.5 mettent en évidence cette étape sur tous les graphiques. Pour ces conditions de coupe, le temps nécessaire à la pénétration du foret et à la mise en contact des listels est d'environ 8 s. Nous sommes dans une phase où l'outil n'est

pas guidé par les deux listels et elle permet une instabilité radiale du foret. Donc, de nombreuses fréquences apparaissent. Sur le graphique, la première FFT présente le spectre fréquentiel lors de l'entrée de l'outil (indiquée par la flèche). Sur la Figure IV.2.6 qui présente des FFT à trois moments précis ($t = 4, 13$ et 50 s.), on constate pendant cette phase de pénétration (Figure IV.2.6 a) que le deuxième mode propre de l'outil est visible (1326 Hz) ainsi que le mode propre de la platine $f_0(x,y)$ à 1015 Hz. Les autres deux fréquences illustrées dans cette figure sont les harmoniques du deuxième mode propre de l'outil. En perspective de stratégie de surveillance, l'apparition de ces fréquences pourrait aussi coïncider avec "la perte" d'un contact en listel.

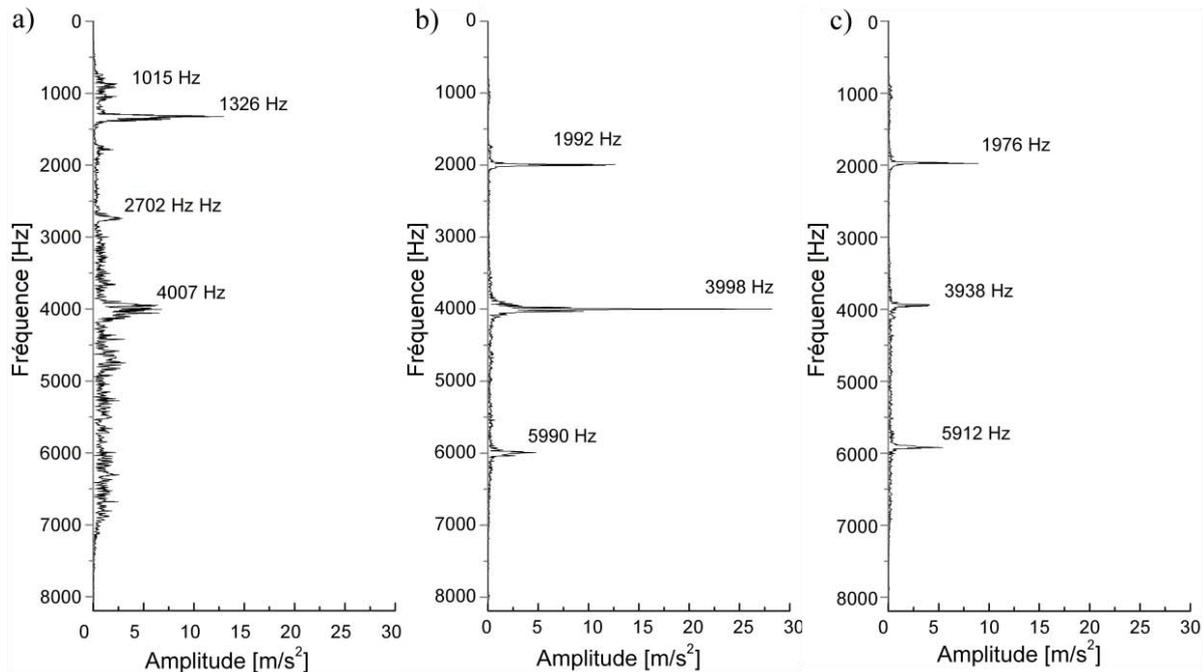


Figure IV.2.6 : Spectre fréquentiel à (a) 4 s ; (b) 13 s et (c) à 50 s

Lorsque l'outil est guidé par les listels (après 8 s), l'usinage devient plus stable (par rapport au niveau du courant de la broche et à l'évolution fréquentielle). Le courant broche est constant, à environ 5 A. En ce qui concerne les fréquences, seuls le quatrième mode propre de l'outil et ses harmoniques sont visibles (1992, 3998 et 5990 Hz), avec une évolution négligeable (Figure IV.2.6.a et b).

Le deuxième trou fait avec le même outil présente la même évolution, avec une augmentation de 51 % pour l'usure en dépouille, jusqu'à 0,082 mm. La différence principale par rapport au premier perçage vient du fait que celui-ci contient une dent entaillée (Figure IV.2.7).

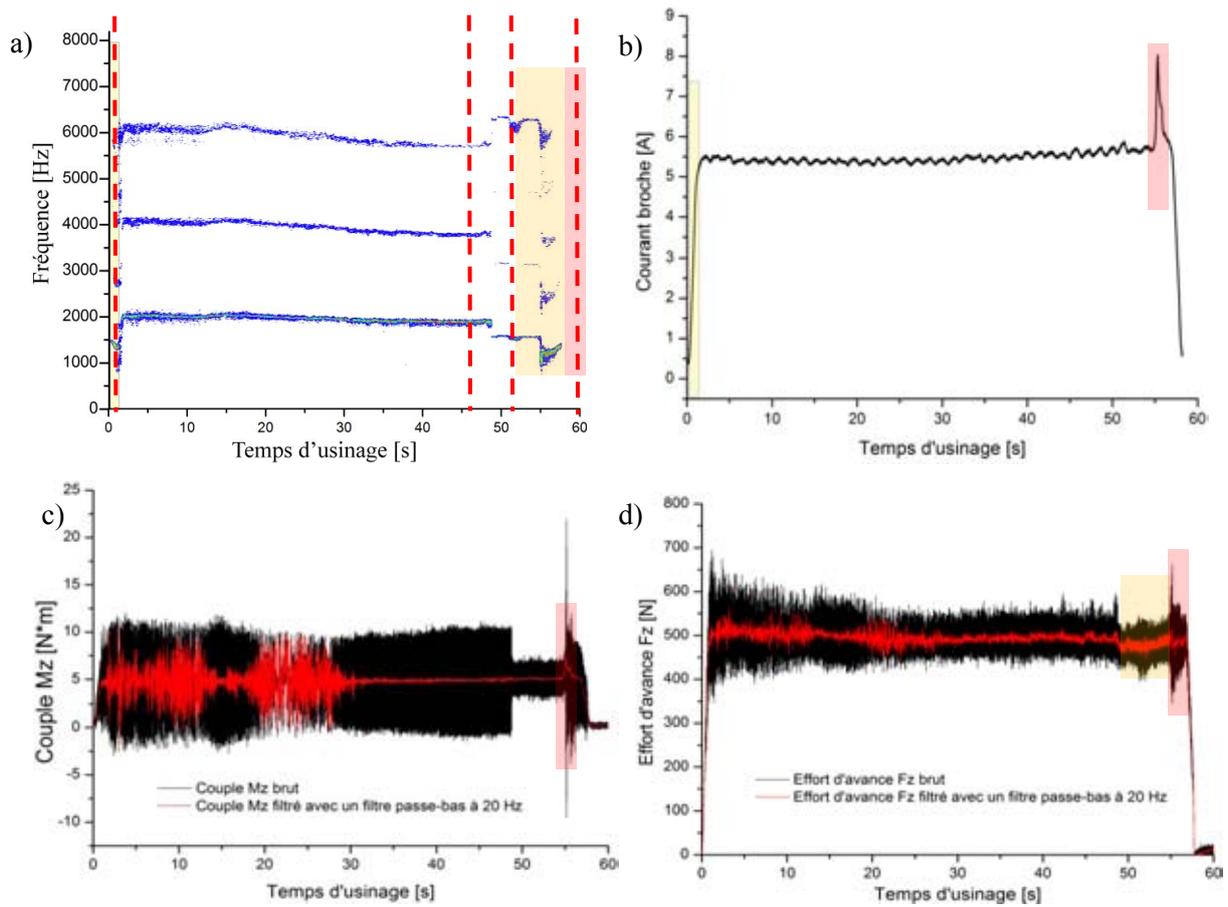


Figure IV.2.7 : Évolution des signaux pour le deuxième perçage fait à $V_c = 19 \text{ m/min}$; $f = 0,1 \text{ mm/tr}$ avec le même outil
 (a) diagramme temps-fréquence, (b) le courant broche (c) le couple M_z et (d) l'effort d'avance F_z

Enfin, un changement intéressant se produit au niveau fréquentiel après 50 s, le quatrième mode disparaît et le troisième mode propre de l'outil apparaît ($\sim 1575 \text{ Hz}$ sur la Figure IV.2.8).

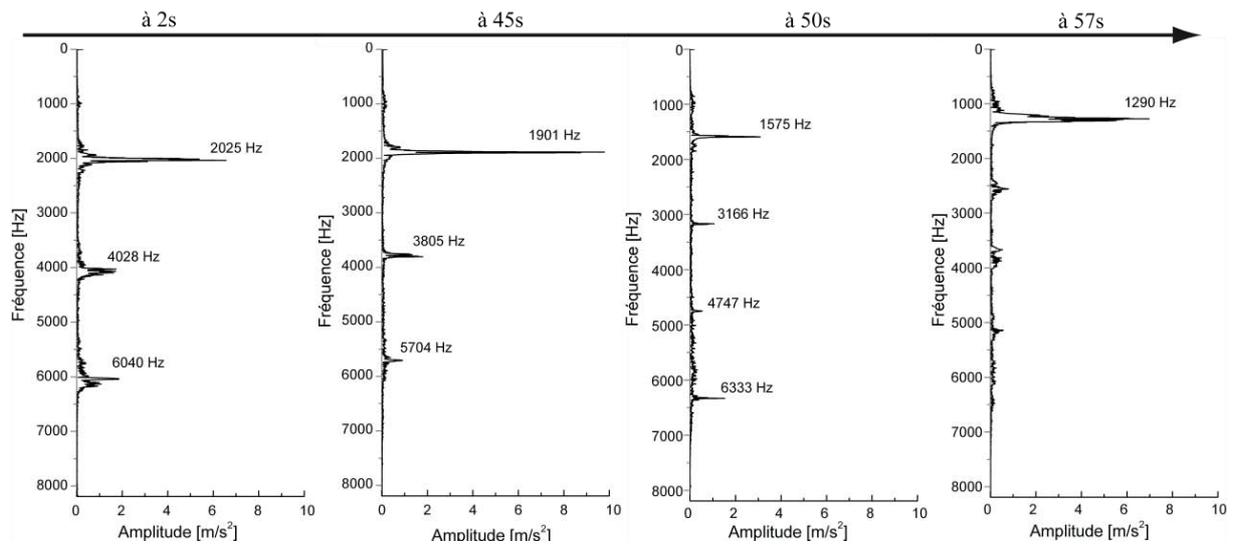


Figure IV.2.8 : FFT associées aux zones indiquées par les lignes pointillées sur le diagramme temps-fréquence

Pour rappel, ce mode est perpendiculaire à la face de dépouille et le talonnage peut expliquer cette apparition du troisième mode. Le dernier aspect lié à ces signaux est donné par l'augmentation brutale du courant de la broche à la fin du perçage (visible sur toutes les grandeurs physiques).

À fin du perçage ($t = 57$ s), le deuxième mode propre de l'outil (~ 1290 Hz - Figure IV.2.8) est prépondérant. Cette évolution est caractéristique de l'apparition d'une entaille, mais une analyse plus détaillée sera faite dans le paragraphe IV.2.2.

Au niveau des efforts de coupe, la Figure IV.2.9 témoigne encore de ce phénomène puisqu'à partir de $t = 57$ s, les signaux d'efforts (sinusoïdes) sont modifiés et ils le resteront. Quand l'entaille se produit, un pic d'effort est visible et un déséquilibre se met en place.

Les efforts de coupe qui correspondent à ce perçage sont présentés Figure IV.2.9. L'évolution est similaire au signal du courant de la broche, avec une augmentation brutale à la fin.

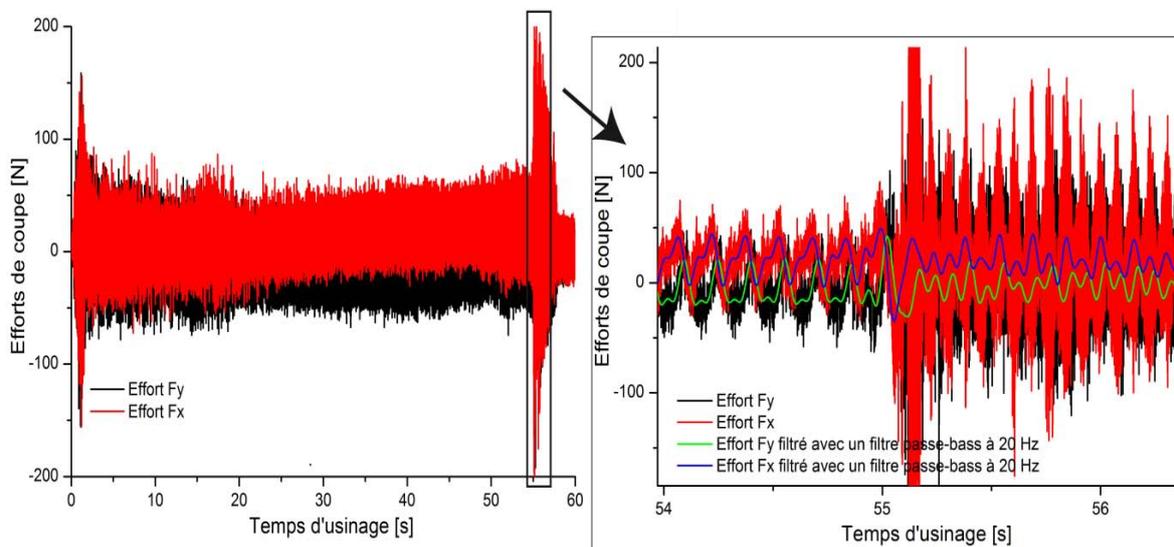


Figure IV.2.9 : Évolution des efforts de coupe pour le deuxième perçage

Pour comprendre l'évolution des signaux d'efforts radiaux, nous utilisons la modélisation présentée dans le troisième chapitre. La Figure IV.2.10 montre les efforts de coupe mesurés à différents instants (les courbes bleues correspondent à l'effort Fx, tandis que les vertes sont pour Fy), comparés ensuite avec les valeurs calculées (en rouge sur la figure) pour un tour réalisé par l'outil. Ici la configuration optimale à $t=54,8$ et $56,2$ s donne un pourcentage de variation d'effort entre les deux dents « F » de 2 et 0.5 %.

L'hypothèse retenue est une modification de la contribution des deux dents quand l'entaille se produit avec une augmentation de l'effort sur la deuxième dent. Si l'apport de la deuxième dent devient plus important, le pourcentage de variation d'effort s'en trouve réduit malgré une augmentation constatée sur le couple. Cet aspect est montré par la Figure IV.2.10.b ($F = 1\%$ et réduction d'amplitude).

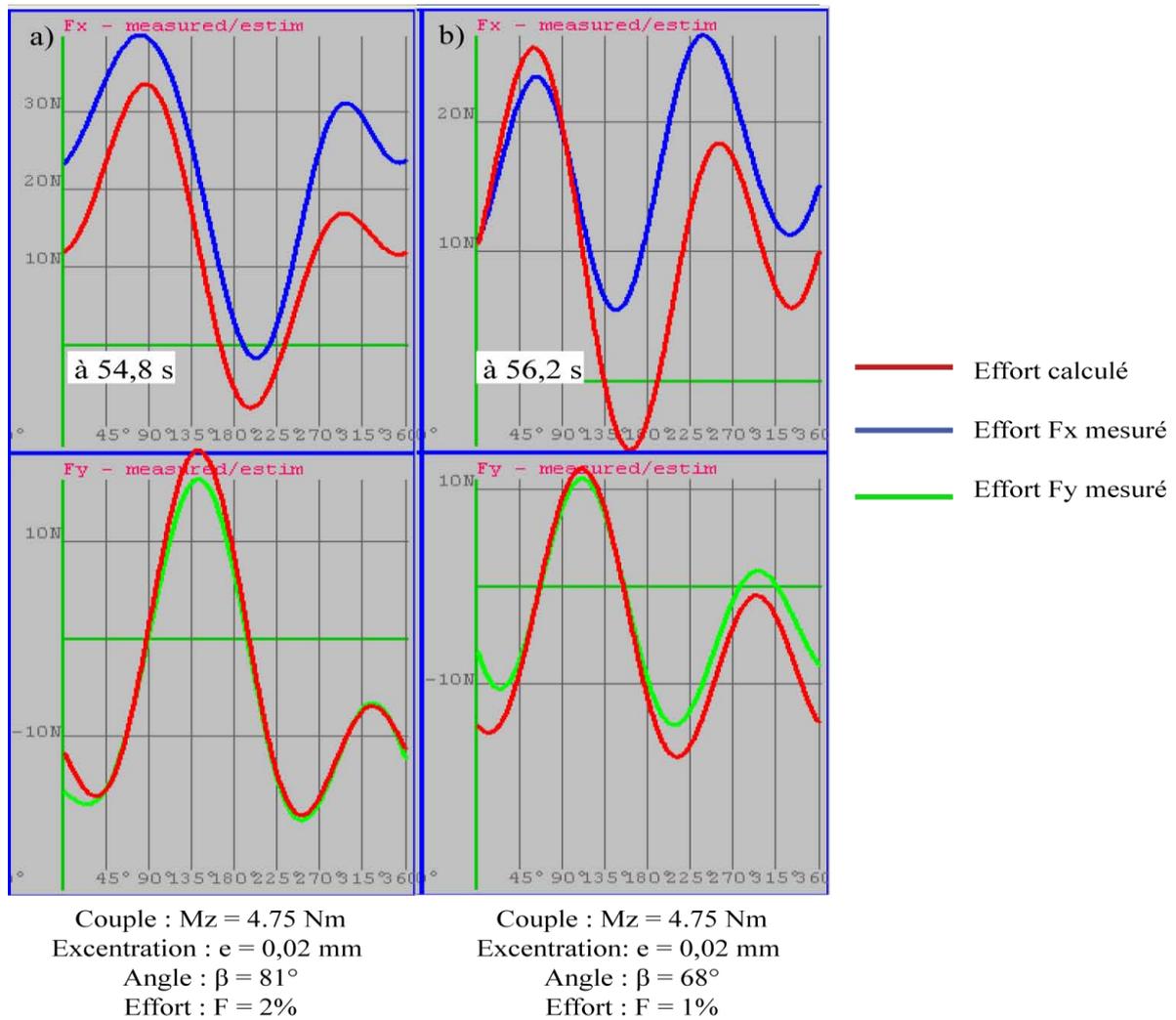


Figure IV.2.10 : Comparaison entre les efforts de coupe mesurés et calculés à : a) $t = 54,8 \text{ s}$ et b) $t = 56,2 \text{ s}$

Un deuxième exemple sera maintenant présenté pour les essais qui génèrent après le premier perçage, seulement une usure en dépouille. La Figure IV.2.11 présente les signaux de surveillance pour le perçage réalisé avec une vitesse de coupe de 15 m/min et une avance de 0,1 mm/tr. À la fin du perçage, l'usure en dépouille a été de 0,073 mm pour la dent 1 et 0,066 mm pour la deuxième dent (c'est à dire une différence d'environ 11 %).

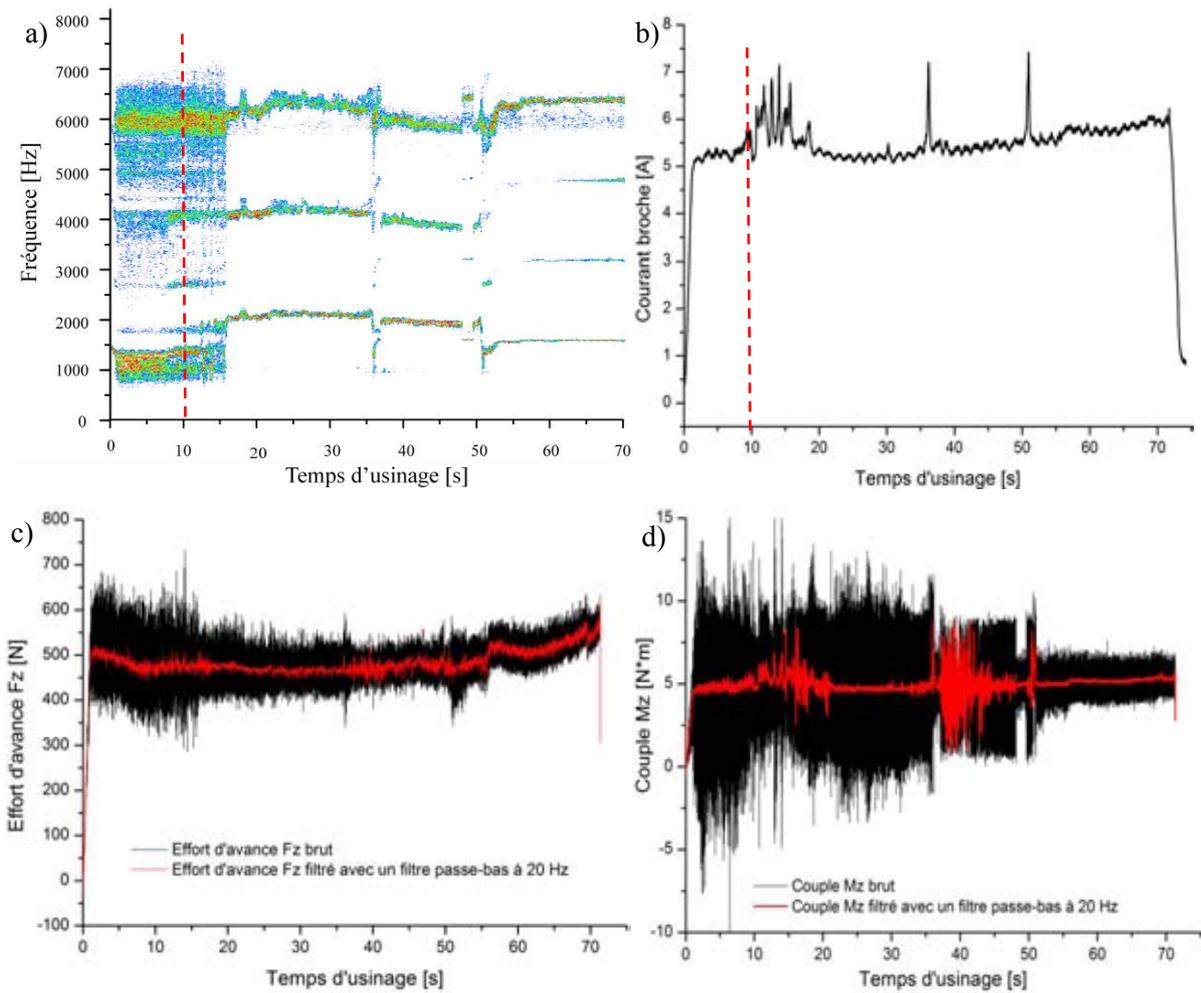


Figure IV.2.11 : Évolution des signaux pour un essai à $V_c = 15$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr (a) diagramme temps-fréquence (b) le courant de la broche (c) l'effort d'avance Fz et (d) le couple Mz

Nous retrouvons le même phénomène que précédemment lors de la pénétration de l'outil (Figure IV.2.11.a) pour les dix premières secondes d'usinage. En utilisant des FFT faites sur une fenêtre de temps de 0,2 s (l'équivalent d'un tour de l'outil pour ces conditions de coupe), les résultats déjà présentés pour le premier exemple sont confirmés. Par exemple, la première FFT sur la Figure IV.2.12 montre le deuxième mode propre de l'outil (à 1291 Hz) et les deux modes de la platine sont mis en évidence. Ensuite, entre 10 s et 20 s d'usinage, nous pouvons identifier une zone avec plusieurs pics de courant broche, imputables à un problème d'évacuation des copeaux (le phénomène des copeaux « coincés »). Par rapport à la consommation globale du courant broche, l'usinage est stable. Cette évolution est vérifiée aussi par l'apparition du quatrième mode propre de l'outil (la deuxième FFT sur la Figure IV.2.12).

Tous les signaux montrent un changement après 50 s d'usinage. Au niveau fréquentiel, le troisième mode apparaît et le quatrième disparaît (1589 Hz sur la Figure IV.2.12). L'apparition de ce mode a été corrélée avec une augmentation de l'usure en dépouille au-delà de 0,06 mm. Dans ce cas

comme dans le précédent, cette hypothèse est vérifiée par les autres signaux. Le couple, le courant de la broche ainsi que l'effort d'avance augmentent quand la fréquence change.

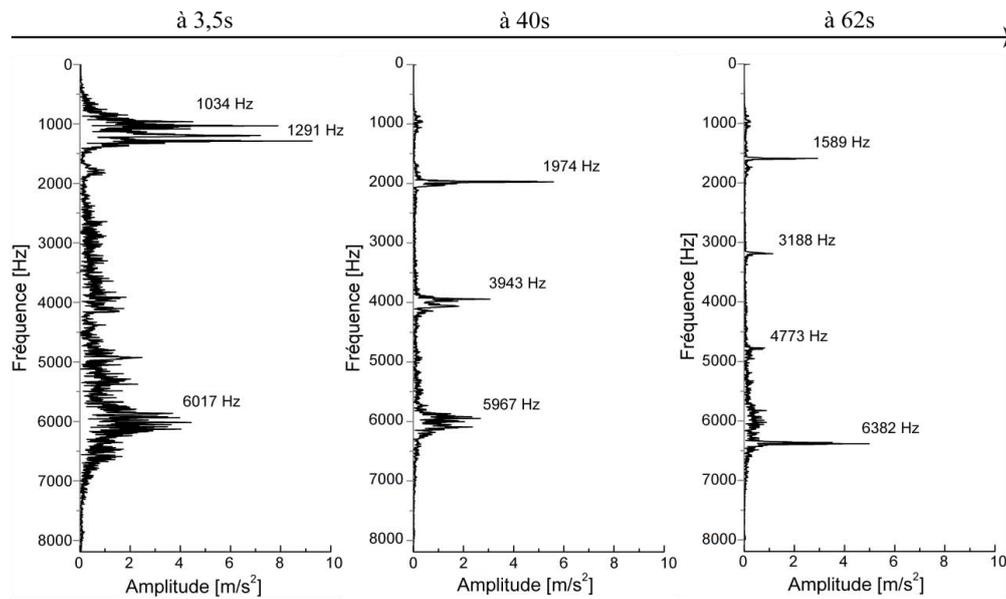


Figure IV.2.12 : FFT réalisées sur le signal de l'accéléromètre Y à différents moments de l'usinage

Les efforts de coupe radiaux (Figure IV.2.13) présentent une évolution très proche du signal du courant broche (niveau constant avec les pics de consommation spécifiques aux copeaux coincés et une augmentation après 56 s).

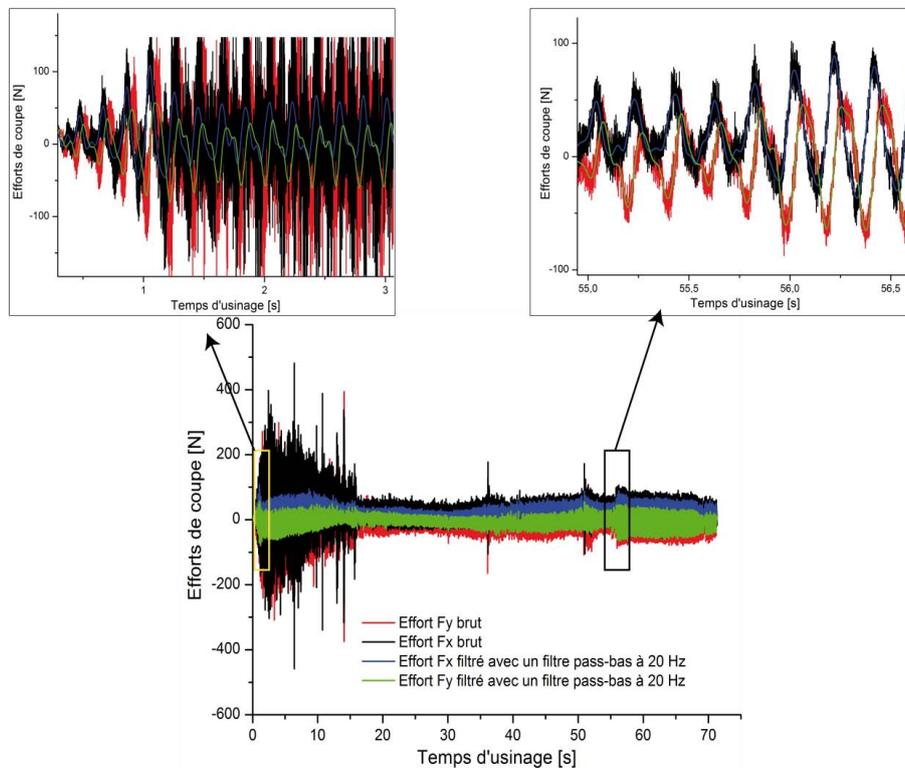


Figure IV.2.13 : Efforts de coupe pour le premier essai réalisé à $V_c = 15 \text{ m/min}$ et $f = 0,1 \text{ mm/tr}$

Sur la Figure IV.2.14, notre simulation recalée à $t = 10$ s donne une excentration de 0.02 mm et une variation d'effort entre les deux dents de l'ordre de 3 à 4%. A partir de 56 s, les sinusoïdes F_x et F_y sont modifiées par une augmentation de la variation d'effort entre les deux dents. Il semble donc que l'usure en dépouille affecte la répartition des efforts.

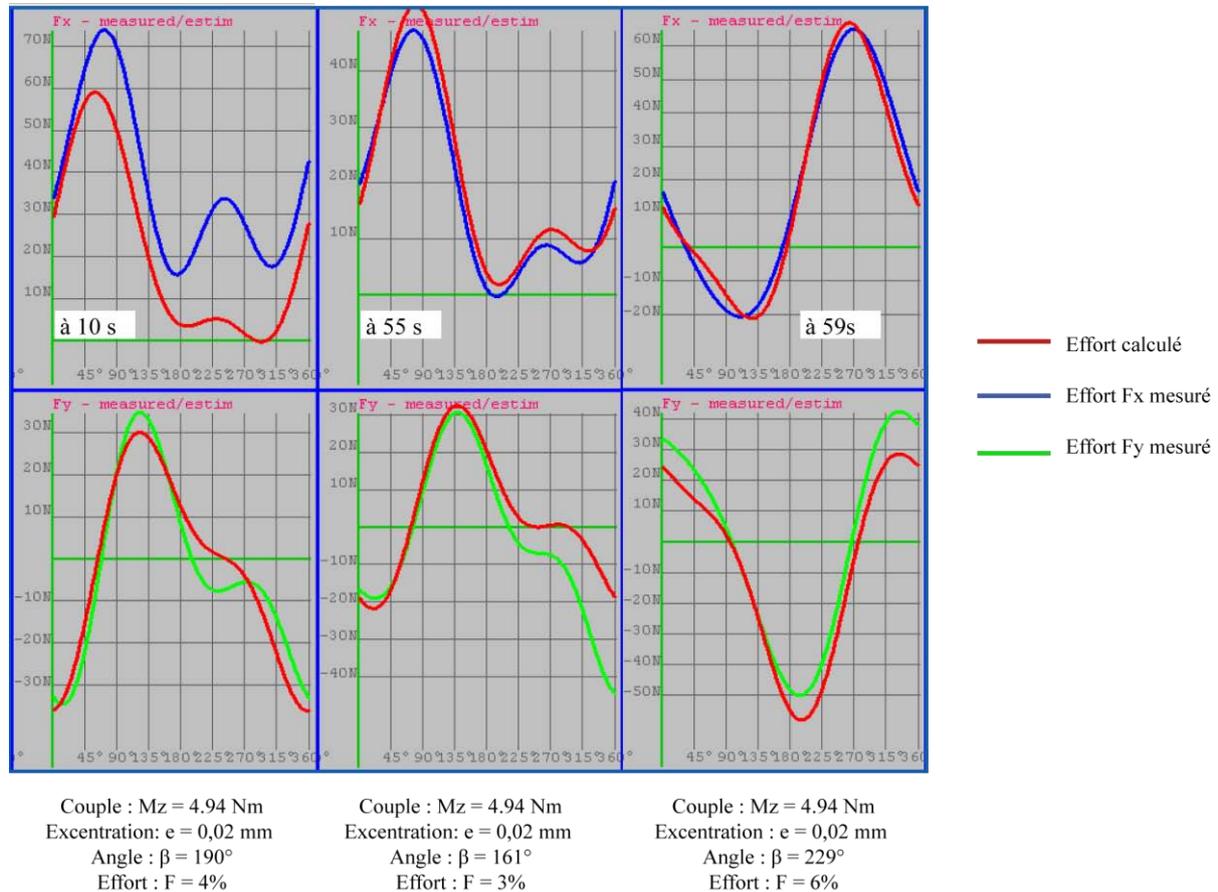


Figure IV.2.14 : Comparaison entre les efforts de coupe mesurés et calculés à $t = 10$ s, $t = 55$ s et $t = 59$ s

La Figure IV.2.15 montre l'évolution des efforts pour le deuxième perçage, réalisé avec une vitesse de coupe de 15 m/min et une avance de 0,1 mm/tr. À la fin de l'usinage, la dent 1 a un $V_b = 0,106$ mm (augmentation d'environ 50 %), tandis que pour la dent 2, $V_b = 0,113$ mm (augmentation de 72 %). Pour rappel, la fréquence de rotation pour ces conditions de coupe est de 5,13 Hz.

Le coincement d'un copeau est synchronisé sur un pic de consommation important montré sur la Figure IV.2.15.c pendant l'usinage (à $t = 63$ s). Cependant sur la Figure IV.2.16, on ne constate pas de modification des sinusoïdes et de variation de la répartition des efforts après $t = 63$ s, les valeurs reviennent au niveau antérieur, soulignant que ce phénomène n'a pas affecté l'intégrité de l'outil.

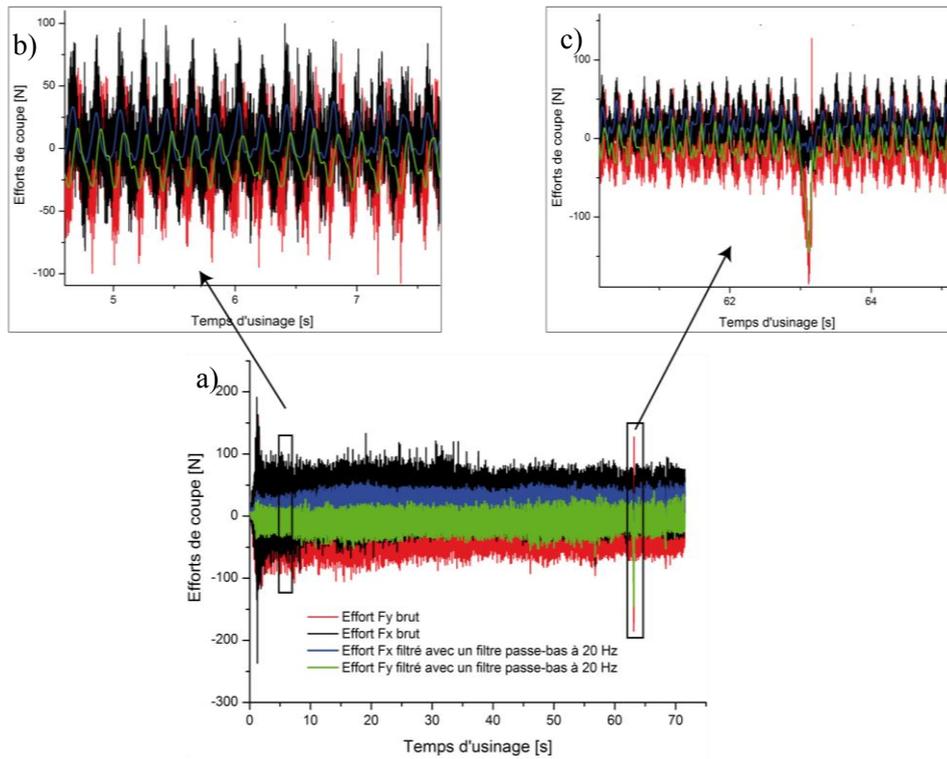


Figure IV.2.15 : Efforts de coupe pour le deuxième perçage réalisé à $V_c = 15 \text{ m/min}$ et $f = 0,1 \text{ mm/tr}$

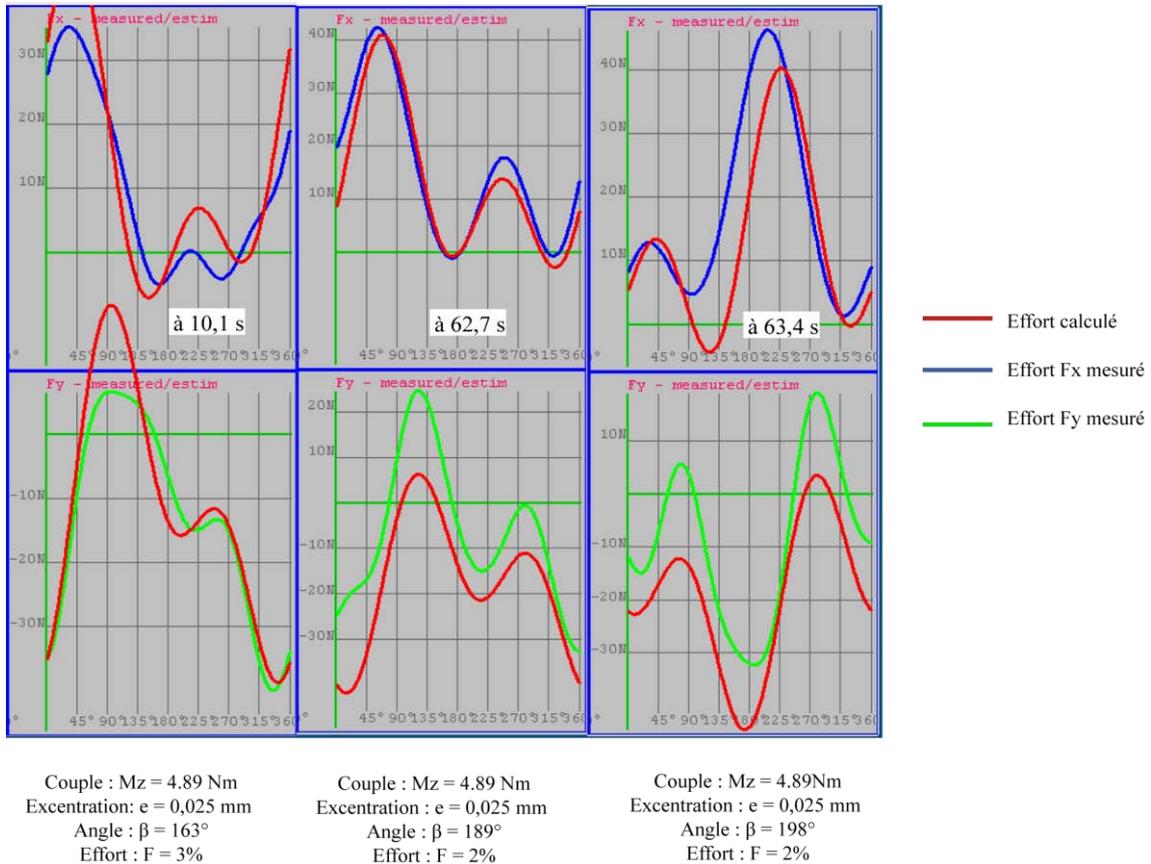
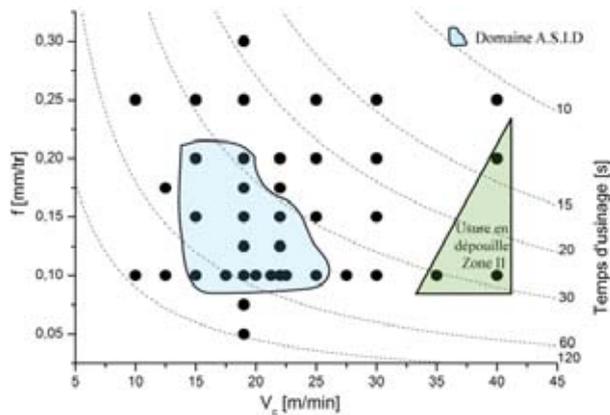


Figure IV.2.16 : Comparaison entre les efforts de coupe mesurés et calculés à $t = 10,1 \text{ s}$, $t = 62,7 \text{ s}$ et $t = 63,4 \text{ s}$

IV.2.1.2 Zone II



Nous nous intéressons ici à la seconde zone d'usure en dépouille. Un essai fait à $V_c = 40$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr est étudié comme exemple afin d'identifier le comportement spécifique de cette zone II par rapport à la zone I. Les analyses présentées dans le paragraphe IV.1.2 montrent que l'usure en dépouille entre les deux zones est quasi identique. Sur la Figure IV.2.17.a, la progression de l'intensité du courant de la

broche est constante, mais légère, comparé avec un essai à faible vitesse de coupe. Ces résultats sont importants, car les phénomènes générés entre les deux zones sont différents. Dans son étude, Dutilh [Dutilh 10] montre que la vitesse de coupe a un effet prépondérant sur la température dans la zone de coupe. Dans la même direction, l'auteur fixe un V_c critique de 25 m/min à partir duquel des couches thermo-mécaniquement affectées apparaissent. Il peut être intéressant de différencier notamment les deux zones par des signaux complémentaires pour fiabiliser la surveillance. Pour cela, une FFT a été faite sur tout le signal fourni par l'accéléromètre Y. Ce type de traitement du signal offre seulement des informations sur les fréquences excitées pendant la coupe et ne précise pas le moment où les fréquences apparaissent.

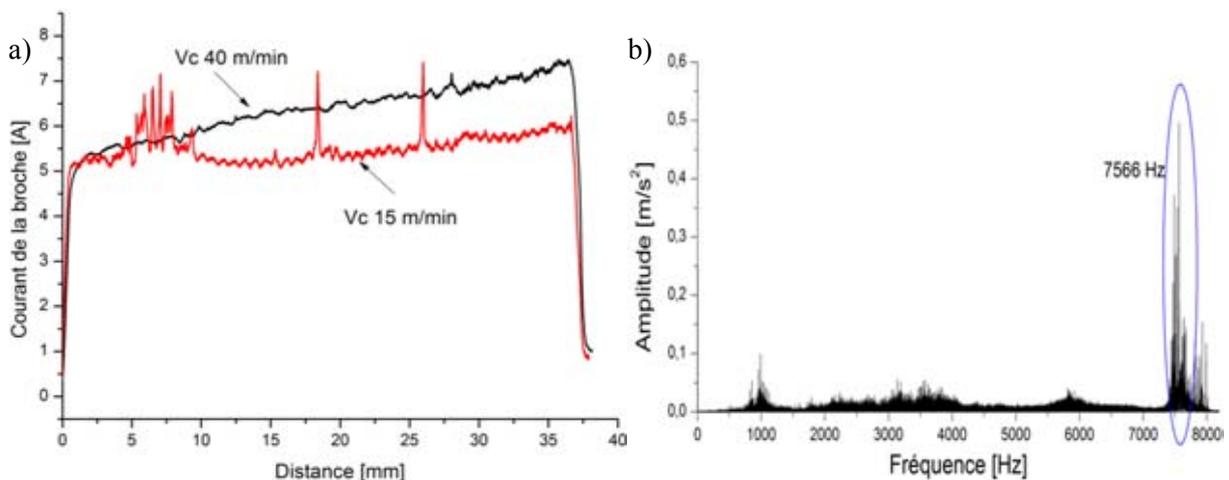


Figure IV.2.17 : (a) Évolution du courant de la broche pour une avance de 0,1 mm/tr et deux vitesses de coupe différentes
(b) FFT sur tout le signal de l'accéléromètre Y pour $V_c = 40$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr

La Figure IV.2.17.b met en évidence que la fréquence principale observée dans ce cas se trouve à 7566 Hz. Cette fréquence peut être associée à un mode propre de torsion de l'outil. Une explication possible est donnée par l'augmentation de l'usure qui va générer un couple plus important ainsi que des vibrations de torsion. L'analyse fréquentielle par élément finis de l'outil a souligné un

premier mode propre de torsion vers 6500 Hz, il est donc plausible qu'une fréquence mesurée élevée corresponde à ce mode.

Une autre caractéristique des signaux entre les deux zones correspond au comportement lors du deuxième perçage avec le même outil. La Figure IV.2.18 montre l'évolution du courant de la broche pour deux essais faits à $V_c = 40$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr, avec le même outil. Si pour le premier trou, l'intensité du courant se situe vers 6 A, le deuxième essai atteint un niveau beaucoup plus élevé (maximum 25 A), témoignant d'une usure prononcée de l'outil et d'une rupture possible au début du second perçage (entre 0 et 5 s). Nous notons une bonne reproductibilité des signaux pour cette condition de coupe.

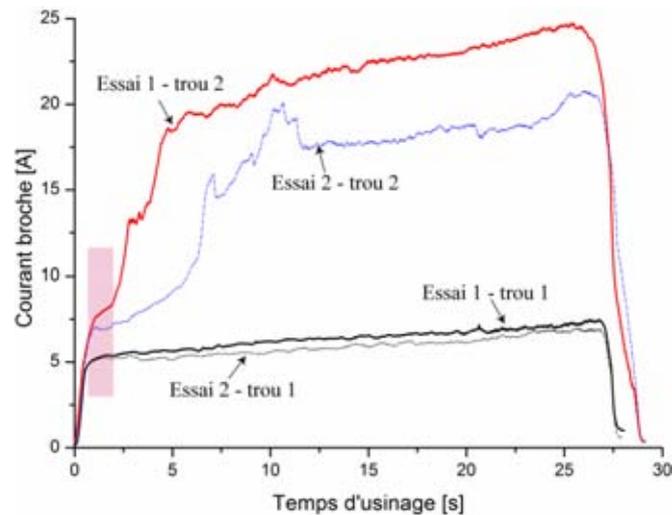
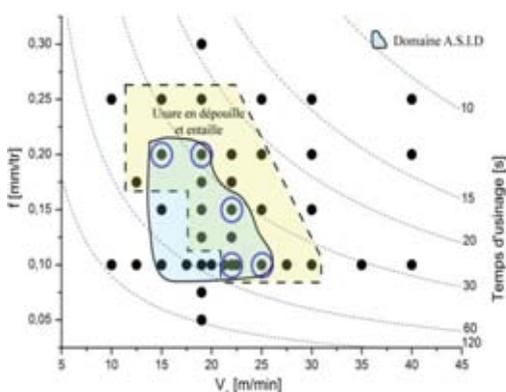


Figure IV.2.18 : Comparaison entre les niveaux du courant de la broche pour des essais réalisés à $V_c = 40$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr

Un dernier aspect qui doit être précisé est l'augmentation de la durée des signaux pour le deuxième trou, d'environ 1,5 s. En effet, il s'agit d'essais présentant une bavure très importante en sortie et donc un allongement du temps de contact entre l'outil et la pièce. Cette typologie est proche de l'étude conduite par Axinte et *al.* [Axinte 04] pour la détection d'une bavure dans le brochage de l'Inconel 718 et Ti-6-4, et nous pouvons imaginer sa prise en compte dans la stratégie de surveillance.

IV.2.2 Évolution des signaux pour les essais avec entaille



Dans cet exemple, le perçage est réalisé pour une vitesse de coupe de 22 m/min et une avance de 0,1 mm/tr et les signaux correspondants sont présentés dans la Figure IV.2.19. La plupart des essais qui se trouvent dans la zone délimitée pour l'usure en entaille, ont une évolution du courant de la broche, de la puissance

consommée par la broche ou du couple identique avec la typologie présentée par Nouari et *al.* [Nouari 08] dans le tournage à sec du Ti-6Al-4V. Quand une entaille est générée, la surface de contact entre l'outil et la pièce augmente. La conséquence de ce phénomène est l'augmentation brutale du courant de la broche et du couple filtré (Figure IV.2.19.b et d). Par contre, le signal de l'effort d'avance F_z (Figure IV.2.19.c) ne permet pas d'identifier le moment où l'entaille se produit et son emploi en surveillance d'usinage est donc délicat.

La Figure IV.2.19.a présente le diagramme temps-fréquence associé à ce perçage. Comme précédemment, la pénétration de l'outil est toujours mise en évidence par le deuxième mode propre de l'outil (à environ 1350 Hz) et les modes de la platine (à 1050 Hz et 6038 Hz), illustrée par la première FFT sur la Figure IV.2.20. Ensuite, une zone restreinte (entre 9 et 12 secondes) présente les caractéristiques d'un perçage « stable », c'est-à-dire l'apparition du quatrième mode propre de l'outil (1970 Hz, visible sur la deuxième FFT - Figure IV.2.20).

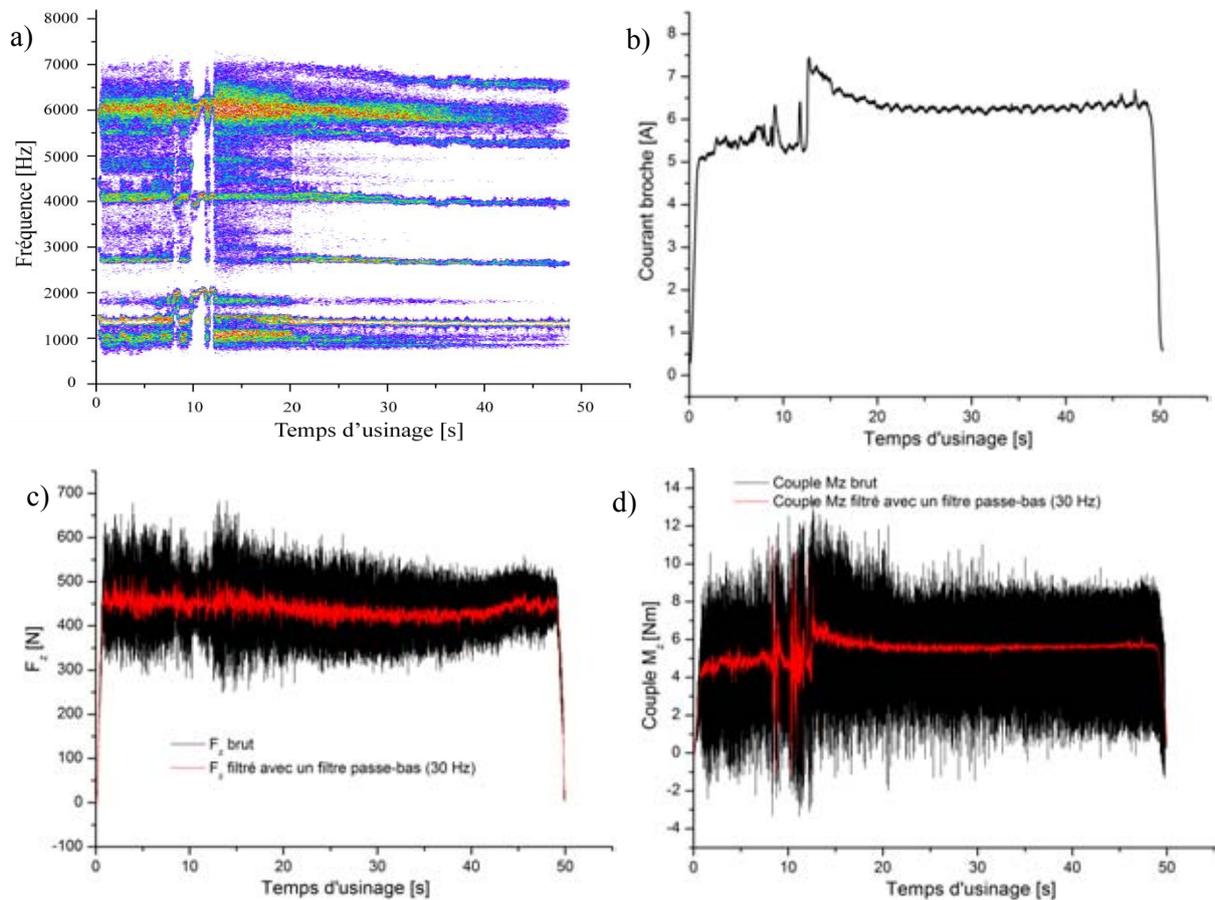


Figure IV.2.19 : Évolution des signaux pour le perçage réalisé à V_c 22 m/min et $f = 0,1$ mm/tr

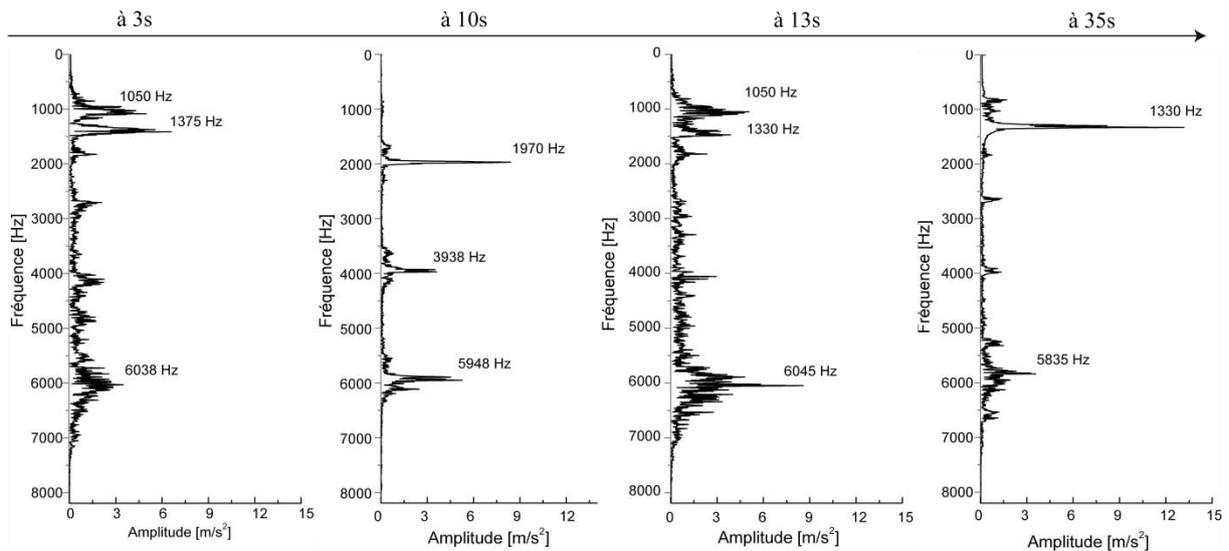


Figure IV.2.20 : FFT réalisées à différents moments de l'usinage

Quand l'entaille se produit, un déséquilibre entre les deux dents apparaîtra et un effort important radial est généré. Ce phénomène a comme conséquence un changement brusque de fréquence après 13 s d'usinage, soulignant à nouveau le deuxième mode propre de l'outil (1330 Hz, sur la troisième FFT - Figure IV.2.20) et la réponse de la platine selon le mode à 1050 Hz (en x,y). Avec l'augmentation des efforts de coupe et du couple, un autre mode de la platine (6045 Hz, selon l'axe z) pourrait réagir avec une amplitude plus importante ou cette fréquence peut correspondre à des vibrations de torsion de l'outil, comme évoqué précédemment.

L'évolution fréquentielle après 20 s (la dernière FFT - Figure IV.2.20) montre que la coupe se fait dans des conditions différentes par rapport au début du perçage puisque le deuxième mode (1330 Hz) se maintient. Les niveaux du couple et du courant de la broche se stabilisent après cette augmentation brusque, à un niveau plus important (environ 20%). Ceci indique que la géométrie de l'outil est endommagé (entaille).

Le dernier aspect étudié pour cet exemple est constitué par l'évolution des efforts de coupe F_x et F_y (Figure IV.2.21.). Sur toute la longueur du signal, nous retrouvons aussi les résultats d'analyse précédents. Après 13 s, l'entaille a provoqué un déséquilibre entre les deux dents, modifiant l'évolution des efforts sur chaque tour et donc la forme des sinusoïdes. Nous constatons de plus une augmentation de l'amplitude des efforts F_x et F_y et un léger accroissement à 5% de la variation d'effort entre les deux dents.

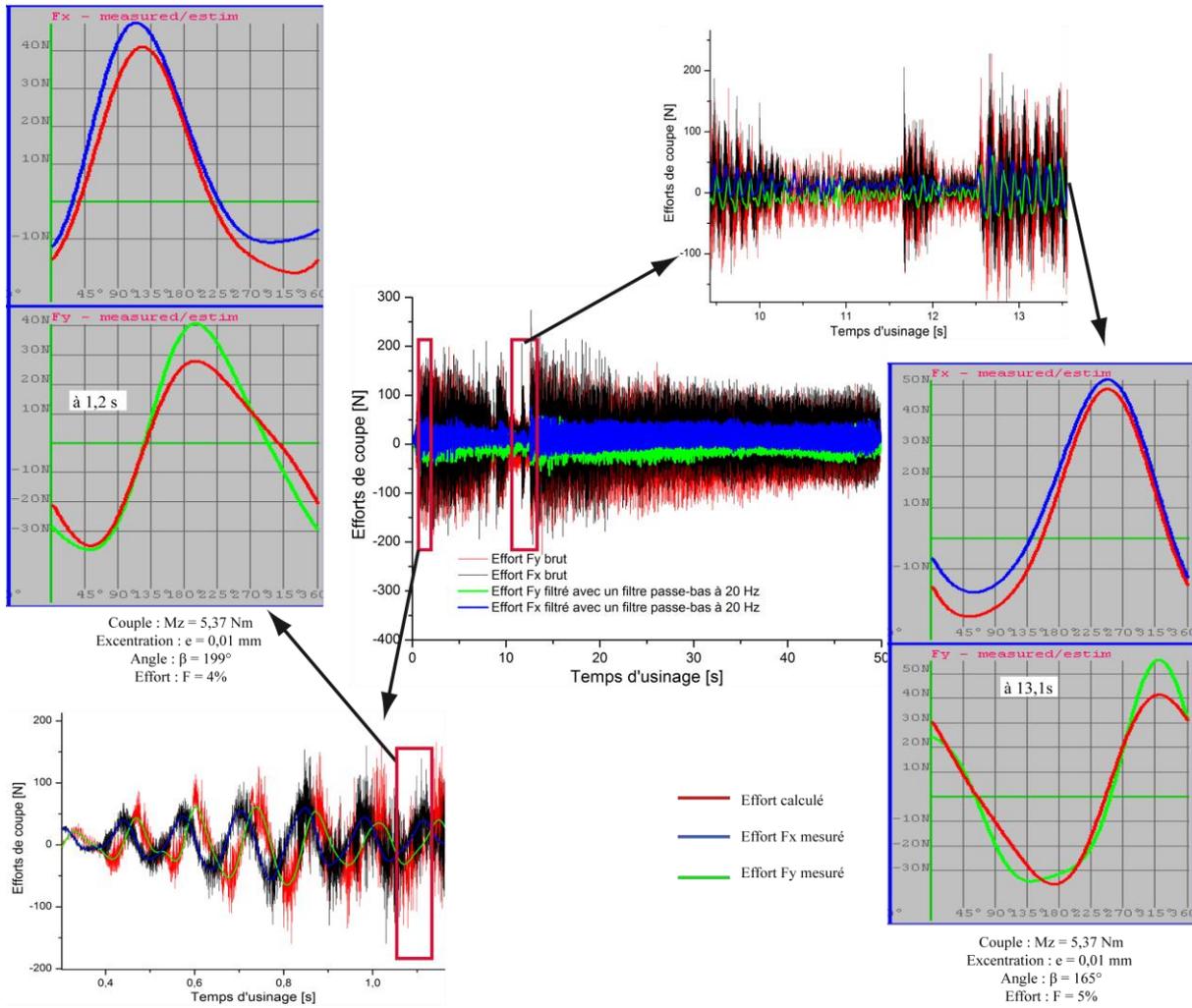


Figure IV.2.21 : Efforts de coupe F_x et F_y pour le perçage réalisé à $V_c = 22 \text{ m/min}$ et $f = 0,1 \text{ mm/tr}$

Les signaux correspondants au deuxième perçage réalisé avec le même outil sont présentés dans la Figure IV.2.22. Il est intéressant de remarquer sur le diagramme temps-fréquence (Figure IV.2.22.a) et sur le couple mesuré des signaux bruités, synonymes d'une coupe avec un outil abîmé. Cette tendance se calme avec la profondeur du trou sans doute à cause d'un guidage plus significatif du foret. Les pics les plus importants sont le deuxième mode propre de l'outil (1380 Hz) et le mode de la platine (6075 Hz), ce qui correspond aux résultats du premier perçage. Parce que les fréquences sont quasi-constantes sur tout le perçage, la FFT globale confirme les fréquences mises en jeu par l'usinage, ainsi que le déséquilibre existant entre les deux dents (dû à l'entaille).

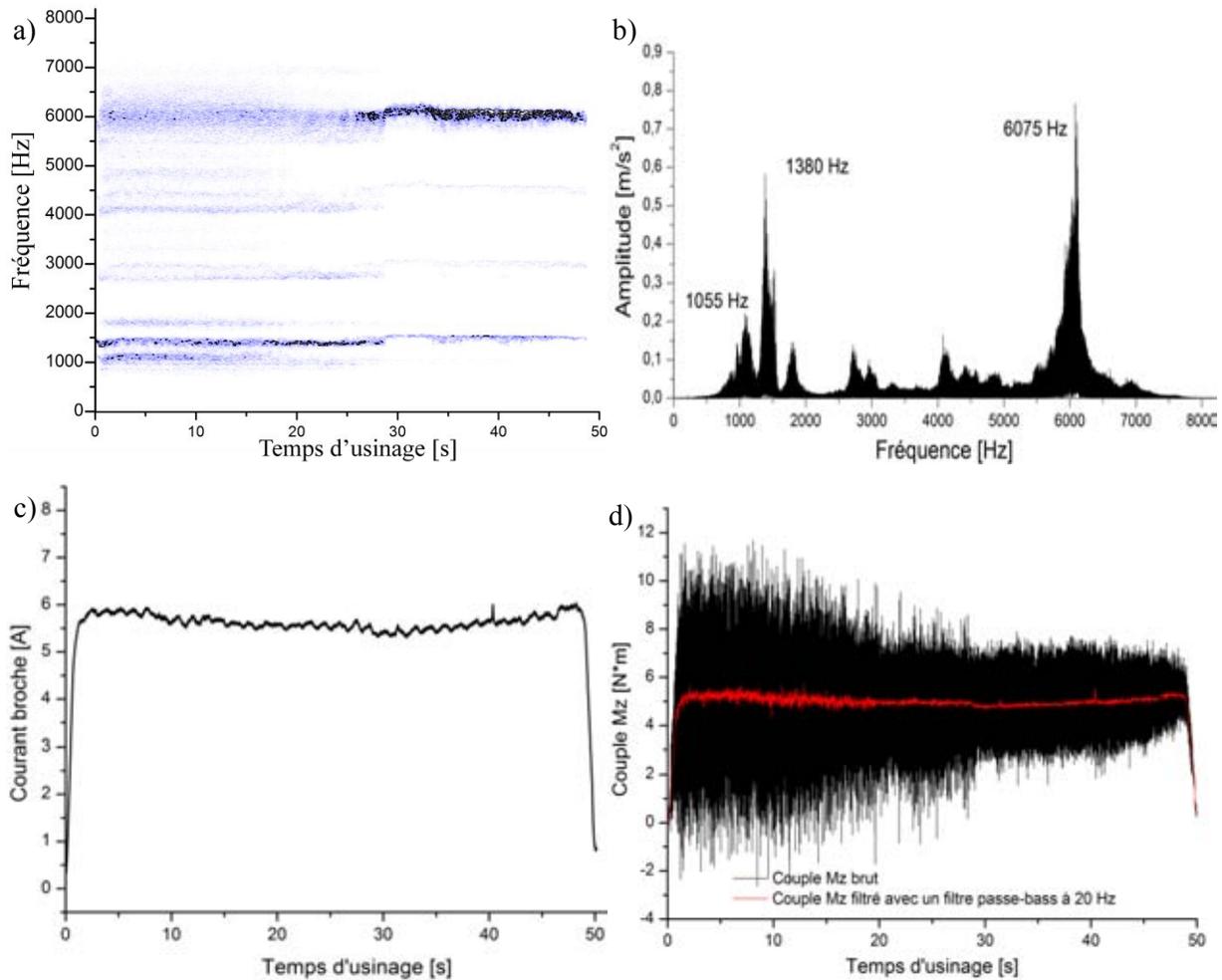
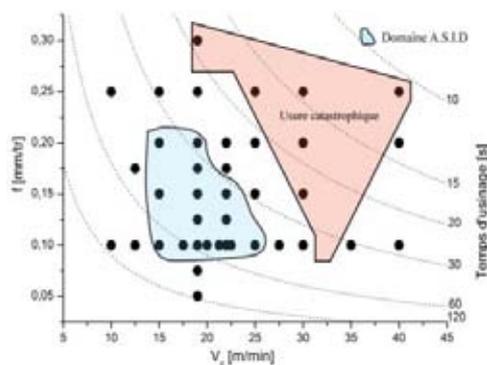


Figure IV.2.22 : Évolution des signaux pour le deuxième perçage réalisé avec la même plaquette à $V_c = 22 \text{ m/min}$ et $f = 0,1 \text{ mm/tr}$ (a) diagramme temps-fréquence (b) FFT associée au signal de l'accéléromètre Y (c) le courant de la broche et (d) le couple Mz

IV.2.3 Évolution des signaux pour l'usure catastrophique



L'usure catastrophique est le dernier mode de dégradation de l'outil pour lequel les signaux sont analysés. Un premier résultat issu des essais confirme le seuil de 12 A sur le signal du courant de la broche défini par Dutilh [Dutilh 11], à partir duquel l'effondrement d'une arête de coupe se produit. L'analyse des signaux est plus délicate pour la rupture de l'outil, car les efforts de coupe deviennent très importants. Dans ce cas, la plus part des signaux issus des accéléromètres saturent et rendent impossible leur exploitation. En revanche, Abu-Mahfouz et al. [Abu-Mahfouz 03] utilisent la saturation des accéléromètres comme information sur la rupture de l'outil.

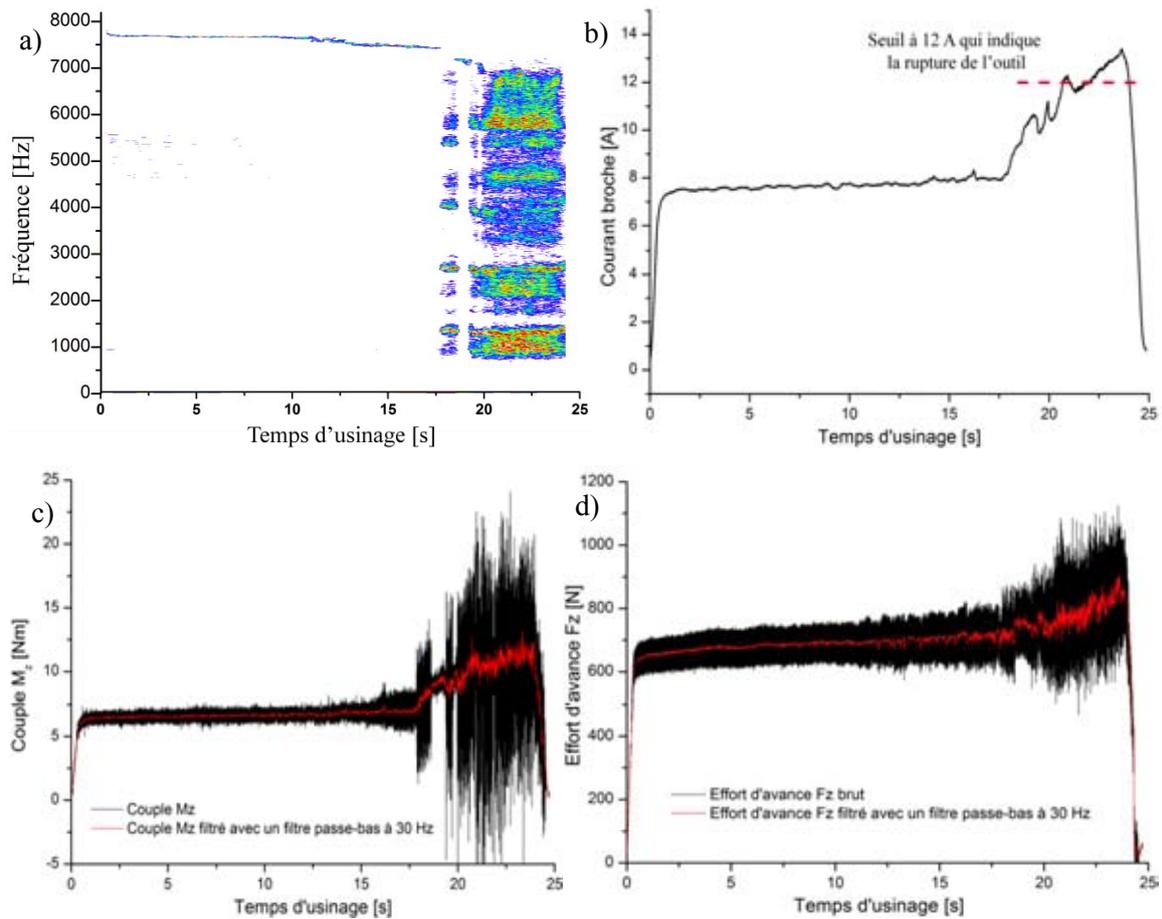


Figure IV.2.23 : Évolution des signaux pour un perçage fait à $V_c = 30$ m/min et $f = 0,15$ mm/tr, (a) diagramme temps-fréquence, (b) le courant broche, (c) le couple M_z et (d) l'effort d'avance F_z

La Figure IV.2.23 présente les signaux de surveillance pour un perçage réalisé à $V_c = 30$ m/min et $f = 0,15$ mm/tr. Ce perçage a été choisi parce que :

- le signal de l'accéléromètre (selon l'axe Z) n'a pas saturé et il offre des informations,
- l'évolution des signaux pour la première partie de l'usinage est proche d'un perçage qui génère une usure en dépouille.

Les signaux du courant de la broche, du couple et de l'effort d'avance (Figure IV.2.23.b, c et d) montrent un usinage « stable » jusqu'à environ 17 secondes. Sur le diagramme temps-fréquence, pour la partie « stable », la seule fréquence se trouve vers 7500 Hz avec une légère tendance à diminuer. Cette fréquence a été retrouvée aussi sur les essais qui génèrent une usure en dépouille, pour les hautes vitesses de coupe. L'explication probable est toujours donnée par l'existence d'une fréquence de torsion. L'effondrement de l'arête se fait après 17 s, quand les signaux relatifs aux efforts de coupe montrent une augmentation brutale d'environ 50 %. En ce qui concerne les fréquences, la Figure IV.2.23.a montre qu'après la rupture de l'outil coupant, le bruit fréquentiel est très élevé.

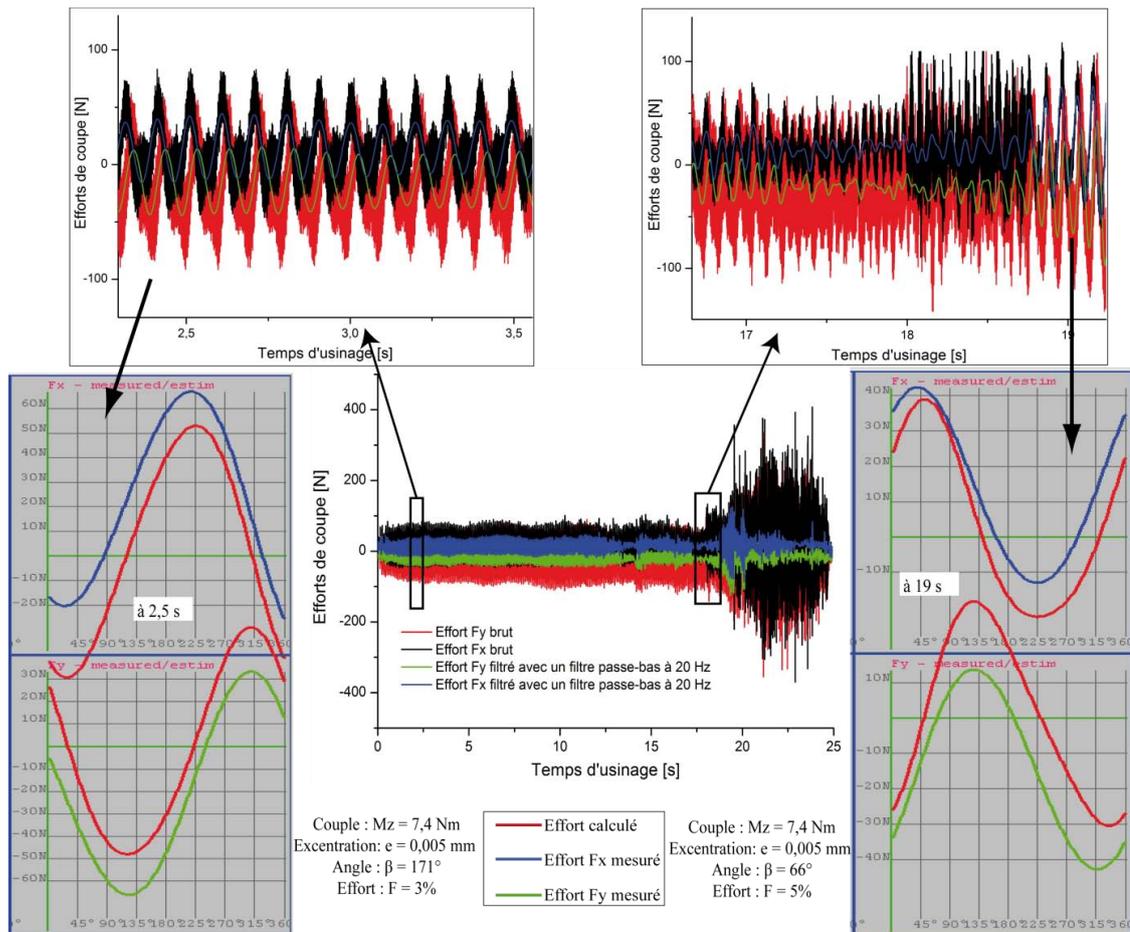


Figure IV.2.24 : Efforts de coupe pour le perçage réalisé à $V_c = 30 \text{ m/min}$ et $f = 0,15 \text{ mm/tr}$

Cependant, nous pouvons identifier le deuxième mode propre de l'outil (à 1340 Hz) excité par la coupe. Les efforts de coupe ainsi que le couple ont des niveaux plus importants et ils font apparaître les modes propres de la platine (à 1050 Hz et 6000Hz), au milieu de nombreuses fréquences. Comme précédemment, il est intéressant de regarder l'évolution des efforts Fx et Fy avant et après la dégradation de l'outil. Nous constatons une modification complète de la forme des signaux, une augmentation de variation des efforts entre les deux dents (5%) mais l'amplitude des efforts apportés par les deux dents n'est pas significative ici. L'interprétation suivante peut néanmoins être relevée. Jusqu'à 13 s, la typologie des signaux est sinusoïdale, influencée par la différence d'efforts entre les dents et par les faibles valeurs de l'excentration, visible sur la comparaison effectuée à $t = 2,5 \text{ s}$. Si initialement, l'effort sur la première dent est plus grand, au fur et à mesure que l'usure sur la deuxième dent augmente, la différence entre leur contribution devient plus petite et donc l'amplitude du signal diminue (vers 18 s d'usinage). Quand l'effondrement de l'arête de coupe se produit, l'effort sur la deuxième dent augmente rapidement et nous retrouvons l'évolution sinusoïdale des efforts mais cette fois-ci, plus perturbée. Ces résultats sont confirmés par les analyses réalisées à $t = 19 \text{ s}$ ($F = 5\%$ et $e = 0,005 \text{ mm}$).

Une conclusion importante émerge de l'analyse des efforts de coupe sur les exemples présentés jusqu'à maintenant. Ces signaux offrent des informations pertinentes sur les phénomènes rencontrés lors de l'usinage. En fonction de chaque contexte, les efforts de coupe peuvent être mis en relation avec la dégradation de l'outil coupant, mais il est délicat d'associer une « signature » différente de F_x et F_y pour chaque type d'usure. Ces éléments peuvent cependant apporter une analyse supplémentaire et redondante pour départager une ambiguïté.

Dans ce contexte particulier d'usure catastrophique, il nous semble évident que la mise en œuvre d'une surveillance d'usinage est facilitée quels que soient les signaux utilisés. Le courant de broche est une solution confortable comme l'amplitude vibratoire (RMS).

IV.2.4 Évolution des signaux pour les essais avec variation du contexte d'usinage

Il est nécessaire de s'intéresser à l'influence des perturbations d'usinage sur les signaux, afin de proposer finalement des stratégies de surveillance d'usinage robustes, intégrant l'ensemble des phénomènes potentiels au cours du perçage. En effet, il est probable que ces perturbations engendrent une pollution des signaux et gênent leur interprétation.

La Figure IV.2.25 montre l'intensité du courant de la broche pour les essais avec une coupure de lubrification (courbes noires et rouges) comparés avec un essai normal sans coupure (courbes bleues). Les quatre graphiques représentent l'intensité du courant de la broche selon la profondeur percée. L'intensité du courant de la broche a été utilisée dans cet exemple, car elle présente la même évolution que le couple filtré, mais ayant l'avantage d'être plus facile à obtenir (pas de platine piézométrique nécessaire). Les conditions de coupe CL1 à CL4 correspondent à une vitesse de coupe V_c 19-30 m/min et une avance f 0,1-0,2 mm/tr.

Les coupures de lubrification sont générées à 10 mm de l'entrée sur une longueur de 4 mm et sont facilement identifiables sur les graphiques par les deux baisses de l'intensité. Cette diminution est expliquée par l'arrêt de l'axe d'avance dû au temps d'interprétation de la commande par l'automate. Pendant cette courte période, il a été vérifié que l'outil reste dans la matière. Pour CL4, l'arrêt de l'avance est d'environ 0,05 s, ce qui correspond à un demi-tour fait par l'outil. La conséquence est la réduction de l'épaisseur du copeau de 0,1 mm à 0,05 mm et nous considérons que cet effet sur l'usure de l'outil est négligeable.

Pour CL1 ($V_c = 19$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr), les signaux ne montrent pas une influence introduite par les coupures de lubrification par rapport à un essai normal. L'intensité du courant de la broche a une évolution constante et seulement quelques « copeaux collés » peuvent être identifiés.

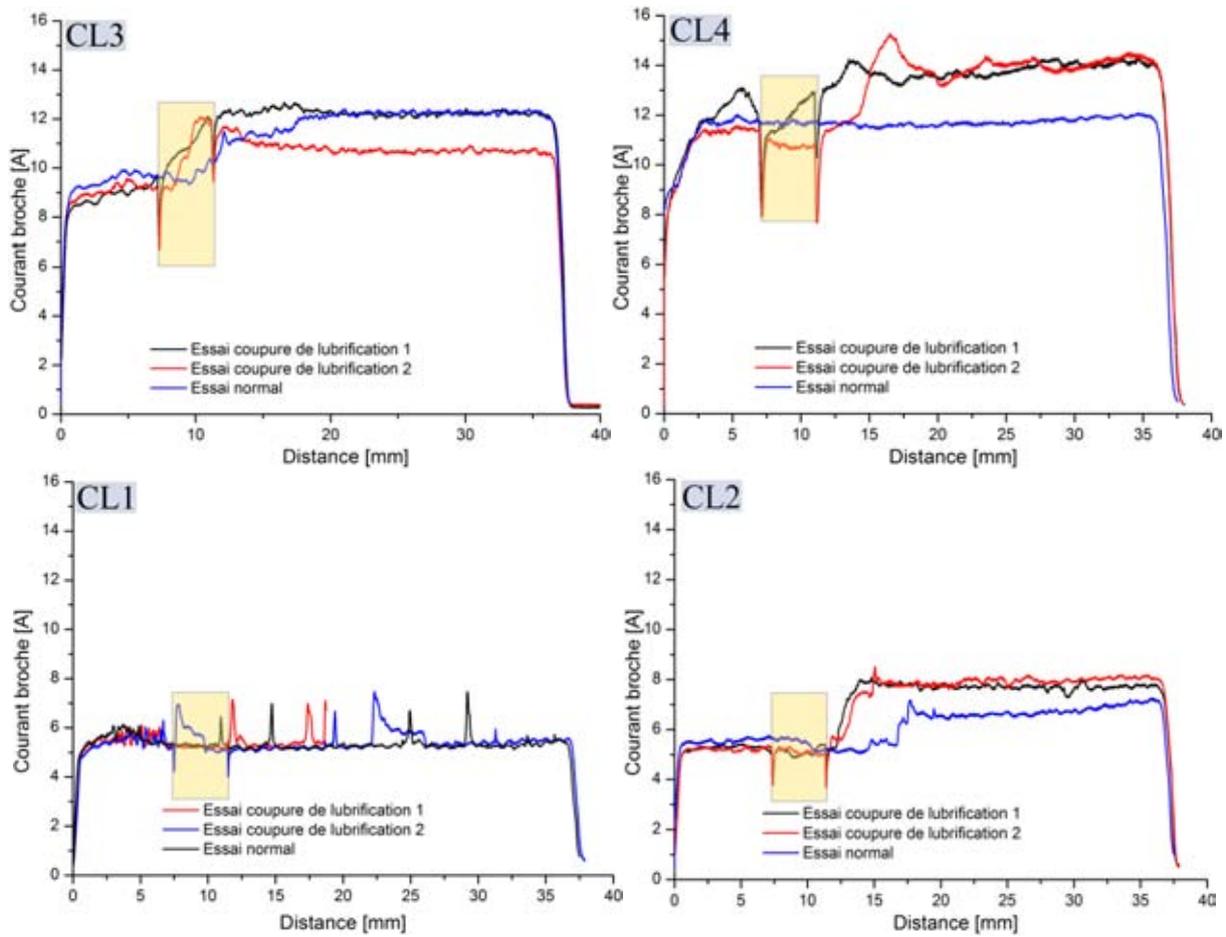


Figure IV.2.25 : Évolution du courant de la broche pour les essais avec et sans coupures de lubrification

Les conditions de coupe CL2 ($V_c = 30$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr) et CL3 ($V_c = 19$ m/min et $f = 0,2$ mm/tr) génèrent une augmentation de l'intensité du courant de la broche juste après la coupe de lubrification mais l'essai en contexte « normal » présente la même typologie. La différence se limite à l'endroit du décrochement du courant de broche. Ces résultats confirment l'évolution des signaux caractéristiques aux essais qui génèrent une usure en entaille.

Pour la condition de coupe la plus sévère CL4 ($V_c = 30$ m/min et $f = 0,2$ mm/tr), les signaux présentent la même typologie que l'usure catastrophique. Si l'influence de la coupe de lubrification semble plus significative sur le courant de broche, les niveaux d'efforts sont tels que le filtrage effectué sur la mesure de ce courant fausse la qualité du signal et seule la première zone (avant 3 secondes) est intéressante du point de vue surveillance ; juste avant que l'outil soit abimé.

La Figure IV.2.26.a présente le diagramme temps-fréquence pour un perçage fait dans les conditions CL1 ($V_c = 19$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr) et nous retrouvons nos résultats précédents (paragraphe IV.2.1.1). Le dernier aspect qui est mis en évidence par le diagramme temps-fréquence est le phénomène de copeau « coincé » (rectangles orange sur la figure). La Figure IV.2.26.b est le dernier exemple considéré pour illustrer l'évolution des signaux pour les essais avec une coupe de

lubrification (sur les conditions de coupe CL3). Sur cette figure, le couple brut ainsi que le signal filtré avec un filtre à 20 Hz confirme l'évolution définie antérieurement pour un perçage qui génère une usure en entaille.

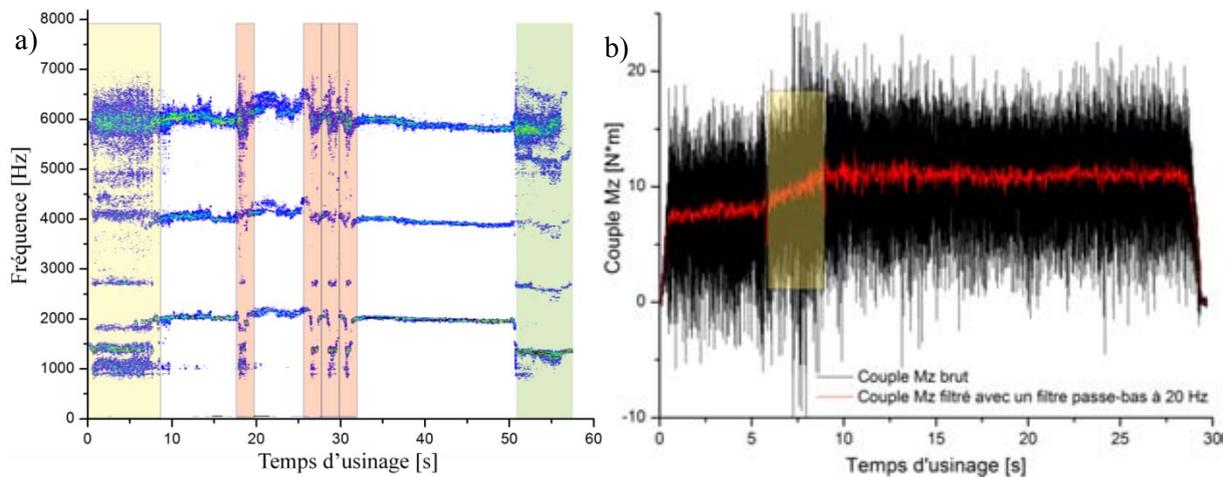


Figure IV.2.26 : (a) Diagramme temps-fréquence pour un perçage à CL1 et (b) Couple M_z pour un essai réalisé dans les conditions CL3

Les essais avec variation du contexte d'usinage permettent notamment l'étude et la compréhension de l'influence d'un défaut de positionnement sur les grandeurs physiques mesurées. La Figure IV.2.27 présente les résultats d'un perçage réalisé avec une vitesse de coupe de 15 m/min, une avance de 0,1 mm/tr, une dureté de 500 HV₃₀ et un défaut de positionnement de 0,05 mm sur l'axe X. Le diagramme temps-fréquence (Figure IV.2.27.a) est quasi-identique avec les résultats présentés dans la Figure IV.2.11.a.

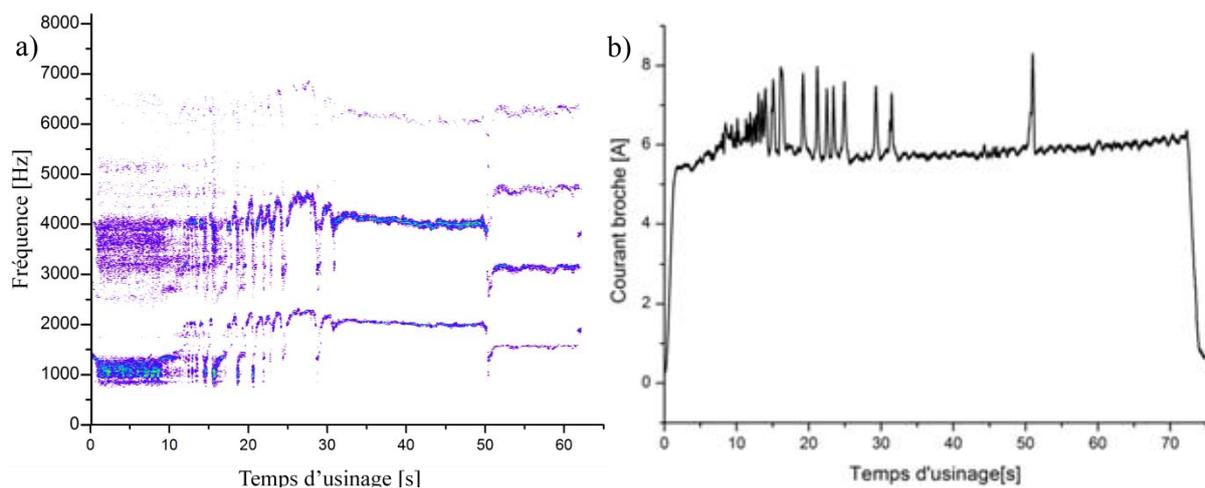


Figure IV.2.27 : Évolution des signaux pour un perçage réalisé avec la variation du contexte d'usinage sur les conditions de coupe $V_c = 15$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr (a) diagramme temps-fréquence (b) courant de la broche

Les résultats issus de ce diagramme, corroborés avec l'évolution du courant de la broche, montrent un problème d'évacuation de copeaux (les copeaux coincés) pour la zone bruitée comprise

entre 10 s et 35 s. Après 35 secondes, par rapport au niveau du courant de la broche et la présence du quatrième mode propre de l'outil (à 2000Hz), l'usinage est stable. Ensuite, après 50 s, les fréquences changent et l'outil vibre selon le troisième mode propre (1550 Hz). Cette évolution confirme que le seuil du $V_b = 0,06$ a été dépassé (pour ces essais, l'usure est de 0,074 mm).

De plus, le défaut de positionnement génère des efforts de coupe différents sur les deux dents, donc une asymétrie en ce qui concerne la coupe. Les résultats présentés dans la Figure IV.2.28 montrent une excentration de 0,085 mm, qui indique un battement important de l'outil qui se rajoute au défaut de positionnement déjà défini. Les sinusoïdes F_x et F_y sont légèrement déphasées, contrairement aux résultats précédents des modes de dégradation de l'outil. Pour ces conditions de coupe, le temps nécessaire pour que l'outil fasse un tour est de 0,19 s, mais ici la période est de 0,095 s. Donc, les efforts de coupe F_x et F_y sont directement influencés par la prise de passe radiale réelle et donc par le défaut de positionnement.

L'une des conséquences de cette perturbation est l'usure en dépouille, qui est différente sur les deux dents d'environ 8%. Par rapport à la valeur moyenne des efforts de coupe F_x , cette perturbation d'usinage peut être identifiée ; l'excentration produit un battement des efforts significatifs.

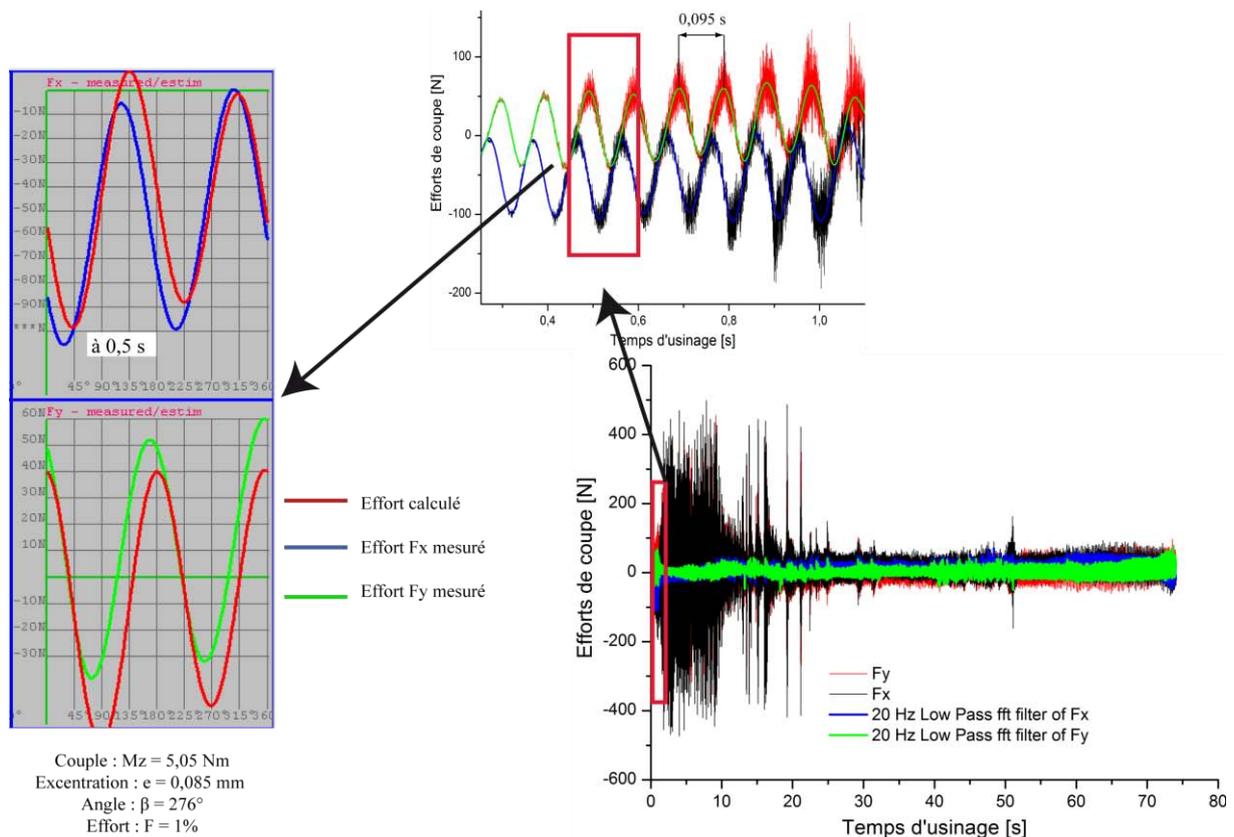


Figure IV.2.28 : Efforts de coupe pour un perçage réalisé avec la variation du contexte d'usinage sur les conditions de coupe $V_c = 15$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr

IV.3 Modélisation de l'usure

Les analyses précédentes ont montré que chaque mode de dégradation nécessite une interprétation spécifique des signaux et donc une technique de surveillance adaptée à chaque situation. Une étude approfondie des relations entre l'usure de l'outil et les grandeurs physiques mesurées lors de l'usinage a été faite, afin de garantir le suivi de l'usure d'outil. Pour cela, plusieurs exemples (selon les quatre fenêtres définies antérieurement - Figure IV.1.11) ont été considérés. Selon chaque cas analysé, les signaux ont montré leur sensibilité pour détecter un problème de l'outil. Mais ces corrélations sont délicates sur toute la plage de conditions de coupe testées. Ceci est dû au nombre de paramètres, aux fluctuations, à la précision des systèmes de mesures ou bien à diverses perturbations d'usinage non prises en compte.

Un exemple a été choisi afin d'illustrer cette difficulté. La Figure IV.3.1 présente le diagramme temps-fréquence et le courant de la broche pour un essai réalisé à une vitesse de coupe de 15 m/min et une avance de 0,15 mm/tr. Sur la cartographie de modes de dégradation, ces conditions de coupe se situent dans la zone caractérisée par une usure en entaille. Dans ce cas, l'évolution des signaux est différente par rapport à l'exemple donné dans le paragraphe IV.2.2. L'augmentation de l'avance influence la section du copeau, et donc le contact entre l'outil et la pièce change modifiant ainsi le comportement dynamique du système usinant [Wehbe 10].

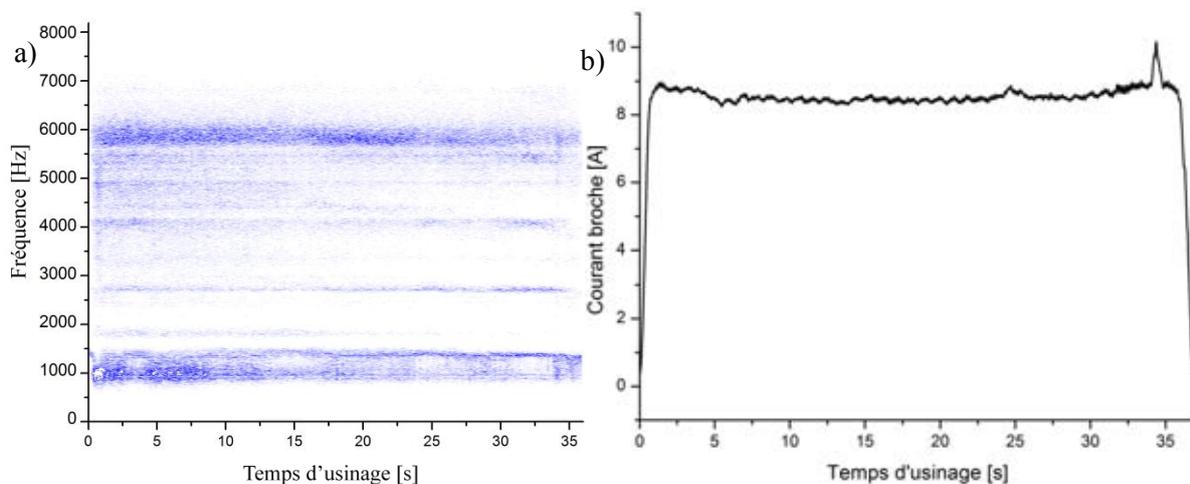


Figure IV.3.1 : (a) Diagramme temps-fréquence et (b) Évolution du courant de la broche pour un perçage réalisé à $V_c = 15 \text{ m/min}$ et $f = 0,2 \text{ mm/tr}$

Dans certains cas facilitant l'interprétation, nous obtiendrons une variation plus ou moins linéaire des fréquences mesurées. Dans d'autres cas, le bruit généré par la coupe (Figure IV.3.1.a) empêchera une lecture claire des phénomènes. Un autre motif pour lequel nous avons choisi cet exemple est lié à l'évolution du courant de la broche (Figure IV.3.1.b). Pour les conditions de coupe qui génèrent une usure en entaille, la typologie du signal de courant de la broche était associée à une

augmentation brusque (décrochement). Au contraire, dans ce cas, le courant de la broche est stable et présente seulement un pic de consommation vers la fin. Celui-ci semble correspondre à un copeau coincé, mais une autre hypothèse reste aussi valable : la génération d'une entaille. Mais, comme ce phénomène se produit à la fin du perçage il est possible que l'augmentation introduite par l'entaille soit atténuée par la diminution des efforts quand l'outil sort de la matière. Donc, la conclusion de cet exemple est qu'il peut exister des cas où les signaux fournissent des informations contradictoires ou difficilement interprétables. Alors, il est nécessaire d'intégrer dans l'étude une deuxième phase complémentaire : l'approche statistique, de type « boîte noire » sensée fiabiliser la méthode.

La modélisation de l'usure par les signaux de surveillance a été adoptée dans le projet ACCENT comme étape dans la démarche pour la prédiction de l'intégrité de surface, en se basant sur une double méthodologie : approches phénoménologique et statistique. L'association de ces deux approches complémentaires et la redondance d'informations permettront de fiabiliser les stratégies de surveillance, à l'image des techniques employées dans divers secteurs.

Tableau IV.3.1 : Filtres passe bande sur les signaux des accéléromètres

Fréquences observées lors de l'usinage	Fréquences identifiées par		Filtres passe bande
950-1050 Hz	912 Hz	Platine $f_0(x,y)$	900 – 1100 Hz
1290-1420 Hz	1320	Mode 2 (Broche + Outil)	1250 – 1440 Hz
1490-1585 Hz	1556	Mode 3 (Broche + Outil)	1460 – 1600 Hz
1900-2060 Hz	1975	Mode 4 (Broche + Outil)	1900 – 2100 Hz
5930-6050 Hz	6000	Platine $f_0(Fz)$	5900 – 6100 Hz

L'analyse des signaux réalisée jusqu'à maintenant offre des informations importantes sur les critères statistiques qui doivent être choisis. Par exemple, sur les signaux des accéléromètres, nous avons décidé d'utiliser cinq filtres par bande passante et ensuite d'extraire les critères. Cette approche a été utilisée aussi par [Dutilh 11] afin de ne prendre en compte que les informations importantes dans la modélisation des critères d'intégrité de surface. Dans notre cas, la justification de ces filtres est donnée par l'analyse fréquentielle faite dans la deuxième partie de ce chapitre, qui a mis en avant les corrélations entre l'apparition de ces fréquences et l'usure. Le Tableau IV.3.1 présente les fréquences et les filtres associés. La largeur de filtres a été imposée par rapport à l'évolution observée pendant l'usinage.

Finalement, la base de données est construite à partir des critères présentés dans le Tableau IV.3.2. Dans ce tableau quelques facteurs ne sont pas pris en compte. Le courant broche et l'intensité de trois axes sont déjà filtrés et seulement la valeur moyenne est récupérable. Le Skewness des signaux filtrés est égal à zéro (il est calculé pour un signal sinusoïdal à la fréquence de filtrage).

Tableau IV.3.2 : Critères statistiques relevés sur les signaux de surveillance

Capteurs de surveillance		Moyenne	Écart type	RMS	Skewness	Kurtosis
Accéléromètres	Axe X	A _x	SD A _x	RMS A _x	Sk A _x	Kurt A _x
	Axe Y	A _y	SD A _y	RMS A _y	Sk A _y	Kurt A _y
	Axe Z	A _z	SD A _z	RMS A _z	Sk A _z	Kurt A _z
	Axe X,Y,Z filtré à 900-1100 Hz	A _{x,y,z} 1000	SD A _{x,y,z} 1000	RMS A _{x,y,z} 1000	-	Kurt A _{x,y,z} 1000
	Axe X,Y,Z filtré à 1250-1450 Hz	A _{x,y,z} 1350	SD A _{x,y,z} 1350	RMS A _{x,y,z} 1350	-	Kurt A _{x,y,z} 1350
	Axe X,Y,Z filtré à 1450-1600 Hz	A _{x,y,z} 1500	SD A _{x,y,z} 1500	RMS A _{x,y,z} 1500	-	Kurt A _{x,y,z} 1500
	Axe X,Y,Z filtré à 1900-2100 Hz	A _{x,y,z} 2000	SD A _{x,y,z} 2000	RMS A _{x,y,z} 2000	-	Kurt A _{x,y,z} 2000
	Axe X,Y,Z filtré à 5900-6100 Hz	A _{x,y,z} 6000	SD A _{x,y,z} 6000	RMS A _{x,y,z} 6000	-	Kurt A _{x,y,z} 6000
Siemens	Courant broche	I _{broche}	-	-	-	-
	Puissance broche	P _{broche}	SD P _{broche}	RMS P _{broche}	SK P _{broche}	Kurt P _{broche}
	Intensité Axe X	I _x	-	-	-	-
	Intensité Axe Y	I _y	-	-	-	-
	Intensité Axe Z	I _z	-	-	-	-
Platine de mesure Kistler	Couple Mz	M _z	SD M _z	RMS M _z	Sk M _z	Kurt M _z
	Puissance calculée	P _{calc}	SD P _{calc}	RMS P _{calc}	Sk P _{calc}	Kurt P _{calc}
	Effort Fz	F _z	SD F _z	RMS F _z	Sk F _z	Kurt F _z
	Effort Fy	F _y	SD F _y	RMS F _y	Sk F _y	Kurt F _y
	Effort Fy filtré à 20 Hz	F _y _{filtré}	SD F _y _{filtré}	RMS F _y _{filtré}	-	Kurt F _y _{filtré}
	Effort Fx	F _x	SD F _x	RMS F _x	Sk F _x	Kurt F _x
	Effort Fx filtré à 20 Hz	F _x _{filtré}	SD F _x _{filtré}	RMS F _x _{filtré}	-	Kurt F _x _{filtré}

En ce qui concerne l'usure, les critères retenus pour la modélisation sont :

- l'usure en dépouille – V_b [mm],

- l'entaille – la surface entaillée [mm²],
- l'usure des listels – la hauteur usée [mm].

L'usure catastrophique n'est pas prise en compte puisque selon les résultats précédents, elle est aisée à surveiller par une lecture directe du courant broche ou des fréquences mesurées.

La base de données définie est composée d'un nombre très important de variables (plus de 100) et les interprétations ou les corrélations directes deviennent difficiles. Afin de détecter certaines liaisons entre l'usure et les critères déterminés sur les signaux, la matrice de corrélation de Pearson est utilisée. Cette méthode permet de cibler les critères pertinents et ensuite, en utilisant des modèles mathématiques (par exemple les régressions linéaires multiples), les réponses seront modélisées.

L'usure en dépouille (Vb), l'usure des listels et l'usure en entaille ont été exprimées sous la forme de loi de puissance. Les modèles ont été établis à partir des valeurs mesurées sur les essais qui font l'objet de la cartographie des modes de dégradation (à l'exception des conditions de coupe qui génèrent la rupture de l'outil). Ensuite, ces valeurs ont été comparées avec les mesures faites sur les essais de reproductibilité. Le coefficient de détermination R² et le pourcentage d'erreur ont été utilisés afin de déterminer la qualité des modèles. Ces trois modèles sont présentés et discutés :

- **L'usure en dépouille**

Pour le Vb, les facteurs les plus influents montrés par la matrice de corrélation sont l'avance, l'écart type sur la puissance calculée à partir de la platine de mesure d'efforts et la valeur moyenne du courant de la broche. Finalement, par une régression linéaire multiple, les coefficients ont été trouvés et la forme finale est présentée dans l'équation ci-dessous.

équation IV.3.1
$$Vb = -6,022 \cdot f^{-0,406} \cdot SD P_{calc}^{0,497} \cdot Mean I_{broche}^{0,226}$$

L'erreur moyenne entre les valeurs mesurées et celles prédites avec ce modèle (Figure IV.3.2.a) est d'environ 8,8 %. Pour vérifier la prédiction de l'usure en dépouille avec ce modèle, nous l'avons appliqué sur d'autres essais de reproductibilité. Les résultats sont présentés dans la Figure IV.3.2.b. et dans ce cas nous obtenons un coefficient de détermination R² assez élevé (0,93) et une erreur relative de 14%. Même si entre deux essais réalisés de répétabilité, le Vb peut varier de 40 %, les critères déterminés sur les signaux sont assez sensibles pour détecter le changement. En tenant compte de l'erreur de mesure, le modèle défini pour le Vb peut être considéré capable de prédire ce type usure. Pour augmenter la robustesse, nous pouvons de plus y associer les résultats précédents (sur la variation de fréquence par exemple), et ainsi vérifier deux conditions : loi précédente et présence des fréquences caractéristiques.

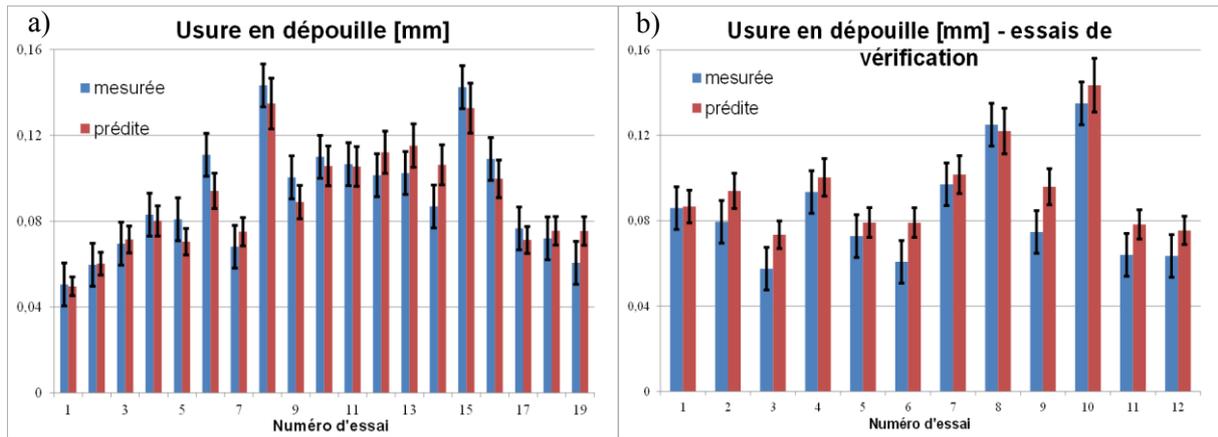


Figure IV.3.2 : Modélisation de l'usure en dépouille, (a) essais sur lequel a été défini le modèle et (b) essais de vérification

▪ L'usure des listels

Pour l'usure des listels, les facteurs influents pris en compte pour construire le modèle sont l'écart type sur la puissance calculée à partir de la platine de mesure d'efforts, la valeur moyenne sur le courant de l'axe Z et l'écart type sur le signal de l'accéléromètre X, filtré par rapport au quatrième mode propre de l'outil. De la même manière que pour l'usure en dépouille, par une régression linéaire multiple, l'équation IV.3.2 a été déterminée. La comparaison entre les valeurs mesurées et celles obtenues avec le modèle (Figure IV.3.3.a) offre une erreur relative de 7,8 %. Sur les essais de vérification (Figure IV.3.3.b), le coefficient de détermination R^2 est égal à 0,96 et l'erreur est de 4,7 %. Effectivement, les résultats dans ce cas sont relativement précis et ce modèle peut être utilisé pour prédire l'usure des listels.

équation IV.3.2
$$\text{Listel} = -1,47 \cdot \text{SD } P_{\text{calc}}^{0,135} \cdot \text{Mean Iz}^{-0,056} \cdot \text{SD Axe X}_{1900-2100}^{0,146}$$

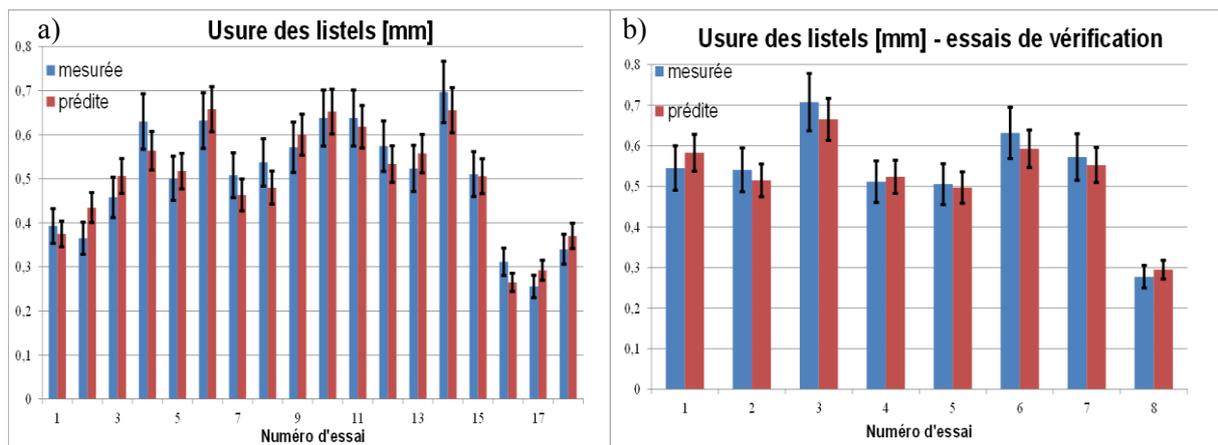


Figure IV.3.3 : Modélisation de l'usure des listels, (a) essais sur lequel a été défini le modèle et (b) essais de vérification

▪ L'usure en entaille

Ce dernier type d'usure a été modélisé de la même manière et la matrice de corrélation de Pearson a mis en évidence que l'écart type sur le couple, sur la puissance calculée et sur le signal de l'accéléromètre X filtré par rapport au quatrième mode de l'outil, ainsi que le Kurtosis de l'effort d'avance et la valeur moyenne du courant de la broche offrent les plus importants coefficients. L'équation IV.3.3 montre la forme finale de ce modèle.

$$\text{équation IV.3.3} \quad \text{Entaille} = -15,28 \cdot \text{SD Mz}^{-1,26} \cdot \text{SD P}_{\text{calc}}^{1,664} \cdot \text{Kurt Fz}^{0,626} \cdot \text{SD Axe X}_{1900-2100}^{1,487} \cdot \text{Mean I}_{\text{broche}}^{0,336}$$

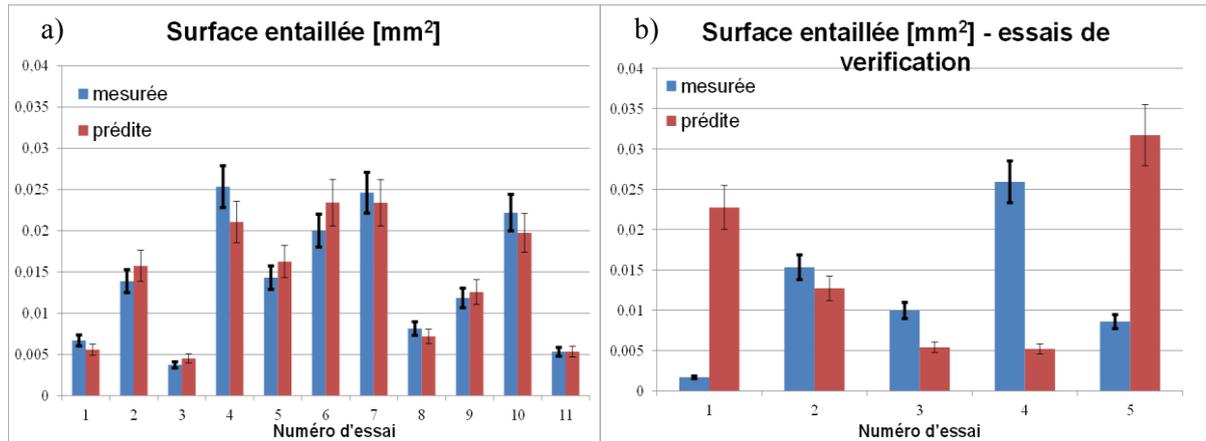


Figure IV.3.4 : Modélisation de l'usure en entaille (a) essais sur lequel a été défini le modèle et (b) essais de vérification

L'erreur obtenue sur le modèle est de 12 %, une valeur proche de l'erreur de mesure qui est de 10 %. Malgré ces bons résultats, les essais de vérification mettent en évidence les limites de cette approche (le coefficient de détermination R^2 est 0,4). La formation d'une entaille est un mécanisme très complexe et ce type de modélisation n'est pas approprié. Aussi, le nombre d'essais utilisés est relativement faible (les problèmes sur l'acquisition des signaux ont limité les possibilités) pour obtenir un modèle fiable. Une autre possibilité sera l'utilisation des réseaux neuronaux, mais l'inconvénient principal de cette technique est l'utilisation d'un nombre très importants d'essais. En effet, une étude plus approfondie sur l'usure en entaille dans le perçage de l'Udimet[®] 720 LI est nécessaire et pourra constituer l'une des perspectives de ces travaux de thèse. En attendant, nous utiliserons les résultats complémentaires précédents (apparition de fréquences caractéristiques, variation des efforts F_x et F_y et modification du courant broche) pour fiabiliser cette surveillance de l'usure en entaille.

Le quatrième chapitre représente une analyse des résultats issus de l'étude expérimentale. Les modes de dégradation caractéristiques à ce processus ont été identifiés. Un aspect très important est lié à la sensibilité des grandeurs physiques à détecter les types d'usure d'outil. En fonction de chaque usure, les signaux offrent une quantité d'informations qui sera utilisé pour développer une technique de surveillance. Pour cela, dans le cinquième chapitre une classification de chaque système de mesure sera faite et à partir de ces résultats, une méthode de surveillance de l'usure sera proposée.

Synthèse

Les éléments principaux du quatrième chapitre peuvent être résumés comme suit :

- identification et analyse de modes de dégradation,
- analyse des signaux correspondants en fonction de chaque type d'usure,
- modélisation de l'usure selon la base de données expérimentales et les matrices de corrélation de Pearson.

L'étude expérimentale a permis l'identification des modes de dégradation dans le perçage de l'Udimet® 720 LI, sans et avec perturbations d'usinage. Les approches retenues étaient contraintes par la faible disponibilité matière et la nécessité d'obtenir des résultats en minimisant les essais (essais d'identification et de reproductibilité). Les types d'usures sont la conséquence des conditions de coupe et du contexte de perçage dans un avant-trou. Pour le premier cas étudié, une usure en dépouille est observée (le revêtement de l'outil est enlevé par abrasion). Plus les conditions de coupe augmentent, plus la pression sur l'arête de coupe va s'accroître et provoquer une entaille. À cette issue, la rupture de l'outil apparaît quand les efforts de coupe deviennent trop importants.

Deux modes de dégradation sont toujours visibles : l'usure des listels qui est provoquée par le frottement entre l'outil et la paroi de la pièce et l'usure de la face de coupe (dû au frottement entre l'outil et le copeau) qui n'était pas inclus dans ces travaux. Sur l'ensemble des conditions de coupe testées et en fonction des résultats, une cartographie des modes de dégradation a été définie. Dans chaque zone, les différentes grandeurs physiques (efforts et couple de la platine de mesure, courant broche et fréquences relevées par les accéléromètres) ont été interprétées selon une approche phénoménologique. Ce travail est essentiel avant de passer à la modélisation des modes de dégradation, afin de comprendre pourquoi les signaux évoluent ainsi.

Cette description a mis en avant les besoins de définir des techniques de surveillance selon chaque type d'usure, puisque les signaux évoluent spécifiquement. Ensuite, les essais avec prise en compte des perturbations d'usinage ont montré que :

- les coupures de lubrification n'ont pas une influence significative sur l'usure et les résultats suivent les évolutions définies pour le contexte sans perturbation,
- parmi les paramètres testés pour les essais avec la variation du contexte d'usinage, seule la position de l'outil par rapport à l'avant-trou et le pourcentage de l'émulsion semblent avoir un effet prépondérant sur l'usure.

Il sera donc important d'intégrer ces constatations dans la méthode de surveillance de l'usinage.

La deuxième partie de ce chapitre a traité l'évolution des signaux selon les quatre zones définies. Cette analyse a eu comme objectif principal l'identification de la « signature » de chaque type d'usure sur les signaux (exemple des fréquences caractéristiques de l'usure en dépouille, en entaille... ou de l'évolution du courant broche selon le type d'usure). Par exemple pour l'usure en dépouille, le courant

de la broche présente une faible augmentation, le quatrième mode propre de l'outil (environ 2000 Hz) et les harmoniques sont retrouvés pour ce type d'usure. En fonction du niveau du V_b , un changement fréquentiel sera visible (l'apparition du troisième mode propre de l'outil) pour les valeurs supérieures à 0,06 mm. Deux contextes différents (essais à faibles et hautes vitesses de coupe) peuvent générer une usure en dépouille presque identique, l'étude de grandeurs physiques enregistrées pendant l'usinage a notamment permis de distinguer les comportements spécifiques dans ces deux zones. À haute vitesse de coupe, les phénomènes thermiques semblent prépondérants et pourront avoir un impact négatif sur l'intégrité de surface. La « signature » des essais qui ont généré une usure en entaille est distincte du mode précédent et cela montre que les signaux sont capables de détecter ce type d'usure. L'influence de l'usure en entaille sur les signaux est donnée par l'augmentation brutale du courant de la broche (décrochement entre 15 et 50%), par l'apparition du deuxième mode propre de l'outil (à 1340 Hz) et par les modes propres de la platine de mesure à 1000 Hz et 6045 Hz. Enfin, l'usure catastrophique a une influence singulière sur les signaux, voire très simple à identifier (rapide augmentation du courant broche, bruit fréquentiel). L'étude faite sur les essais avec perturbations d'usinage se situe dans la même logique que dans le contexte « normal » :

- les coupures de lubrification n'apportent pas un changement sur l'évolution des signaux,
- le défaut de positionnement peut être détecté en utilisant les efforts de coupe.

Un autre résultat issu de cette analyse est lié à l'identification d'une perturbation d'usinage rencontrée sur la plupart d'essais : « les copeaux coincés, collés ou incrustés ». La signature de ce phénomène sur les signaux a été clairement mise en évidence et l'importance de ce résultat est à associer à son impact sur l'intégrité de surface et la tenue en fatigue des pièces.

L'étude des signaux a notamment montré que les grandeurs physiques peuvent détecter une variation de l'état de l'outil. En fonction de chaque type d'usure, les signaux peuvent être représentatifs des phénomènes rencontrés. Malgré cette conclusion, il peut exister certaines situations, où l'interprétation des résultats est beaucoup plus délicate et où les signaux offrent des informations qui ne sont pas claires. Dans ce cas, il est nécessaire de s'appuyer sur une approche statistique (base de données et modélisation «boite noire ») et de définir des modèles pour prédire le niveau d'usure. Dans ces travaux, nous avons choisi d'utiliser la matrice de corrélation de Pearson afin de chercher les critères pertinents, déterminés sur les signaux pour modéliser l'usure. Trois modèles sont proposés (pour l'usure en dépouille, en listels et en entaille). Les deux premiers offrent des bons résultats pour la prédiction du niveau d'usure, tandis que les résultats du troisième sont plutôt médiocres. Une perspective de nos travaux serait d'approfondir la modélisation de l'usure en entaille, avec par exemple, les réseaux neuronaux mais le frein dans notre problématique reste la disponibilité matière, très délicate pour ce matériau.

Face à l'ensemble de nos résultats, complémentaires par l'analyse phénoménologique et l'analyse statistique (au sens de l'exploitation de la base de données expérimentales par régression linéaire), une piste de technique de surveillance nous semble la plus intéressante. Selon chaque situation, l'utilisation de l'une ou de l'autre approche, ou le couplage des deux, peut apporter une stratégie de surveillance d'usinage la plus robuste.

La dernière phase de nos travaux consiste donc à classifier la sensibilité des signaux pour détecter l'usure de l'outil, à isoler ou gérer les événements des signaux antagonistes (pour caractériser les différents modes de dégradation selon les zones) et à construire une technique de surveillance à partir de ces résultats, tout en privilégiant les capteurs "industriellement compatibles" dans le sens de leur facilité d'implantation et de leur fiabilité. Cette partie sera détaillée dans le cinquième chapitre.

Chapitre V

V. Proposition de stratégies de surveillance

Introduction	138
V.1 Problématiques	139
V.1.1 Surveillance	139
V.1.2 Décision	139
V.2 Précision de la méthode	140
V.2.1 Applicabilité	140
V.2.2 Robustesse	141
V.2.2.1 Aspect phénoménologique	141
V.2.2.2 Base de données	143
V.3 Détections envisageables	144
V.3.1 Choix de capteurs	144
V.3.2 Les perturbations d'usinage	145
V.3.3 L'usure en dépouille	148
V.3.4 L'usure en entaille	149
V.3.5 L'usure catastrophique	150
V.4 Proposition d'un algorithme de détection	151
Synthèse	153

Introduction

L'objectif de ce dernier chapitre est de proposer une stratégie de surveillance de l'usure d'outil dans le perçage de l'Udimet[®] 720 LI, intégrant les perturbations d'usinage et basé sur les résultats des chapitres précédents. Après les problématiques de la surveillance d'un procédé rappelées, nous nous intéressons à la précision de la méthode, dans le sens de son applicabilité et de sa robustesse. Pour le suivi de l'usinage, nous avons privilégié deux techniques : l'analyse directe des phénomènes physiques afin d'exploiter directement des signaux pour informer d'une situation (dégradation de l'outil) et l'approche de type "statistique" (modèles d'usure basés sur l'ensemble des essais). Nous présentons en quelques exemples l'application de ces techniques. Enfin, en fonction des besoins industriels, le choix de capteurs à privilégier et des exemples de stratégies de surveillance sont ensuite proposés.

V.1 Problématiques

La surveillance des procédés se généralise aujourd'hui à de nombreux domaines, possédant chacun ses spécificités. De ce fait, les techniques de surveillance peuvent être fondamentalement différentes sur des domaines très vastes, mais il est possible de synthétiser leur approche selon deux aspects principaux : surveillance et décision.

V.1.1 Surveillance

Le projet européen ACCENT a comme principal objectif la mise en place des techniques de surveillance d'usinage afin de sécuriser la fabrication et simplifier la validation des pièces critiques des moteurs aéronautiques. Dans ce contexte, l'utilisation de la surveillance est appliquée pour la détection de toutes anomalies survenant pendant l'usinage, affectant l'intégrité de surface :

- ***l'évacuation des copeaux***. Dans le cadre du perçage, lors des analyses réalisées dans le quatrième chapitre, il a été démontré l'impact négatif de cette perturbation sur l'intégrité de la surface usinée. Il s'agit principalement de copeaux incrustés ou bien de valeurs de rugosité qui ne respectent pas les critères imposés sur les pièces,
- ***l'usure de l'outil***. La dégradation de l'outil coupant peut introduire des anomalies d'usinage dans les pièces fabriquées (ZAT, couches amorphes...) ou simplement une non-fiabilité du procédé.

V.1.2 Décision

La surveillance d'un procédé doit permettre, soit de stocker des informations relatives à une pièce fabriquée, soit de prendre une décision en fonction de l'évolution du procédé :

- ***la traçabilité*** – concerne l'enregistrement de grandeurs physiques correspondantes à chaque pièce réalisée. Lors de problèmes moteurs (ou au pire lors d'un accident), les informations stockées peuvent être utilisées de manière à vérifier si des anomalies ont été générées pendant la phase de fabrication, influençant par la suite le fonctionnement du moteur,
- ***l'information pendant le processus d'usinage (alarme)*** – peut être appliquée pour signaler l'apparition d'une anomalie pendant le procédé ou lors de la dérive de l'usinage par rapport à un fonctionnement « normal »,
- ***le "monitoring" ou l'action pendant le processus*** – plusieurs possibilités sont envisageables :
 - ***l'arrêt du processus*** – cette action peut être réalisée si l'usure dépasse les valeurs imposées par des seuils, ou si un ou plusieurs critères d'intégrité matière ne se situent plus dans les limites acceptables,

- *la correction entre les opérations* – limitée à un repositionnement de l'outil entre deux opérations pour corriger un problème dimensionnel sur l'opération antérieure ou une modification des conditions de coupe suite à des perturbations du procédé non immédiatement corrigeables (exemple du pourcentage d'émulsion),
- *la correction en temps réel* – cette action est la plus délicate à mettre en œuvre, car elle suppose l'intervention directe sur les paramètres machines afin de compenser, limiter ou bien éviter les conséquences d'un événement inopiné. Les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance) semblent les seuls paramètres modifiables sans remise en cause de la gamme d'usinage.

L'ensemble de ces décisions nécessite la maîtrise de toutes les relations entre le contexte d'usinage, les critères de sortie choisis (usure, intégrité de matière, etc.) et les grandeurs physiques mesurées.

V.2 Précision de la méthode

V.2.1 Applicabilité

Par rapport aux approches présentées ci-dessus, la demande des industriels dans le cadre du projet ACCENT est principalement centrée sur la traçabilité des procédés suite aux nouvelles directives européennes (cf. chapitre I). Nous privilégions donc l'utilisation d'alarme pour signaler une dégradation de l'outil coupant. Cependant, notre démarche peut être employée pour un arrêt du processus de coupe et une correction en temps réel des conditions de coupe, afin de retomber dans une fenêtre de conditions plus favorable.

Notre méthode de surveillance de l'usinage est construite sur deux approches complémentaires :

- ***Approche phénoménologique*** – les phénomènes rencontrés lors de l'usinage sont directement explicités par les grandeurs physiques mesurées. Prenons l'exemple de l'usure en entaille, l'augmentation de la surface de contact entre l'outil et la pièce est un phénomène rapide qui est visible sur les signaux par une augmentation brutale de la puissance consommée. Pour ce cas particulier, nous pouvons affirmer qu'une augmentation subite de la puissance, sans retour à la moyenne initiale, est représentative pour cette dégradation de l'outil. Les résultats présentés dans le quatrième chapitre ont montré qu'en fonction de chaque situation (les fenêtres définies pour chaque mode de dégradation), il existe une « signature » distincte de chaque signal,

- **Approche par modèles issus de la base de données** – cette approche de type « boîte noire » est développée à partir des données statistiques extraites sur les signaux de surveillance. Dans cette approche, les paramètres influents sont dictés par la matrice de corrélation de Pearson et les modèles sont exprimés pour adhérer au mieux aux résultats expérimentaux. Il n'y a donc plus d'explication physique directe. Dans ce cas, l'utilisation des critères comme le skewness, le kurtosis, etc. rend l'interprétation physique des phénomènes délicate. Comme déjà mentionné dans la partie dédiée à la modélisation de l'usure, il existe certains cas où l'approche phénoménologique ne peut pas être appliquée car les phénomènes sont complexes et surabondants. Par exemple, dans 25 % des cas, l'usure en entaille n'est pas soulignée par une variation de puissance. Ces situations nécessitent l'exploitation de la base de données afin de surveiller le procédé.

V.2.2 Robustesse

Traditionnellement, la robustesse d'une méthode peut être obtenue par la réalisation d'essais de validation et la caractérisation d'une plage d'imprécision sur chaque grandeur physique. Mais dans notre contexte d'étude, il est difficile de multiplier les essais pour garantir la reproductibilité (vu le coût et l'indisponibilité de la matière). Dans ce cas, nous avons choisi de garantir la robustesse par une redondance des signaux de surveillance, basée sur l'étude phénoménologique et aussi sur l'analyse statistique de la base de données. L'expression de la précision des modèles de surveillance s'appuie sur la corrélation entre leurs résultats et notre base de données expérimentale qui contient 103 essais d'usinage avec les signaux traités. Pour chaque relation identifiée lors des analyses entre les modes de dégradation et les signaux, la probabilité de détection d'un événement est calculée. Les pourcentages sont obtenus par le rapport entre le nombre de cas où la signature est caractéristique du phénomène étudié (dépouille, entaille, etc.) sur le nombre total d'essais présentant ce phénomène.

V.2.2.1 Aspect phénoménologique

Pour l'ensemble des critères de suivi, nous décrivons par la suite les signaux à surveiller, les valeurs attendues et la fiabilité de la surveillance.

Le phénomène de « copeaux coincés, collés ou incrustés » :

- association entre l'augmentation du courant de la broche (entre 13 et 50%) et l'apparition du deuxième mode propre de l'outil et le mode propre de la platine
 $f_0(x,y)$: Probabilité de détection **P(copeaux) = 97 %** (40 sur 48 essais),

Usure en dépouille :

- courant de la broche :

- évolution progressive de la valeur moyenne avec une augmentation entre l'entrée et la sortie du trou de 10 % : Probabilité de détection $P(\text{Im1}) = 97 \%$ (37 sur 38 essais),
- pour la deuxième zone d'usure en dépouille, la valeur moyenne du courant de la broche doit augmenter progressivement et rester inférieure à 20% par rapport à l'entrée : Probabilité de détection $P(\text{Im2}) = 80 \%$ (4 sur 5 essais).
- fréquences :
 - apparition du quatrième mode propre de l'outil (environ 1975 Hz) avec une variation à $\pm 5 \%$: Probabilité de détection $P(1975 \text{ Hz}) = 83,8 \%$ (26 sur 31 essais),
 - pour une usure en Vb qui dépasse 0,06 mm, le troisième mode propre de l'outil (environ 1530 Hz) avec une variation de $\pm 3 \%$ est visible : Probabilité de détection $P(1530 \text{ Hz}) = 45,1 \%$ (14 sur 31 essais),
 - l'apparition des hautes fréquences (7500 Hz) indique une usure en dépouille dans la zone II : Probabilité de détection $P(7500 \text{ Hz}) = 100 \%$ (5 sur 5 essais).

Les probabilités de détection calculées sont basées sur une totale indépendance des signaux, ce qui est bien sûr discutable de par les grandeurs physiques mesurées. En effet, une vibration et un courant de broche sont liés par la même source, une augmentation des contraintes dans le processus de coupe. Dans cette première approche, nous nous limitons à cette hypothèse d'indépendance pour exprimer les probabilités de détection, et nous utilisons les signaux en parallèle pour améliorer la prédiction des phénomènes. C'est-à-dire que nous regardons les phénomènes avec plusieurs signaux et que si un signal montre une signature caractéristique, nous estimons que le phénomène est présent. En considérant l'indépendance des signaux, les taux de probabilité de détection peuvent être calculés en utilisant les relations suivantes :

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad \text{équation V.2.1}$$

$$\text{où } P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad \text{équation V.2.2}$$

Pour l'usure en dépouille, l'utilisation de deux signaux (courant et fréquences) donnent :

- $P(\text{Im1} \cup 1975 \text{ Hz}) = P(\text{Im1}) + P(1975 \text{ Hz}) - P(\text{Im1} \cap 1975 \text{ Hz}) = 0,995$, donc une **probabilité de détection de l'usure en dépouille de 99,5%**.
- $P(\text{Im1} \cup 1530 \text{ Hz}) = P(\text{Im1}) + P(1530 \text{ Hz}) - P(\text{Im1} \cap 1530 \text{ Hz}) = 0,983$, donc une **probabilité de détection d'une usure en dépouille supérieure à 0,06 mm de 98,3%**.
- $P(\text{Im2} \cup 7500 \text{ Hz}) = P(\text{Im2}) + P(7500 \text{ Hz}) - P(\text{Im2} \cap 7500 \text{ Hz}) = 1$, donc une **probabilité de détection d'une usure en dépouille dans la zone II de 100%**.

Usure en entaille :

- une augmentation brusque du courant de broche (décrochement) est le critère représentatif pour ce type d'usure, $15\% < \Delta I < 50\%$: Probabilité de détection **$P(\Delta I) = 83,3 \%$** (35 sur 42 essais),
- pour les fréquences, l'apparition du deuxième mode de l'outil (1340 Hz – variation de $\pm 5 \%$) et des modes propres de la platine en x,y à 1000 Hz (variation de 8%) et suivant l'axe Z à 6000 Hz (variation de 2%) : Probabilité de détection **$P(\text{Fréquences entaille}) = 52,6 \%$** (20 sur 38 essais).

En appliquant le même raisonnement que précédemment, nous obtenons pour l'usure en entaille :

$P(\Delta I \cup \text{Fréquences entaille}) = P(\Delta I + P(\text{Fréquences entaille}) - P(\Delta I \cap \text{Fréquences entaille})) = 0,92$, la **probabilité de détection de l'usure en entaille augmente dans ce cas jusqu'à 92%**.

Effondrement de l'arête :

- sur la majorité des essais, quand la valeur du courant de broche dépasse 12 A, l'effondrement se produit : Probabilité de détection **$P(I_{\max}) = 82\%$** (18 sur 22 essais). Dans ce cas, il existe quatre essais qui génèrent seulement une usure en entaille pour le seuil à 12 A, mais par mesure de sécurité cette valeur sera utilisée comme indicateur de la rupture de l'outil coupant.

Une évolution des signaux qui était identifiée comme représentative pour un phénomène physique (par exemple, l'augmentation du courant corrélée avec l'entaille) est valable quel que soit le contexte d'usinage (sans et avec perturbations d'usinage).

L'analyse des efforts de coupe a montré que ce signal offre des informations sur la qualité de l'usinage. À faibles conditions de coupe, les efforts de coupe sont capables de détecter le moment où une entaille se produit (les sinusoides changent de forme selon le contexte d'usinage). En revanche, quand les efforts de coupe sont très élevés, cette influence est plus délicate à identifier.

Évidemment, l'ensemble de ces résultats est fonction du nombre d'essais réalisés et les pourcentages de probabilité proposés doivent être progressivement confirmés, par l'augmentation de la base de données expérimentales. L'utilisation de plusieurs signaux en parallèle augmente la probabilité de détection. Par contre, cette approche est basée sur l'hypothèse d'une indépendance des signaux, sans la prise en compte des biais existants entre les signaux de surveillance. En perspective, une étude plus approfondie sur cet aspect est envisageable.

V.2.2.2 Base de données

À partir de la base de données, nous avons proposée trois modèles pour l'usure en dépouille, l'usure des listels et l'usure en entaille (détaillées dans le quatrième chapitre). Pour rappel, le modèle

d'usure en entaille n'offre pas des résultats satisfaisants sur les essais de vérification et il ne sera pas utilisé dans cette proposition de surveillance. Le modèle d'usure en dépouille offre une estimation du niveau d'usure avec une précision de 86 %, tandis que pour l'usure des listels, la précision est plus élevée, d'environ 95%.

Dans le cas de l'usure en dépouille, les relations définies ci-dessus, à partir de l'étude phénoménologique, peuvent être doublées par l'utilisation du modèle proposé dans le chapitre IV. En fonction de chaque zone étudiée, l'association des deux approches nous permet de détecter l'usure en dépouille avec une probabilité plus élevée et aussi d'obtenir une estimation du niveau de Vb. Une remarque très importante est que l'utilisation de l'approche statistique (le modèle d'usure) doit être impérativement réalisée en parallèle de l'approche phénoménologique. Dans le chapitre IV, nous avons précisé que ce modèle peut être appliqué aussi sur les essais qui génèrent une usure entaille, sans pouvoir distinguer les deux zones.

Le dernier aspect de cette analyse concerne la probabilité de détection quand les deux approches (phénoménologique et « statistique ») sont utilisées en parallèle. Pour une usure en dépouille qui ne dépasse pas 0,16 mm (valeur établie à partir des essais), les probabilités de détection de l'usure en dépouille deviennent :

$$P((Im1 \cup 1975 \text{ Hz}) \cup P(\text{modèle})) = P(Im1 \cup 1975 \text{ Hz}) + P(\text{modèle}) - P(Im1 \cup 1975 \text{ Hz}) \cdot P(\text{modèle}) = 0,9993$$

La probabilité de détection de l'usure en dépouille augmente dans ce cas jusqu'à 99,93%.

$$P((Im1 \cup 1530 \text{ Hz}) \cup P(\text{modèle})) = P(Im1 \cup 1530 \text{ Hz}) + P(\text{modèle}) - P(Im1 \cup 1530 \text{ Hz}) \cdot P(\text{modèle}) = 0,997$$

La probabilité de détection de l'usure en dépouille augmente dans ce cas jusqu'à 99,7%.

V.3 Détections envisageables

V.3.1 Choix de capteurs

À partir des résultats présentés dans le quatrième chapitre, nous avons constaté qu'il n'existe pas de grandeur physique, utilisée seule, assez sensible pour détecter et distinguer les problèmes qui peuvent survenir pendant d'usinage. Par exemple, l'utilisation unique de la puissance (fournie par le profibus Siemens ou par le système WattPilote®) ne peut pas différencier un problème d'usure d'outil des perturbations introduites par une mauvaise évacuation des copeaux. Par contre, la conjugaison de plusieurs signaux peut informer correctement sur les phénomènes générés lors du perçage.

Par rapport à ces observations, nous avons décidé d'utiliser trois capteurs :

- *le courant consommé par la broche* (par rapport à la puissance et au couple, il présente l'avantage d'être facile à mesurer et déjà filtré),

- *les accéléromètres* (le contenu temporel et fréquentiel de ces signaux offre des informations riches pour la compréhension des phénomènes physiques générés lors de la coupe),
- *les efforts de coupe* (dans notre cas mesurés à partir d'une table dynamométrique, mais les nouvelles solutions de capteurs piézoélectriques intégrés dans les logements de broche peuvent être employées pour une mesure efficace dans un contexte industriel).

Les fréquences d'échantillonnage ainsi que les critères de chaque moyen de surveillance qui sont utilisés sont présentés dans le Tableau V.3.1.

Tableau V.3.1 : Considérations sur les capteurs de surveillance

Capteur	Fréquence d'échantillonnage	Critères
Courant broche	250 Hz	Valeur max (I_{\max}) ΔI ($t_2-t_1=2$ s) I_{m1} et I_{m2}
Accéléromètres	16000 Hz	Fréquences identifiées avec les filtres par bande passante
Efforts de coupe	1000 Hz	Filtre passe bas à 20 Hz

Le choix de ces capteurs est justifié par leur utilisation potentielle dans un cadre industriel (au niveau de leur coût acceptable au regard de matériel exclusivement dédié aux laboratoires, de leur robustesse, de la facilité de la mise en œuvre, etc.). Il existe d'autres grandeurs physiques, susceptibles de fournir des informations pertinentes en usinage, mais elles ne nous semblent pas aujourd'hui adaptées pour un fonctionnement dans le contexte du perçage de matériaux durs avec lubrification haute pression. Par exemple, la mesure de la température, qui peut s'avérer performante en usinage, serait délicate à mettre en œuvre ici de part le surcoût sur les outils coupants et l'influence de la lubrification.

V.3.2 Les perturbations d'usinage

L'outil développé dans le chapitre III permet de simuler l'influence d'un défaut d'excentricité de l'outil sur les efforts de coupe. Les sinusoïdes obtenues témoignent du travail de chaque dent et leurs variations selon les figures ci-dessous nous informent sur le défaut d'excentration, constant pendant le perçage. La Figure V.3.1 présente une comparaison entre l'évolution des efforts de coupe sans et avec excentration. Pour le cas sans ce défaut, les courbes théoriques sont des sinusoïdes déterminées par la différence de géométrie de dents, qui génère une légère différence entre les efforts.

L'excentration est disposée selon l'axe X et la conséquence du défaut est le changement de la profondeur de passe réelle, provoquant un déséquilibre en ce qui concerne les efforts sur chaque dent. Cette différence est montrée par la comparaison des efforts avec deux excentrations différentes (la première est de 0,025 mm, tandis que la deuxième est 2 fois plus grande) sur la Figure V.3.2 (ΔFx_{dent} et ΔFy_{dent}). L'augmentation du niveau de l'excentration conduit à l'augmentation des efforts de coupe (ΔFx_e et ΔFy_e).

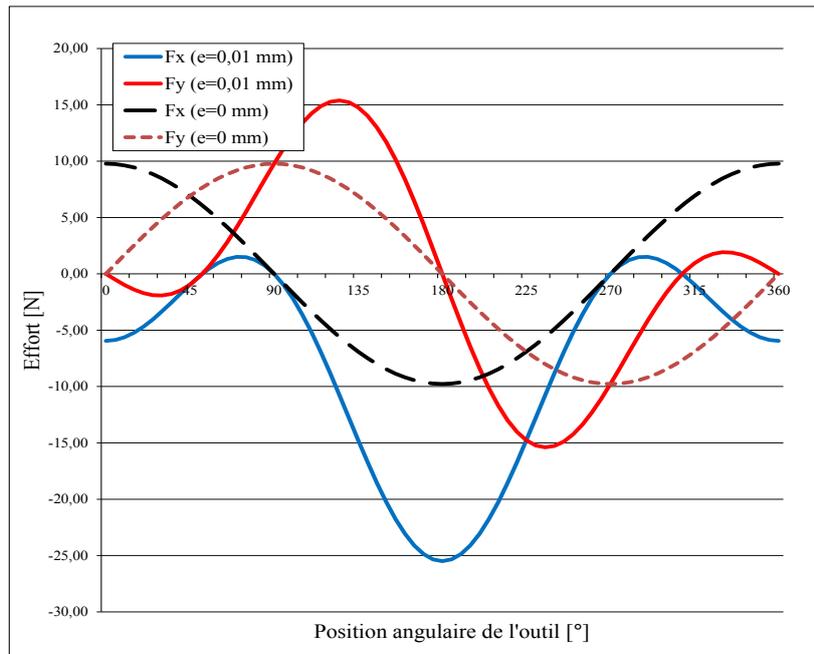


Figure V.3.1 : Comparaison des efforts de coupe sans et avec excentration

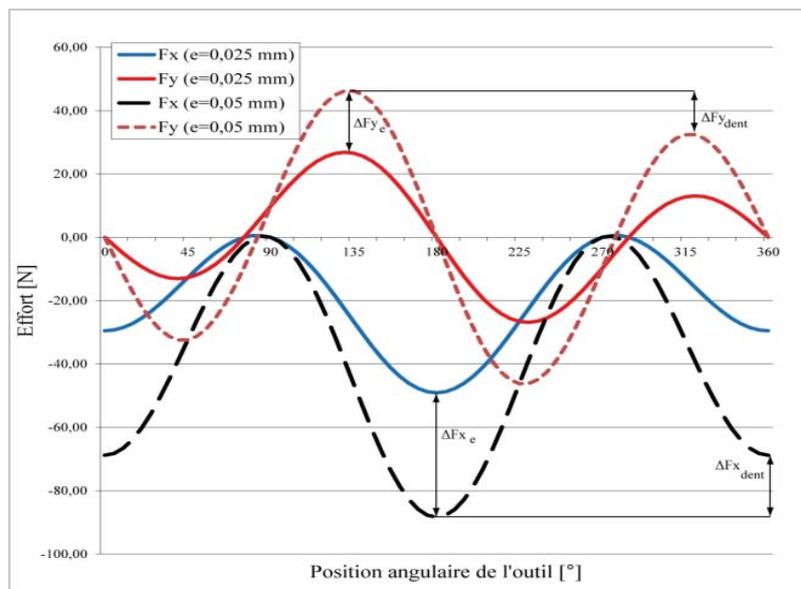


Figure V.3.2 : Comparaison des efforts de coupe avec deux valeurs d'excentration différentes

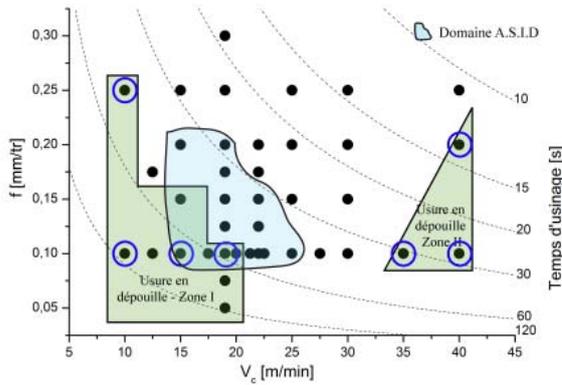
Pour le **phénomène de « copeaux coincés, collés ou incrustés »**, la perturbation se situe pendant le perçage, aléatoirement. Le problème d'évacuation de copeaux est rencontré le plus souvent pour des faibles avances et vitesses de coupe (plutôt dans la zone définie pour l'usure en dépouille et aussi pour une faible entaille), quand la fragmentation de copeaux n'est pas très importante. La détection de cette perturbation se fait par :

- une augmentation brusque du courant de la broche (en fonction de chaque situation, la variation est comprise entre 13 et 50 % sur l'ensemble des essais) pendant un temps très court (max 2 s). Après l'évènement, le courant revient au niveau antérieur,
- l'augmentation doit être corrélée avec un changement fréquentiel. Pour un usinage qui se fait dans des conditions normales sans cette perturbation, l'outil vibre selon le quatrième mode propre (qui se trouve vers 2000 Hz). Les analyses ont montré que le coincement d'un copeau génère un choc et un effort radial qui va exciter le deuxième mode propre de l'outil (environ 1330 Hz) et aussi le mode propre de la platine de mesure (vers 1050 Hz). La détection des fréquences mises en jeu lors du perçage se fait avec des filtres par bande passante définis sur chaque mode propre (Tableau IV.3.1). En plus de ces valeurs, il doit être rajouté un filtre pour identifier les hautes fréquences (7500 Hz),
- les efforts de coupe ont une évolution théorique de type « sinusoïdale » pour un contexte d'usinage sans perturbation. Au moment du coincement du copeau entre le listel et la paroi de la pièce, un pic d'effort est visible sur les deux signaux (voir Figure IV.2.15.c). L'augmentation varie avec la nature du coincement et il a été démontré que le pic de courant est directement proportionnel à la taille du copeau incrusté. De plus, la durée sur laquelle cette évolution est visible indique si c'est un copeau coincé (l'évacuation se fait après un quart de tour) ou plutôt un bourrage de copeaux (ce phénomène s'étend sur plusieurs tours).

La corrélation en temps de ces trois types d'évolution, nous offre la possibilité de détecter le problème d'évacuation de copeaux.

Dans le cas de notre surveillance de l'usure d'outil, nous avons précisé la nécessité de surveiller chaque situation avec une méthode appropriée selon la cartographie des modes de dégradation. Les paragraphes suivants déclinent chaque situation sur les zones identifiées dans la cartographie. L'usure en listel est absente de ces zones puisqu'elle n'est caractérisée que par la modélisation selon la base de données.

V.3.3 L'usure en dépouille



Les signaux correspondants à l'usure en dépouille présentent une stabilité par rapport au niveau du courant de la broche ou par les fréquences (Figure V.3.3). La détection de ce mode de dégradation se fera de la manière suivante :

- l'augmentation progressive du courant de la broche (inférieure à 10% ou 20% entre la

sortie et l'entrée du trou),

- au niveau fréquentiel, seulement le quatrième mode propre de l'outil et ses harmoniques sont mises en évidence par l'usinage,
- les efforts de coupe doivent avoir une évolution sinusoïdale (sans variation brutale).

Par contre, deux autres situations (selon les analyses effectuées dans le quatrième chapitre) sont possibles si un changement fréquentiel survient :

- le troisième mode l'outil (environ 1550 Hz) indique que l'usure a dépassé le seuil de 0,06 mm,
- une haute fréquence (vers 7500 Hz) signifie une usure en dépouille qui est caractéristique pour la deuxième zone (hautes vitesses de coupe).

Le niveau d'usure en dépouille est estimé avec le modèle proposé à partir de la base de données.

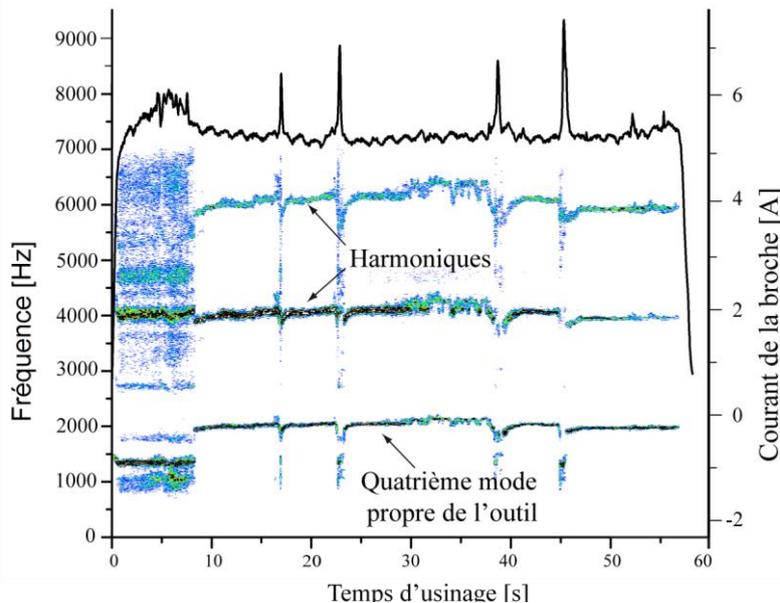
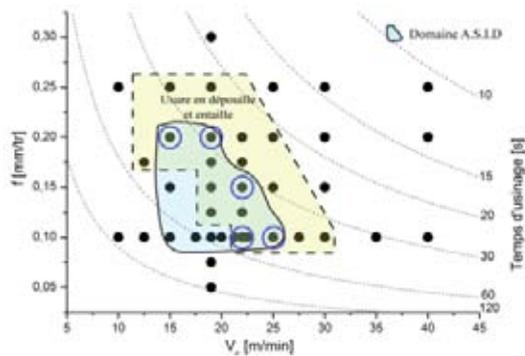


Figure V.3.3 : Évolution des signaux représentatifs pour l'usure en dépouille (conditions de coupe standards – production)

V.3.4 L'usure en entaille



Sur l'ensemble des conditions de coupes testées dans la zone caractérisée par une usure en entaille, les signaux présentent quelques particularités :

- la typologie du signal du courant consommé par la broche est donnée dans 90 % des cas étudiés, par l'évolution décrite dans la Figure V.3.4, avec une augmentation brutale après la génération de l'entaille.

En fonction de conditions de coupe, des dimensions de l'entaille et de l'instant où elle est générée, l'augmentation peut avoir des niveaux plus ou moins importants (sur nos essais, la variation se situe entre 15 et 50 %).

- quand une entaille est générée, un déséquilibre entre les deux dents apparaîtra et va générer un effort radial important. Par conséquent, le deuxième mode propre de l'outil (1340 Hz) ainsi que les modes propres de la platine $f(x,y) \sim 1000$ Hz et $f(z) \sim 6045$ Hz sont excités par ce phénomène. Après cet instant, les trois fréquences auront l'amplitude la plus importante.

Selon les résultats du quatrième chapitre, les efforts F_x et F_y ne présentent pas une évolution caractéristique à chaque type d'usure et nécessitent une interprétation adaptée à chaque contexte d'usage. Malgré les informations fournies, l'emploi des efforts de coupe pour la détection d'une usure en entaille est délicat à mettre en œuvre, car les résultats peuvent créer une ambiguïté sur les réponses. Dans ce cas, ces signaux de surveillance serviront comme un instrument complémentaire pour la compréhension des phénomènes.

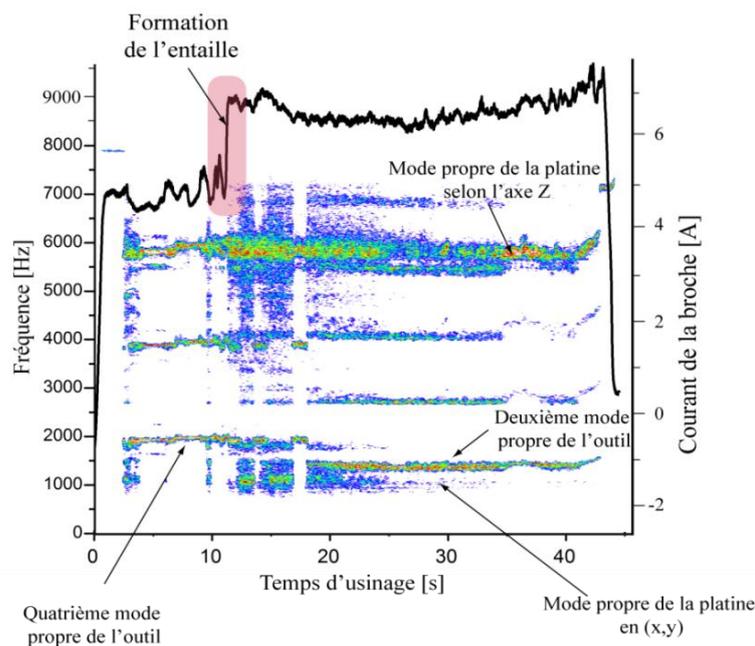
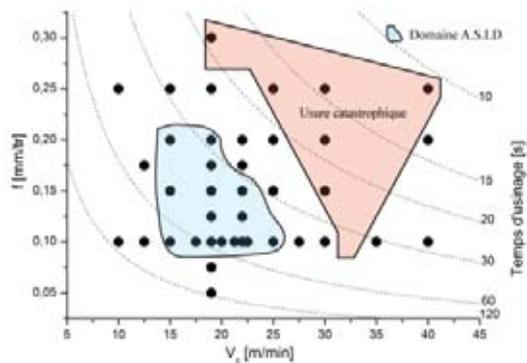


Figure V.3.4 : Évolution des signaux représentatifs pour l'usure en entaille

Par rapport à l'usure en dépouille, dans ce cas, l'utilisation en parallèle de deux approches semble être inopportune. Le modèle proposé à partir de la base de données offre des résultats sur lesquels nous ne pouvons pas nous appuyer pour la détection de l'entaille. Avant d'améliorer la qualité du modèle par des nouvelles campagnes expérimentales ou par d'autres techniques de modélisation, nous prenons la décision de réaliser la surveillance de l'usure en entaille uniquement par l'intermédiaire de relations issues de l'approche phénoménologique.

V.3.5 L'usure catastrophique



La détection de l'effondrement d'une arête de coupe est possible avec la mesure du courant de la broche. La Figure V.3.5 montre l'évolution du courant de la broche où nous avons introduit un seuil statique (qui n'évolue pas avec le temps) afin de détecter l'effondrement de l'arête de coupe. Les résultats des essais réalisés lors de différentes campagnes expérimentales ont mis en avant une valeur de 12 A, à

partir de laquelle l'usure catastrophique limite la durée de vie de l'outil.

Il est possible de détecter l'effondrement en utilisant les fréquences mises en jeu par l'usinage. Selon les résultats présentés dans le quatrième chapitre, l'effondrement d'une arête de l'outil se traduit au niveau fréquentiel par l'apparition du deuxième mode propre de l'outil (1340 Hz) et les modes propres de la platine $f(x,y) \sim 1000$ Hz et $f(z) \sim 6045$ Hz (excités par l'augmentation du couple et des efforts de coupe). Ces fréquences sont accompagnées d'un niveau élevé de bruit. L'inconvénient majeur dans ce cas est la ressemblance avec l'évolution des signaux pour l'usure en entaille, qui peut amener une ambiguïté sur les résultats.

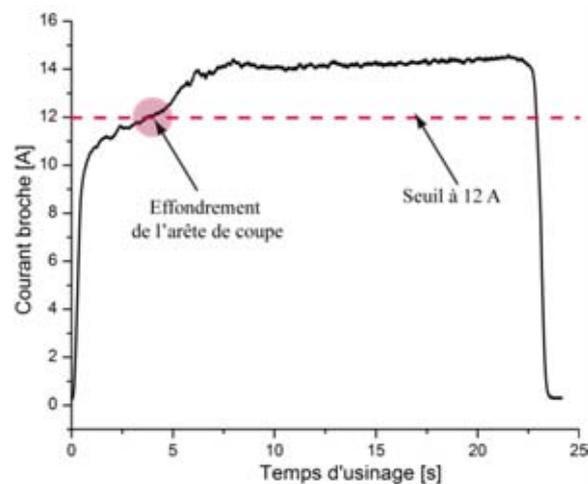


Figure V.3.5 : Exemple de seuil utilisé pour détecter l'effondrement de l'arête de coupe

L'usure catastrophique ne fait pas l'objet d'une modélisation à partir de la base de données, car l'utilisation de l'approche phénoménologique est rapide et facile à être mise en œuvre, assurant des bons résultats.

V.4 Proposition d'un algorithme de détection

Les exemples d'application de la surveillance d'usinage présentés ci-dessus sont réunis dans le synopsis de la Figure V.4.1. Il s'agit d'une proposition globale, sous une forme algorithmique, permettant d'intégrer les stratégies de surveillance des modes de dégradation de l'outil et des perturbations d'usinage, dans le cas du perçage de l'Udimet[®] 720 LI dans un avant-trou (\varnothing 13 mm), avec un foret à tête interchangeable (\varnothing 15,5 mm).

La fiabilité de cette méthode de surveillance a été exposée dans le paragraphe V2.2. Afin d'augmenter sa robustesse, le synopsis peut utiliser en parallèle les deux approches, phénoménologique ou "statistique". Par exemple, pour l'usure en dépouille, les informations obtenues par l'évolution du courant de la broche et du quatrième mode de vibration peuvent être associées avec le modèle proposé par l'analyse statistique.

En conclusion, il est possible que certaines situations rencontrées en usinage ne permettent pas une détection aisée et efficace des événements (dégradations de l'outil et mauvais dégagement des copeaux). Par exemple, l'augmentation brusque du courant de la broche peut montrer la génération d'une entaille ou bien, si cette information n'est pas doublée par une certaine évolution fréquentielle, peut être confondue avec un problème d'évacuation des copeaux. Dans ce cas, le modèle d'usure issu de la base de données en entaille ne donne pas de bons résultats. Un autre exemple critique correspond à l'apparition de trois fréquences (deuxième mode propre de l'outil et les modes propres de la platine). Ces informations peuvent signaler soit la génération d'une entaille, soit la rupture de l'outil coupant. Ce cas nécessite la réponse du courant de la broche pour pouvoir distinguer les deux cas. Malgré ces informations contradictoires, pour les deux situations, l'approche informera sur un problème concernant la dégradation de l'outil.

Une application de cette technique de surveillance d'usinage dans le cadre industriel permettra de stocker les informations et il est tout-à-fait imaginable, progressivement, d'augmenter la connaissance du procédé par l'enrichissement de la base de données et d'augmenter ainsi la précision des modèles, seuils et niveaux des paramètres de surveillance. Cette solution s'apparente à l'approche par réseaux de neurone, largement employée en usinage.

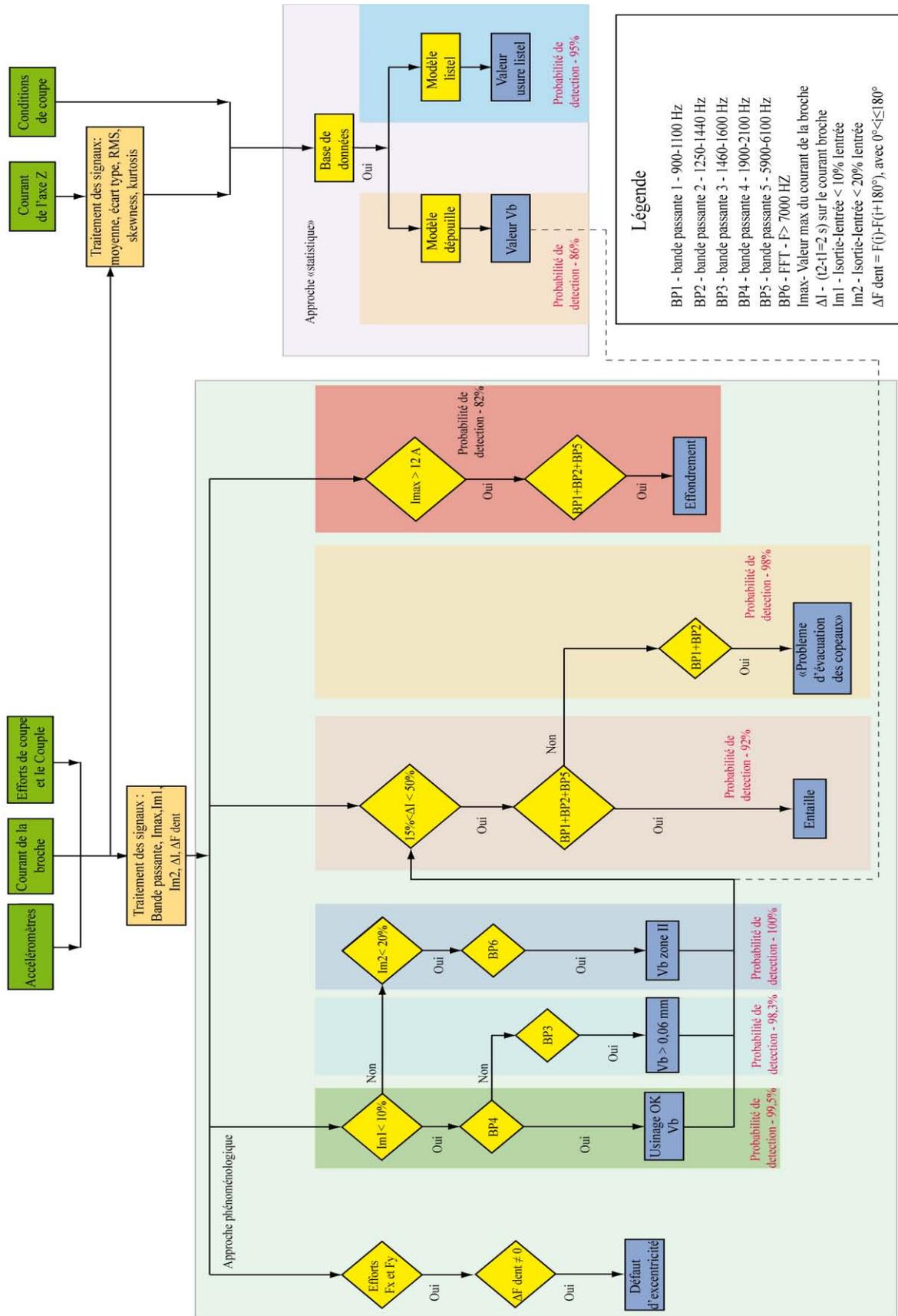


Figure V.4.1: Synopsis de stratégies de surveillance

Synthèse

Ce chapitre présente les propositions de stratégies de surveillance d'usinage dans le perçage de l'Udimet[®] 720 LI. Cette approche a été construite sur les relations entre les modes de dégradation, les perturbations d'usinage et les signaux enregistrés, exposées dans le quatrième chapitre. Ces informations ont été obtenues soit par une analyse phénoménologique, soit par l'analyse de la base de données.

La première exploitation s'appuie sur l'explication directe des phénomènes physiques lors des situations rencontrées pendant l'usinage. En fonction de chaque situation (type d'usure, perturbations, etc.), les signaux représentatifs ont été définis.

La deuxième exploitation, appelée abusivement "statistique" puisqu'elle utilise une matrice de corrélation de Pearson à partir de la base de données expérimentale, peut être utilisée en substitution ou en parallèle de la première approche. Dans un contexte où les essais de validation sont très difficiles à organiser, du fait de l'indisponibilité de la matière, il nous semble intéressant de pouvoir conjuguer les deux approches pour augmenter la robustesse de la surveillance.

En perspective, il nous semble important de préciser que la mise en œuvre de cette stratégie de surveillance du perçage sur le procédé industriel doit s'accompagner d'un apprentissage progressif. L'enrichissement de la base de données profitera à la précision de nos modèles phénoménologiques et statistiques, et permettra d'améliorer graduellement la robustesse de cette surveillance du perçage.

Conclusion générale et perspectives

L'étude faisant l'objet de ces travaux de thèse est réalisée en collaboration avec l'entreprise Turbomeca dans le cadre du projet européen ACCENT. Elle s'inscrit dans la problématique de l'utilisation de la surveillance d'usinage dans la fabrication de pièces critiques. Sachant qu'une dégradation de l'outil coupant et les perturbations d'usinage peuvent affecter la qualité de la surface usinée, l'objectif global des travaux est de proposer une technique de surveillance basée sur la mesure de grandeurs physiques pendant l'usinage.

Le travail bibliographique (détaillée dans le *chapitre II*) était orienté selon plusieurs directions. La première concerne l'étude des superalliages à base nickel répondant aux nouvelles exigences des constructeurs d'avions, ainsi que sur les problématiques amenées par leur faible usinabilité. Le niveau élevé de qualité de la surface usinée attendu pour les pièces à haute criticité suppose une maîtrise parfaite du procédé. Dans ce contexte, l'usure de l'outil est un paramètre important à maîtriser puisqu'il peut avoir une influence majeure sur l'intégrité de la surface. Dans cet esprit, la deuxième direction porte sur l'étude des différents modes de l'usure de l'outil dans le contexte des superalliages. L'analyse des travaux existants a permis de définir les principaux modes de dégradation ainsi que les facteurs qui les influencent, notamment les conditions de coupe, le revêtement, la lubrification, etc. La troisième partie nous a permis d'avoir une vue globale sur les techniques de surveillance de l'usure et les capteurs utilisés dans la littérature. Cette étude bibliographique nous a permis de définir, en fonction de plusieurs aspects (coûts, facilité de mise en œuvre industrielle, etc.), les grandeurs physiques pouvant être employées dans notre contexte (la mesure de la puissance et du courant de la broche, les efforts de coupe, le couple et les vibrations). Ensuite, en se basant sur ces grandeurs mesurées, le traitement des signaux permettra d'obtenir les informations nécessaires afin d'établir les corrélations entre les signaux et les modes de dégradation. Nous avons privilégié deux pistes dans ce sens : une explication directe de l'évolution des signaux par des phénomènes physiques et une approche de type « boîte noire » (pour les cas où l'interprétation physique est plus délicate).

Suite à l'étude bibliographique qui a mise en avant la complexité des phénomènes dans l'usinage des superalliages à base nickel, une démarche expérimentale a été proposée afin de répondre aux objectifs de ces travaux. Dans un premier temps, les essais expérimentaux ont permis de définir les différents modes de dégradation rencontrés lors de l'usinage de l'Udimet[®] 720 LI. Par ailleurs, l'impact des perturbations d'usinage (coupure de lubrification, modification du pourcentage d'émulsion du lubrifiant, défaut de position de l'outil par rapport à l'avant trou, mauvais dégagement des copeaux, etc.) sur le comportement de l'outil a été établi ou réfuté.

La répartition des modes de dégradation sur la plage de conditions testées a été représentée sous la forme d'une cartographie. Elle permet de montrer l'influence des conditions de coupe et du contexte d'un perçage dans un avant-trou sur la dégradation de l'outil. Plusieurs modes de dégradations ont été observés : usure en dépouille, usure en entaille, usure catastrophique, usure des listels et usure sur la face de coupe.

La cartographie présente une première zone, caractérisée par une usure en dépouille. Cette usure est provoquée par l'enlèvement du revêtement par abrasion. Dans ce cas, l'usure a une évolution linéaire (après cinq perçages) et le V_b ne dépasse pas 0,13 mm sur l'ensemble des essais. L'usure en dépouille est influencée par l'augmentation de la vitesse de coupe. L'étude des signaux de surveillance a mis en avant une « signature » de ce type d'usure. Le courant de la broche présente une faible augmentation. Au niveau fréquentiel, nous pouvons identifier seulement le quatrième mode propre de l'outil (environ 2000 Hz) et ses harmoniques. Par contre, une augmentation du niveau de V_b (0,06 mm) peut être corrélée avec l'apparition du troisième mode propre de l'outil (1530 Hz). Une deuxième zone correspond aussi à une usure en dépouille et peut être observée pour les hautes vitesses de coupe. La détection du V_b dans cette situation se fait par l'apparition d'une fréquence supérieure à 7500 Hz (justifiée par la présence d'un mode propre de torsion).

Une troisième zone apparaît correspond à une usure par entaille générée par une différence de pression importante sur l'arête de coupe. Les résultats indiquent une influence majoritaire de l'avance. Par rapport à l'usure en dépouille, les signaux possèdent une signature différente : la conséquence d'une entaille sur le courant de la broche se présente sous la forme d'une augmentation brutale (provoquée par l'augmentation de la surface de contact entre l'outil et la matière). Le déséquilibre de la coupe, introduit entre les deux dents par l'entaille, provoque un changement brusque des fréquences. Le deuxième mode propre de l'outil (1330 Hz) ainsi que les modes propres de la platine (1050 Hz et 6045 Hz) deviennent très visibles.

Enfin, la cartographie contient une quatrième zone qui correspond à un mode d'usure catastrophique. En effet, lorsque la pression sur l'arête de coupe devient trop importante, l'augmentation de l'entaille engendre la rupture de l'outil. Ce type d'usure a été appelée « catastrophique », car il représente une dégradation rapide et irréversible de l'outil. La signature est ici simple à identifier, par une augmentation rapide du courant de la broche au-delà de 12 A.

Notons que deux modes de dégradation sont toujours présents simultanément : il s'agit de l'usure des listels et de l'usure sur la face de coupe (ce dernier n'a pas été étudié dans le cadre de nos travaux).

En outre, cette analyse a permis de détecter certaines perturbations en utilisant les signaux de surveillance. Par exemple, un défaut d'excentration de l'outil dans le porte-outil agit directement sur les répartitions des efforts de coupe F_x et F_y . Un deuxième cas de perturbation est représenté par un problème d'évacuation de copeaux. Dans cette configuration, une augmentation brusque du courant de la broche pour des intervalles de temps courts (inférieures à 2 s) est observée, ainsi que l'apparition simultanée du deuxième mode de l'outil et des modes propres de la platine en (x, y) . Cette variation brusque du signal du courant consommé par la broche est le résultat du choc introduit par le copeau coincé entre les listels et la paroi du trou.

L'analyse des phénomènes rencontrés permet de fiabiliser les relations entre les signaux de surveillance et les perturbations d'usinage. Mais il existe des cas où l'interprétation physique des signaux n'est pas triviale et il est donc nécessaire d'employer des informations complémentaires pour fiabiliser la surveillance. En s'appuyant sur la base de données des essais réalisés, nous avons créé trois modèles pour la prédiction de l'usure en dépouille, des listels et en entaille. Si pour les deux premiers cas, les résultats sont relativement performants, le modèle d'usure en entaille offre une faible précision. Dans notre étude, où la principale contrainte fût la faible disponibilité de matière, le nombre d'essais réalisés reste insuffisant pour pouvoir définir un modèle plus robuste.

La dernière phase de nos travaux est l'étude de la sensibilité des signaux afin de détecter l'ensemble des phénomènes et de définir les stratégies d'usinage pouvant être mises en place. Pour chaque relation définie, nous avons estimé une probabilité de détection. Elle est représentée par le rapport entre le nombre de cas où la signature est caractéristique du phénomène et le nombre total d'essais présentant ce phénomène. En fonction de chaque réponse (usure en dépouille, en entaille, etc.), nous avons décidé de mettre l'observation des signaux en parallèle afin d'améliorer la robustesse de la détection. Dans ce cas, si un des signaux choisis montre une signature représentative d'un phénomène, nous estimons que le phénomène est présent. Les pourcentages de détection ont été améliorés par cette approche. Toutefois, les taux de probabilité sont discutables, car l'approche est basée sur l'indépendance des signaux, sans calculer les biais existants. Enfin, nous avons associé l'approche phénoménologique à l'approche dite « statistique » pour pouvoir augmenter la robustesse de la surveillance.

En résumé, ces travaux de thèse ont apporté dans un premier temps une compréhension plus approfondie de l'usinage des matériaux durs, comme l'Udimet[®] 720 LI. L'étude expérimentale réalisée a permis d'identifier les différents modes de dégradation de l'outil ainsi que les relations de ces derniers avec les signaux de surveillance. Tous les résultats ont été résumés dans un synopsis présentant les aspects à surveiller ainsi que leurs probabilités de détection.

Ce travail laisse entrevoir de nombreuses *perspectives*, orientées vers deux volets : la recherche scientifique et l'application industrielle.

La recherche scientifique

Une première perspective est constituée par une analyse plus détaillée des mécanismes de formation de l'entaille en parallèle d'une modélisation de cette usure par les réseaux de neurones.

L'étude des perturbations d'usinage a mis en avant les effets de la position de l'outil par rapport à l'avant-trou et du pourcentage d'émulsion sur l'usure. Une étude complémentaire permettra une meilleure compréhension de ces influences et donc une fiabilisation de la surveillance par l'intégration de ces conclusions.

Dans cette étude, nous avons choisi de modéliser l'usure des listels afin de prédire ces valeurs. Il nous semble intéressant dans les perspectives d'étudier l'influence de ce type d'usure sur les signaux. En isolant sa signature sur les grandeurs physiques, nous pouvons fiabiliser les relations déjà existantes entre les signaux, les perturbations d'usinage et les défauts d'intégrité de surface.

Les taux de probabilité de détection de l'usure ont été obtenus en supposant dans une première approche, une indépendance totale des signaux. Il est évident que cette hypothèse est simpliste mais elle permet des premiers résultats. Une étude plus fine centrée sur le calcul des biais entre les signaux nous permettra de corriger et d'obtenir les nouvelles probabilités de détection.

Application industrielle

Les stratégies de surveillance définies à partir des résultats obtenus dans ces travaux peuvent être déployées dans le milieu industriel afin de fiabiliser le procédé d'usinage. La mise en œuvre de cette application doit permettre d'augmenter la taille de la base de données afin d'améliorer progressivement la robustesse des stratégies de surveillance. L'implémentation de stratégies sera réalisée dans un premier temps par des alarmes qui informent sur le problème survenu.

Cette première approche que nous proposons servira comme une base pour la surveillance dans le contexte industriel. Ensuite, par un apprentissage progressif, la méthode sera améliorée, permettant de sécuriser le procédé de fabrication.

Références bibliographiques

- [Abouelatta 01] O. B. Abouelatta & J. Mádl. *Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 118, no. 1-3, pages 269 – 277, 2001.
- [Abu-Mahfouz 03] Issam Abu-Mahfouz. *Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 43, no. 7, pages 707 – 720, 2003.
- [ACCENT 09] ACCENT. *ACCENT "Technical Report"*. Rapport technique, 2009.
- [Arunachalam 04] R.M. Arunachalam, M.A. Mannan & A.C. Spowage. *Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 44, no. 14, pages 1481 – 1491, 2004.
- [Axinte 03] Dragos A. Axinte & Nabil Gindy. *Tool condition monitoring in broaching*. Wear, vol. 254, no. 3-4, pages 370 – 382, 2003.
- [Axinte 04] D.A. Axinte & N. Gindy. *Assessment of the effectiveness of a spindle power signal for tool condition monitoring in machining processes*. International Journal of Production Research, vol. 42, pages 2679–2691, 2004.
- [Axinte 06a] D.A. Axinte, P. Andrews, W. Li, N. Gindy, P.J. Withers & T.H.C. Childs. *Turning of advanced Ni based alloys obtained via powder metallurgy route*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 55, no. 1, pages 117 – 120, 2006.
- [Axinte 06b] Dragos A. Axinte. *Approach into the use of probabilistic neural networks for automated classification of tool malfunctions in broaching*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 46, no. 12–13, pages 1445 – 1448, 2006.
- [Baili 11] Maher Baili, Vincent Wagner, Gilles Dessein, Julien Sallaberry & Daniel LtT. *An experimental investigation of hot machining with induction to improve Ti-5553 machinability*. Applied Mechanics and Materials, vol. 62, pages 67–76, 2011.

-
- [Balazinski 02] Marek Balazinski, Ernest Czogala, Krzysztof Jemielniak & Jacek Leski. *Tool condition monitoring using artificial intelligence methods*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 15, no. 1, pages 73 – 80, 2002.
- [Baradie 96] M.A. El Baradie. *Cutting fluids: Part I. Characterisation*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 56, no. 1-4, pages 786 – 797, 1996. International Conference on Advances in Material and Processing Technologies.
- [Bhatt 10] Abhay Bhatt, Helmi Attia, R. Vargas & V. Thomson. *Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718*. Tribology International, vol. 43, no. 5-6, pages 1113 – 1121, 2010. Special Issue on Second International Conference on Advanced Tribology (iCAT2008).
- [Bisu 09] C. F. Bisu & Jean-Yves K'nevez Philippe Darnis Alain Gerard. *Displacements analysis of self-excited vibrations in turning*. Displacements analysis of self-excited vibrations in turning., vol. 44, pages 1–16, 2009.
- [Bonnet 09] C. Bonnet, G Poulachon, J Rech & Y Girard. *Identification of Mechanical and Tribological Margins Interactions in Case of Ti-6Al-4V Alloy Drilling*. 12th Cirp Conference on Modelling of Machining Operations. Donostia-San Sebastián, Spain, vol. 1, pages 237–242, 2009.
- [Bono 01] Matthew Bono & Jun Ni. *The effects of thermal distortions on the diameter and cylindricity of dry drilled holes*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 41, no. 15, pages 2261 – 2270, 2001.
- [Brandão 08] Lincoln Cardoso Brandão, Reginaldo Teixeira Coelho & Alessandro Roger Rodrigues. *Experimental and theoretical study of workpiece temperature when end milling hardened steels using (TiAl)N-coated and PcBN-tipped tools*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 199, no. 1–3, pages 234 – 244, 2008.
- [Brophy 02] B. Brophy, K. Kelly & G. Byrne. *AI-based condition monitoring of the drilling process*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 124, no. 3, pages 305 – 310, 2002.
- [Byrne 95] G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, W. König & R. Teti. *Tool Condition Monitoring (TCM) – The Status of Research and Industrial Application*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 44, no. 2, pages 541 – 567, 1995.
-

-
- [Byrne 07] G. Byrne & G.E. O'Donnell. *An Integrated Force Sensor Solution for Process Monitoring of Drilling Operations*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 56, no. 1, pages 89 – 92, 2007.
- [Cantero 05] J.L. Cantero, M.M. Tardío, J.A. Canteli, M. Marcos & M.H. Miguélez. *Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 45, no. 11, pages 1246 – 1255, 2005.
- [Chen 03] Y.C Chen & Y.S Liao. *Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 140, no. 1-3, pages 269 – 273, 2003. Proceedings of the 6th Asia Pacific Conference on materials Processing.
- [Choudhury 98] I.A Choudhury & M.A El-Baradie. *Machinability of nickel-base super alloys: a general review*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 77, no. 1-3, pages 278 – 284, 1998.
- [Corduan 03] N. Corduan, T. Himbart, G. Poulachon, M. Dessoly, M. Lambertin, J. Vigneau & B. Payoux. *Wear Mechanisms of New Tool Materials for Ti-6Al-4V High Performance Machining*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 52, no. 1, pages 73 – 76, 2003.
- [Davies 07] M.A. Davies, T. Ueda, R. M'Saoubi, B. Mullany & A.L. Cooke. *On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 56, no. 2, pages 581 – 604, 2007.
- [de Lacalle 00] L.N López de Lacalle, J Pérez, J.I Llorente & J.A Sánchez. *Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 100, no. 1-3, pages 1 – 11, 2000.
- [Devaux 04] Alexandre Devaux. *Amélioration des propriétés mécaniques de l'udimet 720*. Master's thesis, UTC Compiègne, 2004.
- [Devillez 07] A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski & D. Larrouquere. *Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools*. Wear, vol. 262, no. 7-8, pages 931 – 942, 2007.
- [Dimla 00a] D.E. Dimla & P.M. Lister. *On-line metal cutting tool condition monitoring.: I: force and vibration analyses*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 40, no. 5, pages 739 – 768, 2000.
-

-
- [Dimla 00b] Dimla E. Dimla. *Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 40, no. 8, pages 1073 – 1098, 2000.
- [Diniz 08] A.E. Diniz, A.B. Junior & F.T. Filho. *Tool wear damage caused by abundant emulsion in milling operation of PH stainless Steel*. J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng., vol. 2, page 133, 2008.
- [Dörr 03] J. Dörr, Th. Mertens, G. Engering & M. Lahres. *'In-situ' temperature measurement to determine the machining potential of different tool coatings*. Surface and Coatings Technology, vol. 174-175, no. 0, pages 389 – 392, 2003. Proceedings of the Eight International Conference on Plasma Surface Engineering.
- [Dutilh 10] Dutilh, G. Dessein, J. Alexis & G. Perrin. *Links Between Machining Parameters and Surface Integrity in Drilling Ni-Superalloy*. Advanced Materials Research, vol. 112, page 171, 2010.
- [Dutilh 11] Vincent Dutilh. *Maîtrise de l'intégrité de surface par la surveillance d'usinage sur les pièces critiques en superalliage de turbomoteurs aéronautiques*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2011.
- [El-Wardany 96] T. I. El-Wardany, D. Gao & M. A. Elbestawi. *Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 36, no. 6, pages 687 – 711, 1996.
- [Ertunc 01] H.M Ertunc & K.A Loparo. *A decision fusion algorithm for tool wear condition monitoring in drilling*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 41, no. 9, pages 1347 – 1362, 2001.
- [Everson 99] Curt E. Everson & S. Hoessein Cheraghi. *The application of acoustic emission for precision drilling process monitoring*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 39, no. 3, pages 371 – 387, 1999.
- [Ezugwu 95] E.O. Ezugwu & C.J. Lai. *Failure modes and wear mechanisms of M35 high-speed steel drills when machining Inconel 901*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 49, no. 3-4, pages 295 – 312, 1995.
-

-
- [Ezugwu 99] E.O. Ezugwu, Z.M. Wang & A.R. Machado. *The machinability of nickel-based alloys: a review*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 86, no. 1-3, pages 1 – 16, 1999.
- [Ezugwu 00] Wang Z. M. Ezugwu E. O. & A. R. Machado. *Wear of Coated Carbide Tools When Machining Nickel (Inconel 718) and Titanium Base (Ti-6Al-4V) Alloys*. Tribology Transactions, vol. 43: 2, page 263 — 268, 2000.
- [Ezugwu 03] E.O Ezugwu, J Bonney & Y Yamane. *An overview of the machinability of aeroengine alloys*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 134, no. 2, pages 233 – 253, 2003.
- [Ezugwu 05] E.O. Ezugwu. *Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 45, no. 12-13, pages 1353 – 1367, 2005.
- [FAA 11] FAA. *Rapport FAA*. Rapport technique, 2011.
- [Gómez 10] Martín P. Gómez, Alfredo M. Hey, José E. Ruzzante & Carlos E. D'Attellis. *Tool wear evaluation in drilling by acoustic emission*. Physics Procedia, vol. 3, no. 1, pages 819 – 825, 2010. International Congress on Ultrasonics, Santiago de Chile, January 2009
- [Hong 01] Shane Y Hong, Irel Markus & Woo cheol Jeong. *New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 41, no. 15, pages 2245 – 2260, 2001.
- [Jackson 99] M.P. Jackson & R.C. Reed. *Heat treatment of UDIMET 720Li: the effect of microstructure on properties*. Materials Science and Engineering, pages 85–97, 1999.
- [Jantunen 02] Erkki Jantunen. *A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 42, no. 9, pages 997 – 1010, 2002.
- [Jawaid 99] A Jawaid, C.H Che-Haron & A Abdullah. *Tool wear characteristics in turning of titanium alloy Ti-6246*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 92–93, no. 0, pages 329 – 334, 1999.
-

-
- [Jawaid 01] A Jawaid, S Koksai & S Sharif. *Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 116, no. 1, pages 2 – 9, 2001. Containing papers selected from the 2nd international conference on Advanced Manufacturing Technology.
- [Jeong 02] Young-Hun Jeong & Dong-Woo Cho. *Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 42, no. 14, pages 1559 – 1566, 2002.
- [Jianxin 08] Deng Jianxin, Li Yousheng & Song Wenlong. *Diffusion wear in dry cutting of Ti-6Al-4V with WC/Co carbide tools*. Wear, vol. 265, no. 11–12, pages 1776 – 1783, 2008.
- [Jindal 99] P.C Jindal, A.T Santhanam, U Schleinkofer & A.F Shuster. *Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN coated cemented carbide tools in turning*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, vol. 17, no. 1-3, pages 163 – 170, 1999.
- [Kadirgama 11] K. Kadirgama, K.A. Abou-El-Hossein, M.M. Noor, K.V. Sharma & B. Mohammad. *Tool life and wear mechanism when machining Hastelloy C-22HS*. Wear, vol. 270, no. 3-4, pages 258 – 268, 2011.
- [Kalvoda 10] Tomas Kalvoda & Yean-Ren Hwang. *A cutter tool monitoring in machining process using Hilbert-Huang transform*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 50, no. 5, pages 495 – 501, 2010.
- [Kamarthi 97] S.V. Kamarthi & S. Pittner. *fourier and wavelet transform for flank wear estimation — A COMPARISON*. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 11, no. 6, pages 791 – 809, 1997.
- [Khamsehazadeh 91] H. Khamsehazadeh. *Behaviour of Ceramic Cutting Tools When Machining Superalloys*. PhD thesis, University of Warwick, 1991.
- [Kilundu 11] Bovic Kilundu, Pierre Dehombreux & Xavier Chimentin. *Tool wear monitoring by machine learning techniques and singular spectrum analysis*. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 25, no. 1, pages 400 – 415, 2011.
-

-
- [Kim 02] H. Y. Kim, J. H. Ahn, S. H. Kim & S. Takata. *Real-time drill wear estimation based on spindle motor power*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 124, no. 3, pages 267 – 273, 2002.
- [Kitagawa 97] T. Kitagawa, A. Kubo & K. Maekawa. *Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn*. Wear, vol. 202, no. 2, pages 142 – 148, 1997.
- [Li 97] X. Q. Li, Y. S. Wong & A. Y. C. Nee. *Tool wear and chatter detection using the coherence function of two crossed accelerations*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 37, no. 4, pages 425 – 435, 1997.
- [Liang 04] Steven Y. Liang. *Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art*. ASME, vol. 126, pages 297–311, 2004.
- [Liao 96] Y.S Liao & R.H SHIUE. *Carbide tool wear mechanism in turning of Inconel 718 superalloy*. Wear, ISSN 0043-1648, vol. 1, pages 16–24, 1996.
- [Lin 95] S.C. Lin & C.J. Ting. *Tool wear monitoring in drilling using force signals*. Wear, vol. 180, no. 1–2, pages 53 – 60, 1995.
- [ManHIRP 04] ManHIRP. *ManHIRP "Final Report"*. Rapport technique, 2004.
- [Marinescu 08] Iulian Marinescu & Dragos A. Axinte. *A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 48, no. 10, pages 1148 – 1160, 2008.
- [Marinescu 09a] Iulian Marinescu & Dragos Axinte. *A time–frequency acoustic emission-based monitoring technique to identify workpiece surface malfunctions in milling with multiple teeth cutting simultaneously*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 49, no. 1, pages 53 – 65, 2009.
- [Marinescu 09b] M. Marinescu, M. Jrad, A. Devillez & D. Dudzinski. *Cutting Temperature Measurement during Drilling of Ti6Al4V, Comparison between Modeling and Experimental Results from Thrust and Torque Point of View*. 12th Cirp Conference on Modelling of Machining Operations. Donostia-San Sebastián, Spain, vol. 1, pages 395–402, 2009.
-

-
- [Nabhani 01] Farhad Nabhani. *Wear mechanisms of ultra-hard cutting tools materials*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 115, no. 3, pages 402 – 412, 2001.
- [Nouari 05] M. Nouari, G. List, F. Girot & D. Géhin. *Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 45, no. 12–13, pages 1436 – 1442, 2005.
- [Nouari 08] Mohammed Nouari, Madalina Calamaz & Franck Girot. *Mécanismes d'usure des outils coupants en usinage à sec de l'alliage de titane aéronautique Ti-6Al-4V*. Comptes Rendus Mécanique, vol. 336, no. 10, pages 772 – 781, 2008.
- [Olovsjö 10] S. Olovsjö, A. Wretland & G. Sjöberg. *The effect of grain size and hardness of wrought Alloy 718 on the wear of cemented carbide tools*. Wear, vol. 268, no. 9-10, pages 1045 – 1052, 2010.
- [Pawade 07] R.S. Pawade, Suhas S. Joshi, P.K. Brahmankar & M. Rahman. *An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 192-193, pages 139 – 146, 2007. The Seventh Asia Pacific Conference on Materials Processing (7th APCMP 2006).
- [Perrin 07] Geraldine Perrin. *Études métallurgique, mécanique et thermique du perçage au foret hélicoïdal dans l'Inconel 718 TR*. Thèse de doctorat, Ecole de Mines de Paris, 2007.
- [Prengel 01] H.G Prengel, P.C Jindal, K.H Wendt, A.T Santhanam, P.L Hegde & R.M Penich. *A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools*. Surface and Coatings Technology, vol. 139, no. 1, pages 25 – 34, 2001.
- [Rahman 97] M. Rahman, W.K.H. Seah & T.T. Teo. *The machinability of inconel 718*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 63, no. 1-3, pages 199 – 204, 1997.
- [Rancic 10] M. Rancic, J-P Costes & G. Poulachon. *Tool wear investigation: behavior in continuous trials vs. divided wear trials*. In ISBN 978-88-95028-65-1, 2010.
- [Rech 04] J Rech, A Kusiak & J.L Battaglia. *Tribological and thermal functions of cutting tool coatings*. Surface and Coatings Technology, vol. 186, no. 3, pages 364 – 371, 2004.
-

-
- [Reed 99] R. Reed, M. Jackson & Y. Na. *Characterization and modeling of the precipitation of the sigma phase in UDIMET 720 and UDIMET 720Li*. Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 30, pages 521–533, 1999. 10.1007/s11661-999-0044-6.
- [Sadat 87] Abdul B. Sadat. *Surface region damage of machined inconel-718 nickel-base superalloy using natural and controlled contact length tools*. Wear, vol. 119, pages 225–235, 1987.
- [Sadat 92] A. Sadat & M. Reddy. *Surface integrity of inconel-718 nickel-base superalloy using controlled and natural contact length tools. part I: Lubricated*. Experimental Mechanics, vol. 32, pages 282–288, 1992. 10.1007/BF02319367.
- [Scheffer 01] C. Scheffer & P.S. HEYNS. *Wear monitoring in turning operations using vibration and strain measurements*. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 15, no. 6, pages 1185 – 1202, 2001.
- [Seguy 08] Sébastien Seguy. *De l'adaptation à la variation continue de la vitesse de broche afin de contrôler le broutement en fraisage de parois minces : modélisations et études expérimentales*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2008.
- [Sharman 01a] Adrian Sharman, Richard C. Dewes & David K. Aspinwall. *Tool life when high speed ball nose end milling Inconel 718™*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 118, no. 1–3, pages 29 – 35, 2001.
- [Sharman 01b] A.R.C. Sharman, D.K. Aspinwall, R.C. Dewes & P. Bowen. *Workpiece surface integrity considerations when finish turning gamma titanium aluminide*. Wear, vol. 249, no. 5-6, pages 473 – 481, 2001.
- [Sharman 06] A.R.C. Sharman, J.I. Hughes & K. Ridgway. *An analysis of the residual stresses generated in Inconel 718(TM) when turning*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 173, no. 3, pages 359 – 367, 2006.
- [Sharman 08] A.R.C. Sharman, A. Amarasinghe & K. Ridgway. *Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 200, no. 1-3, pages 424 – 432, 2008.
- [Shi 07a] D. Shi, D. Axinte & N. Gindy. *Development of an online machining process monitoring system: a case study of the broaching process*. The International
-

- Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 34, pages 34–46, 2007. 10.1007/s00170-006-0588-1.
- [Shi 07b] Dongfeng Shi & Nabil N. Gindy. *Development of an online machining process monitoring system: Application in hard turning*. Sensors and Actuators A: Physical, vol. 135, no. 2, pages 405 – 414, 2007.
- [Teti 10] R. Teti, K. Jemielniak, G. O’Donnell & D. Dornfeld. *Advanced monitoring of machining operations*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 59, no. 2, pages 717 – 739, 2010.
- [Ulutan 10] Durul Ulutan & Tugrul Ozel. *Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. In Press, Corrected Proof, pages –, 2010.
- [Vigneau 99] Joël Vigneau. *Usinage des matériaux aéronautiques à faible usinabilité*. Technique de l’ingénieur, 1999.
- [Wagner 11] Vincent Wagner. *Amélioration de la productivité en usinage d’un titane réfractaire : le Ti5553*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2011.
- [Wehbe 10] Toufic Wehbe. *Étude des vibrations de pièce mince durant l’usinage par stéréo corrélation d’images*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2010.
- [Xue 11] Chao Xue & Wuyi Chen. *Adhering layer formation and its effect on the wear of coated carbide tools during turning of a nickel-based alloy*. Wear, vol. 270, no. 11-12, pages 895 – 902, 2011.
- [Zhang 09] S. Zhang, J. Li, J. Deng & Y. Li. *Investigation on diffusion wear during high-speed machining Ti-6Al-4V alloy with straight tungsten carbide tools*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 44, pages 17–25, 2009. 10.1007/s00170-008-1803-z.

