

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

AMÉLIORATION DU PROCÉDÉ DE FABRICATION
D'ALÉSAGES PAR FRAISAGE ORBITAL

BENJAMIN CARRIER
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
AOÛT 2007



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-35669-2

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-35669-2

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé

AMÉLIORATION DU PROCÉDÉ DE FABRICATION
D'ALÉSAGES PAR FRAISAGE ORBITAL

Présenté par : CARRIER, Benjamin

En vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. MASCLE Christian, Doct. ès sc.

M. MAYER René, Ph.D., directeur de recherche

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., codirecteur de recherche

M. CHÂTELAIN Jean-François, Ph.D.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout ceux qui ont pu, de près ou de loin, m'aider à faire de ce projet de maîtrise un succès, et tout particulièrement M. René Mayer, pour m'avoir permis de réaliser ce projet sous sa tutelle. Le temps qui m'a été alloué par M. Mayer a été crucial pour le succès de ce projet. Je tiens également à remercier M. Marek Balazinski pour m'avoir donné un bon coup de main dans ce projet. Un merci s'impose également pour tous ceux qui travaillent dans le laboratoire de fabrication et de métrologie : Mélissa Côté, François Ménard, Guy Gironne et Louida Laliberté, qui m'ont été d'un grand soutien autant d'un point de vue théorique que du point de vue pratique. Sans eux, je n'aurais pas pu réaliser tous les tests que j'ai eu à faire tout au long de ce projet de maîtrise.

Du côté des industriels, je tiens à remercier Pratt & Whitney et spécialement M. Serafetin Engin pour sa disponibilité et M. Robert Chicoine pour son aide matérielle en me fournissant l'équipement dont j'avais besoin pour réaliser certains tests. Du côté de Bombardier, un merci s'impose à M. Stéphane Chalut pour l'aide apportée au cours des réunions mensuelles du CRIAQ.

Provenant des institutions d'enseignement, je veux remercier M. Jean-François Châtelain de l'ÉTS ainsi que M. Henri Paris de l'université de Grenoble pour leur aide et pour le soutien théorique dont ils ont pu me faire bénéficier.

Un merci s'impose au CRIAQ pour le soutien financier sans quoi je n'aurais probablement pas pu faire ce projet.

Je veux également remercier Mohamed Slamini, Serge St-Martin, Victor Calatoru ainsi que Réjean Roy pour leur contribution de près ou de loin à mon projet.

Finalement, je ne veux pas oublier parents et amis qui ont su me soutenir durant mes études et qui ont toujours été compréhensifs au fait que je n'avais pas toujours assez de temps à leur consacrer.

RÉSUMÉ

Le but de ce projet est d'étudier le comportement d'un système MOCN/pièce/outil lors de la fabrication d'alésages par fraisage orbital. On cherche à identifier, comprendre et corriger les erreurs pouvant altérer la qualité de surface d'un tel alésage, et ceci dans le but de remplacer l'utilisation de la barre à aléser par du fraisage orbital lors de la fabrication d'alésages.

Le choix de cette technique d'usinage provient de certaines hypothèses soulevées. Le fraisage orbital devrait permettre une augmentation de productivité par rapport à la barre à aléser puisque ce procédé est supposé beaucoup plus rapide. De plus, la qualité de surface en fraisage orbital, bien que moins bonne qu'avec la barre à aléser, peut être contrôlée pour devenir autant sinon meilleure qu'avec le procédé traditionnel.

Au cours de ce projet, plusieurs pièces ont été usinées afin de tester différents ajustements possibles appliqués à la stratégie d'usinage par fraisage orbital. La première pièce usinée a permis de cerner les erreurs dominantes sur la surface usinée en fraisage orbital. Ces erreurs sont :

- Ondulations dues aux vibrations forcées.
- Erreur d'entrée/sortie de l'outil.
- Forme quadrilobée de la surface.
- Erreurs de pics à l'inversion.

Concernant l'erreur due aux vibrations forcées, il faut noter que cette erreur est inhérente au procédé mais son amplitude est très faible. Aucune correction n'a donc été apportée pour corriger cette erreur. Il en est de même pour la forme quadrilobée observée lors de la métrologie des surfaces usinées. L'hypothèse la plus plausible pouvant générer cette erreur vient du problème de rigidité variable de la paroi extérieure des alésages. Cette erreur n'a pas été analysée ici car ceci pourrait faire l'objet d'un projet à elle seule.

Cependant, pour les tests d'usinage faits par la suite, nous avons pris soin de conserver une épaisseur suffisamment grande de la paroi pour limiter l'impact du problème de rigidité.

L'erreur d'entrée/sortie de l'outil dans la matière a fait l'objet d'une seconde pièce test. Sur cette pièce, deux stratégies ont été testées dans le but d'éliminer cette erreur. La première stratégie développée consistait à faire une trajectoire spiralee partant du centre de l'usinage jusqu'à la paroi à usiner. La deuxième stratégie testée consistait en une trajectoire hélicoïdale, trajectoire à rayon constant mais ayant un mouvement relatif entre l'outil et la pièce dans l'axe de l'alésage. La stratégie de trajectoire spiralee a montré une grande diminution de l'erreur d'entrée/sortie par rapport aux tests initiaux qui avaient été menés. De son côté, la trajectoire hélicoïdale a permis d'éliminer complètement l'erreur d'entrée/sortie de l'outil dans la matière. C'est donc cette stratégie qui a été conservée comme étant la plus viable.

Concernant les pics à l'inversion, des tests de KGM ont été réalisés dans le but de pouvoir corriger le comportement dynamique de la MOCN puisque cette erreur provient typiquement de la machine. Le paramètre du contrôleur de la machine-outil régissant la quantité d'accélération lors d'un changement de direction des axes de la machine a pu être optimisé grâce aux tests de KGM. En trouvant les valeurs optimales des paramètres du contrôleur, il a été possible de limiter les erreurs de pics à l'inversion à quelques micromètres seulement.

Finalement, la dernière pièce usinée consistait à faire un test de comparaison entre la barre à aléser et le fraisage orbital avec toutes les corrections apportées au cours du projet. L'usinage des deux pièces avec les deux méthodes a donné des résultats très semblables en terme de qualité de surface. La barre à aléser offre un meilleur fini de surface que le fraisage orbital, mais les erreurs pouvant altérer la qualité de surface sont du même ordre de grandeur. En ce qui concerne la productivité, les deux stratégies

donnent un temps d'usinage équivalent. La différence majeure est que le fraisage orbital offre l'avantage de pouvoir réaliser n'importe quel diamètre d'alésage avec un seul outil, limitant les pertes de temps dues aux changements d'outils et les temps de réglage des outils.

En conclusion, la fabrication d'alésages en fraisage orbital est une solution viable pouvant remplacer la barre à aléser en offrant une qualité de surface équivalente à la barre à aléser, en plus d'offrir des gains de temps en terme de préparation d'outils et de changement d'outils.

ABSTRACT

The objective of this project is to identify, understand and control the errors that can deteriorate the surface finish of a bore made with orbital milling in order to replace the boring bar method to machine a hole.

The justification for the project is that orbital milling should improve the manufacturing productivity compared with boring bar, because it is much faster than a boring bar. Moreover, the surface quality in orbital milling, even if worse than the surface quality made with a boring bar, can be controlled to become the same or better than with the boring bar method.

During this project, test parts were machined to test various possible adjustments applied to orbital milling strategy. The first machined part allowed us to detect the following:

- Undulations due to forced vibrations.
- Tool entry/exit error.
- Clover shape of the surface.
- Reversal spikes errors.

Forced vibration error cannot be avoided because it is part of the process. However its amplitude is very small. No correction can be applied to reduce this error. Regarding the clover shape error, the most plausible cause of this error comes from the difference in rigidity of the wall around the hole that has been machined. This error was not analyzed because of its apparent complexity. However, for subsequent tests, care was taken to have a large thickness around the hole to avoid any rigidity problems.

The entry/exit error of the tool in the workpiece was analyzed with the second machined test part. Two strategies were tested to reduce this error. The first strategy consists in using a spiral tool trajectory. The second strategy consists of an helicoidal. The spiral

trajectory strategy showed a decreasing of the entry/exit error amplitude. However, with the helicoidal strategy, it was possible to completely eliminate the entry/exit error. For upcoming tests, the helicoidal strategy will be use to avoid entry/exit error.

Concerning reversal spike errors, some KGM tests were carried out to correct the dynamic behavior of the machine. The parameters of the controller of the machine governing the acceleration quantity during a change in direction of displacement were optimized with KGM tests. It was possible to reduce reversal spike errors to a few micrometers only.

Finally, the last machined part consisted of a comparison between the fabrication of a hole with a boring bar and the fabrication of a hole with orbital milling with all corrections made during this project. Both strategies gave very similar results in term of surface quality. The boring bar gave a better surface finish but the magnitude of dominant errors on the surface is similar. In terms of productivity, both strategies gave the same machining time. The major difference is that orbital milling offers the advantage of being able to machine any bore diameter greater then tool diameter, reducing tool changing time and tools adjustment cost.

In conclusion, an orbital milling strategy can be used to replace the boring bar for bore machining. Of course, certain steps will have to be done to be able to establish this strategy in the industry but we showed that orbital milling gives almost the same surface quality then boring bar, with significant productivity gain.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	IV
RÉSUMÉ	VI
ABSTRACT.....	IX
TABLE DES MATIÈRES	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIX
LISTE DES ANNEXES	XX
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 – CADRE THÉORIQUE.....	5
1.1 Revue littéraire.....	5
1.2 Utilisation de l'aluminium	6
1.3 Fraisage	7
1.4 Alésage par barre à aléser	9
1.5 Outils de coupe.....	10
1.6 Coefficients de coupe.....	12
1.7 Phénomènes vibratoires et analyse modale.....	12
1.8 Pics à l'inversion.....	16
CHAPITRE 2 – MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE.....	17
2.1 Choix des paramètres d'usinage	18
2.1.1 Matériau	18
2.1.2 Bridage.....	18
2.1.3 Machine-outil.....	19
2.1.4 Outils : Fraise.....	20
2.1.5 Outils : Barre à aléser.....	20
2.1.6 Coefficients de coupe.....	21
2.1.7 Analyse modale.....	24

2.2 Tests de circularité	28
2.3 Pièces usinées (optimisation du procédé)	30
2.4 Test comparatif fraisage orbital versus barre à aléser versus KGM	36
CHAPITRE 3 – ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	40
3.1 Coefficients de coupe.....	40
3.2 Analyse modale.....	44
3.3 Tests de circularité	46
3.4 Pièces usinées.....	49
3.5 Test comparatif	54
CONCLUSION.....	65
RECOMMANDATIONS	67
RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE.....	69
ANNEXES.....	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Paramètres de coupe sélectionnés à partir de l'analyse modale.....	32
Tableau 2.2 : Rayons des différentes rainures	33
Tableau 3.1 : Coefficients de coupe à 5013 rpm et 10026 rpm	43
Tableau 3.2 : Valeurs optimales du paramètre #1860 pour l'axe x	46
Tableau 3.3 : Valeurs optimales du paramètre #1860 pour l'axe y	47

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Pièces types dans l'industrie. [9]	1
Figure 2 : Fabrication d'un alésage à l'aide d'une barre à aléser.	2
Figure 3 : Fabrication d'un alésage en fraisage orbital.....	3
Figure 1.1 : Paramètres régissant le processus de fraisage [7].....	8
Figure 1.2 : Stratégies d'usinage en fraisage [7].....	8
Figure 1.3 : Paramètres régissant la fabrication d'un alésage [7]	10
Figure 1.4 : Fraise monobloc Garr [6]	11
Figure 1.5 : Évacuation de la chaleur par le copeau [7].....	11
Figure 1.6 : Phénomènes vibratoires en fraisage	14
Figure 1.7 : Modèle dynamique du fraisage [12].....	14
Figure 1.8 : Lobes de stabilité.....	15
Figure 2.1 : MOCN HU-40 de Mitsui Seiki	19
Figure 2.2 : Barre à aléser Komet [8].....	21
Figure 2.3 : Pièce usinée durant les tests d'usinage.....	23
Figure 2.4 : Forces et accélérations mesurées lors d'un test d'impact.....	25
Figure 2.5 : Fonction de transfert associée à un degré de liberté.....	26
Figure 2.6 : KGM utilisé pour les tests de circularité	28
Figure 2.7 : Résultat d'un test de circularité	29
Figure 2.8 : Pièce test #1	31
Figure 2.9 : Portions usinées sur la pièce test #1	32
Figure 2.10 : Trajectoire de l'outil à l'entrée/sortie	34
Figure 2.11 : Parcours hélicoïdal	35
Figure 2.12 : Parcours spiralé	35
Figure 2.13 : Pièce pour tests comparatifs.	38
Figure 3.1 : Forces de coupe moyennes avec vitesse de rotation à 5013 rpm	40
Figure 3.2 : Forces de coupe moyennes avec vitesse de rotation à 10026 rpm	42
Figure 3.3 : Lobes de stabilité pour le système machine/outil/pièce.	45

Figure 3.4 : Valeurs optimales du paramètre #1860 pour l'axe x.....	47
Figure 3.5 : Valeurs optimales du paramètre #1860 pour l'axe y.....	48
Figure 3.6 : Tracé provenant de mesures sur la MMT d'une surface usinée.....	49
Figure 3.7 : Première surface usinée avec une trajectoire spiralée.....	52
Figure 3.8 : Deuxième surface usinée avec une trajectoire spiralée.....	52
Figure 3.9 : Troisième surface usinée avec une trajectoire spiralée.....	53
Figure 3.10 : Surface usinée avec une trajectoire hélicoïdale.....	53
Figure 3.11 : Tracé de KGM pour les valeurs optimales du paramètre #1860.....	55
Figure 3.12 : Usinage d'un alésage avec la barre à aléser.....	56
Figure 3.13 : Alésage usiné avec la barre à aléser à une profondeur de 1 mm.....	57
Figure 3.14 : Alésage usiné avec la barre à aléser à une profondeur de 3.5 mm.....	57
Figure 3.15 : Alésage usiné avec la barre à aléser à une profondeur de 6 mm.....	58
Figure 3.16 : Usinage d'un alésage par fraisage orbital.....	59
Figure 3.17 : Alésage usiné par fraisage orbital à une profondeur de 1 mm.....	60
Figure 3.18 : Alésage usiné par fraisage orbital à une profondeur de 3.5 mm.....	60
Figure 3.19 : Alésage usiné par fraisage orbital à une profondeur de 6 mm.....	61
Figure 3.20 : Tracé de KGM versus MMT. a) Tracé de KGM avec optimisation du paramètre #1860. b) Mesure sur MMT de l'alésage par fraisage orbital.....	62
Figure 3.21 : Trace observée sur la surface usinée avec la barre à aléser.....	64
Figure 3.22 : Trace observée sur la surface usinée en fraisage orbital.....	64
Figure A-1 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (50,40).....	73
Figure A-2 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (30,30).....	74
Figure A-3 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (10,10).....	74
Figure A-4 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (20,5).....	75
Figure A-5 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (20,5).....	76
Figure A-6 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (10,0).....	76
Figure A-7 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (10,-5).....	77
Figure A-8 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (10,-5).....	77
Figure A-9 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (0,-15).....	78

Figure A-10 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (0,-15)	79
Figure A-11 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (10,-25)	79
Figure A-12 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (-13,-27)	80
Figure A-13 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (-17,-30)	80
Figure A-14 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (20,5)	81
Figure A-15 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (25,5)	81
Figure A-16 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (35,5)	82
Figure A-17 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (40,5)	82
Figure A-18 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (40,5)	83
Figure A-19 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (20,5)	84
Figure A-20 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (23,5)	84
Figure A-21 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (25,5)	85
Figure A-22 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (25,5)	86
Figure A-23 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (10,-5)	86
Figure A-24 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (10,-10)	87
Figure A-25 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (10,-15)	87
Figure A-26 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (10,-15)	88
Figure A-27 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (0,-25)	89
Figure A-28 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (-10,-25)	89
Figure A-29 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (40,5)	90
Figure A-30 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (45,15)	91
Figure A-31 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (50,25)	91
Figure A-32 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (50,40)	92
Figure A-33 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (50,35)	92
Figure A-34 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (50,35)	93
Figure A-35 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (40,25)	93
Figure A-36 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (35,20)	94
Figure A-37 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (35,22)	94
Figure A-38 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (35,22)	95

Figure A-39 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (30,20).....	96
Figure A-40 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (23,15).....	96
Figure A-41 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (20,10).....	97
Figure A-42 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (20,10).....	98
Figure A-43 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (5,5).....	98
Figure A-44 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 0 mm, #1860 = (5,0).....	99
Figure B-1 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 66.7625 mm, Profondeur de coupe de 2mm.....	100
Figure B-2 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 66.7625 mm, Profondeur de coupe de 2 mm	101
Figure B-3 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 62.7625 mm, Profondeur de coupe de 5 mm	102
Figure B-4 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 62.7625 mm, Profondeur de coupe de 5 mm	102
Figure B-5 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 58.7625 mm, Profondeur de coupe de 2 mm	103
Figure B-6 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 58.7625 mm, Profondeur de coupe de 2 mm	104
Figure B-7 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 54.7625 mm, Profondeur de coupe de 5 mm	104
Figure B-8 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 54.7625 mm, Profondeur de coupe de 5 mm	105
Figure B-9 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 116.7625 mm, Profondeur de coupe de 2 mm	106
Figure B-10 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 116.7625 mm, Profondeur de coupe de 2 mm	106
Figure B-11 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 112.7625 mm, Profondeur de coupe de 5 mm	107

Figure B-12 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 112.7625 mm, Profondeur de coupe de 5 mm	108
Figure B-13 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 108.7625 mm, Profondeur de coupe de 2 mm	108
Figure B-14 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 108.7625 mm, Profondeur de coupe de 2 mm	109
Figure B-15 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 104.7625 mm, Profondeur de coupe de 5 mm	110
Figure B-16 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 104.7625 mm, Profondeur de coupe de 5 mm	110

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CRIAQ	Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec
KGM	Kreutz Gitter Mebsystem (encodeur à grille croisée)
LRFV	Laboratoire de recherche en fabrication virtuelle
MMT	Machine à mesurer tridimensionnelle
MOCN	Machine-outil à commandes numériques
P&W	Pratt & Whitney Canada
RPM	Révolutions par minute
UGV	Usinage grande vitesse

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	73
Annexe B	100

INTRODUCTION

Les procédés de mise en forme par enlèvement de matière sont les procédés les plus utilisés en entreprise quand vient le temps de fabriquer une pièce. Les industriels ainsi que les institutions d'enseignement effectuent énormément de recherche dans le but d'optimiser ces procédés.

Ce mémoire touche la fabrication d'alésage dans des métaux légers, principalement pour l'industrie aéronautique où les métaux légers sont ceux préconisés pour la fabrication de différentes pièces. Certaines pièces dans l'industrie aéronautique sont très complexes et nécessitent la fabrication de plusieurs alésages.

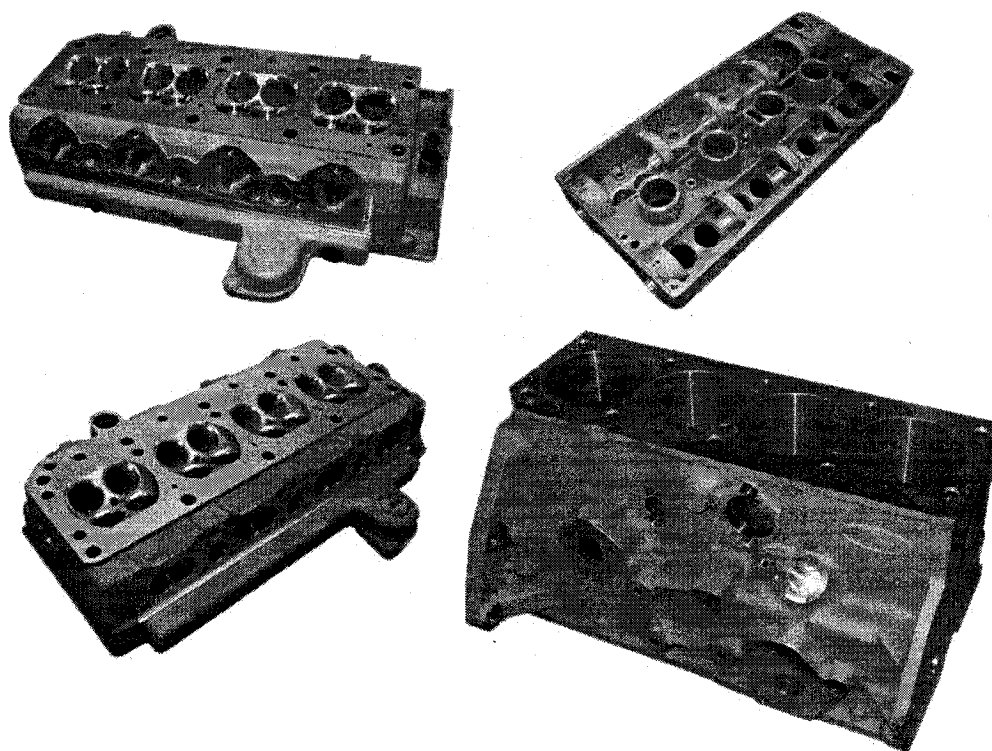


Figure 1 : Pièces types dans l'industrie. [9]

La méthode préconisée pour la fabrication d'alésages précis est l'utilisation de la barre à aléser. Cette méthode possède les avantages et les inconvénients suivants :

Avantages :

- Procédé très précis.

Inconvénients :

- Procédé très long (changements d'outils fréquents, réglages nombreux).
- Une barre à aléser possède un diamètre fixe permettant seulement l'usinage d'un alésage du même diamètre que l'outil.
- Le magasin d'outil doit pouvoir contenir assez d'espace pour y installer toutes les barres à aléser permettant l'usinage de tous les alésages prévus sur une pièce.
- Procédé coûteux en terme d'outils, de temps de réglage et de temps d'usinage.

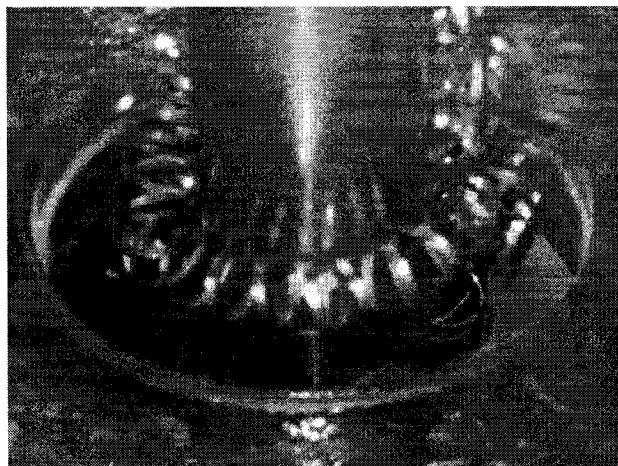


Figure 2 : Fabrication d'un alésage à l'aide d'une barre à aléser.

Dans ce projet, nous tentons de remplacer la barre à aléser par l'utilisation du fraisage orbital. Ce processus consiste à réaliser la fabrication d'alésages en fraisage, en effectuant des trajectoires par interpolation circulaire. Les avantages et inconvénients d'un tel procédé sont les suivants :

Avantages :

- Procédé très rapide.

- Un seul outil peut réaliser la fabrication de tous les alésages ayant un diamètre supérieur à celui de l'outil.
- Procédé moins coûteux que la barre à aléser.

Inconvénients :

- La précision est à modérer.

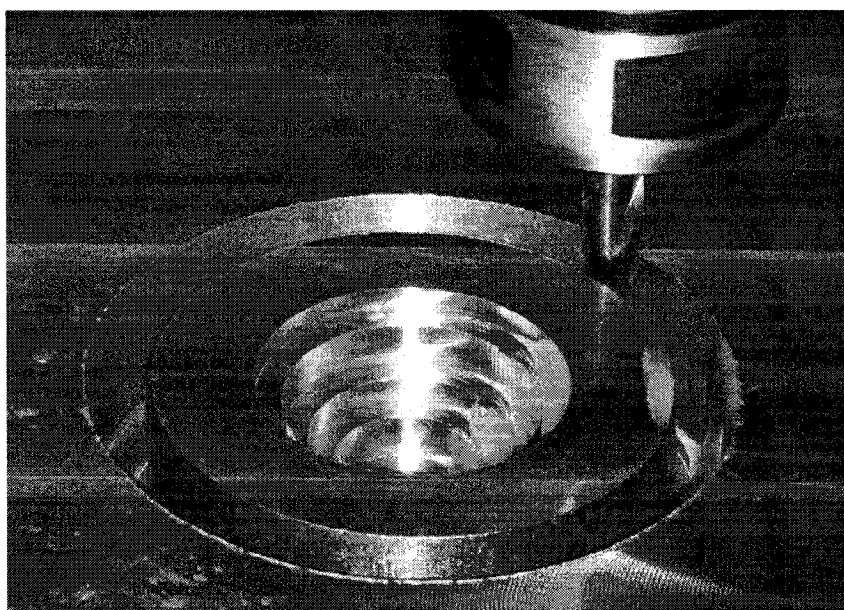


Figure 3 : Fabrication d'un alésage en fraisage orbital

Dans le cadre de ce projet, nous cherchons à identifier, comprendre et corriger les erreurs pouvant altérer la qualité de surface d'un alésage fait par fraisage orbital. Les différentes optimisations pouvant être apportées à ce procédé seront alors testées sur des pièces tests. Les résultats obtenus pourront alors être comparés à ceux obtenus lors de la fabrication d'un alésage réalisé avec une barre à aléser.

Ce mémoire présente le travail fait dans le but de permettre l'utilisation du fraisage orbital pour remplacer la barre à aléser pour la fabrication d'alésages. Trois sections principales seront développées dans ce document. Tout d'abord, un survol du cadre

théorique entourant le projet sera présenté au chapitre 1. Dans le chapitre 2, la méthodologie expérimentale sera présentée. Finalement, le dernier chapitre contient les résultats expérimentaux des différents tests réalisés au cours du projet.

CHAPITRE 1 – CADRE THÉORIQUE

Ce chapitre présente les différents concepts théoriques utilisés pour ce projet. Le chapitre débute avec une revue littéraire suivi d'une présentation de différents aspects théoriques concernant l'utilisation de l'aluminium, le processus de fraisage, la fabrication d'alésage avec une barre à aléser, les outils de coupe, les coefficients de coupe ainsi que les phénomènes vibratoires et l'analyse modale.

1.1 Revue littéraire

Deux articles ont été trouvés dans lesquels il est fait mention de fabrication d'alésages en fraisage : un de B.K. Hinds et T.S. Ong [13] ainsi que un de E.D Tung, M. Tomizuka et Y. Urushisaka [14]. Dans ces deux articles, il est fait mention de la possibilité d'usiner un alésage à l'aide d'interpolations circulaires sous forme spiralées ou hélicoïdales, deux stratégies qui ont été testées durant ce projet. Dans l'article de Hinds et Ong, l'emphasis est mise sur le choix des paramètres de coupe et des stratégies d'usinage pour permettre l'usinage d'un alésage en fraisage afin de respecter les tolérances géométriques. Dans les choix des stratégies d'entrée de l'outil dans la matière, l'auteur mentionne la possibilité d'avoir une trajectoire hélicoïdale mais cette stratégie n'est pas présentée dans cet article. Du côté de Tung, Tomizuka et Urushisaka, l'article présente des tests d'usinage d'alésages fait en utilisant un contrôleur expérimental induisant une compensation de friction lors de l'usinage. Ils ont en effet montré qu'il était possible d'obtenir des trajectoires réelles de l'outil plus près des trajectoires programmées en incluant des compensations de friction dans le contrôleur de la machine-outil. Pour les tests qu'ils ont réalisés, la stratégie d'entrée et de sortie de l'outil qui a été préconisée était la trajectoire spiralée.

Concernant l'étude de la stabilité du processus de fraisage, plusieurs chercheurs ont élaboré des méthodes pour l'obtention des lobes de stabilité. C'est le cas de M.A. Davies et al. [17], de E. Solis et al. [15] ainsi que de Yusuf Altintas [10]. À noter que pour

l'étude de la stabilité, le modèle mathématique utilisé dans ce projet est celui développé par Y. Altintas puisque le logiciel que son équipe a développé est celui disponible à l'université.

Finalement, concernant les pics à l'inversion, Ryuta Sato et Masaomi Tsutsumi [21] ont étudié le comportement dynamique d'une MOCN aux changements de direction des axes pour un parcours circulaire. Dans cet article, il n'est pas question de compensation mais bien de la compréhension du phénomène qui se produit aux quadrants durant une interpolation circulaire. Dans cet article, il est démontré que la vitesse et l'accélération jouent un rôle important dans la formation des pics à l'inversion lors d'un changement de direction d'un des axes de la machine. Il est donc pertinent de tenter de corriger les paramètres du contrôleur régissant ces accélérations dans le but de réduire l'amplitude des pics à l'inversion.

1.2 Utilisation de l'aluminium

Dans l'industrie aérospatiale, la masse des différentes composantes utilisées est cruciale pour l'optimisation des performances d'un produit. L'utilisation de métaux légers s'avère être le choix par excellence pour les pièces destinées à l'aéronautique.

L'aluminium présente, pour sa mise en forme, des avantages substantiels par rapport à d'autres métaux. L'usinabilité de l'aluminium est très bonne, nécessitant moins d'efforts de coupe que les métaux durs pour créer les copeaux. De plus, la très bonne conductivité thermique de l'aluminium permet un refroidissement rapide de la pièce usinée. Également, lors d'UGV la pièce ne se réchauffe pratiquement pas, limitant ici les déformations pouvant être dues à une augmentation de la température.

Lors des tests réalisés au cours de ce projet, un alliage d'aluminium 6061-T6 a été utilisé. Ce matériau possède une très bonne usinabilité en plus d'être un alliage très peu coûteux.

1.3 Fraisage

Dans les procédés de mise en forme par enlèvement de matière, le fraisage est la méthode d'usinage la plus répandue en industrie due à la polyvalence du procédé. Le mécanisme de fraisage se distingue des autres procédés d'usinage par la présence combinée d'une rotation de l'outil et de l'avance relative entre l'outil et la pièce à usiner. Le fraisage se caractérise également par un usinage interrompu dû au passage successif des dents de l'outil dans la matière. Il s'agit donc d'un processus de coupe non linéaire contrairement au tournage par exemple.

Différents paramètres de coupe régissent l'opération de fraisage :

- Nombre de dents, Z
- Profondeur de coupe axiale, ap [mm]
- Profondeur de coupe radiale, ae [mm]
- Vitesse de rotation de l'outil, N [tour/min]

$$\circ N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times d}$$

- Vitesse de coupe, v_c [mm/min]

$$\circ V_c = \frac{\pi \times d \times N}{1000}$$

- L'avance par dent, f_z [mm/dent]
- Vitesse d'avance, v_f [mm/min]

$$\circ V_f = f_z \times Z \times N$$

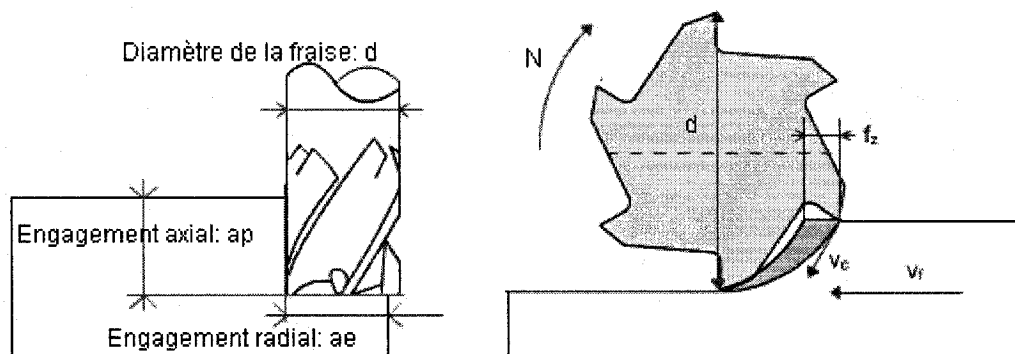


Figure 1.1 : Paramètres régissant le processus de fraisage [7]

Il existe deux stratégies de travail utilisées en fraisage : en avalant et en opposition.

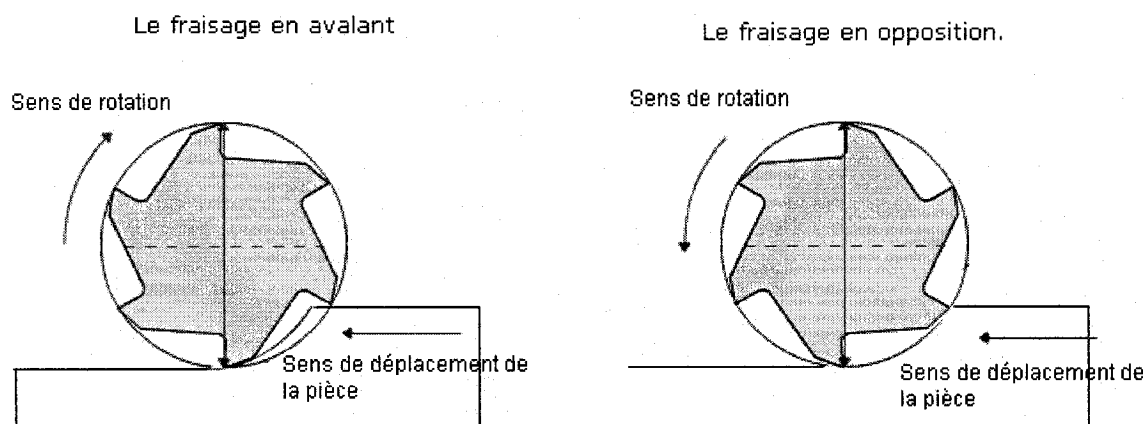


Figure 1.2 : Stratégies d'usinage en fraisage [7]

Le fraisage en avalant est caractérisé par une épaisseur du copeau maximale au début de la coupe. Ceci a pour effet d'augmenter les efforts de coupe au cours du procédé. L'orientation des forces de coupe lors d'un usinage en avalant a pour effet d'éloigner légèrement l'outil de la pièce. L'épaisseur de matière enlevée sera donc un peu plus petite que supposée. Ce type de mode de fraisage permet d'obtenir un meilleur fini de surface que par le fraisage en opposition. Concernant le fraisage par opposition, les dents entrent dans la matière avec une épaisseur de coupe minimale, générant ainsi de plus faibles efforts de coupe qu'avec le fraisage en avalant. L'orientation des efforts de coupe

dans ce cas-ci entraîne un rapprochement de l'outil et de la pièce, ce qui a pour effet qu'un tel usinage va générer un copeau légèrement plus épais que supposé. Pour les tests qui ont été faits dans ce projet, l'usinage en avalant a été préconisé puisque ce que nous cherchions à obtenir était un alésage avec une très bonne qualité de surface.

1.4 Alésage par barre à aléser

L'opération d'alésage se caractérise par l'utilisation d'outils de rayon équivalent au demi-diamètre de l'alésage à réaliser. L'outil est mis en rotation et le seul mouvement linéaire de la machine correspond à un déplacement selon l'axe de l'outil. La fabrication d'un alésage avec une barre à aléser se fait en deux étapes distinctes. Tout d'abord, un pré-perçage est nécessaire pour pouvoir par la suite effectuer la finition avec la barre à aléser. Généralement, la barre à aléser est utilisée lorsque la qualité de l'alésage est le critère prédominant. En effet, la barre à aléser offre une faible productivité mais un diamètre très précis et un excellent fini de surface.

Les paramètres régissant la fabrication d'un alésage sont les suivants :

- Diamètre de l'outil et de l'alésage, d [mm]
- Surépaisseur radiale d'alésage : a [mm]
- Vitesse de coupe, v_c [mm/min]
- Vitesse de rotation de l'outil, N [tour/min]

$$\circ N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times d}$$

- Avance par tour, f [mm/tour]
- Vitesse d'avance, v_f [mm/min]

$$\circ V_f = f \times N$$

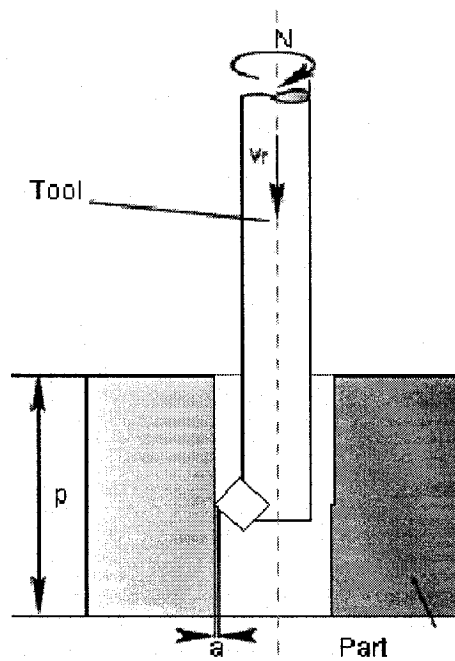


Figure 1.3 : Paramètres régissant la fabrication d'un alésage [7]

1.5 Outils de coupe

En ce qui a trait au choix des outils utilisés pour l'usinage en fraisage des différentes pièces, des outils typiques utilisés pour l'usinage de l'aluminium ont été sélectionnés. Ces outils, de la compagnie « Garr Tool » sont des fraises monobloc en carbure avec un revêtement en TiCN.

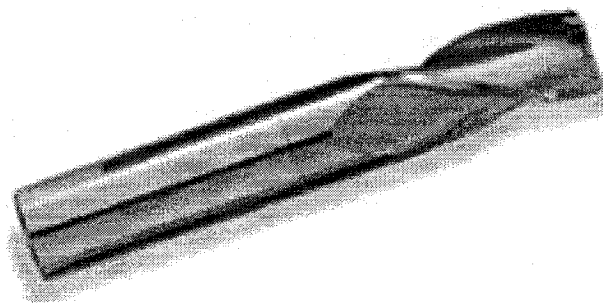


Figure 1.4 : Fraise monobloc Garr [6]

Le revêtement choisi, typique pour l'usinage de l'aluminium, permet d'accroître les caractéristiques physico-chimiques de la partie tranchante de l'outil. Les coefficients de frottement sur les différentes surfaces de l'outil sont de beaucoup diminués, permettant une meilleure évacuation du copeau lors de l'usinage puisque celui-ci aura moins tendance à coller sur l'outil. De plus, la faible conductivité thermique du revêtement empêche la propagation de la chaleur dans l'outil, chaleur qui sera principalement évacuée avec le copeau lors de l'usinage.

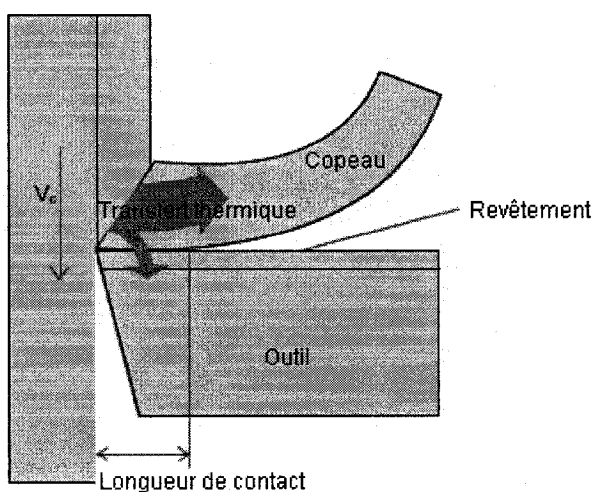


Figure 1.5 : Évacuation de la chaleur par le copeau [7]

Finalement, la présence d'un revêtement sur l'outil permet une meilleure résistance à l'usure, limitant la possibilité d'ébrèchement de l'outil.

1.6 Coefficients de coupe

La méthode préconisée pour trouver les coefficients de coupe est celle présentée par Yusuf Altintas dans son livre *Manufacturing Automation* [10]. La méthode présentée est une méthode expérimentale où il faut faire quelques essais de coupe afin de trouver les coefficients de coupe. Les différents coefficients de coupe sont :

- K_{tc} : Coefficient de coupe tangentiel [N/mm^2]
- K_{te} : Coefficient de contact tangentiel [N/mm]
- K_{rc} : Coefficient de coupe radial [N/mm^2]
- K_{re} : Coefficient de contact radial [N/mm]
- K_{ac} : Coefficient de coupe axial [N/mm^2]
- K_{ae} : Coefficient de contact axial [N/mm]

Ces coefficients servent à décrire l'interaction entre un outil et un brut d'usinage, en tenant compte des matériaux ainsi que de la géométrie de la partie coupante de l'outil.

La connaissance des coefficients de coupe permet de faire des simulations d'efforts de coupe pour le couple outil/brut d'usinage sélectionné mais aussi, ces coefficients rentrent dans les calculs nécessaires à l'obtention des lobes de stabilité du processus. La description détaillée de la procédure expérimentale permettant l'obtention des coefficients de coupe est présentée au chapitre 2.

1.7 Phénomènes vibratoires et analyse modale

Le procédé de fraisage est un processus intermittent dû au passage successif des dents de l'outil dans la matière, créant ainsi un phénomène d'auto excitation pouvant générer des

vibrations de l'outil. Puisque la trajectoire empruntée par l'outil durant l'usinage est directement copiée sur la surface usinée, il est primordial de contrôler les vibrations de l'outil afin de s'assurer de la stabilité d'usinage pour obtenir une pièce respectant les tolérances prescrites sur le dessin de définition. L'analyse modale sur la MOCN permet d'obtenir un graphique de lobes de stabilité duquel on peut tirer les paramètres d'usinage assurant un usinage stable. La théorie relative à l'analyse modale est celle présentée par Yusuf Altintas [10].

Durant l'usinage, deux types de vibrations peuvent survenir : les vibrations forcées et le broutement. Les vibrations forcées sont celles qui sont dues à la fréquence d'excitation correspondant au passage successif des dents de l'outil dans la matière. Ces vibrations sont inhérentes au procédé et sont généralement de très faible amplitude et ne causent pas de problèmes lors de l'usinage. Ces vibrations auront pour effet de laisser de petites ondulations sur la surface machinée. Le broutement est le type de vibration que l'on cherche à éviter lors du fraisage puisque ces vibrations peuvent être nuisibles et peuvent endommager la pièce mais aussi l'outil et la machine-outil. Le broutement est dû au fait que l'épaisseur du copeau peut osciller jusqu'à un maximum, causant une augmentation considérable des efforts de coupe. L'augmentation des forces peut rendre le système instable et venir endommager le système étudié. L'étude dynamique du procédé de fraisage permet de contrôler les paramètres pouvant créer le broutement et ainsi assurer un usinage stable exempt de broutement.

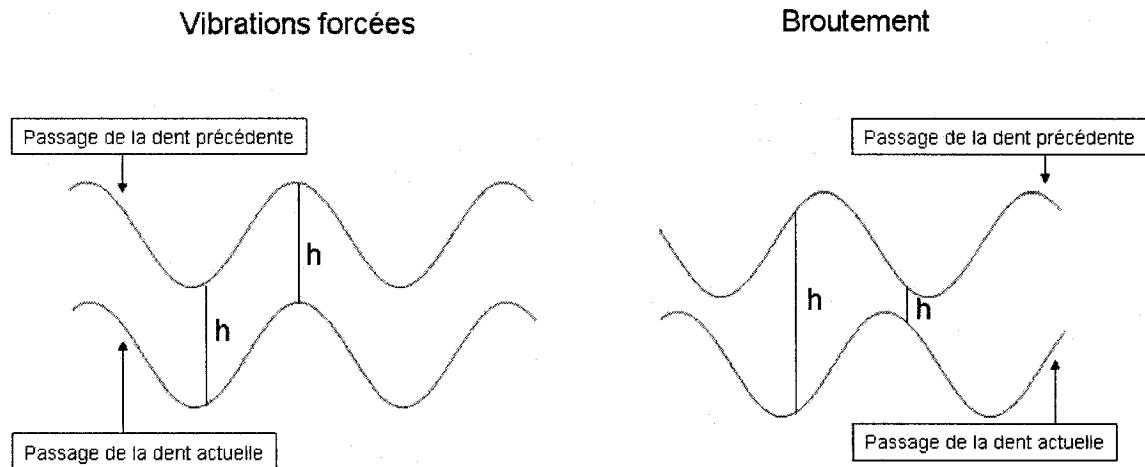


Figure 1.6 : Phénomènes vibratoires en fraisage

Le modèle dynamique associé au fraisage peut être représenté par le système à plusieurs degrés de libertés comme le montre la figure 1.7.

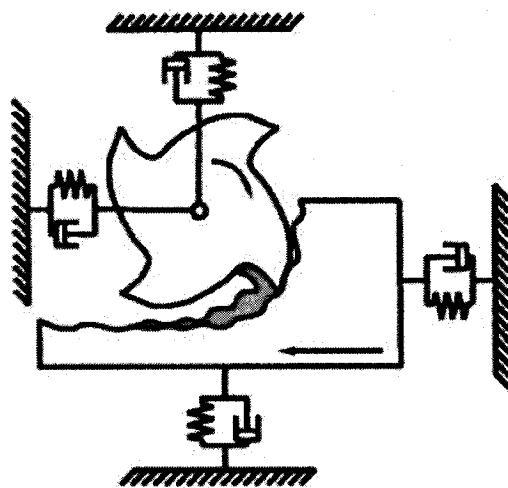


Figure 1.7 : Modèle dynamique du fraisage [12]

Il faut noter que dans la grande majorité des cas, la pièce est considérée comme rigide, éliminant ainsi les deux degrés de liberté associés à la pièce. Ceci n'est plus vrai lors d'usinage de murs minces par exemple où les vibrations du mur sont à considérer. Dans

le cas qui nous intéresse, on conserve seulement les deux degrés de liberté associés à l'outil, degrés de liberté qui sont associés aux directions principales x et y.

L'équation du mouvement pour un système à plusieurs degrés de liberté dans le domaine de Laplace est :

$$([M]s^2 + [C]s + [K]) \{X(s)\} = \{F(s)\}$$

La fonction de transfert associée à cette équation du mouvement est :

$$[H(s)] = \{X(s)\} / \{F(s)\} = ([M]s^2 + [C]s + [K])^{-1}$$

À partir de la fonction de transfert obtenue pour un système spécifique, ainsi qu'avec les différents paramètres considérés pour l'usinage, il est possible d'obtenir un graphique de lobes de stabilité.

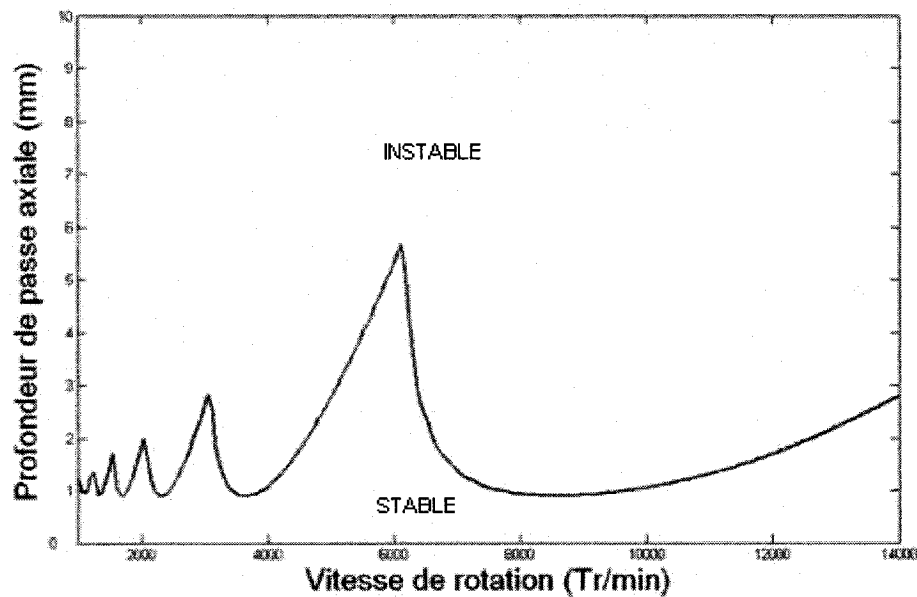


Figure 1.8 : Lobes de stabilité

La courbe sur un graphique de lobes de stabilité délimite l'usinage stable d'un usinage instable. Un choix de paramètres se situant sous la courbe assure un usinage stable tandis que des paramètres choisis au dessus de la courbe donneront un usinage instable.

La méthode expérimentale d'analyse modale permettant d'obtenir les lobes de stabilité est présentée en détail au chapitre 2.

1.8 Pics à l'inversion

Un pic à l'inversion est un phénomène dynamique que l'on peut déceler sur une machine-outil à l'aide d'un appareil de mesure de type barre à billes ou KGM. Ces instruments effectuent des prises de mesure des positions des axes lors d'un parcours circulaire sur la MOCN. Une des erreurs que ce type de machine peut déceler est les pics à l'inversion. Sur un tracé circulaire, le pic à l'inversion est un pic que l'on peut observer aux quatre quadrants du parcours. Cette erreur apparaît lors d'un changement de direction d'un des axes de la machine-outil.

Les pics à l'inversion sont causés par une pause momentanée dans le déplacement au point d'inversion de l'axe. Ceci peut se produire si le couple fourni par le moteur de l'axe est insuffisant ou par un mauvais réglage du mécanisme d'asservissement.

Cette erreur peut être diminuée par un ajustement adéquat des paramètres du contrôleur de la MOCN régissant le mécanisme d'asservissement.

CHAPITRE 2 – MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale menant à des pièces tests pouvant être mesurées très précisément afin de pouvoir comparer la méthode classique d'usinage d'un alésage avec une barre à aléser avec la fabrication d'alésages par fraisage orbital.

Tout d'abord, les pièces qui seront usinées serviront à tester différents paramètres en cause lors de l'usinage d'alésage en fraisage orbital afin de pouvoir comprendre et contrôler les effets de ces paramètres sur la qualité de la surface usinée ainsi qu sur la productivité. Chaque test fait permettra d'améliorer le processus de fraisage orbital pour éventuellement obtenir une stratégie d'usinage pouvant rivaliser avec la stratégie classique utilisant la barre à aléser.

En premier lieu, le choix des paramètres d'usinage est présenté. Pour ce faire, il faut réaliser des tests d'usinage pour obtenir les coefficients de coupe des outils utilisés pour pouvoir ensuite réaliser des tests d'impacts permettant de faire l'analyse modale du système machine/outil/pièce.

En second lieu, la méthodologie permettant la compensation des pics à l'inversion sera présentée, méthodologie utilisant un encodeur planaire (KGM) pour trouver les valeurs de compensation pouvant être incorporées dans le contrôleur de la machine.

Par la suite, les stratégies d'usinage des pièces test seront présentées. Ces pièces usinées ont permis l'optimisation du procédé en analysant les différentes erreurs présentes sur les surfaces usinées et en contrôlant ces erreurs.

Finalement, le test final de comparaison entre l'usinage par barre à aléser et par fraisage orbital sera présenté, test qui conclut ce projet.

2.1 Choix des paramètres d'usinage

Le choix des paramètres d'usinage pour une pièce dépend de plusieurs critères : productivité, état de surface, coût, caractéristiques de la MOCN, rigidité pièce/MOCN/outil. Dans le cas qui nous intéresse, les critères prédominants sont la productivité ainsi que la qualité de la surface usinée. Évidemment, avec le fraisage orbital, on cherche à obtenir une meilleure productivité et un meilleur état de surface qu'avec la barre à aléser. Bien sûr, le coût n'est pas à négliger mais si on arrive à augmenter la productivité, il va de soi qu'il sera possible de faire des gains substantiels au point de vue monétaire. Concernant les caractéristiques de la MOCN et la rigidité des composantes, ces deux critères ne font qu'apporter des restrictions dans le choix des paramètres de coupe.

2.1.1 Matériau

Pour ce qui est du choix du matériau utilisé pour les pièces test, l'aluminium 6061-T6 a été choisi, comme mentionné dans la section 1.2. Cet alliage d'aluminium possède une très bonne usinabilité en plus d'être peu coûteux. De plus, sa faible masse volumique fait de lui un excellent matériau pour l'industrie aérospatiale. Voici quelques caractéristiques de cet alliage, paramètres étant utilisés dans la simulation des lobes de stabilité :

- Densité de 2.7 g/cm^3
- Dureté Brinell de 95
- Module d'élasticité de 69 GPa
- Coefficient de Poisson de 0.33

2.1.2 Bridage

Concernant le bridage de la pièce sur la palette de la MOCN, la pièce sera attachée au moyen de vis positionnées aux 4 coins de la pièce. Il faut noter que la pièce sera montée sur une table dynamométrique de marque Kistler afin de mesurer les efforts de coupe. Le

choix du bridage aux 4 coins vient du fait que la table dynamométrique possède des trous d'assemblage qui coïncident avec les 4 coins de la pièce. Le bridage par vis s'avèrait être le choix le plus simple pour maintenir la pièce en place lors de l'usinage.

2.1.3 Machine-outil

La MOCN sur laquelle les tests sont réalisés est la HU-40 de Mitsui Seiki, machine présente au LRFV de l'École Polytechnique de Montréal. Cette machine possède cinq axes et a été choisie simplement sur une base de disponibilité. Cette MOCN possède un système d'entraînement par vis à billes sur ses axes linéaires. Les travaux de Michaël Zervoudis [5] ont montré qu'une MOCN avec moteur linéaire offrait une dynamique de mouvement plus précise qu'une machine avec vis à billes mais comme en entreprise la grande majorité des MOCN sont avec un entraînement par vis à billes, il convenait de réaliser les tests sur la HU-40 afin de développer un processus qui serait applicable en entreprise. La principale restriction provenant de la MOCN pour la planification des tests est que la vitesse de rotation maximale de la broche est de 15000 rpm.



Figure 2.1 : MOCN HU-40 de Mitsui Seiki

2.1.4 Outils : Fraise

Les outils sélectionnés pour l'usinage par fraisage orbital ont les caractéristiques suivantes :

- Outil de la compagnie « Garr Tool », numéro 223MC-12234
- Outil en carbure
- Revêtement en TiCN
- 3 flûtes
- Angle d'hélice de 30°
- Diamètre de 9.525 mm
- Longueur de 63.5 mm
- Longueur des flûtes de 22.225 mm
- Coût unitaire de 25.43\$

Il faut noter que le choix des outils de coupe s'est fait selon plusieurs critères. Les principaux critères de sélection de ces outils sont : le matériau à usiner, la géométrie des alésages usinés (diamètre, profondeur de coupe axiale et radiale), les critères de qualité ainsi que le coût à l'achat de ces outils.

2.1.5 Outils : Barre à aléser

Concernant l'usinage d'alésage par barre à aléser, un outil typique utilisé en industrie a été sélectionné. Une barre à aléser provenant de chez P&W utilisée typiquement pour l'usinage d'aluminium a servi pour les tests faits au cours de ce projet. La barre à aléser de la compagnie « Komet » possède les caractéristiques suivantes :

- Tête numéro B30-14020
- Cartouche numéro M30-20041
- Plaquette en carbure spécialement conçue pour l'usinage de l'aluminium
- Ajustement diamétral de 57.99 mm à 83.01 mm

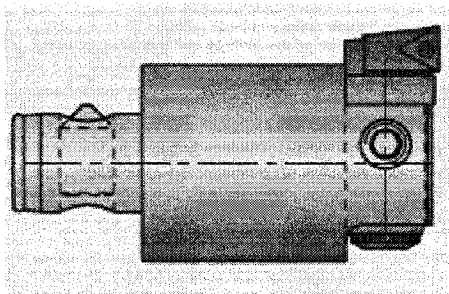


Figure 2.2 : Barre à aléser Komet [8]

Les paramètres qui restent à déterminer sont les vitesses d'avance et de rotation de la broche ainsi que les profondeurs de coupe axiale et radiale. Pour ce faire, il faut réaliser des tests d'impact pour obtenir les lobes de stabilité du système machine/outil/pièce. Cependant, avant de pouvoir réaliser ces tests, des tests d'usinage doivent être effectués afin d'obtenir les coefficients de coupe de l'outil. Les deux prochaines sections présentent la méthodologie associée à l'obtention des coefficients de coupe et des lobes de stabilité.

2.1.6 Coefficients de coupe

Afin d'obtenir les coefficients de coupe, des tests d'usinage ont été fait en laboratoire. Ces tests consistent à faire entre six et dix passes d'usinage dans le matériau concerné. Dans le cas qui nous intéresse, huit passes ont été effectuées lors de ces tests d'usinage. Idéalement les passes sont faites en pleine immersion de l'outil permettant un angle d'entrée de l'outil dans la matière de 0° et un angle de sortie de 180° , ce qui vient simplifier de beaucoup les équations pour le calcul des coefficients de coupe puisque tous les sinus et les cosinus des équations prennent une valeur de 0 ou de 1. La profondeur de coupe des passes effectuées a été choisie à 3 mm, valeur du même ordre de grandeur que les profondeurs de passe des tests qui seront effectués en fraisage orbital. Il faut noter que la profondeur de coupe axiale est gardée constante pour toutes les passes faites.

Les deux paramètres qui restent à choisir pour effectuer ces tests sont la vitesse de rotation de la broche ainsi que la vitesse d'avance de l'outil dans la matière. Une fois la vitesse de rotation choisie, celle-ci est gardée constante pour les huit passes faites dans la pièce. Pour sélectionner les différentes vitesses, les spécifications du fabricant des outils ont été utilisées. Pour la fraise trois flûtes en question avec un matériau à usiner qui est l'aluminium, le fabricant donne les recommandations de vitesses suivantes :

- $V_c = 150\,000\text{ mm/min}$
- $f_z = 0.05 \text{ à } 0.152\text{ mm/dent}$
- $d = 9.525\text{ mm}$

À partir de ces recommandations, il est possible de calculer la vitesse de rotation de la broche :

$$N = \frac{V_c}{\pi \times d} = \frac{15000\text{ mm/min}}{\pi \times 9.525\text{ mm}} = 5013\text{rpm} \quad (1)$$

Ces tests d'usinage ont été réalisés pour cette valeur de vitesse de rotation. Cependant, comme les tests s'inscrivent dans un contexte d'UGV, les tests ont été répétés pour une valeur de vitesse de rotation du double de celle précédemment calculée, c'est-à-dire 10026 rpm. De cette façon, il serait possible de voir comment évoluent les coefficients de coupe en fonction de la vitesse de rotation de la broche.

Avec les vitesses de rotation de la broche, il est maintenant possible de calculer les vitesses d'avance auxquelles seraient effectués les tests. Il faut noter que pour chaque passe effectuée, le seul paramètre qui est variable est la vitesse d'avance. Avec la plage de vitesse proposée par le fabricant, la vitesse de rotation de 5013 rpm et un nombre de dents à trois, on a que :

$$V_f = N \times f_z \times Z_n = 752 \text{ à } 2286\text{ mm/min} \quad (2)$$

Pour faire les huit passes, on a tout simplement divisé la plage de vitesse en huit portions égale pour avoir les huit vitesses d'avance nécessaires pour effectuer les tests. Pour la

vitesse de rotation de 10026 rpm, la même procédure a été suivie et on obtient ainsi des valeurs de vitesses variant de 1504 à 4572 mm/min.

Avec tous les paramètres sélectionnés, il est maintenant possible de réaliser les huit passes dans le bloc d'aluminium. Durant les tests, les efforts de coupe doivent être mesurés dans les trois directions principales x, y et z. Pour ce faire, le bloc d'aluminium doit être monté sur la table dynamométrique. La figure 2.3 montre l'allure des passes qui ont été effectuées sur la pièce.

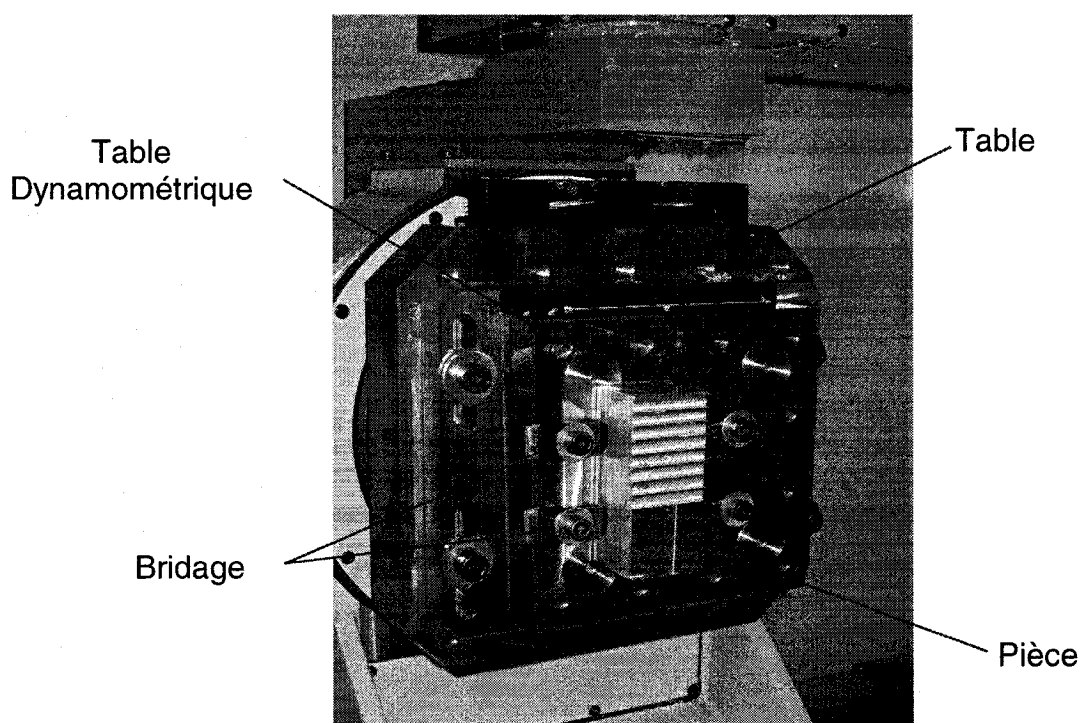


Figure 2.3 : Pièce usinée durant les tests d'usinage

Une fois les huit passes faites et ayant mesuré les forces d'usinage en cause pour chaque passe, le calcul des coefficients peut maintenant être fait. Pour chaque vitesse sélectionnée, on calcule la force moyenne en x, y et z. Ces forces moyennes sont ensuite mises en graphique de la force moyenne en fonction de la vitesse d'avance en mm/dent.

On obtient ainsi trois courbes correspondant aux forces moyennes en x, y et z. De ces trois courbes, on peut tirer trois équations linéaires de la forme suivante [10] :

$$\begin{aligned}\overline{F_x} &= -\frac{Na}{4} K_{rc} - \frac{Na}{\pi} K_{re}, \\ \overline{F_y} &= +\frac{Na}{4} K_{ic} + \frac{Na}{\pi} K_{ie}, \\ \overline{F_z} &= +\frac{Na}{\pi} K_{ac} + \frac{Na}{2} K_{ae}\end{aligned}\quad (3)$$

où N est le nombre de dents de l'outil, « a » est la profondeur de coupe et Kij sont les coefficients de coupe.

Finalement, les coefficients de coupe sont exprimés par les équations suivantes [10] :

$$\begin{aligned}K_{ic} &= \frac{4\overline{F_{yc}}}{Na}, & K_{ie} &= \frac{\pi\overline{F_{ye}}}{Na}, \\ K_{rc} &= \frac{-4\overline{F_{xc}}}{Na}, & K_{re} &= \frac{-\pi\overline{F_{xe}}}{Na}, \\ K_{ac} &= \frac{\pi\overline{F_{zc}}}{Na}, & K_{ae} &= \frac{2\overline{F_{ze}}}{Na}\end{aligned}\quad (4)$$

Avec les valeurs des coefficients de coupe, on peut maintenant faire les tests d'impact en vue de l'analyse modale du système étudié. Les résultats de ces tests d'usinage sont présentés dans la section 3.1.

2.1.7 Analyse modale

L'analyse modale sur une MOCN se divise en trois principales étapes : l'obtention des fonctions de transfert par tests d'impact, la caractérisation des modes de vibration principaux et la simulation des lobes de stabilité.

Tout d'abord, les tests d'impact permettent d'obtenir les fonctions de transfert associées au système étudié. Comme mentionné précédemment, le système MOCN/outil/pièce se

résume à un système à deux degrés de liberté sur l'outil aligné sur les axes x et y de la MOCN. Il nous faut donc obtenir les fonctions de transfert en x et en y sur l'outil

Pour obtenir ces deux fonctions de transfert, la méthode préconisée consiste à exciter l'extrémité de l'outil en lui imputant un impact avec un marteau piézoélectrique permettant de mesurer la force d'impact, et ce sur un des deux axes de la machine. On mesure simultanément la réponse en accélération du côté opposé de l'outil avec un accéléromètre. Le but ici de faire un test d'impact vient du fait qu'un impact présenté dans le domaine des fréquences représente un bruit blanc couvrant toute la gamme de fréquences. Dans le cas de l'impact donné avec le marteau, on n'obtient pas un impact parfait, ce qui vient limiter le bruit blanc à une valeur de fréquence maximale. Cependant, la fréquence de coupure du signal est de beaucoup supérieure aux fréquences propres du système étudié. Le module *MalTF* du logiciel *CutPro* permet l'acquisition des signaux de forces et d'accélération obtenus lors de tests d'impacts. L'allure des courbes de force et d'accélération que l'on peut obtenir est présentée à la figure 2.4.

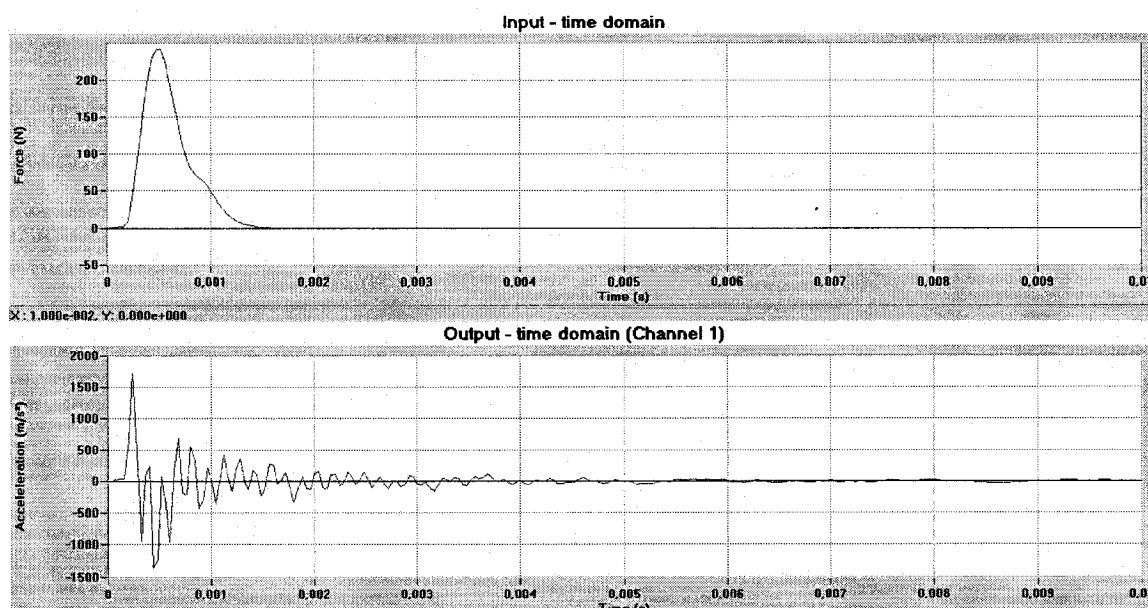


Figure 2.4 : Forces et accélérations mesurées lors d'un test d'impact

Il faut noter qu'il faut effectuer ces tests d'impact dans les deux directions principales x et y de la machine puisqu'il faut obtenir une fonction de transfert pour chaque degré de liberté du système.

Ayant maintenant la force et l'accélération qui y correspond, il est possible d'obtenir la fonction de transfert associée à un degré de liberté du système. Une fonction de transfert est toujours calculée en divisant la valeur de sortie par la valeur d'entrée dans le système. Donc, en divisant l'accélération par la force, il est possible d'obtenir la fonction de transfert le long d'un axe de la MOCN. Le module *MalTF* dans *CutPro* permet de calculer directement la fonction de transfert à partir des forces et des accélérations mesurées.

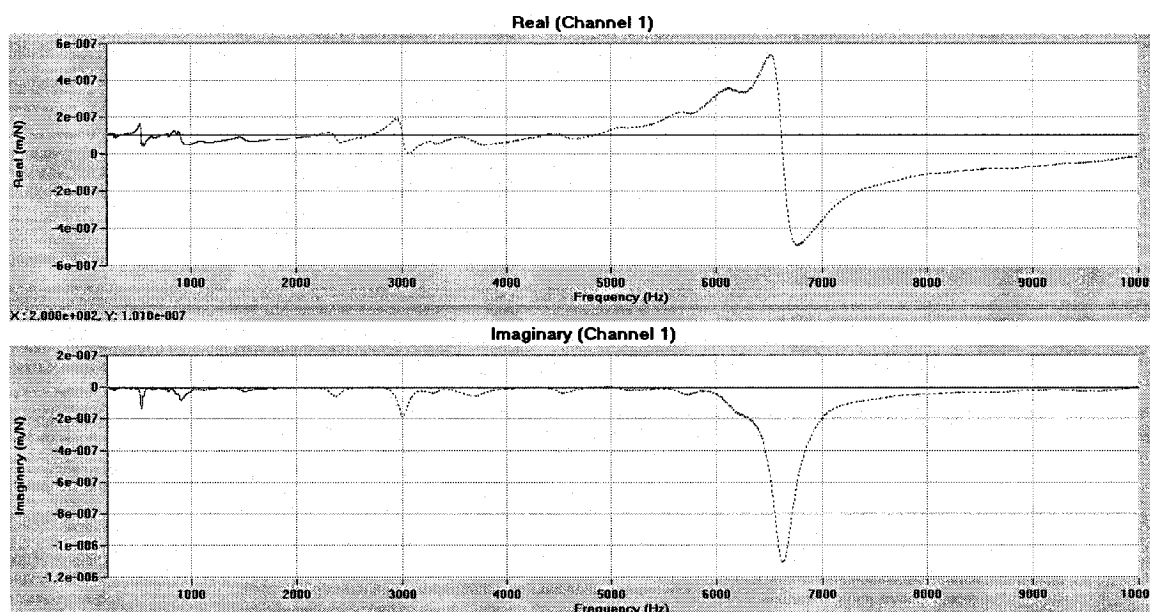


Figure 2.5 : Fonction de transfert associée à un degré de liberté

L'obtention de la fonction de transfert termine la première étape du processus d'analyse modale. Il faut noter que l'on obtient deux fonctions de transfert pour un système donné, une selon l'axe x et l'autre selon l'axe y. Ces deux fonctions devront être étudiées séparément afin de caractériser les différents modes qui pourront y être observés.

Par la suite, il faut caractériser les modes principaux que l'on peut observer sur chaque fonction de transfert. Pour ce faire, il faut prendre soin de sélectionner tous les modes observables sur la fonction de transfert. Le module *Modal* du logiciel *CutPro* permet de faire ce type de travail très facilement. Il suffit simplement de sélectionner tous les modes directement sur le graphique et le logiciel calcule automatiquement les caractéristiques du mode sélectionné. Ces caractéristiques sont : la fréquence, l'amortissement, l'équation des résidus, la masse modale ainsi que la rigidité modale. Tous ces paramètres seront nécessaires pour l'obtention des lobes de stabilité.

Finalement, nous avons maintenant tout ce qu'il faut pour faire la simulation des lobes de stabilité. *CutPro* s'avère être ici le meilleur outil pour réaliser la simulation. Les paramètres pris en entrée pour la simulation des lobes de stabilité sont :

- Le type d'outil
- Le nombre de flûtes
- Le matériau de l'outil
- La géométrie de l'outil
- Les paramètres modaux associés aux fonctions de transfert en x et y
- Le matériau de la pièce à usiner
- Les coefficients de coupe
- Le mode de fraisage
- La direction de rotation de la broche
- La vitesse d'avance de l'outil
- La profondeur de coupe radiale

Avec tous ces paramètres, le logiciel peut effectuer la simulation analytique des lobes de stabilité. Ce graphique de lobes délimitant la zone d'usinage stable de la zone instable permet la sélection des deux derniers paramètres qu'il faut pour réaliser les essais de coupe, c'est-à-dire la profondeur de coupe axiale ainsi que la vitesse de rotation de la broche.

2.2 Tests de circularité

Les tests de circularité sont des tests à vide fait sur la MOCN qui permettent de déceler les erreurs servo de la machine ainsi que les erreurs dynamiques de la machine lors de déplacements des différentes composantes de la machine. Dans le cas qui nous intéresse, ce sont les pics à l'inversion que nous cherchons à caractériser puisque cette erreur est celle que nous chercherons à éliminer lors de l'usinage des alésages. Ces erreurs se produisent lors d'un changement de direction d'un des axes de la machine. Les tests circulaires, faits à l'aide du KGM consistent en une interpolation circulaire de la broche dans laquelle est montée la tête de lecture, qui se déplace au dessus d'une plaque sur laquelle une grille optique ultra fine est gravée, permettant de mesurer la position de la broche partout sur le parcours circulaire.

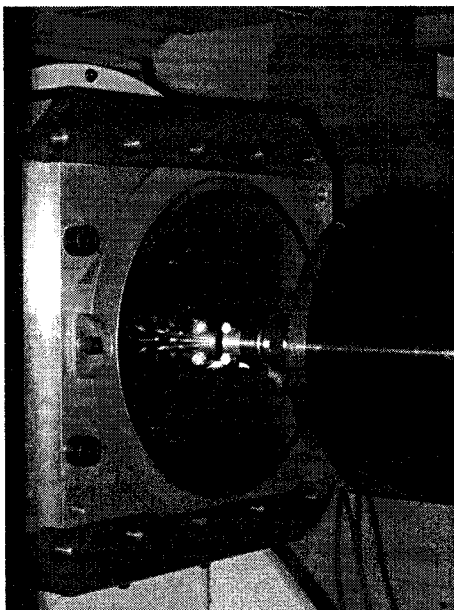


Figure 2.6 : KGM utilisé pour les tests de circularité

Un tracé type d'un test de KGM est montré à la figure 2.7 :

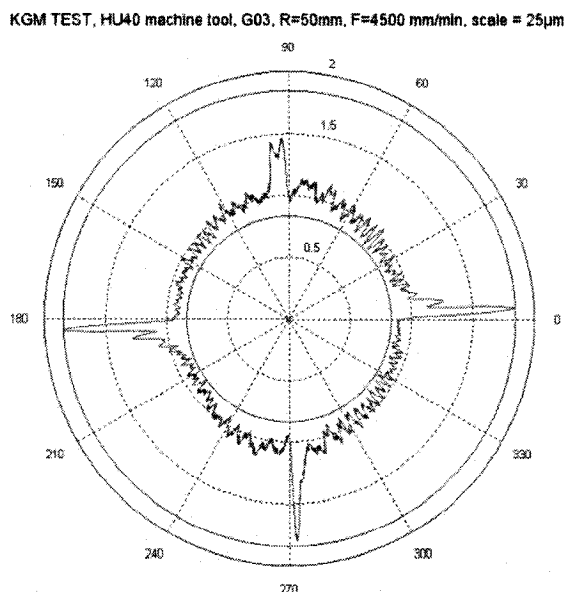


Figure 2.7 : Résultat d'un test de circularité

On peut noter la présence de pics à chaque quadrant. Ce sont les erreurs sur lesquels nous avons travaillé puisque ces erreurs se retrouvaient sur les pièces usinées.

Afin de pouvoir éliminer ces erreurs, certains paramètres du contrôleur de la machine devaient être modifiés. Dans la documentation du contrôleur (Fanuc 15-ma) il a été possible de trouver les paramètres influençant le comportement de la machine pour un changement de direction. Il existe trois paramètres qu'il faut modifier pour permettre une compensation des pics à l'inversion. Ces paramètres sont :

- Paramètre #8000 : Ce paramètre sert de sécurité dans le contrôleur. Une valeur de 0 empêche toute modification des paramètres tandis qu'une valeur de 1 rend possible les modifications des autres paramètres.
- Paramètre #1808 : Ce paramètre une fois réglé à la valeur 1 permet d'activer la compensation des pics à l'inversion.
- Paramètre #1860 : Ce paramètre dicte la quantité d'accélération donnée à un axe de la machine immédiatement après un changement de direction. Les valeurs de ce paramètre doivent être obtenus par tâtonnement puisque rien dans la

documentation ne permettait d'obtenir une valeur précise à mettre dans le contrôleur en fonction de l'erreur observée sur le graphique obtenu du KGM.

Pour une vitesse et un rayon donné, des tests de KGM ont été faits en posant les paramètres ##8000 et #1808 à 1 et en jouant avec le paramètre #1860. Une valeur arbitraire était fixée pour le paramètre #1860 et un test correspondant était effectué. Lorsque la compensation n'était pas suffisante pour éliminer le pic à l'inversion, on augmentait la valeur inscrite dans le paramètre #1860 et on refaisait le test. Lorsque la compensation devenait trop grande, c'est-à-dire que le pic à l'inversion se trouvait à l'intérieur du tracé, il fallait diminuer la valeur du paramètre #1860. Les tests étaient donc répétés avec plusieurs itérations jusqu'à ce que le tracé de KGM soit le plus optimal possible.

Pour réussir à éliminer les erreurs de pics à l'inversion, des tests de KGM ont été faits dans le but d'établir une base de données des paramètres optimaux pour toute une gamme de vitesse et de rayons. Il a donc été possible d'obtenir les valeurs optimales du paramètre #1860 pour toutes les combinaisons de vitesses et de rayons suivants :

- Vitesses de 3000, 3500, 4000 et 4500 mm/min
- Rayons de 30, 40 et 50 mm

Une base de donnée avec traitement en logique floue a été créée avec les valeurs optimales du paramètre #1860 afin de pouvoir obtenir la valeur de ce paramètre pour n'importe quelle combinaison de vitesse et de rayon comprises entre les valeurs des tests faits. Les résultats détaillés sont présentés à la section 3.3.

2.3 Pièces usinées (optimisation du procédé)

Dans le but d'optimiser l'usinage d'alésages par fraisage orbital, il fallait machiner une première pièce pour pouvoir y observer les erreurs dominantes, erreurs qui seraient par

la suite contrôlées, éliminées ou corrigées afin d'améliorer la qualité et la productivité des alésages.

La première pièce usinée a été modélisée comme montrée à la figure 2.8 :

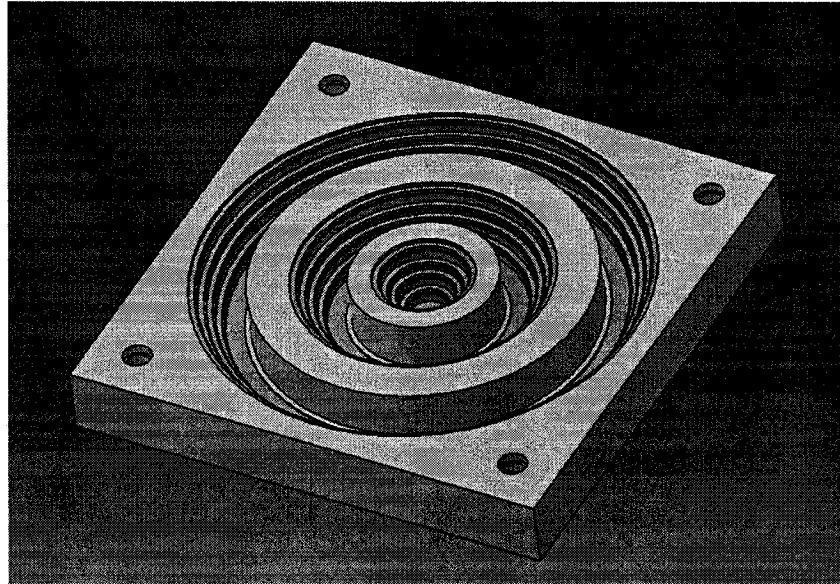


Figure 2.8 : Pièce test #1

Cette pièce comporte trois séries de rainures permettant de tester l'effet du rayon usiné sur la qualité de la surface machinée. Ces trois séries de rainures présentent le même type de passes avec les mêmes paramètres de coupe tels que présentées dans la figure 2.9 et les tableaux 2.1 et 2.2.

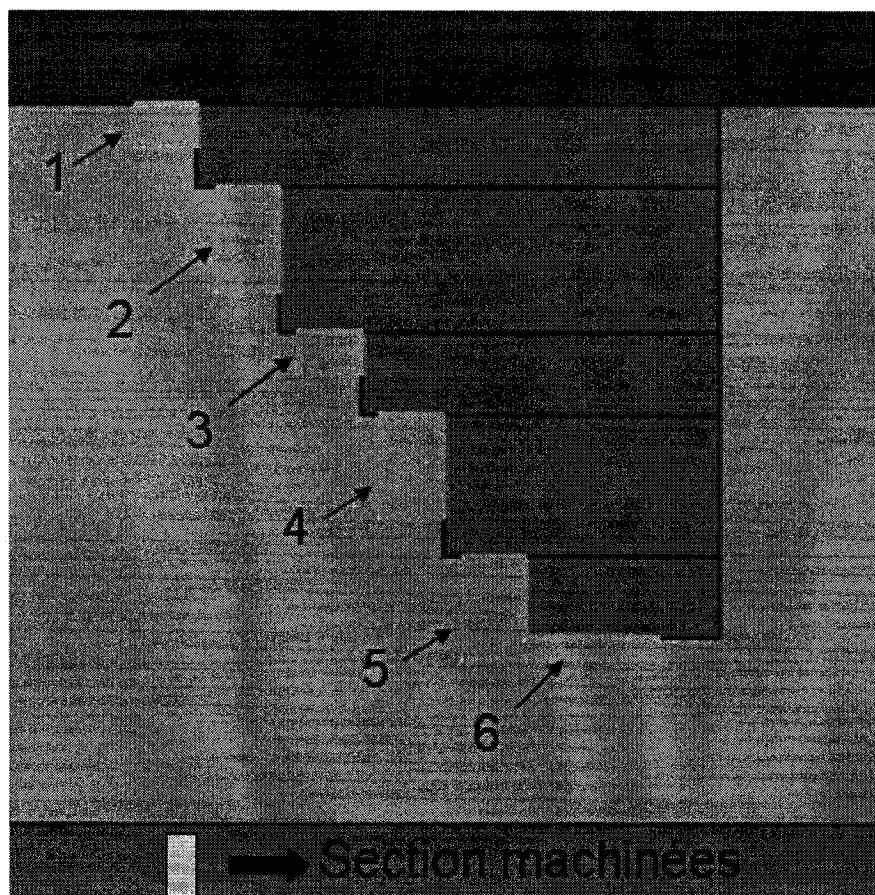


Figure 2.9 : Portions usinées sur la pièce test #1

Tableau 2.1 : Paramètres de coupe sélectionnés à partir de l'analyse modale

	Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5 et 6
Vitesse de rotation de 5000 rpm	X	X			
Vitesse de rotation de 15000 rpm			X	X	X
Profondeur de coupe axiale de 2 mm	X		X		
Profondeur de coupe axiale de 5 mm		X		X	X

Tableau 2.2 : Rayons des différentes rainures

Section Intérieure	Section Centrale	Section Extérieure
26.1763 mm	66.7625 mm	116.7625 mm
22.1763 mm	62.7625 mm	112.7625 mm
18.1763 mm	58.7625 mm	108.7625 mm
14.1763 mm	54.7625 mm	104.7625 mm
10.1763 mm	50.7625 mm	100.7625 mm

Pour cette pièce, du liquide de coupe a été utilisé afin d'avoir une bonne évacuation du copeau ainsi que pour limiter le réchauffement de la pièce et de l'outil. Ceci permet d'obtenir un meilleur fini de surface sur la surface usinée.

Concernant la gamme de fabrication, une première étape de dégrossissage a été effectuée pour ensuite faire les différentes passes de finition souhaitées.

Pour ce qui est de l'entrée/sortie de l'outil dans la matière, la même méthode que celle proposée dans les travaux de Michaël Zervoudis [5] a été utilisée. Cette méthode consiste à rentrer et sortir de la pièce avec une trajectoire circulaire de rayon équivalent à la moitié du rayon de la rainure usinée et ce avec les mêmes paramètres de vitesse que ceux utilisés pour la finition. De cette façon on s'assure que les conditions d'usinage sont dans le régime permanent au moment où l'outil atteint sa pleine profondeur de coupe. Il faut noter que l'entrée/sortie de l'outil a été programmée à 45° sous l'axe des x afin de ne pas rajouter l'erreur possible d'entrée/sortie au même endroit que les pics à l'inversion. La figure 2.10 montre la trajectoire de l'outil préconisée pour l'entrée/sortie :

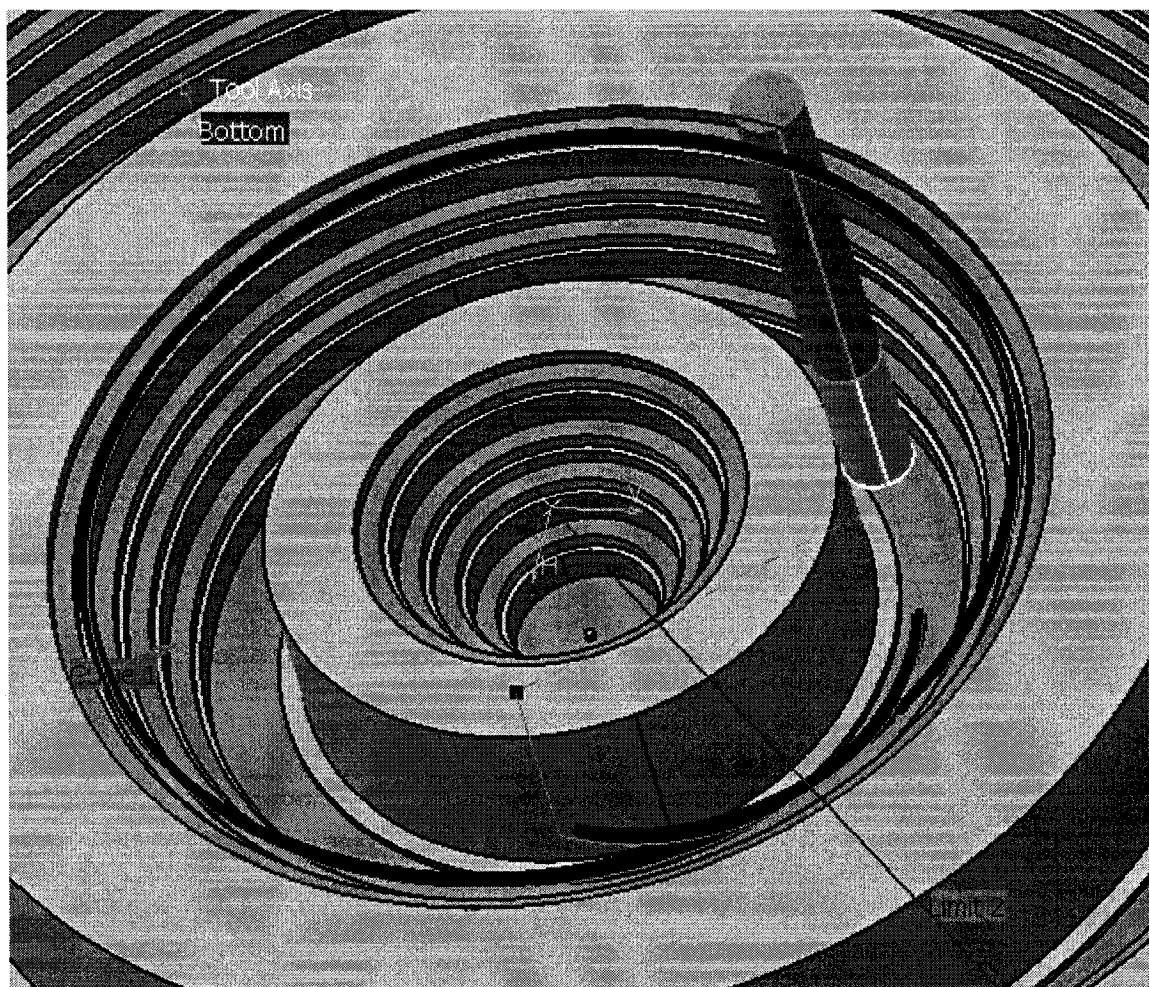


Figure 2.10 : Trajectoire de l'outil à l'entrée/sortie

Les résultats de métrologie mesurés avec la MMT des différentes surfaces usinées sont présentés à la section 3.4.

La seconde pièce usinée a été pensée afin de corriger les erreurs présentes sur la première pièce qui avait été faite. Principalement, l'erreur que l'on cherchait à éliminer sur cette deuxième pièce est l'erreur présente à l'entrée/sortie de l'outil. Deux stratégies ont été envisagées pour tenter d'éliminer cette erreur : la trajectoire spiralee (figure 2.12) et la trajectoire hélicoïdale (figure 2.11).

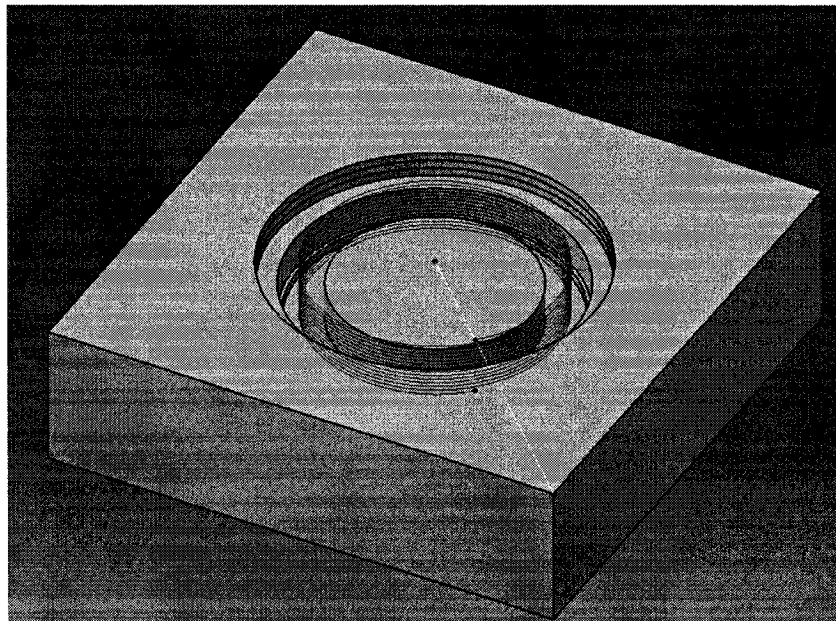


Figure 2.11 : Parcours hélicoïdal

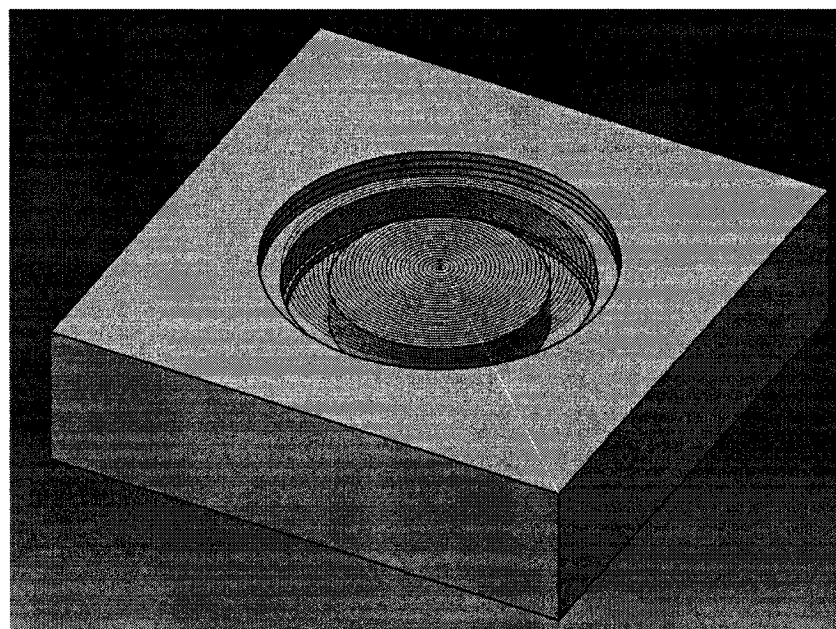


Figure 2.12 : Parcours spiralé

Dans le cas du parcours spiralé, trois combinaisons de paramètres ont été testées :

- Première rainure : Vitesse d'avance à 4500 mm/min, vitesse de rotation de la broche à 15000 rpm, distance entre deux tours consécutifs de 1 mm, profondeur axiale de coupe de 3 mm.
- Deuxième rainure : Vitesse d'avance de 4500 mm/min, vitesse de rotation de la broche à 14000 rpm, distance entre deux tours consécutifs de 1 mm, profondeur axiale de coupe de 3 mm.
- Troisième rainure : Vitesse d'avance à 4500 mm/min, vitesse de rotation de la broche à 15000 rpm, distance ente deux tours consécutifs de 1.5 mm, profondeur axiale de coupe de 3 mm.

Pour ce qui est de la trajectoire hélicoïdale, les paramètres suivants ont été utilisés :

- Vitesse d'avance à 4500 mm/min, vitesse de rotation de la broche à 15000 rpm, pas de l'hélice de 1 mm, profondeur radiale de coupe de 1 mm.

Il faut noter que dans les deux cas testés ici, suite à la trajectoire spiralée ou hélicoïdale, une passe à rayon constant et à profondeur constante était effectuée afin d'obtenir une passe finale venant enlever le surplus de matériau pouvant être laissé avec les deux stratégies proposées. En effet, avec la stratégie spiralée, le dernier tour de la spirale ne décrit pas un cercle parfait mais bien un arc de cercle dont le début et la fin du parcours sont décalés d'une distance équivalente à l'épaisseur de coupe. Il en est de même pour la stratégie en hélice mais dans ce cas-ci, le décalage se trouve dans l'axe de l'outil. La passe supplémentaire vient donc compléter la spirale ou l'hélice. La sortie de l'outil suite à cette passe supplémentaire se faisait de la même façon que sur la pièce #1. Les résultats détaillés de ces deux stratégies sont présentés à la section 3.4.

2.4 Test comparatif fraisage orbital versus barre à aléser versus KGM

Le test final fait au cours de ce projet consiste en une comparaison entre le KGM, l'usinage d'alésage par barre à aléser et l'usinage d'alésage par fraisage orbital.

Comme la stratégie de trajectoire hélicoïdale donnait de meilleurs résultats que la stratégie de trajectoire spiralee, celle-ci a été utilisée pour faire la pièce finale en fraisage orbital.

Les résultats de compensation pour les pics à l'inversion ont été utilisés pour éliminer le plus possible les erreurs de pics à l'inversion sur la pièce finale. Les valeurs du paramètre #1860 pour les axes x et y ont été défini à -13 pour l'axe x et à -17 pour l'axe y. Ces valeurs ont été sélectionnées à partir de la base de données faite à l'aide des tests de circularité qui avaient été réalisés. Notons que ces valeurs ont été vérifiées avec de nouveaux tests de KGM afin de s'assurer que la base de donnée élaborée était valide.

Pour ce test comparatif, deux pièces ont été usinées, l'une par fraisage orbital et l'autre par barre à aléser. Le but ici étant de pouvoir comparer la qualité de ces deux alésages pour s'assurer que la fabrication d'alésages par fraisage orbital pouvait être une alternative souhaitable à l'utilisation de la barre à aléser. Dans les deux cas, les temps d'usinage ont été soigneusement notés afin de pouvoir comparer la productivité du processus.

La géométrie des pièces usinées est montrée à la figure 213 :

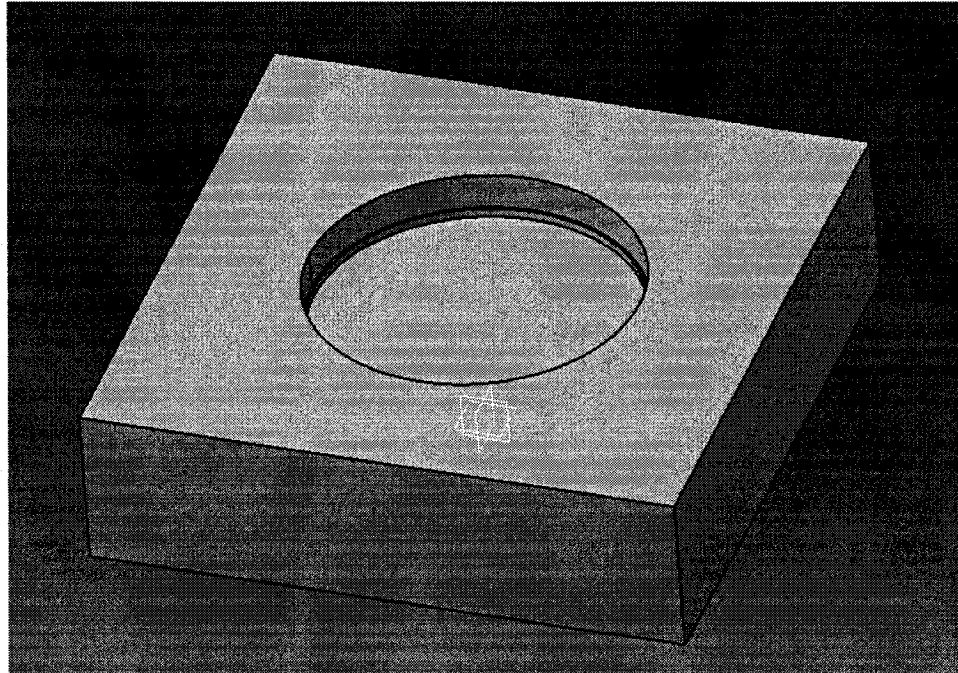


Figure 2.13 : Pièce pour tests comparatifs.

Les paramètres utilisés pour l'usinage de l'alésage en fraisage orbital sont :

- Ébauche de la pièce avec un outil 4 flûtes de 19,05 mm de diamètre.
- Pas d'hélice de 1 mm
- Vitesse d'avance de 4500 mm/min
- Vitesse de rotation de la broche d 15000 rpm
- Rayon de l'alésage de 35.25 mm
- Profondeur de coupe radiale de 0.25 mm
- Profondeur totale de l'alésage de 8 mm

Dans le cas de l'usinage de l'alésage avec la barre à aléser, les paramètres sélectionnés sont :

- Ébauche de la pièce avec un outil 4 flûtes de 19.05 mm de diamètre.
- Pas de la trajectoire de 0.077 mm
- Vitesse d'avance de l'axe z de 100 mm/min

- Vitesse de rotation de la broche de 1300 rpm
- Rayon de l'alésage de 35 mm
- Profondeur de coupe radiale de 0.25 mm
- Profondeur totale de l'alésage de 8 mm.

Suite à ces tests, il est maintenant possible de conclure quant à l'utilisation du fraisage orbital pour remplacer la barre à aléser. Les résultats détaillés de ces tests sont présentés à la section 3.5.

CHAPITRE 3 – ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le présent chapitre présente tous les résultats expérimentaux pertinents réalisés au cours de ce projet avec les discussions et analyses qui s'y rattachent. Les résultats sont présentés en cinq sections distinctes : les coefficients de coupe, l'analyse modale, les tests de circularité, les pièces usinées et le test comparatif.

3.1 Coefficients de coupe

Suite aux tests d'usinage réalisés, les efforts de coupe moyens ont été calculés dans les trois directions principales. Le graphique suivant présente les efforts moyens en fonction de la vitesse d'avance pour les tests d'usinage réalisés avec une vitesse de rotation de la broche de 5013 rpm.

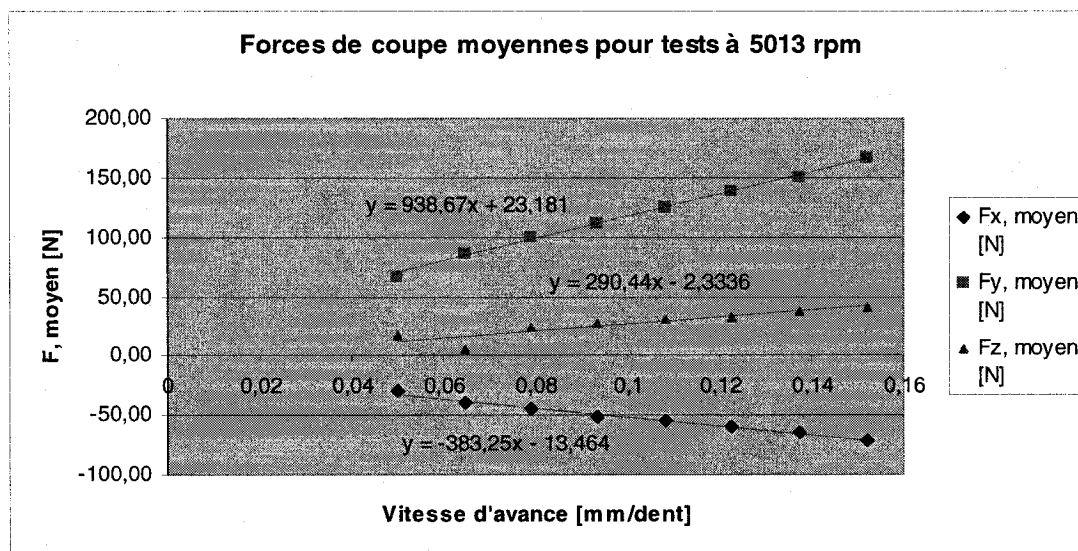


Figure 3.1 : Forces de coupe moyennes avec vitesse de rotation à 5013 rpm

Avec les équations des droites passant par les points du graphique, il est maintenant possible de calculer les six coefficients de coupe associés au système étudié.

$$\begin{aligned}
\overline{F_x} &= -\frac{Na}{4} K_{rc} c - \frac{Na}{\pi} K_{re} = -383.25c - 13.464 \\
\overline{F_y} &= +\frac{Na}{4} K_{ic} c + \frac{Na}{\pi} K_{ie} = 938.67c + 23.181 \\
\overline{F_z} &= +\frac{Na}{\pi} K_{ac} + \frac{Na}{2} K_{ae} = 290.44c - 2.3336
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
K_{ic} &= \frac{4\overline{F_{yc}}}{Na} = \frac{4 \times 938.67}{9} = 417.1867 N/mm^2 \\
K_{ie} &= \frac{\pi\overline{F_{ye}}}{Na} = \frac{\pi \times 23.181}{9} = 8.0917 N/mm \\
K_{rc} &= \frac{-4\overline{F_{xc}}}{Na} = \frac{-4 \times -383.25}{9} = 170.3333 N/mm^2 \\
K_{re} &= \frac{-\pi\overline{F_{xe}}}{Na} = \frac{-\pi \times -13.464}{9} = 4.6998 N/mm \\
K_{ac} &= \frac{\pi\overline{F_{zc}}}{Na} = \frac{\pi \times 290.44}{9} = 101.3827 N/mm^2 \\
K_{ae} &= \frac{2\overline{F_{ze}}}{Na} = \frac{2 \times -2.336}{9} = 0.5186 N/mm
\end{aligned} \tag{6}$$

Ces tests ont été répétés pour une vitesse de rotation de la broche réglée à 10026 rpm dans le but de connaître le comportement des coefficients de coupe avec une variation de cette vitesse. Voici les résultats obtenus :

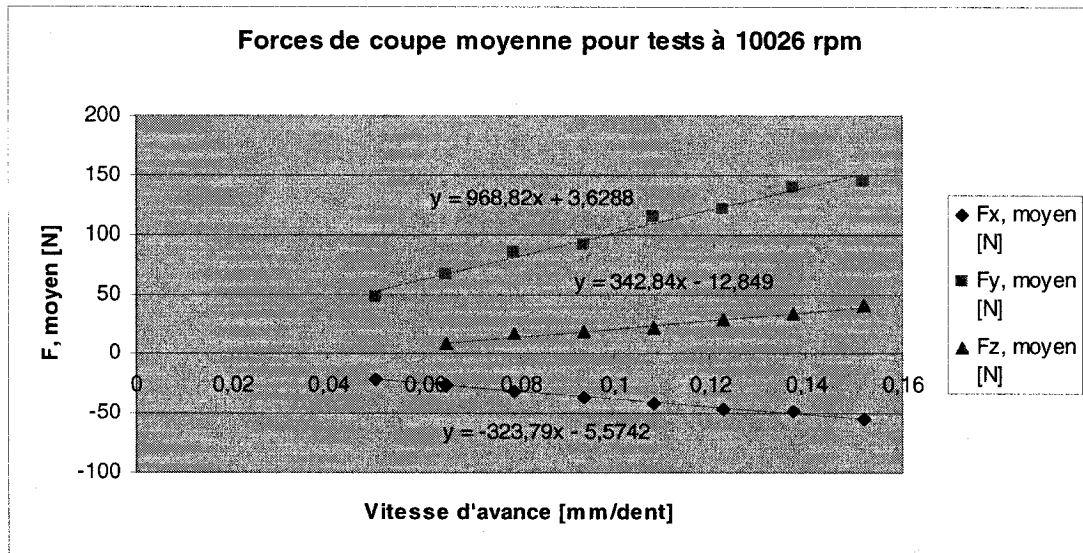


Figure 3.2 : Forces de coupe moyennes avec vitesse de rotation à 10026 rpm

Les coefficients de coupe correspondant à ces résultats sont calculés ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 \overline{F_x} &= -\frac{Na}{4} K_{rc} c - \frac{Na}{\pi} K_{re} = -323.79c - 5.5742 \\
 \overline{F_y} &= +\frac{Na}{4} K_{tc} c + \frac{Na}{\pi} K_{te} = 968.82c + 3.6288 \\
 \overline{F_z} &= +\frac{Na}{\pi} K_{ac} + \frac{Na}{2} K_{ae} = 342.84c - 12.849
 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
K_{tc} &= \frac{4\overline{F_{yc}}}{Na} = \frac{4 \times 968.82}{9} = 430.5867 \text{ N/mm}^2 \\
K_{te} &= \frac{\pi\overline{F_{ye}}}{Na} = \frac{\pi \times 3.6288}{9} = 1.2667 \text{ N/mm} \\
K_{rc} &= \frac{-4\overline{F_{xc}}}{Na} = \frac{-4 \times -323.79}{9} = 143.9067 \text{ N/mm}^2 \\
K_{re} &= \frac{-\pi\overline{F_{xe}}}{Na} = \frac{-\pi \times -5.5742}{9} = 1.9458 \text{ N/mm} \\
K_{ac} &= \frac{\pi\overline{F_{zc}}}{Na} = \frac{\pi \times 342.84}{9} = 119.6737 \text{ N/mm}^2 \\
K_{ae} &= \frac{2\overline{F_{ze}}}{Na} = \frac{2 \times -12.849}{9} = 2.8553 \text{ N/mm}
\end{aligned} \tag{8}$$

Pour fin de comparaison, voici les résultats des différents coefficients de coupe :

Tableau 3.1 : Coefficients de coupe à 5013 rpm et 10026 rpm

	Tests à 5013 rpm	Tests à 10026 rpm
K_{tc} [N/mm ²]	417.1867	430.5867
K_{te} [N/mm]	8.0917	1.2667
K_{rc} [N/mm ²]	170.3333	143.9067
K_{re} [N/mm]	4.6998	1.9458
K_{ac} [N/mm ²]	101.3827	119.6737
K_{ae} [N/mm]	0.5186	2.8553

Comme on peut le constater, les résultats diffèrent légèrement selon que l'on prenne les résultats des tests fait avec un rpm à 5013 versus un rpm à 10026. Cependant les résultats sont du même ordre de grandeur. Afin de vérifier si les différences entre ces résultats ont un impact majeur pour la simulation des lobes de stabilité, des tests ont été faits en simulant les lobes dans les mêmes conditions, mais en changeant seulement les valeurs des coefficients de coupe. Les lobes obtenus présentaient exactement la même

forme. La seule différence notable est que les lobes obtenus par simulation en utilisant les coefficients obtenus avec une vitesse de rotation de la broche à 10026 rpm étaient légèrement plus bas que ceux obtenus avec les coefficients à 5013 rpm. La profondeur de coupe limite se trouve à être environ 1 mm plus petite. Pour les simulations de lobes de stabilité réalisés subséquemment, les coefficients obtenus à 10026 rpm seront ceux utilisés. Cependant, comme la plupart des tests sont faits avec une vitesse de rotation de la broche de 15000 rpm, il faudra être prudent quant à l'interprétation des lobes de stabilité. Ceci peut expliquer certains résultats moins bons obtenus lors de l'usinage de la première pièce (voir section 3.4 pour plus de détails).

Ayant maintenant les coefficients de coupe relatifs au couple outil/pièce, il est maintenant possible de simuler les lobes de stabilité.

3.2 Analyse modale

Suite aux tests d'usinage, il est maintenant possible de réaliser les simulations de lobes de stabilité pour le système machine/outil/pièce. Des tests d'impacts ont été réalisés dans le but d'obtenir les fonctions de transfert dans les directions x et y. Avec ces fonctions de transfert, les lobes de stabilité ont pu être obtenus.

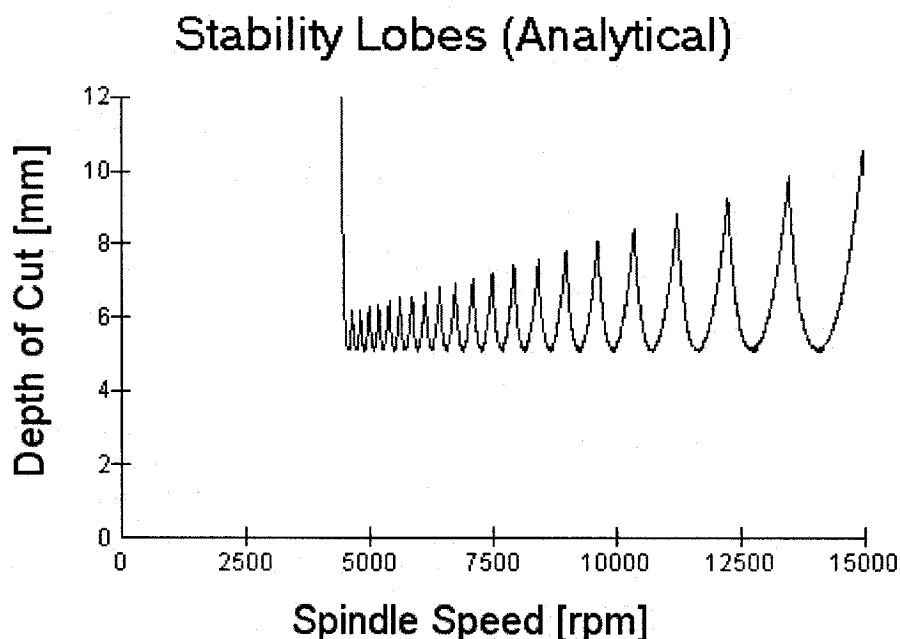


Figure 3.3 : Lobes de stabilité pour le système machine/outil/pièce.

Comme on peut le constater sur le graphique, jusqu'à une profondeur de coupe légèrement supérieure à 5 mm, on devrait obtenir un usinage stable. Pour les grandes vitesses de rotation, cette profondeur limite assurant la stabilité peut être de beaucoup augmentée tout en gardant un usinage stable. Pour les tests faits, il était important de s'assurer d'obtenir un usinage stable en sélectionnant les paramètres adéquats.

Les paramètres de coupe pour la première pièce test ont été sélectionnés directement en regardant les lobes de stabilité. Ces paramètres choisis sont une combinaison des profondeurs de 2 mm et de 5 mm avec des vitesses de rotation de 5000 rpm et de 15000 rpm. Il faut noter que pour une profondeur choisie à 5 mm avec une vitesse de 15000 rpm, les résultats d'usinage montrent que l'usinage était instable, ceci étant dû au fait que les coefficients de coupe pour une vitesse de 15000 rpm sont légèrement différents que ceux utilisés, ce qui a pour effet d'abaisser les lobes de stabilité, risquant ainsi de tomber dans une zone d'usinage instable.

Avec les paramètres sélectionnés grâce aux lobes de stabilité, on possède maintenant tout ce qu'il faut pour réaliser les tests d'usinage.

3.3 Tests de circularité

Les tests de circularité faits avec le KGM ont été réalisés dans le but d'éliminer les erreurs de pics à l'inversion pendant une interpolation circulaire en modifiant les paramètres à l'intérieur du contrôleur. Le paramètre #1860 contrôlant la quantité d'accélération donnée suite à un changement de direction des axes de la machine est le paramètre sur lequel on peut agir pour contrôler les pics à l'inversion.

Les tests de KGM ont donc été réalisés pour des rayons de 30, 40 et 50 mm ainsi que pour des vitesses d'avance de 3000, 3500, 4000 et 4500 mm/min. Pour chacun de ces tests, il a été possible de trouver des valeurs à imputer au paramètre #1860 pour ainsi minimiser l'amplitude des pics à l'inversion. Les résultats des valeurs optimales du paramètre #1860 pour les axes x et y sont présentés aux figures 3.4 et 3.5 ainsi que dans les tableaux 3.2 et 3.3.

Tableau 3.2 : Valeurs optimales du paramètre #1860 pour l'axe x

	Rayon 30 mm	Rayon 40 mm	Rayon 50 mm
Avance 3000 mm/min	20	40	50
Avance 3500 mm/min	10	25	35
Avance 4000 mm/min	0	10	20
Avance 4500 mm/min	-17	-10	5

Valeurs optimales du paramètre 1860 pour l'axe X, Fanuc, HU-40

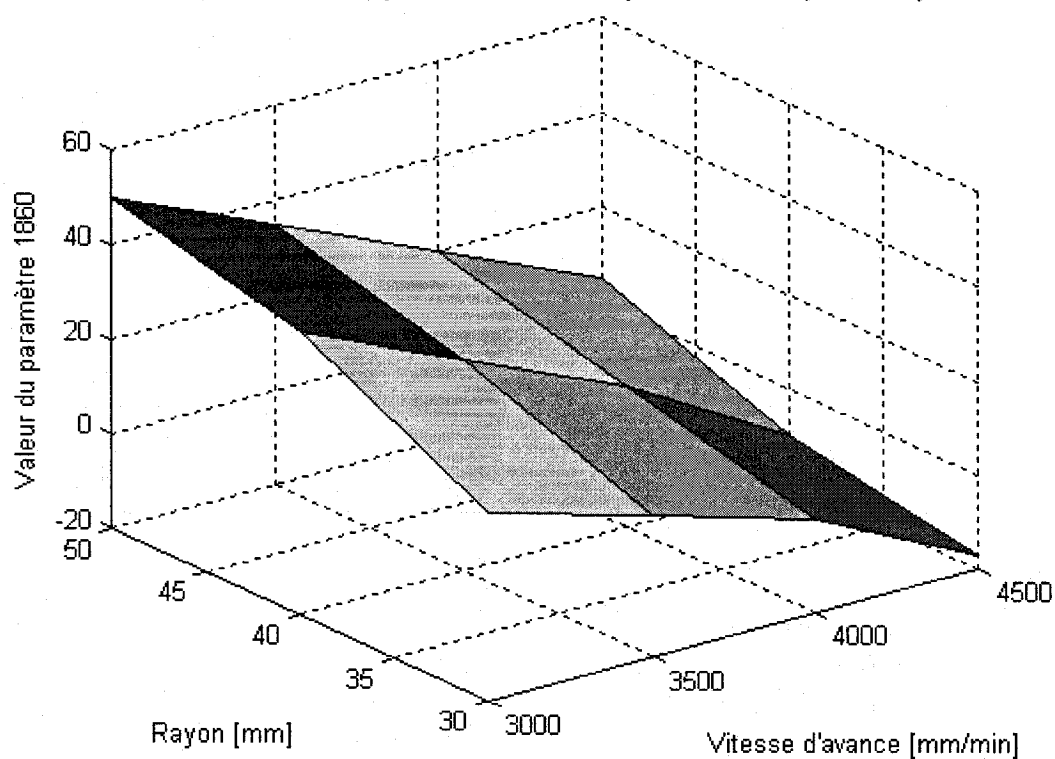


Figure 3.4 : Valeurs optimales du paramètre #1860 pour l'axe x

Tableau 3.3 : Valeurs optimales du paramètre #1860 pour l'axe y

	Rayon 30 mm	Rayon 40 mm	Rayon 50 mm
Avance 3000 mm/min	5	5	35
Avance 3500 mm/min	-5	5	22
Avance 4000 mm/min	-15	-15	10
Avance 4500 mm/min	-30	-25	0

Valeurs optimales du paramètre 1860 pour l'axe Y, Fanuc, HU-40

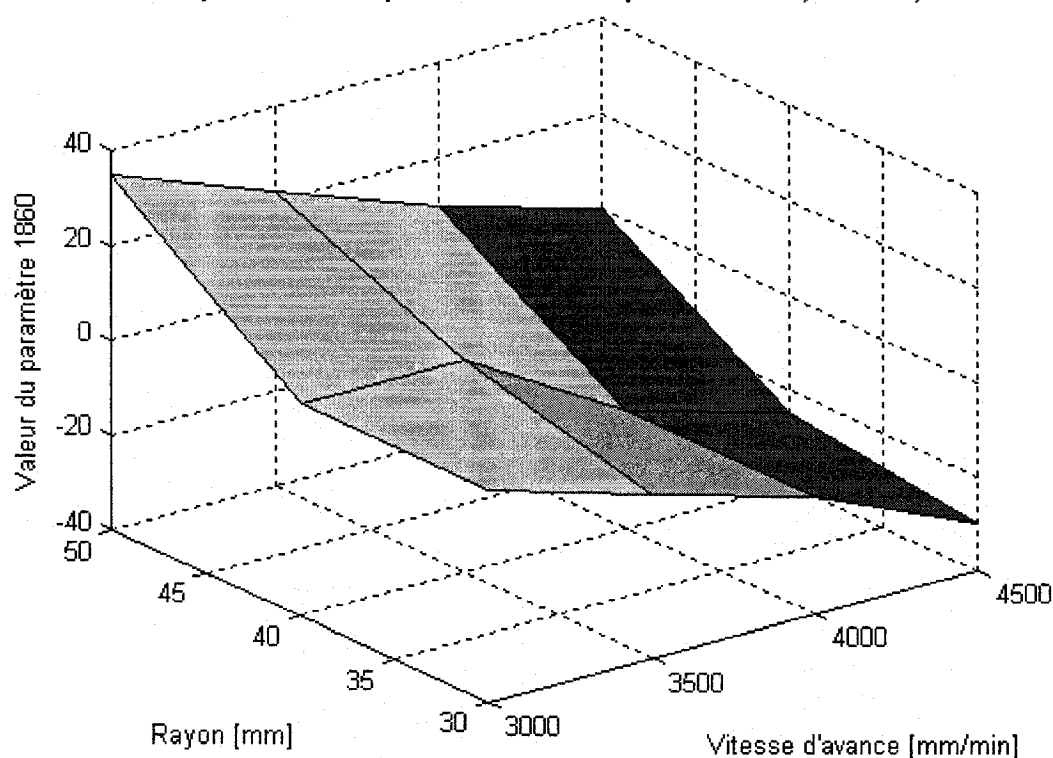


Figure 3.5 : Valeurs optimales du paramètre #1860 pour l'axe y

À partir des valeurs trouvées pour ce paramètre, il est possible, avant un usinage, de régler ce paramètre à la bonne valeur pour ainsi éliminer les erreurs de pics à l'inversion. Le problème actuel concernant cette façon de faire est que l'opérateur doit changer les valeurs manuellement dans le contrôleur. Donc si une pièce comporte plusieurs alésages à usiner, l'opérateur doit modifier la valeur du paramètre #1860 avant l'usinage de chaque alésage, ce qui n'est pas du tout pratique pour une utilisation en industrie. Comme il est mentionné dans la section « Recommandations », il serait souhaitable de trouver une méthode permettant de modifier les paramètres du contrôleur directement à l'intérieur du code G régissant l'usinage de la pièce. Malgré ce point négatif, on a quand même réussi à prouver qu'il était possible d'éliminer les erreurs de pics à l'inversion en ajustant les paramètres du contrôleur.

Tous les tracés de KGM ayant servi à l'obtention des valeurs optimales pour le paramètre #1860 sont présentés à l'annexe A.

3.4 Pièces usinées

Ayant maintenant tous les paramètres d'usinage en main, l'usinage de la première pièce test a pu être réalisé. Cette pièce a été faite dans le but de voir quels types d'erreurs pouvaient se retrouver sur les surfaces usinées en utilisant le fraisage orbital pour réaliser les alésages.

Une fois la pièce usinée, les surfaces produites ont été mesurées sur la MMT afin d'obtenir un tracé permettant de caractériser l'état des surfaces. La figure 3.6 montre un tracé type de MMT d'une des surfaces usinées. Notez que tous les résultats de cette première pièce sont présentés à l'annexe B.

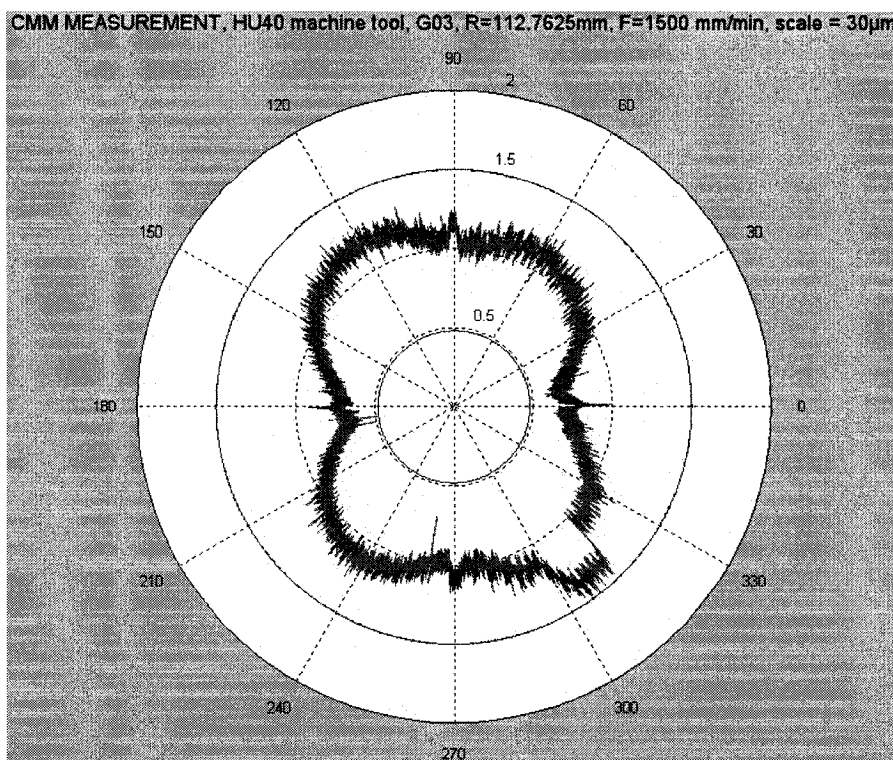


Figure 3.6 : Tracé provenant de mesures sur la MMT d'une surface usinée.

Comme on peut le constater sur le tracé, quatre types d'erreurs dominantes ont pu être décelées :

- Les vibrations forcées de l'outil lors de l'usinage.
- L'erreur d'entrée/sortie de l'outil dans la matière.
- Une forme de trèfle à quatre feuilles.
- Les pics à l'inversion.

Concernant les traces dues aux vibrations forcées de l'outil lors de l'usinage, on sait que cette erreur est inhérente au procédé et qu'elle sera toujours présente avec un usinage en fraisage. La seule façon de limiter cette erreur est de diminuer la profondeur radiale de coupe puisque de cette façon l'amplitude des forces d'excitation dues au passage successif des dents dans la matière sera plus petite, diminuant par le fait même l'amplitude des vibrations forcées. La profondeur de coupe radiale sera donc diminuée lors de la pièce finale permettant la comparaison entre la barre à aléser et le fraisage orbital. Cette profondeur était de 3 mm pour la première pièce test et elle sera diminuée à 1 mm pour les tests d'entrée/sortie et elle sera diminuée à 0.25 mm pour la pièce finale.

L'erreur d'entrée/sortie de l'outil dans la matière, d'une amplitude de plusieurs dizaines de micromètres, est due au fait que lorsque l'outil rentre dans la matière avec une interpolation circulaire de rayon équivalent à la moitié du rayon usiné, une portion de matière est enlevée avant que l'outil atteigne sa pleine profondeur de coupe radiale. Lorsque l'outil finira son parcours à cet endroit où déjà un peu de matériau a été enlevé, l'épaisseur de coupe diminuera drastiquement, faisant par le fait même diminuer les efforts de coupe. Cette diminution des forces entraînera une déflexion moindre de l'outil, faisant en sorte qu'une trace apparaîtra à chaque endroit où l'outil rentre et sort de la matière. Afin d'éliminer cette erreur, une seconde pièce test sera usinée dans le but de tester deux stratégies pouvant potentiellement éliminer l'erreur. Le détail de ces tests est présenté un peu plus loin dans cette section.

Pour ce qui est de la forme de trèfle à quatre feuilles observée sur le tracé de MMT, l'hypothèse la plus plausible pouvant l'expliquer vient de la différence de rigidité de la pièce autour de l'alésage usiné. En effet, pour la rainure centrale de la pièce, la paroi extérieure possède une épaisseur constante et la forme de trèfle n'apparaît pas sur les tracés. Cependant, quand on regarde les tracés de la rainure extérieure, la forme de trèfle est présente sur tous les tracés. La paroi extérieure de la rainure la plus grande possède une épaisseur minimale aux quatre quadrants et une épaisseur maximale aux quatre coins de bridage. L'étude plus approfondie de cette erreur a été mise de côté puisque cette étude aurait pu faire l'objet de travail de maîtrise à lui seul. Du côté pratique, nous avons simplement éliminé cette erreur sur les pièces usinées par la suite en s'assurant d'avoir une épaisseur de paroi suffisamment grande pour que sa rigidité ne vienne plus affecter les résultats.

Finalement, on sait que les erreurs de pics à l'inversion sont dues au changement de direction d'un des axes de la MOCN. Afin de contrôler cette erreur, des tests des KGM ont été faits dans le but d'optimiser les paramètres du contrôleur régissant la quantité d'accélération donnée aux axes lors d'un changement de direction, comme il l'est mentionné dans la section 3.3. Ces corrections faites à l'intérieur du contrôleur ont été appliquées pour l'usinage de la pièce finale de comparaison entre le fraisage orbital et la barre à aléser.

Suite à l'usinage de la première pièce test, une seconde pièce a été réalisée afin d'éliminer l'erreur due à l'entrée/sortie de l'outil dans la matière. Pour ce faire, deux stratégies ont été testées : la trajectoire spiralée et la trajectoire hélicoïdale. Encore ici, la métrologie des surfaces usinées a été faite sur la MMT. Les résultats de métrologie obtenus pour les deux stratégies testées sont présentés aux figures 3.7 à 3.10.

Spirale 1, HU40, R=40mm, F=4500 mm/min, RPM=15000
DÉBRIDÉE a z=-1mm, scale = 65 μ m

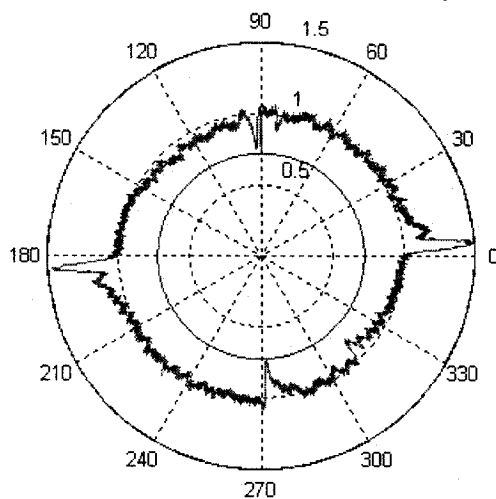


Figure 3.7 : Première surface usinée avec une trajectoire spiralee

Spirale 2, HU40, R=40mm, F=4500 mm/min, RPM=14000
DÉBRIDÉE a z=-3mm, scale = 65 μ m

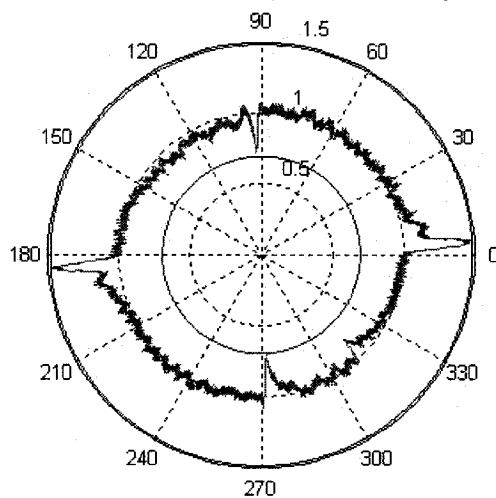


Figure 3.8 : Deuxième surface usinée avec une trajectoire spiralee

Spirale 3, HU40, R=40mm, F=4500 mm/min, RPM=15000
DÉBRIDÉE a z=-5mm, scale = 65 μ m

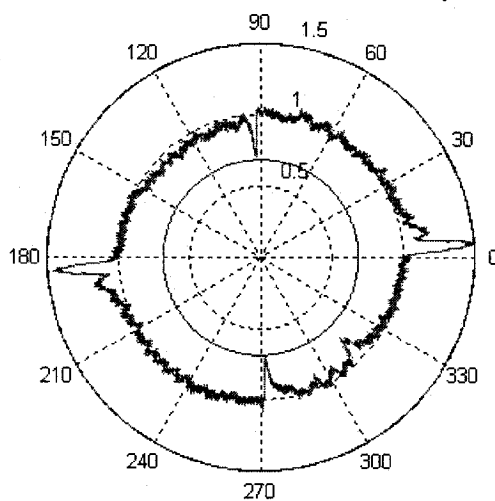


Figure 3.9 : Troisième surface usinée avec une trajectoire spiralee

Hélice, HU40, R=35mm, F=4500 mm/min, RPM=15000
DÉBRIDÉE a z=-1mm, scale = 65 μ m

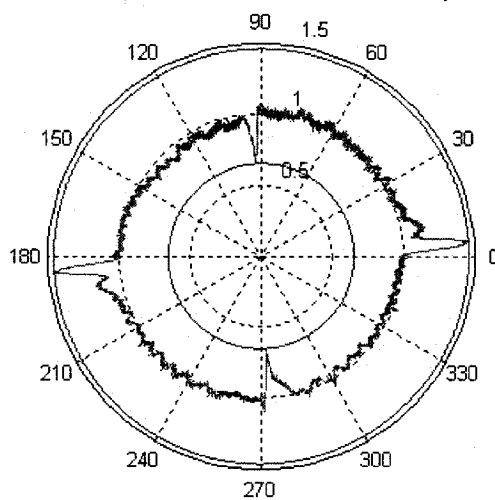


Figure 3.10 : Surface usinée avec une trajectoire hélicoïdale

Comme on peut le constater, la stratégie d'usinage avec un parcours d'outil en spirale réduit de beaucoup l'erreur d'entrée/sortie de l'outil. En effet, cette erreur est d'environ 10 μm pour cette stratégie, ce qui se veut une nette amélioration par rapport aux premiers tests réalisés. De son côté, la trajectoire hélicoïdale permet d'éliminer complètement l'erreur d'entrée/sortie, comme on peut le constater à la figure 3.10. Cette stratégie sera donc celle préconisée pour effectuer le test final de comparaison entre le fraisage orbital et la barre à aléser. Si on regarde le tracé obtenu pour la trajectoire hélicoïdale, on peut remarquer que la seule erreur dominante restant à corriger est l'erreur des pics à l'inversion, erreur pour laquelle des compensations des paramètres du contrôleur devrait permettre une nette amélioration.

Ayant maintenant éliminé l'erreur d'entrée/sortie, et ayant une stratégie permettant de corriger les erreurs de pics à l'inversion, il est maintenant possible de réaliser le test final de comparaison entre les deux méthodes possibles pour la fabrication d'alésages.

3.5 Test comparatif

Le test final consiste à réaliser l'usinage de deux alésages, un avec la méthode traditionnelle utilisée, c'est-à-dire en utilisant la barre à aléser, et l'autre en utilisant le fraisage orbital, dans le but de pouvoir comparer tous les aspects de ces deux méthodes, et voir si le fraisage orbital peut être un procédé viable.

Pour éviter un problème de rigidité variable de la paroi extérieure, les pièces ont été conçues pour laisser une bonne épaisseur de paroi tout autour de l'alésage. La trajectoire hélicoïdale sera celle préconisée pour ces tests puisque cette stratégie permet d'éliminer l'erreur d'entrée/sortie de l'outil. Finalement, les compensations à l'intérieur du contrôleur ont été sélectionnées par interpolation sur les graphiques donnant les valeurs optimales du paramètre #1860, c'est-à-dire une valeur de -13 pour la compensation sur l'axe x et -17 pour l'axe y. Ces valeurs de compensation ont été testées avec le KGM

afin de s'assurer qu'il s'agit bel et bien des valeurs optimales pour un alésage de 35 mm de rayon usiné avec une vitesse d'avance de 4500 mm/min.

La figure 3.11 montre le tracé obtenu du KGM pour vérifier la justesse des compensations du paramètre #1860 du contrôleur

**KGM TEST, HU40, G03, R=35mm, F=4500 mm/min, scale = 50 μ m
#1860: x=-13 y=-17**

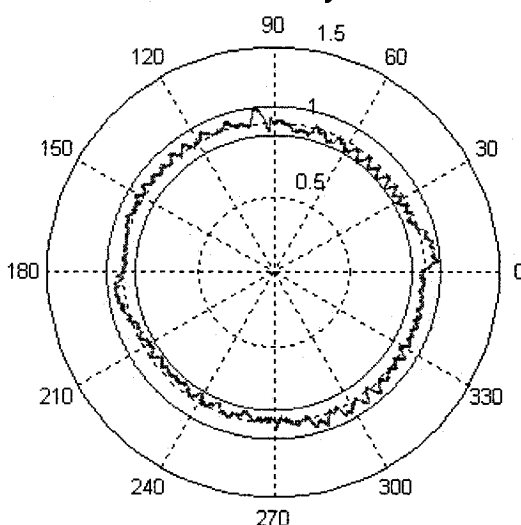


Figure 3.11 : Tracé de KGM pour les valeurs optimales du paramètre #1860

Le tracé obtenu ici est le meilleur que l'on a réussi à obtenir avec les ajustements faits sur le paramètre #1860. Comme on peut le constater, les erreurs de pics à l'inversion sont encore présentes, mais leurs amplitudes sont de beaucoup réduites. En effet avant l'implantation des compensations, les erreurs de pics à l'inversion avaient une amplitude qui se situait entre 25 et 35 μ m. Avec les compensations, ces erreurs se situent maintenant entre 5 et 10 μ m.

Le test de comparaison a débuté avec la fabrication d'un alésage avec la barre à aléser, dont le montage est montré à la figure 3.12.

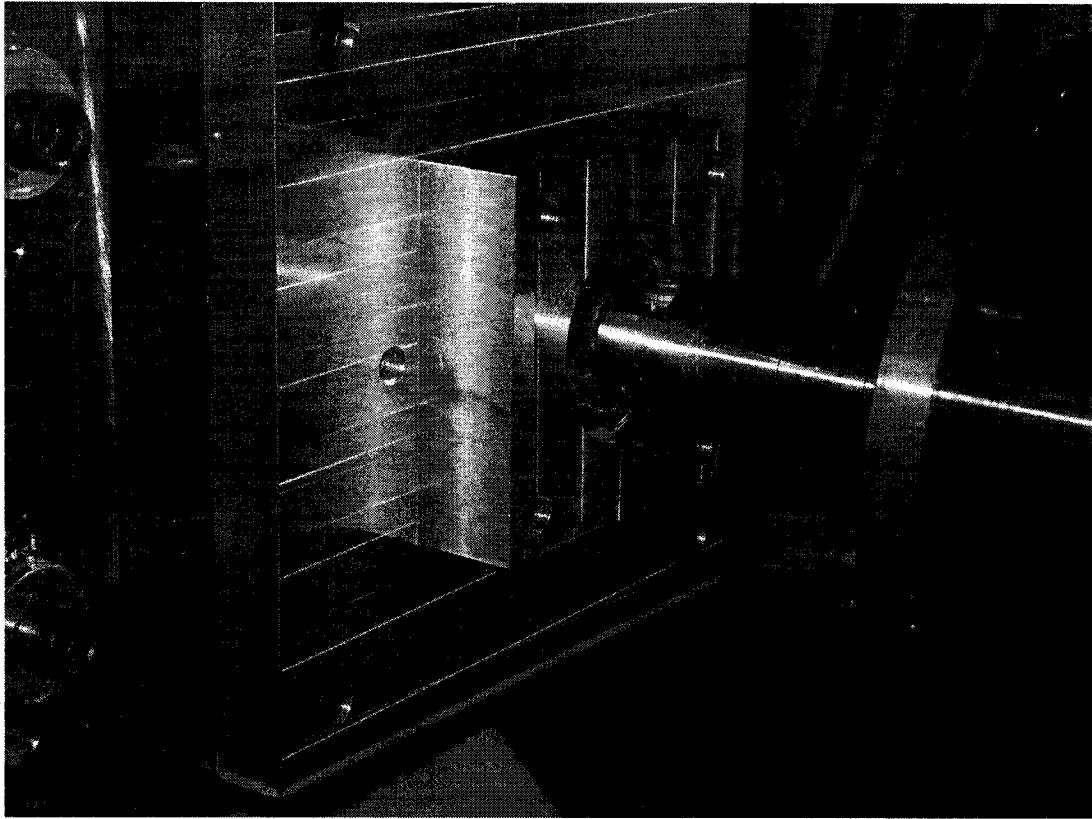


Figure 3.12 : Usinage d'un alésage avec la barre à aléser

La pièce ainsi usinée a été mesurée sur la MMT afin d'obtenir une topologie de la surface. Les mesures de MMT ont été prises à trois hauteurs différentes sur la surface afin de voir si des différences pouvaient être dénotées selon la profondeur de l'usinage. Les résultats de MMT pour la barre à aléser sont présentés aux figures 3.13 à 3.15.

Boring Bar, HU40, R=35mm, F=100 mm/min, RPM=1300
a z=-1mm, scale = 50 μ m

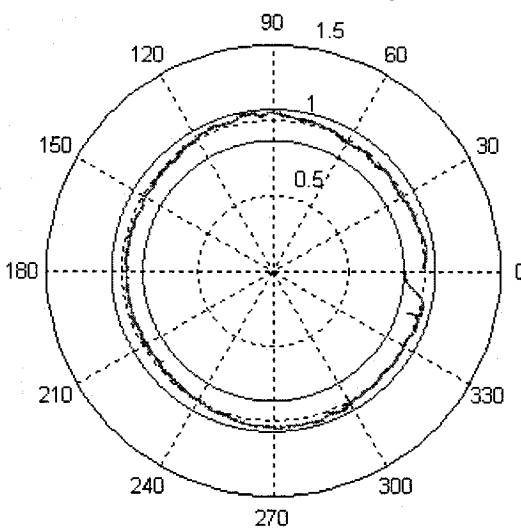


Figure 3.13 : Alésage usiné avec la barre à aléser à une profondeur de 1 mm

Boring Bar, HU40, R=35mm, F=100 mm/min, RPM=1300
a z=-3.5mm, scale = 50 μ m

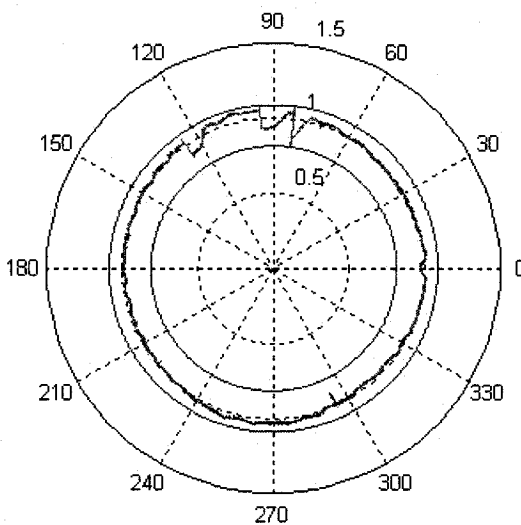


Figure 3.14 : Alésage usiné avec la barre à aléser à une profondeur de 3.5 mm

Boring Bar, HU40, R=35mm, F=100 mm/min, RPM=1300
a z=-6mm, scale = 50 μ m

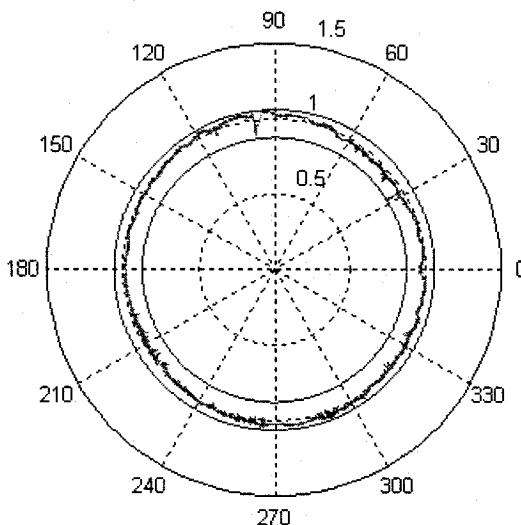


Figure 3.15 : Alésage usiné avec la barre à aléser à une profondeur de 6 mm

Comme on peut le constater, l'usinage avec la barre à aléser donne un usinage s'approchant du cercle parfait. Quelques défauts apparaissent sur la surface mais ces défauts sont de très faible amplitude. L'amplitude maximale des défauts observés est de 10 μ m.

La deuxième partie de ce test consistait à usiner l'alésage avec le fraisage orbital, comme le montre la figure 3.16.

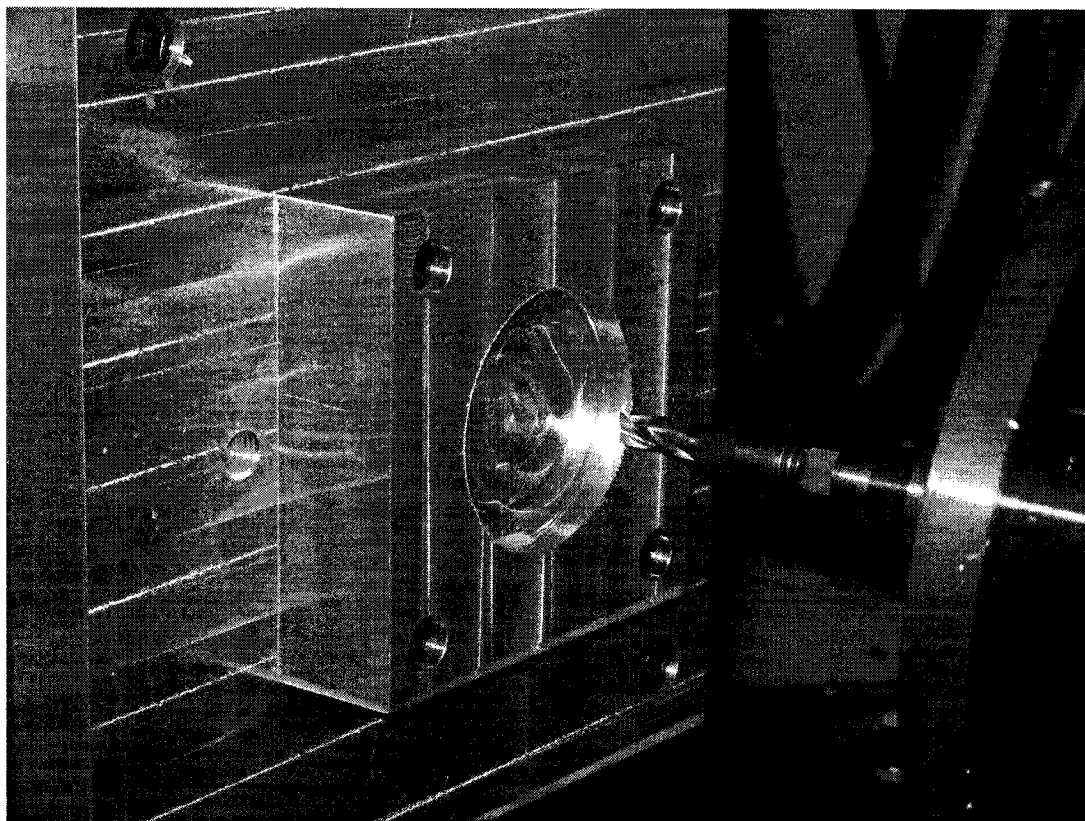


Figure 3.16 : Usinage d'un alésage par fraisage orbital.

Encore ici la surface usinée a été mesurée sur la MMT avec exactement les même conditions de mesure utilisées pour la pièce faite avec la barre à aléser. Les résultats de ces mesures sont présentés aux figures 3.17 à 3.19.

Fraisage Orbital, HU40, R=35.25mm, F=4500 mm/min, RPM=15000
a z=-1mm, scale = 50 μ m

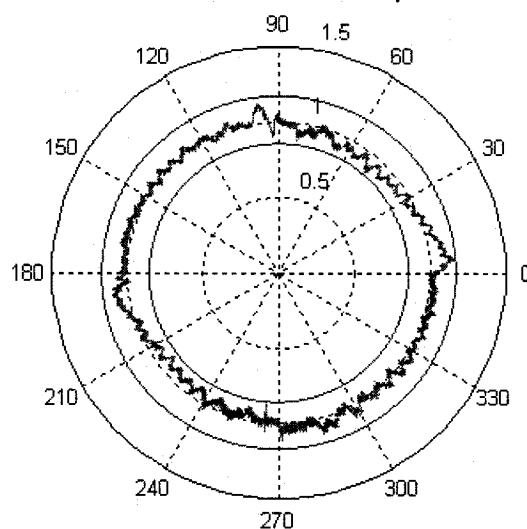


Figure 3.17 : Alésage usiné par fraisage orbital à une profondeur de 1 mm

Fraisage Orbital, HU40, R=35.25mm, F=4500 mm/min, RPM=15000
a z=-3.5mm, scale = 50 μ m

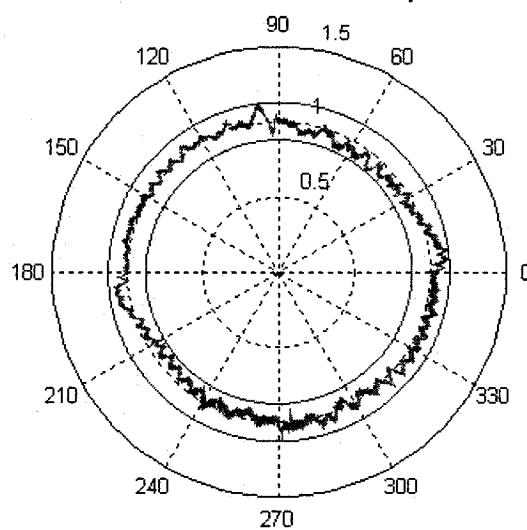


Figure 3.18 : Alésage usiné par fraisage orbital à une profondeur de 3.5 mm

Fraisage Orbital, HU40, R=35.25mm, F=4500 mm/min, RPM=15000
a z=-6mm, scale = 50µm

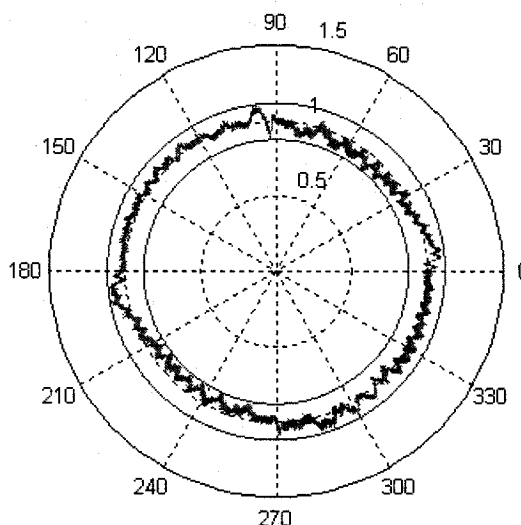


Figure 3.19 : Alésage usiné par fraisage orbital à une profondeur de 6 mm

Sur ces tracés de MMT, on peut remarquer que la qualité de la surface est un petit peu moins bonne que celle faite avec la barre à aléser. Certains défauts sont toujours présents sur la pièce faite en fraisage orbital. Le premier défaut que l'on peut observer est les ondulations laissées sur la surface dues aux vibrations forcées. Comme il a déjà été mentionné, ce défaut est inhérent au procédé et ne peut être évité. L'amplitude de ce défaut est cependant très petite. L'autre erreur toujours présente est l'erreur due aux pics à l'inversion. Bien que les compensations aient été appliquées pour faire ce test, le défaut est toujours perceptible, mais lui aussi est de très faible amplitude, de l'ordre de 5 à 10 µm. Si on compare les tracés obtenus par fraisage orbital et le tracé obtenu du KGM lors de l'optimisation des paramètres du contrôleur (figure 3.11), on peut remarquer qu'ils sont pratiquement identiques.

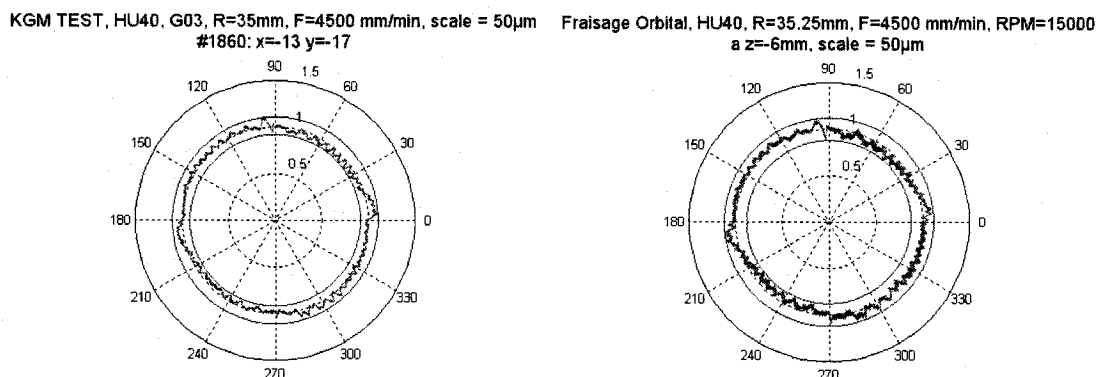


Figure 3.20 : Tracé de KGM versus MMT. a) Tracé de KGM avec optimisation du paramètre #1860. b) Mesure sur MMT de l'alésage par fraissage orbital.

La trajectoire empruntée par l'outil à vide est donc très semblable à la trajectoire de l'outil lors de l'usinage. Bien sûr ceci est de plus en plus vrai lorsque la profondeur de coupe radiale est faible puisque les efforts de coupe seront aussi très faibles. Si les efforts de coupe sont faibles, on peut s'attendre à ce que les erreurs potentielles dues aux forces soient minimales.

Concernant la qualité de la surface, on remarque donc que la barre à aléser offre un usinage plus régulier que le fraissage orbital. Cependant, l'amplitude des défauts avec le fraissage orbital est du même ordre de grandeur que ceux observés avec la barre à aléser. Le fraissage orbital pourrait donc être une alternative viable à la barre à aléser, en autant que l'amplitude des défauts observés ne sorte pas des tolérances prescrites sur le dessin de définition d'une pièce.

Du côté de la productivité, les temps d'usinage pour les deux méthodes ont été mesurés. Dans les deux cas, l'opération complète a duré 2 minutes. Bien sûr, le fait de réaliser l'alésage en fraissage orbital avec un parcours hélicoïdal revient pratiquement au même que la trajectoire empruntée par la plaquette sur la barre à aléser. La différence majeure en terme de productivité vient du fait qu'une seule fraise peut réaliser toute une gamme

d'alésage, versus la barre à aléser qui a un diamètre spécifique et qui peut seulement faire des alésages de ce diamètre. Sur une pièce possédant plusieurs alésages à usiner, à l'étape de la finition, le fraisage orbital nécessitera un seul changement d'outil pour tous les alésages tandis qu'avec des barres à aléser, il faudra un changement d'outil pour chaque alésage de diamètres différents sur la pièce. Ces changements d'outils représentent une perte de temps importante lors de l'usinage d'une pièce. Sur la HU-40, un changement d'outil prend environ 30 secondes. Sur une même pièce, on peut donc avoir des pertes de temps de plusieurs minutes en utilisant des barres à aléser pour réaliser les alésages. Également, le fait d'avoir une barre à aléser pour chaque diamètre à être usiné vient augmenter considérablement le nombre d'outil dans le magasin d'outil, et, par le fait même, vient augmenter considérablement le temps de préparation des outils (montage dans la broche, balançage, ajustements, etc.). On peut donc conclure que le fraisage orbital est beaucoup plus productif que la barre à aléser, surtout dans un contexte de grande production avec beaucoup d'alésages différents sur une même pièce.

Suite à l'usinage des ce pièces, une question est restée en suspend, faute de temps pour approfondir le problème. Lors de l'usinage par fraisage orbital, on peut observer une rainure parfaitement droite à chaque quadrant sur la surface usinée. Pour l'usinage avec barre à aléser ce phénomène est également présent, mais plutôt sous la forme de plusieurs points successifs alignés sur une droite. L'amplitude de ces défauts est très petite, de l'ordre de quelques micromètres. Les figures 3.21 et 3.22 montrent clairement ce défaut.

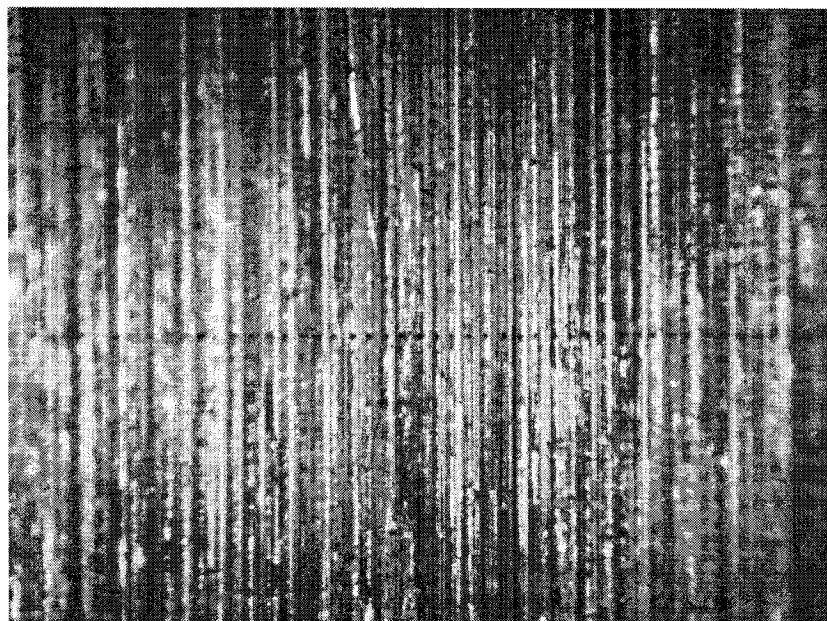


Figure 3.21 : Trace observée sur la surface usinée avec la barre à aléser.

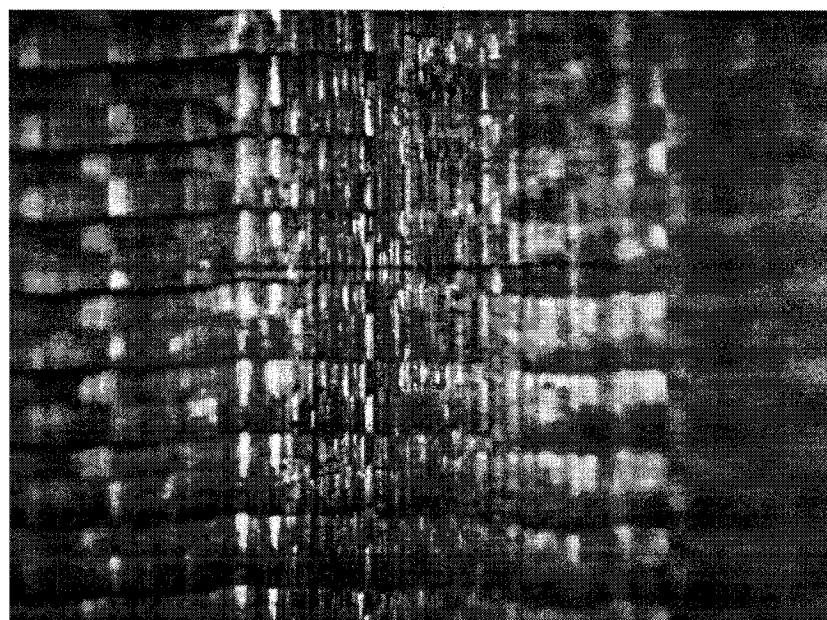


Figure 3.22 : Trace observée sur la surface usinée en fraisage orbital.

Ce défaut, pourtant si minime, a éveillé notre curiosité mais il nous a été impossible d'investiguer les causes possibles.

CONCLUSION

En somme, l'objectif principal du projet a été atteint. Le but principal du projet était de pouvoir identifier, comprendre et contrôler les erreurs pouvant altérer la qualité d'un alésage réalisé par fraisage orbital pour éventuellement obtenir une qualité de surface égale ou supérieure à la barre à aléser.

Les tests réalisés durant ce projet ont permis d'identifier quatre types d'erreurs dominantes sur les surfaces usinées en fraisage orbital :

- Présence d'ondulations dues aux vibrations forcées imputées par le passage successif des dents dans la matière. Cette erreur est inévitable puisque inhérente au procédé de fraisage.
- Erreur d'entrée/sortie de l'outil. Pour cette erreur, une stratégie d'usinage avec un parcours hélicoïdal permet d'éliminer complètement la trace laissée par l'outil lorsqu'il entre ou sort de la matière.
- Présence d'une forme quadrilobée sur la surface usinée. Bien que cette erreur n'ait pas été investiguée en profondeur, l'hypothèse la plus plausible pouvant causer cette erreur vient de la rigidité variable de la paroi extérieure de l'alésage. Pour contrer ce problème, il faut s'assurer d'avoir une épaisseur suffisante pour pouvoir considérer la pièce comme rigide tout autour de l'alésage, malgré la variation d'épaisseur.
- Les erreurs de pics à l'inversion. Cette erreur provient du comportement dynamique de la MOCN. Des tests de KGM ont permis l'optimisation du paramètre #1860 du contrôleur, paramètre régissant la quantité d'accélération donnée aux axes de la machine lors d'un changement de direction. Sans être complètement éliminée, cette erreur devient pratiquement négligeable suite à des compensations adéquates du paramètre #1860.

En connaissant les erreurs potentielles en fraisage orbital et en appliquant les corrections nécessaires, il est possible de réaliser un usinage d'aussi bonne qualité en fraisage orbital qu'avec la barre à aléser.

Du côté de la productivité, l'usinage d'alésage par fraisage orbital présente l'avantage de pouvoir avoir un seul outil pour réaliser tous les alésages présents sur une pièce, diminuant ainsi les temps d'usinage reliés aux changements d'outils. De plus, le temps de réglage des outils est de beaucoup amélioré puisqu'en fraisage orbital, un seul outil doit être contrôlé contre un magasin d'outil énorme avec l'utilisation de barres à aléser. Par le fait même, les coûts d'usinage et de main d'œuvre associés au fraisage orbital sont grandement diminués.

L'usinage d'alésages par fraisage orbital est donc une alternative à considérer pour remplacer l'utilisation de la barre à aléser. Bien sûr, l'implantation d'une telle stratégie d'usinage en entreprise nécessiterait un travail énorme, mais les gains potentiels pour une entreprise peuvent valoir l'investissement.

RECOMMANDATIONS

Suite à la réalisation de ce projet, plusieurs recommandations peuvent être émises. Ces recommandations présentent des suggestions de tests qu'il serait souhaitable de faire avant de pouvoir penser à implanter le fraisage orbital en entreprise, mais également des ouvertures sur d'autres voies de recherche.

- Tout d'abord, il serait intéressant de pouvoir tester d'autres machines avec la stratégie développée au cours de ce projet. Il a été montré dans les travaux de Michaël Zervoudis que des MOCN à moteurs linéaires permettaient d'obtenir des trajectoires plus régulières que les MOCN avec système d'entraînement par vis à billes. Tester d'autres MOCN permettrait d'avoir une meilleure idée de la viabilité de cette stratégie d'usinage.
- Également, il serait souhaitable de réaliser la fabrication d'une pièce typique en entreprise afin d'avoir une meilleure idée des gains potentiels du fraisage orbital en terme de temps d'usinage, de coût et de qualité des surfaces usinées. Bien sûr tous les tests faits au cours de ce projet ont été pensés pour tester des points bien précis mais une vraie pièce permettrait probablement de déceler certains problèmes auxquels il faudrait porter une attention particulière.
- Concernant la modification des paramètres du contrôleur, il faudrait essayer de réaliser les compensations sur d'autres types de contrôleur. Un autre fabricant de contrôleur pourrait avoir une autre méthode d'optimisation des paramètres. Une étude pourrait être faite pour différents types de contrôleur. De plus, une stratégie pouvant permettre de modifier les paramètres automatiquement par l'intermédiaire d'un code d'usinage serait souhaitable puisqu'il n'est pas pratique en entreprise d'avoir un opérateur qui modifie les paramètres à la main avant

l'usinage de chaque alésage. Dans un tel cas, les bénéfices apportés par le fraisage orbital serait complètement perdus.

- Un autre point intéressant qu'il serait souhaitable de développer est de pouvoir éliminer l'utilisation de liquide de coupe durant l'usinage. Beaucoup de chercheurs travaillent déjà sur la question de l'usinage à sec et il serait intéressant de pouvoir réaliser le fraisage orbital sans liquide de coupe. De nos jours, toutes les questions environnementales sont d'un grand intérêt pour la population en général. Il serait donc intéressant d'obtenir une stratégie d'usinage « verte ».
- Finalement, une autre voie potentielle de recherche provient des observations faites aux quadrants des surfaces usinées autant en fraisage orbital qu'avec la barre à aléser. À chaque quadrant, une légère rainure parfaitement droite, très mince et très peu profonde est visible. Faute de temps, nous n'avons pas pu faire des recherches à ce niveau là, mais il serait intéressant de pouvoir comprendre d'où provient cette trace et tenter de corriger la cause de cette erreur.

RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE

Notes de cours :

[1] MAYER, René, MEC6513 : *Modélisation des machines en fabrication mécanique*, École Polytechnique de Montréal.

[2] BALAZINSKI, Marek, MEC6510 : *Théorie d'usinage avancée*, École Polytechnique de Montréal.

[3] ENGIN, Serafettin, MECH6421 : *Metal machining and surface technology*, Université Concordia, Montréal

[4] PETTIGREW, Michel, MEC6417: *Vibrations mécaniques: théorie avancée et applications*, École Polytechnique de Montréal.

Mémoire :

[5] ZERVOUDIS, Michaël (2005), *Caractérisation d'une machine outil à système d'entraînement par moteurs linéaires durant le fraisage orbital à hautes vitesses d'alliages légers*, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada

Sites web :

[6] Garr Tool, 2002, *Garr Toll*, Garr Toll Company, consulté le 9 mars 2006, tiré de <http://www.garrtool.com>

[7] EAA, 2007, *alumatter*, European Aluminium Association and Matter, consulté le 10 mai 2007, tiré de <http://aluminium.matter.org.uk>

[8] Komet group, 2007, *Komet group*, Komet of America, consulté le 21 mai 2007, tiré de <http://www.komet.com>

[9] SAS Engineering, 2007, *Precision engineering historic race engine components*, SAS Engineering, consulté le 10 juillet 2007, tiré de <http://sasengineering.co.uk/>

Livres :

[10] ALTINTAS, Yusuf, *Machining Automation*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000, 286 pages.

[11] S. RAO, Singiresu, *Mechanical vibrations*, 4th edition, Prentice Hall, 2003, 1078 pages.

Articles scientifiques:

[12] ALTINTAS, Yusuf (2003), An improved time domain simulation for dynamic milling at small radial immersions [Version électronique], *Transaction of the ASME*, 125, 416-422.

[13] B.K. HINDS, T.S. ONG (2004), End milling of circular pockets to meet geometric tolerances [Version électronique], *Journal of Materials Processing Technology*, 152, 339-345.

- [14] E.D. TUNG, M. TOMIZUKA, Y. URUSHISAKI (1994), High-speed end mill boring and rounded corner cutting [Version électronique], *Proceeding of the American Control Conference* (pp. 2894-2898), Baltimore, Maryland.
- [15] E SOLIS, C.R. PERES, J.E. JIMÉNEZ, J.R. ALIQUE, J.C. MONJE (2004), A new analytical-experimental method for the identification of stability lobes in high-speed milling [Version électronique], *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 1591-1597.
- [16] LEE, Ki Yong, KANG, Myeong Chang, JEONG, Yung Ho, LEE, Deuk Woo, KIM, Jeong Suk (2001), Simulation of surface roughness and profile in high-speed end milling [Version électronique], *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 113, 410-415.
- [17] M.A. DAVIS, J.R. PRATT, B. DUTTERER, T.J. BURNS (2002), Stability prediction for low radial immersion milling [Version électronique], *National Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124, 217-225.
- [18] PARIS, Henri, PEIGNE, Grégoire, BRISSAUD, Daniel (2003), A model of milled surface generation for time domain simulation of high-speed cutting [Version électronique], *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 217, 919-930.
- [19] PARIS, Henri, PEIGNE, Grégoire, BRISSAUD, Daniel, GOUSKOV, Alexandre (2004), Impact of the cutting dynamics of small radial immersion milling operations on machined surface roughness [Version électronique], *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 1133-1142.

- [20] PARIS, Henri, PEIGNE, Grégoire, MAYER, René (2004), Surface shape prediction in high speed milling [Version électronique], *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 1567-1576.
- [21] SATO, Ryuta, TSUTSUMI, Masaomi (2006), Dynamic behaviour of feed drive systems around quadrant changes in circular motion [Version électronique], *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 72 (2), 208-213.
- [22] YIH-FONG, Tzeng, MING-DER, Jean (2004), Dimensional quality optimisation of high-speed CNC milling process with dynamic quality characteristic [Version électronique], *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21, 50-517.

ANNEXES

Annexe A

Cet annexe présente les tests de KGM qui ont été faits dans le but d'obtenir les valeurs optimales du paramètre #1860 du contrôleur. Chaque série de tests est présentée en fonction de la vitesse d'avance et du rayon de la trajectoire. Le dernier tracé de chaque section présente le test le mieux compensé que nous ayons pu obtenir.

Avance de 3000 mm/min, rayon de 30 mm

KGM TEST, HU40, G03, R=30mm, F=3000 mm/min, scale = 50 μ m
#1860: x=50 y=40

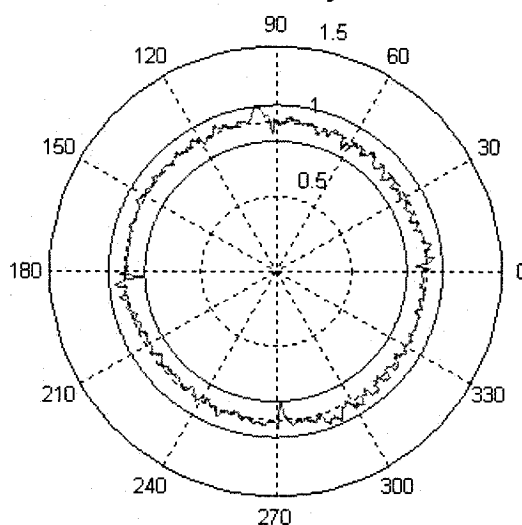


Figure A-1 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (50,40)

KGM TEST, HU40, G03, R=30mm, F=3000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=30 y=30

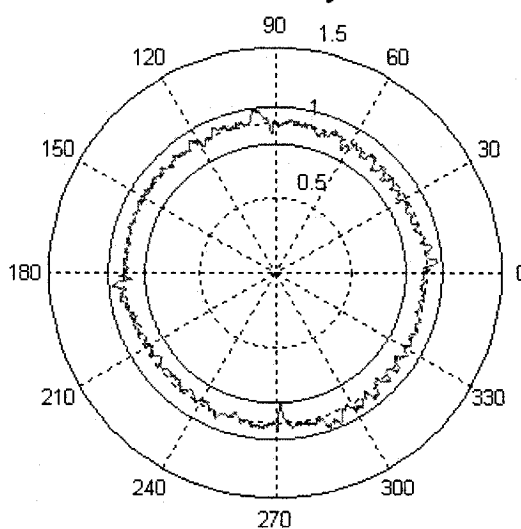


Figure A-2 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (30,30)

KGM TEST, HU40, G03, R=30mm, F=3000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=10 y=10

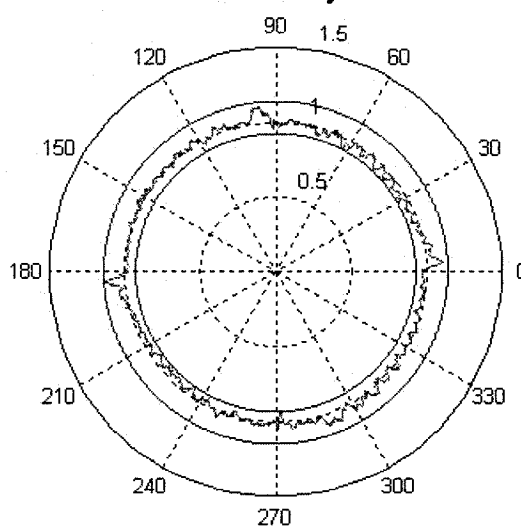


Figure A-3 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (10,10)

KGM TEST, HU40, G03, R=30mm, F=3000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=20 y=5

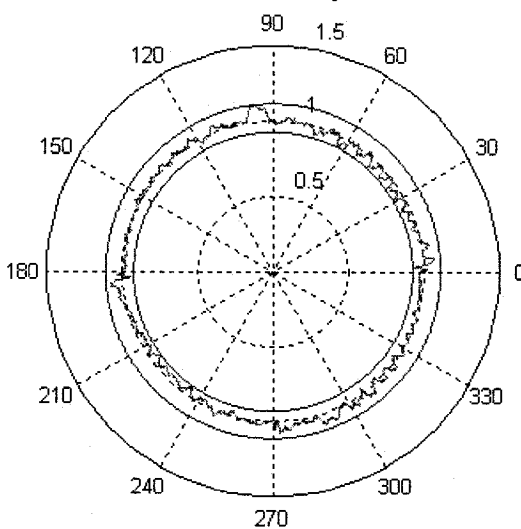


Figure A-4 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (20,5)

Avance de 3500 mm/min, rayon de 30 mm

KGM TEST, HU40, G03, R=30mm, F=3500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=20 y=5

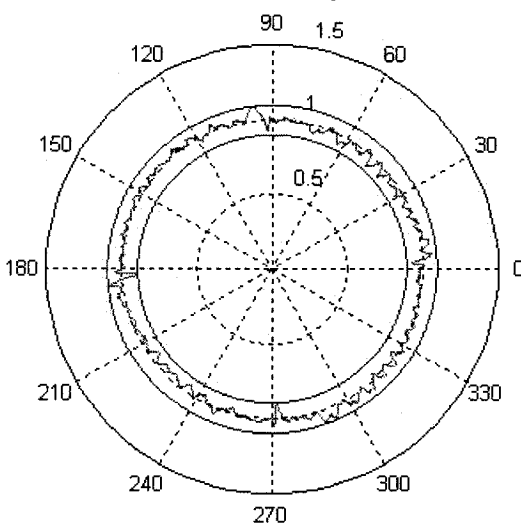


Figure A-5 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (20,5)

KGM TEST, HU40, G03, R=30mm, F=3500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=10 y=0

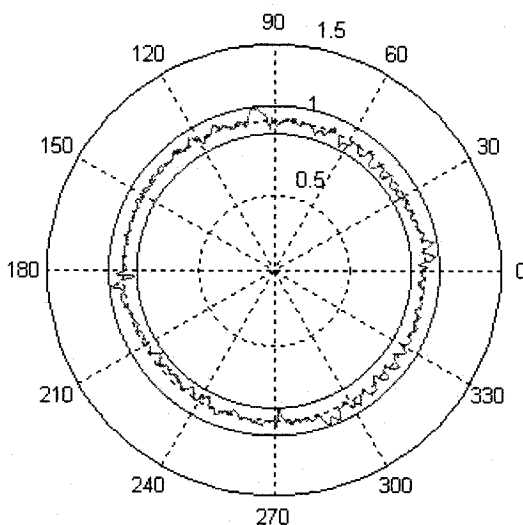


Figure A-6 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (10,0)

KGM TEST, HU40, G03, R=30mm, F=3500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=10 y=-5

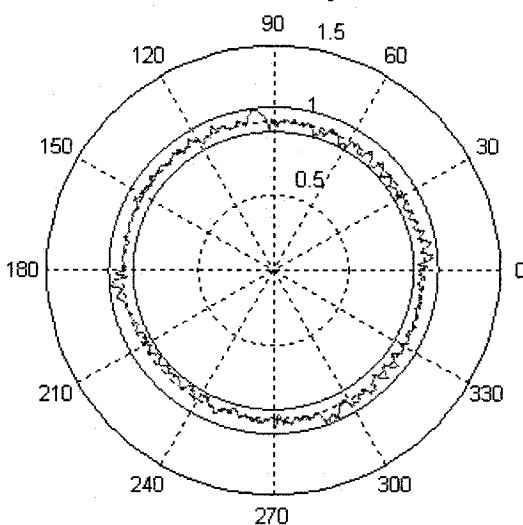


Figure A-7 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (10,-5)

Avance de 4000 mm/min, rayon de 30 mm

KGM TEST, HU40, G03, R=30mm, F=4000 mm/min, scale = 50 μ m
#1860: x=10 y=-5

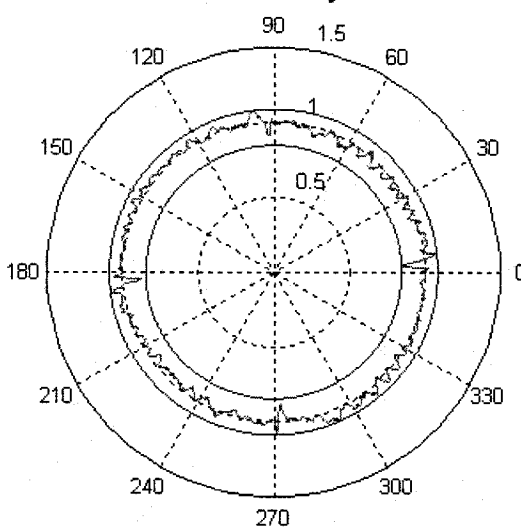


Figure A-8 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (10,-5)

KGM TEST, HU40, G03, R=30mm, F=4000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=0 y=-15

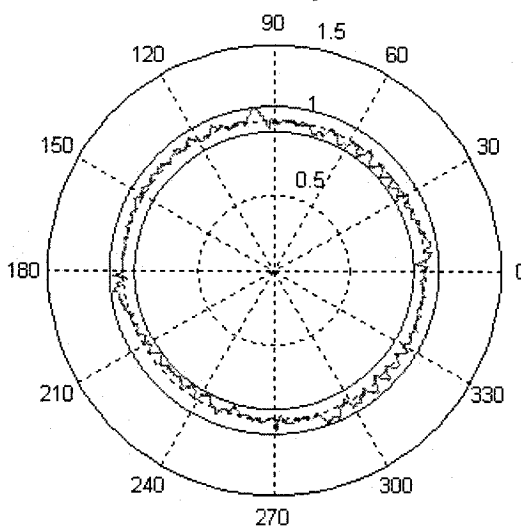


Figure A-9 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (0,-15)

Avance de 4500 mm/min, rayon de 30 mm

KGM TEST, HU40, G03, R=30mm, F=4500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=0 y=-15

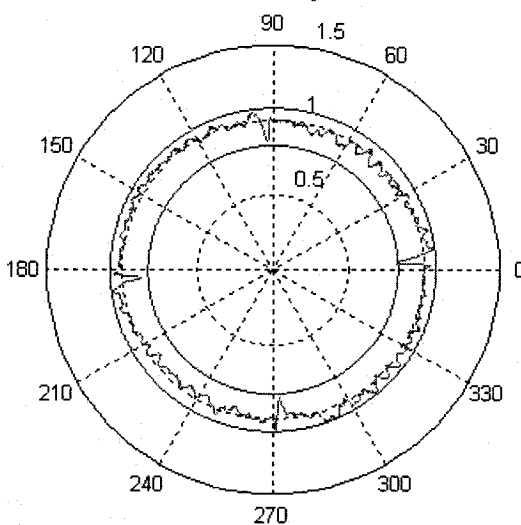


Figure A-10 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (0,-15)

KGM TEST, HU40, G03, R=30mm, F=4500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=-10 y=-25

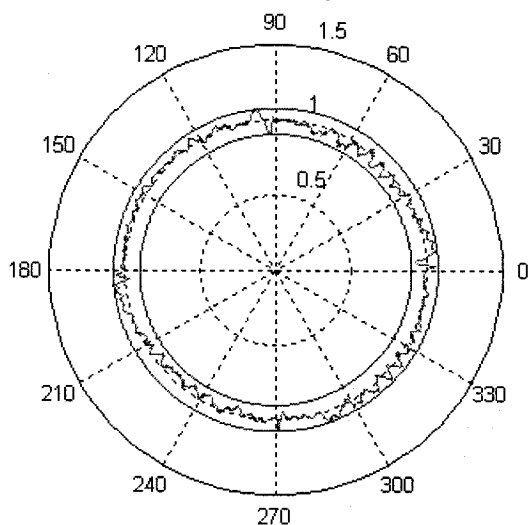


Figure A-11 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (10,-25)

KGM TEST, HU40, G03, R=30mm, F=4500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=-13 y=-27

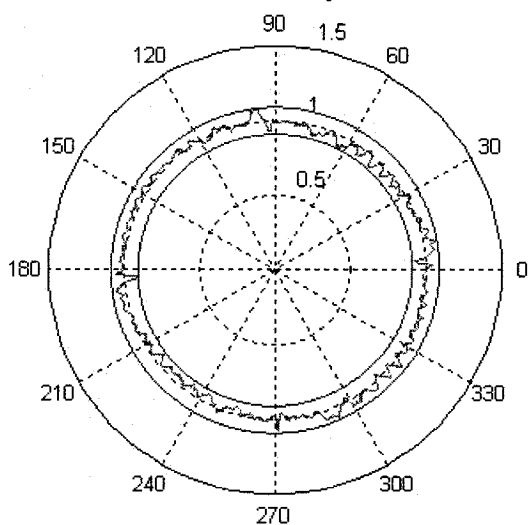


Figure A-12 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (-13,-27)

KGM TEST, HU40, G03, R=30mm, F=4500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=-17 y=-30

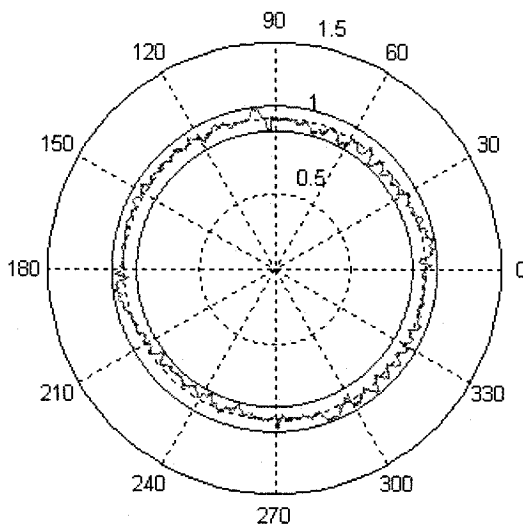


Figure A-13 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 30 mm, #1860 = (-17,-30)

Avance de 3000 mm/min, rayon de 40 mm

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=3000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=20 y=5

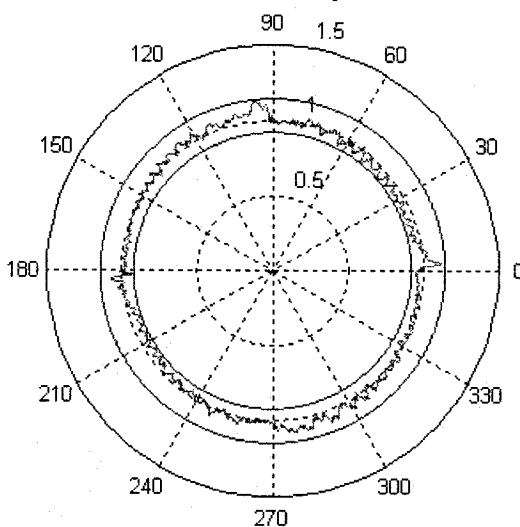


Figure A-14 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (20,5)

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=3000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=25 y=5

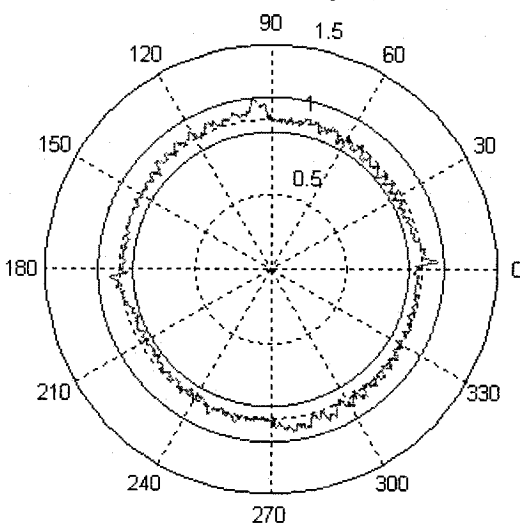


Figure A-15 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (25,5)

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=3000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=35 y=5

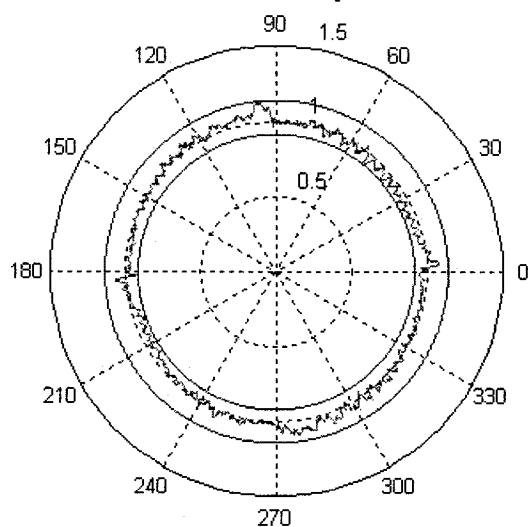


Figure A-16 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (35,5)

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=3000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=40 y=5

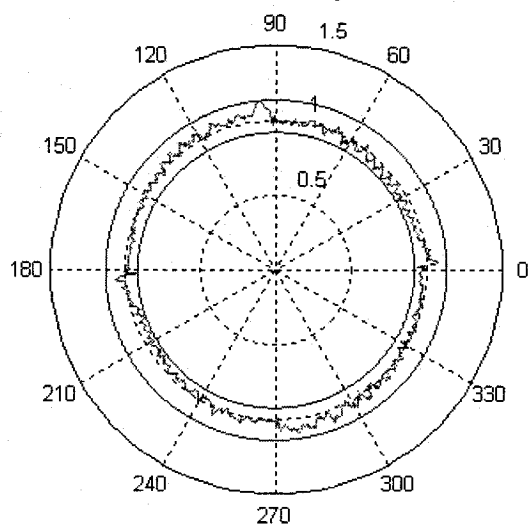


Figure A-17 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (40,5)

Avance de 3500 mm/min, rayon de 40 mm

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=3500 mm/min, scale = 50 μ m
#1860: x=40 y=5

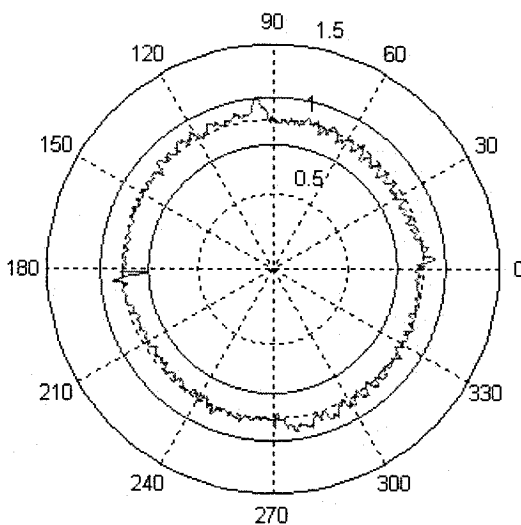


Figure A-18 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (40,5)

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=3500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=20 y=5

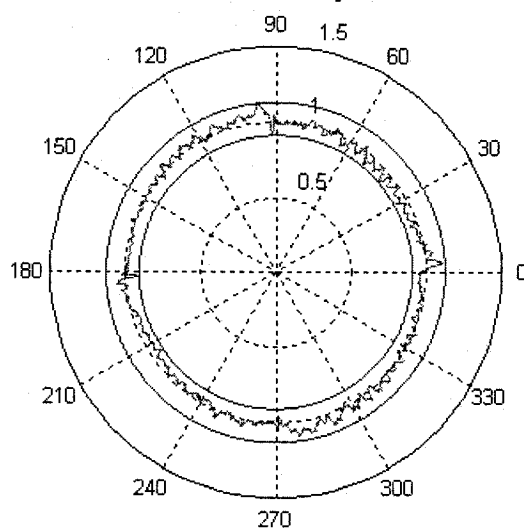


Figure A-19 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (20,5)

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=3500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=23 y=5

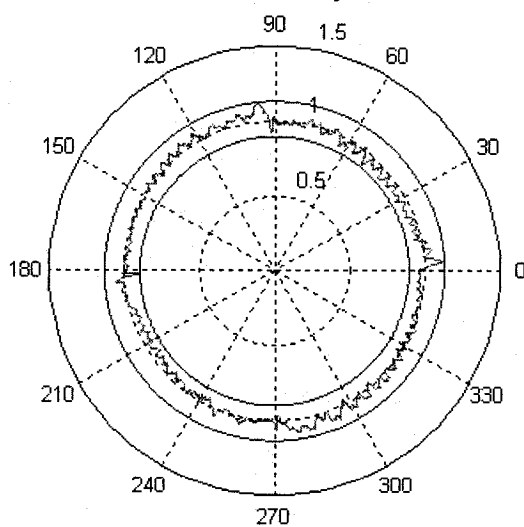


Figure A-20 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (23,5)

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=3500 mm/min, scale = 50 μ m
#1860: x=25 y=5

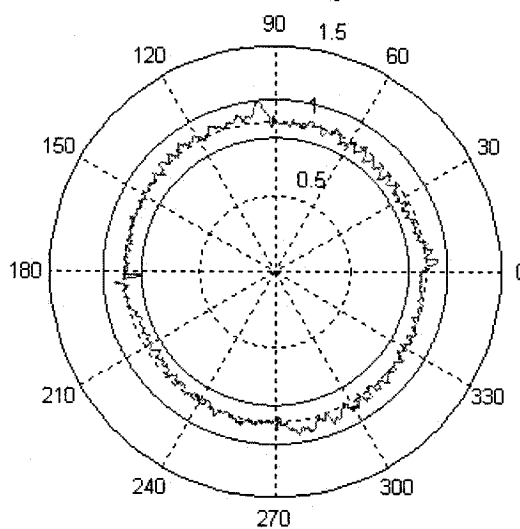


Figure A-21 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (25,5)

Avance de 4000 mm/min, rayon de 40 mm

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=4000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=25 y=5

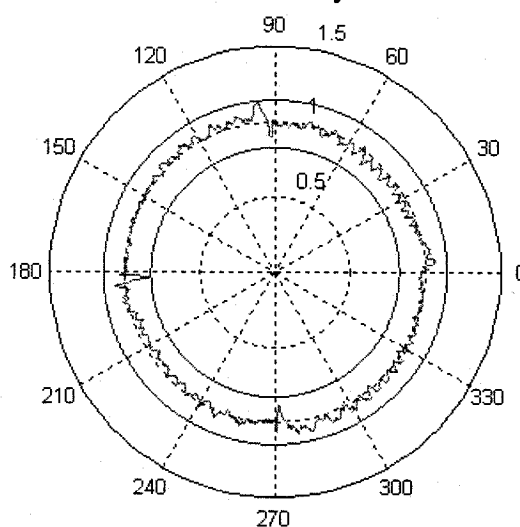


Figure A-22 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (25,5)

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=4000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=10 y=-5

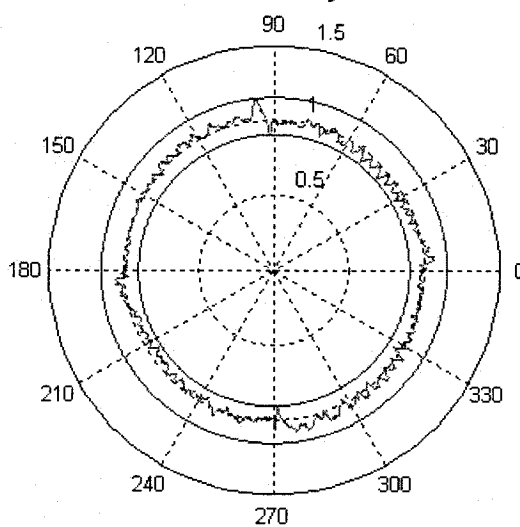


Figure A-23 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (10,-5)

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=4000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=10 y=-10

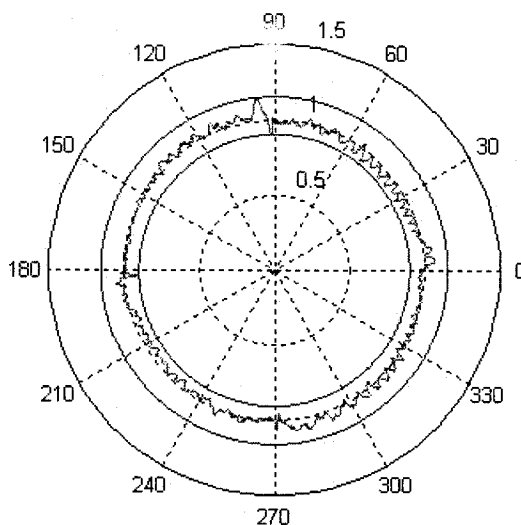


Figure A-24 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (10,-10)

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=4000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=10 y=-15

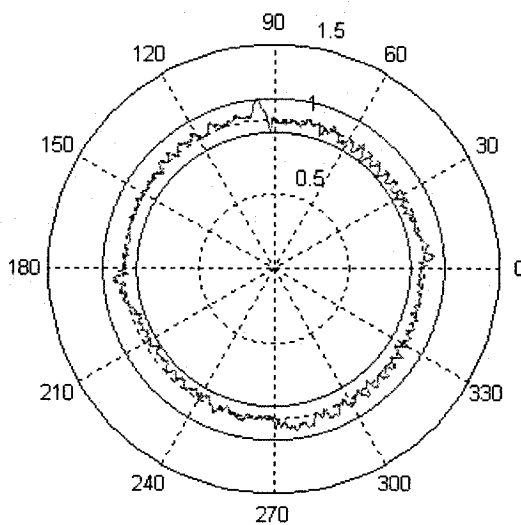


Figure A-25 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (10,-15)

Avance de 4500 mm/min, rayon de 40 mm

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=4500 mm/min, scale = 50 μ m
#1860: x=10 y=-15

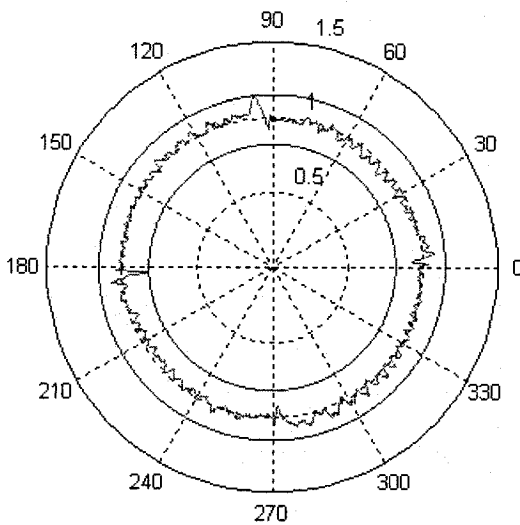


Figure A-26 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (10,-15)

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=4500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=0 y=-25

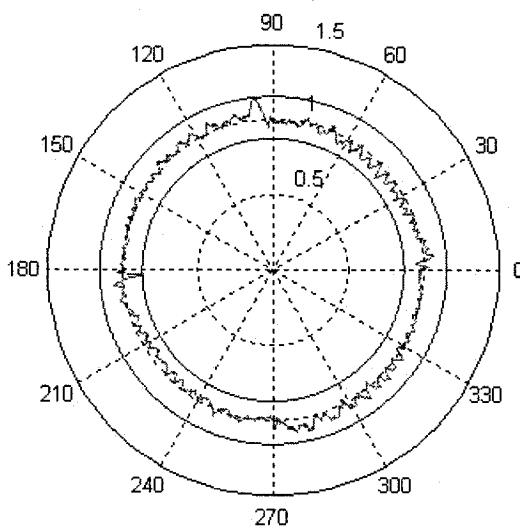


Figure A-27 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (0,-25)

KGM TEST, HU40, G03, R=40mm, F=4500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=-10 y=-25

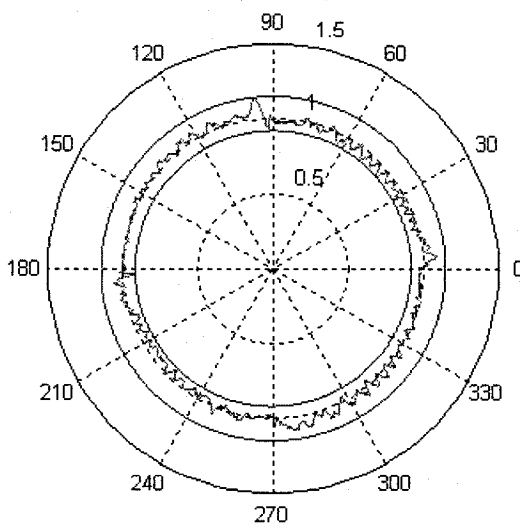


Figure A-28 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 40 mm, #1860 = (-10,-25)

Avance de 3000 mm/min, rayon de 50 mm

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=3000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=40 y=5

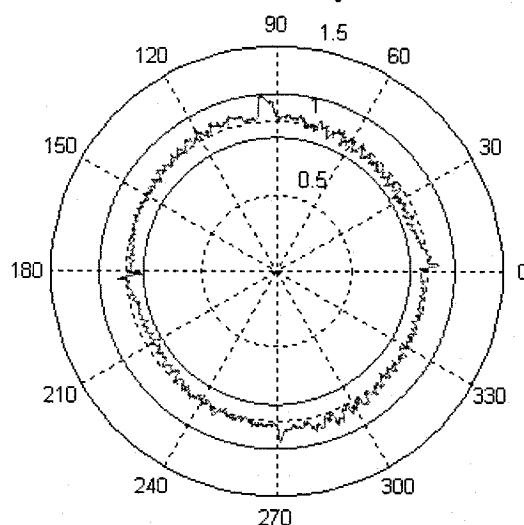


Figure A-29 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (40,5)

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=3000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=45 y=15

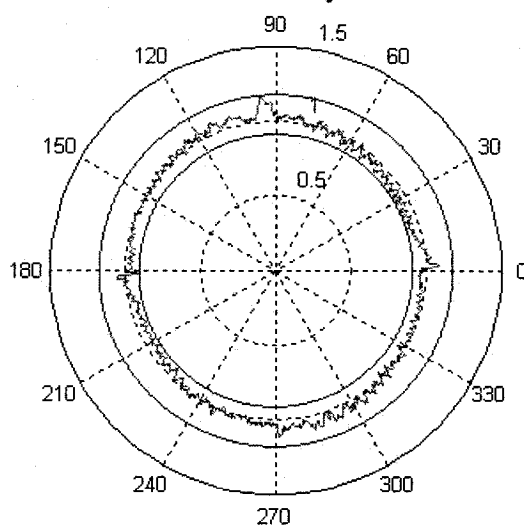


Figure A-30 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (45,15)

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=3000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=50 y=25

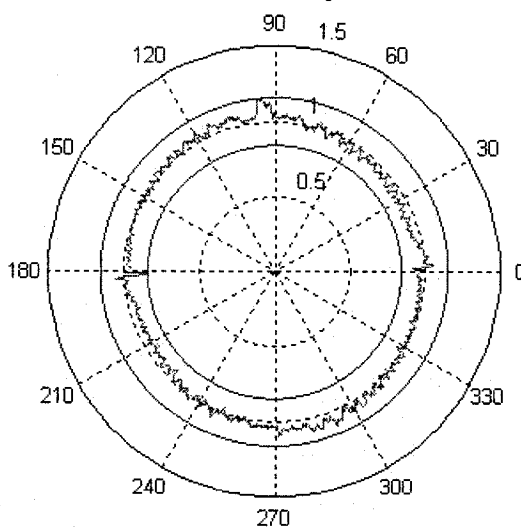


Figure A-31 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (50,25)

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=3000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=50 y=40

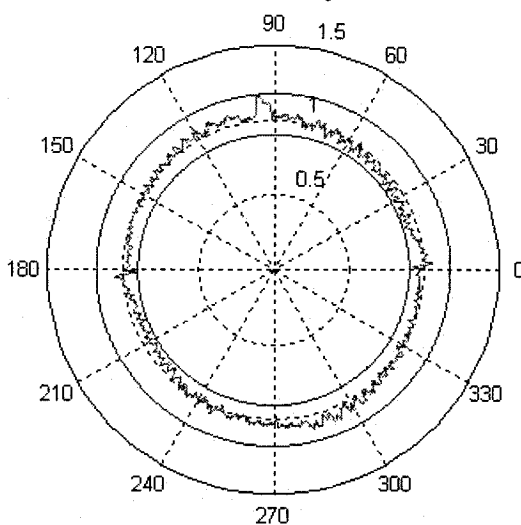


Figure A-32 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (50,40)

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=3000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=50 y=35

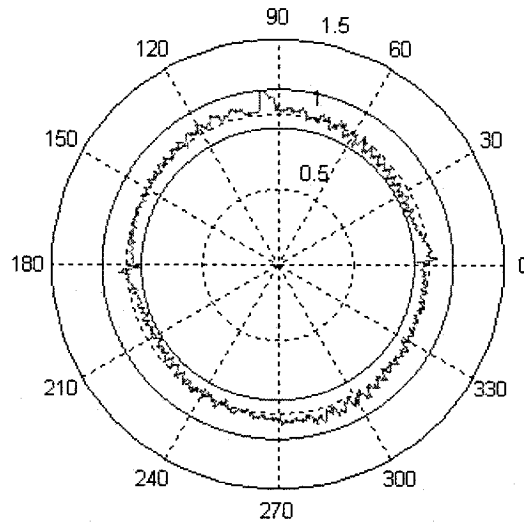


Figure A-33 : KGM, Avance de 3000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (50,35)

Avance de 3500 mm/min, rayon de 50 mm

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=3500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=50 y=35

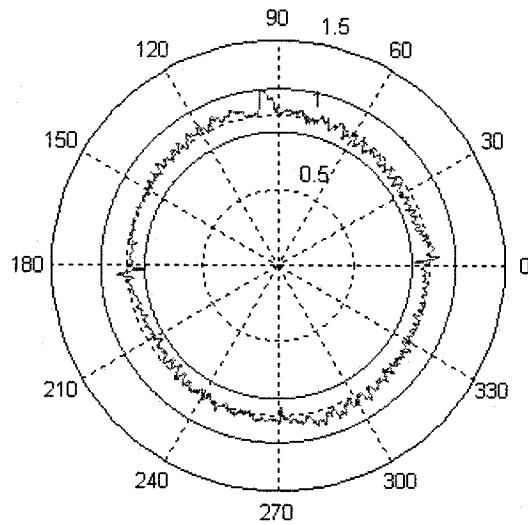


Figure A-34 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (50,35)

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=3500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=40 y=25

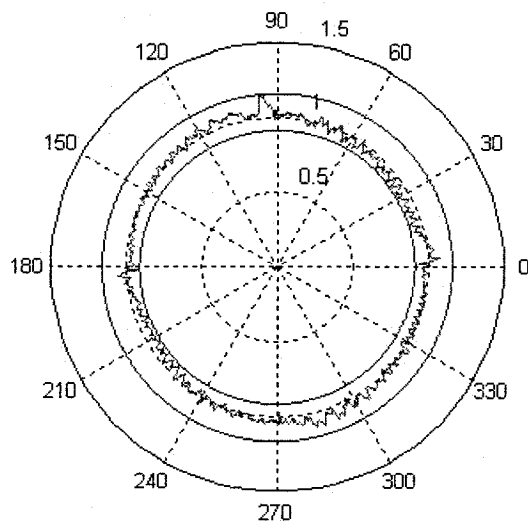


Figure A-35 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (40,25)

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=3500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=35 y=20

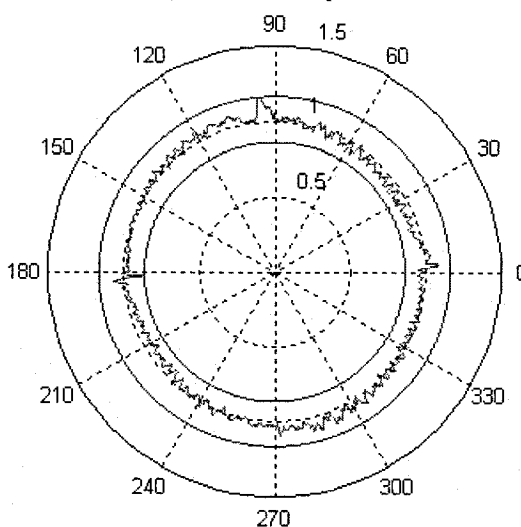


Figure A-36 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (35,20)

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=3500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=35 y=22

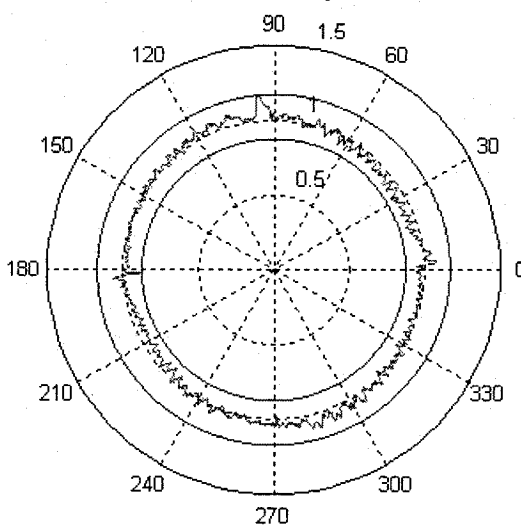


Figure A-37 : KGM, Avance de 3500 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (35,22)

Avance de 4000 mm/min, rayon de 50 mm

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=4000 mm/min, scale = 50 μ m
#1860: x=35 y=22

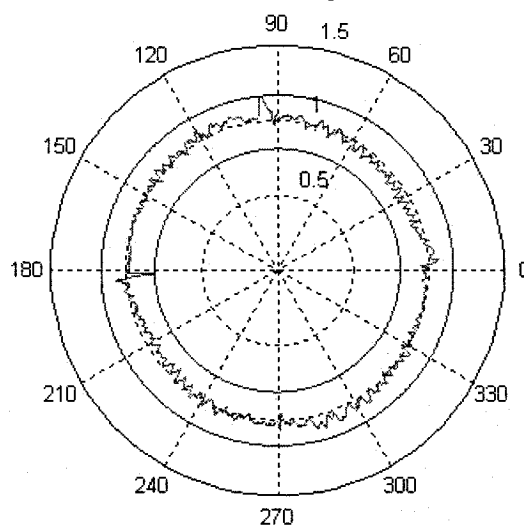


Figure A-38 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (35,22)

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=4000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=30 y=20

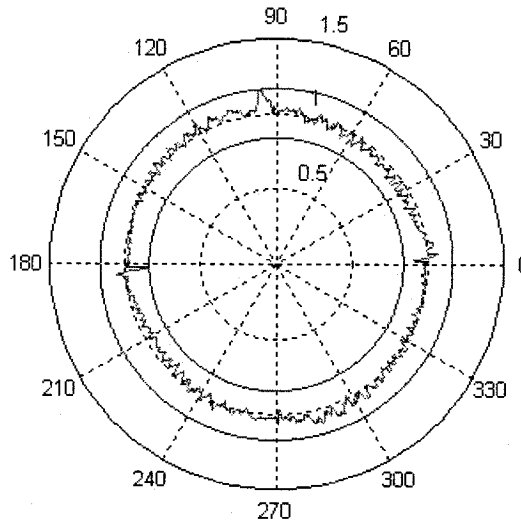


Figure A-39 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (30,20)

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=4000 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=23 y=15

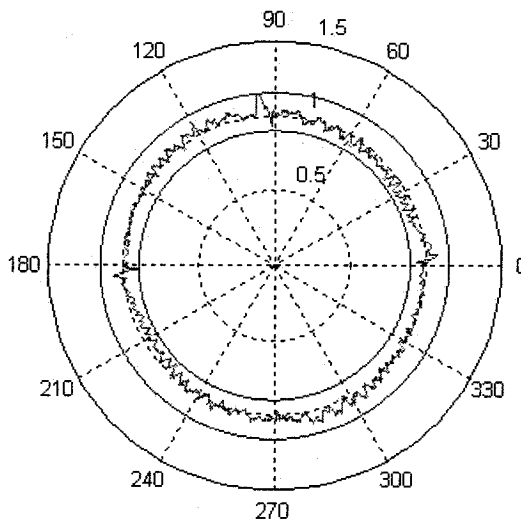


Figure A-40 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (23,15)

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=4000 mm/min, scale = 50 μ m
#1860: x=20 y=10

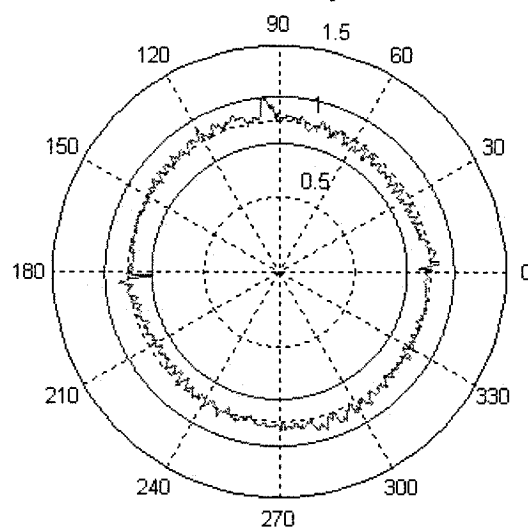


Figure A-41 : KGM, Avance de 4000 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (20,10)

Avance de 4500 mm/min, rayon de 50 mm

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=4500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=20 y=10

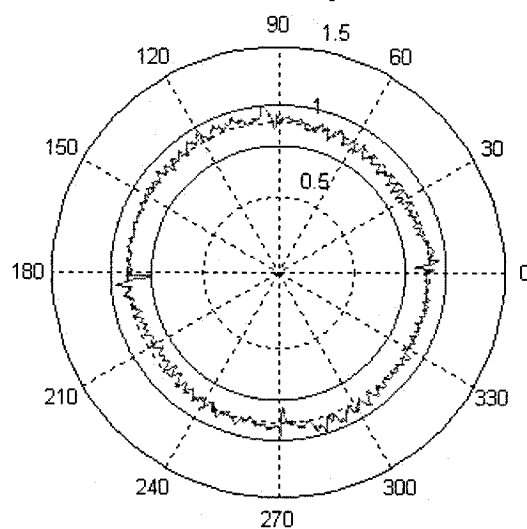


Figure A-42 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (20,10)

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=4500 mm/min, scale = 50 μ m
 #1860: x=5 y=5

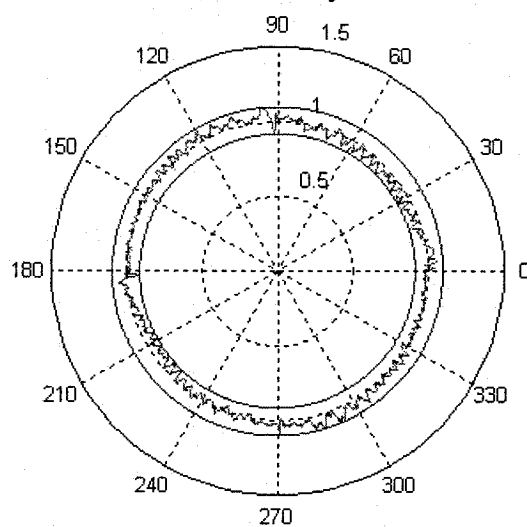


Figure A-43 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 50 mm, #1860 = (5,5)

KGM TEST, HU40, G03, R=50mm, F=4500 mm/min, scale = 50 μ m
#1860: x=5 y=0

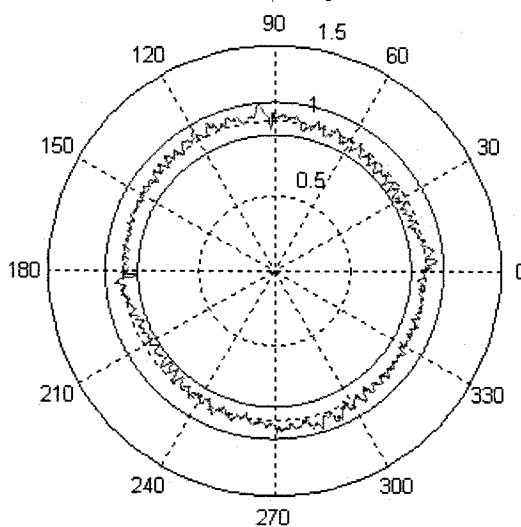


Figure A-44 : KGM, Avance de 4500 mm/min, Rayon de 0 mm, #1860 = (5,0)

Annexe B

L'annexe B présente les mesures prises avec MMT sur les surface usinées pour la première pièce test.

Rainure intérieure :

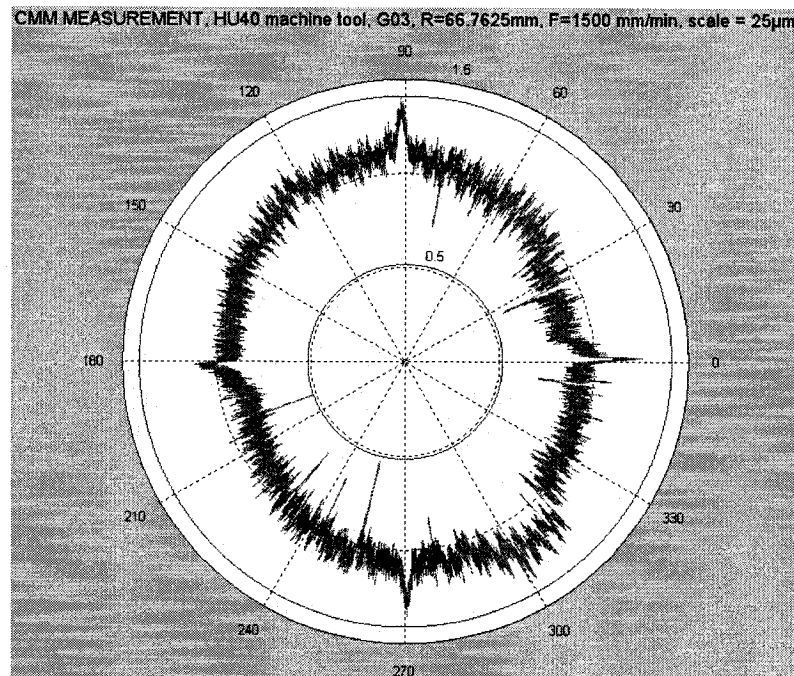


Figure B-1 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 66.7625 mm,
Profonde de coupe de 2mm

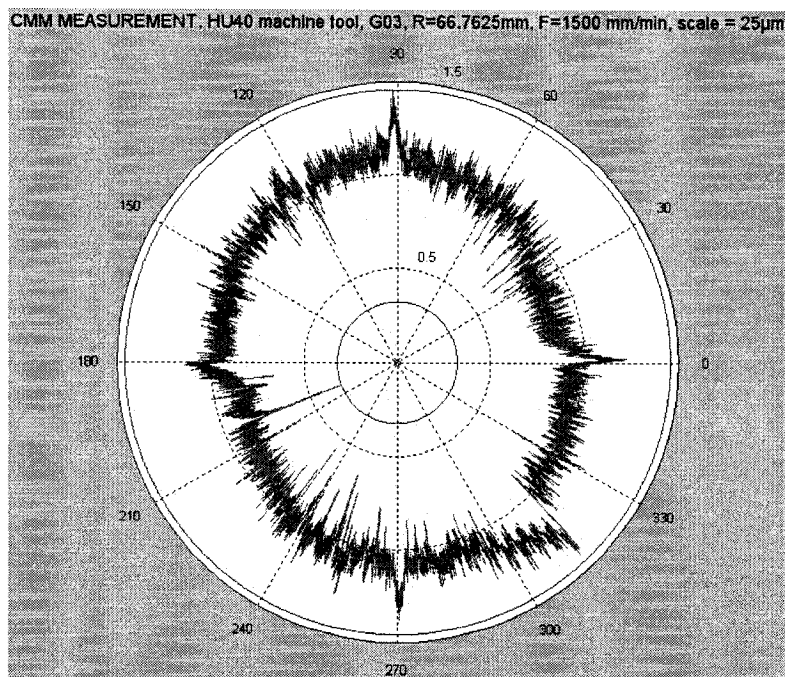


Figure B-2 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 66.7625 mm,
Profondeur de coupe de 2 mm

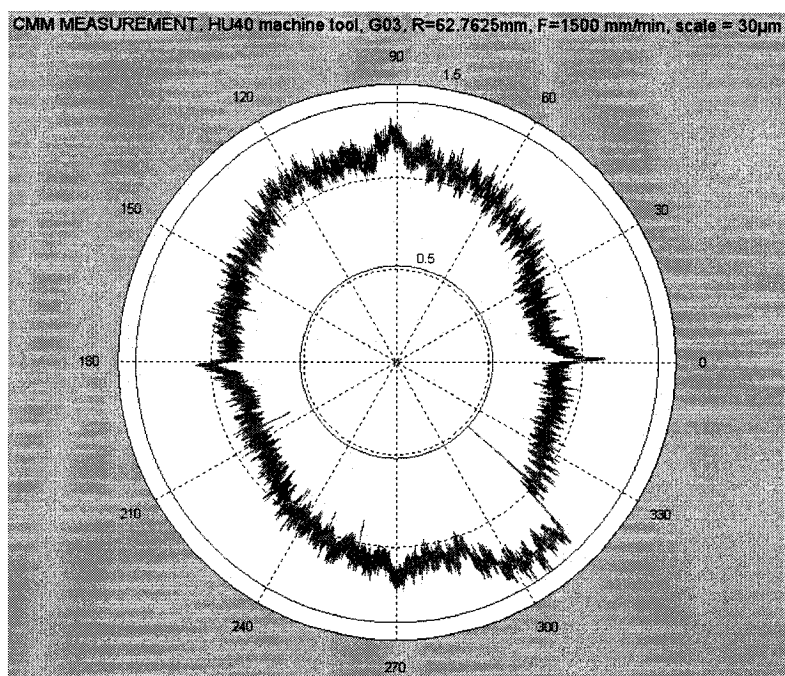


Figure B-3 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 62.7625 mm,
Profondeur de coupe de 5 mm

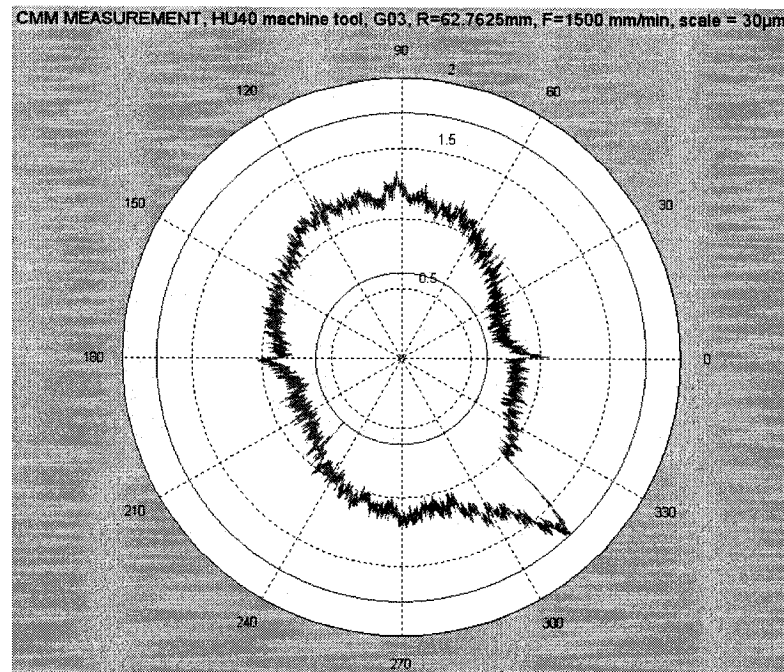


Figure B-4 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 62.7625 mm,
Profondeur de coupe de 5 mm

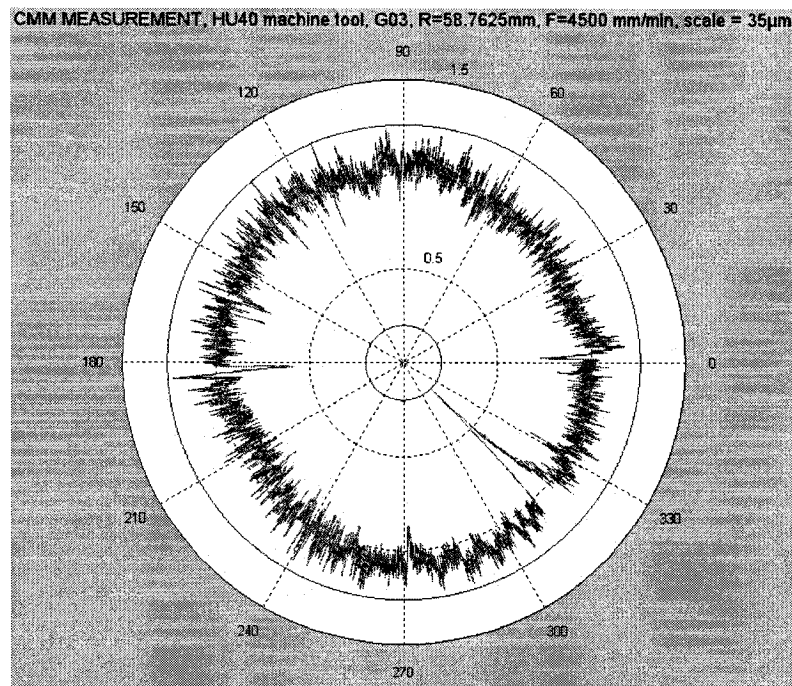


Figure B-5 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 58.7625 mm,
Profondeur de coupe de 2 mm

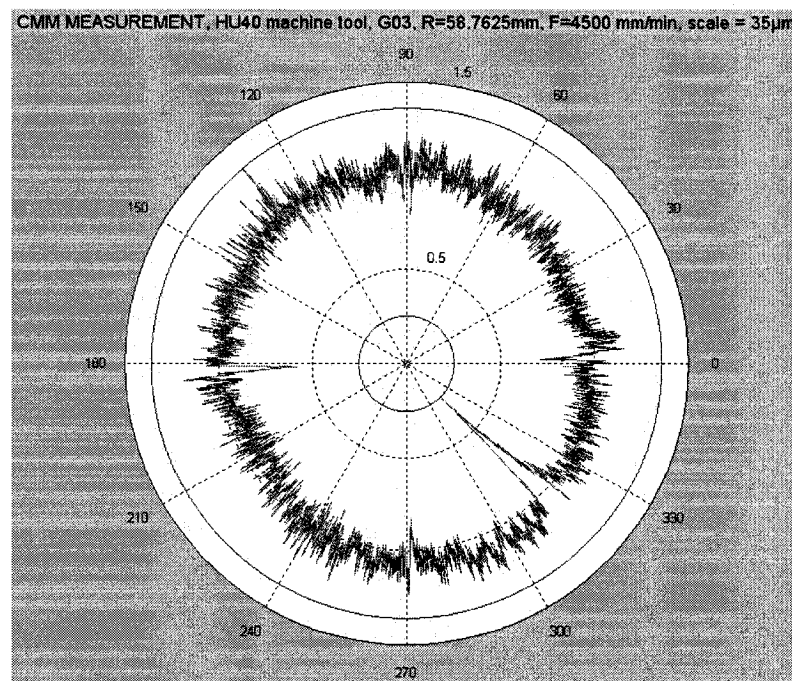


Figure B-6 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 58.7625 mm,
Profondeur de coupe de 2 mm

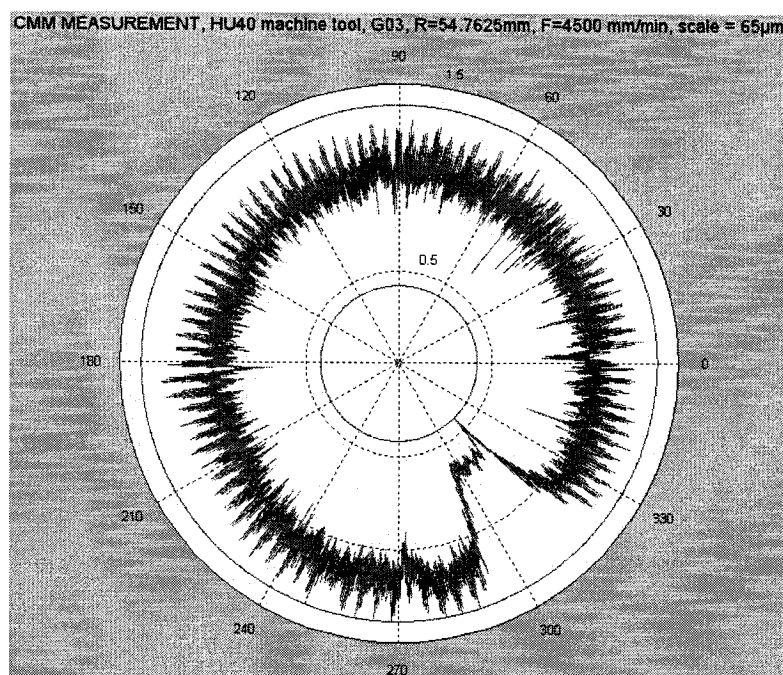


Figure B-7 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 54.7625 mm,
Profondeur de coupe de 5 mm

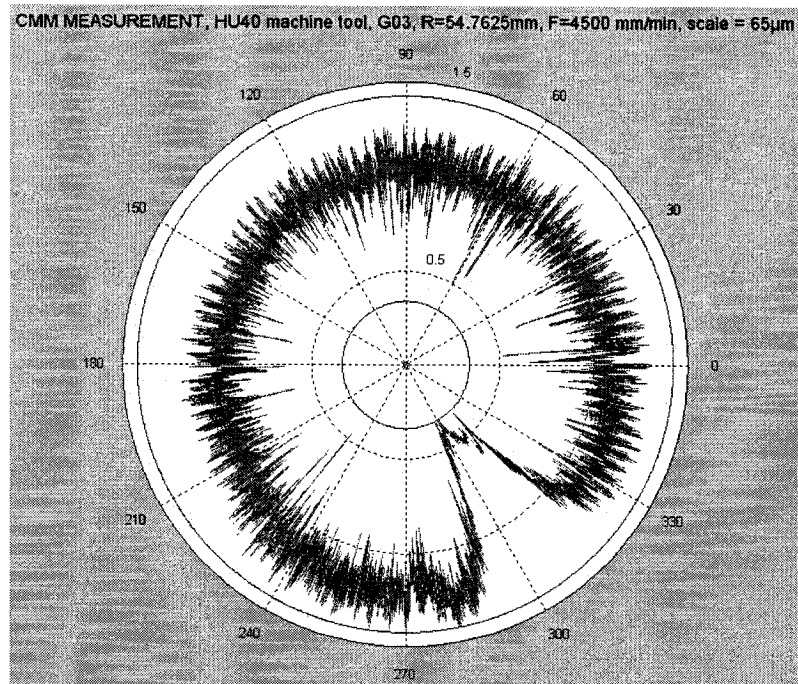


Figure B-8 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 54.7625 mm,
Profondeur de coupe de 5 mm

Rainure extérieure :

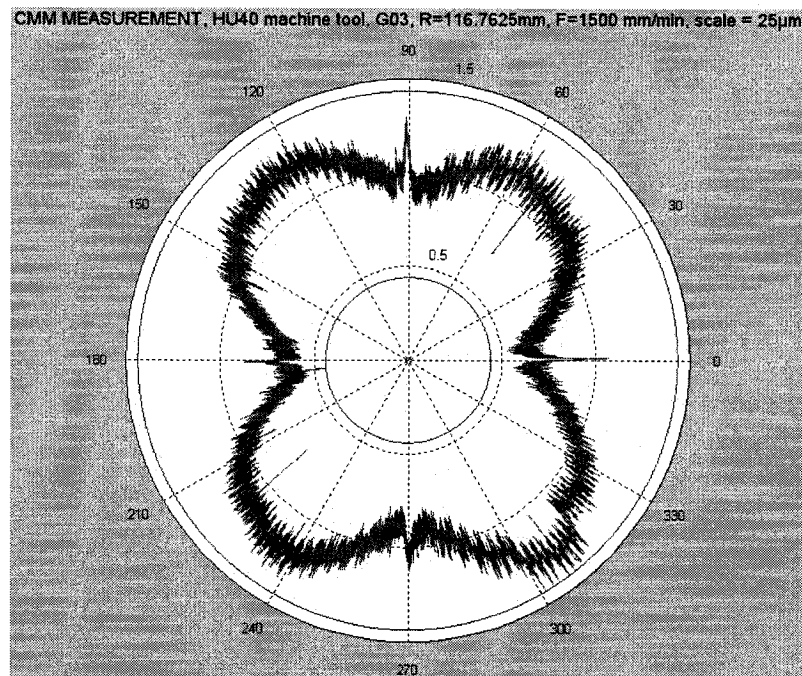


Figure B-9 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 116.7625 mm,
Profondeur de coupe de 2 mm

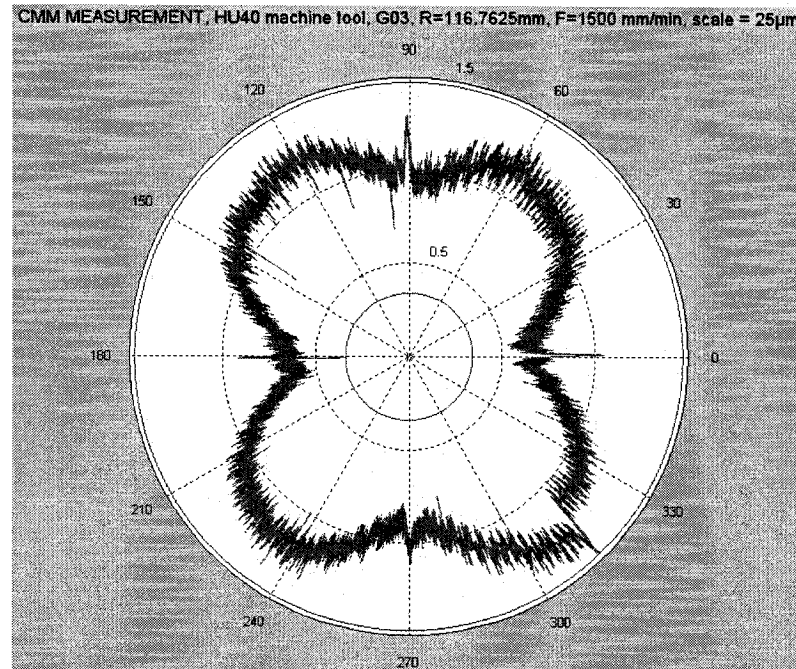


Figure B-10 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 116.7625
mm, Profondeur de coupe de 2 mm

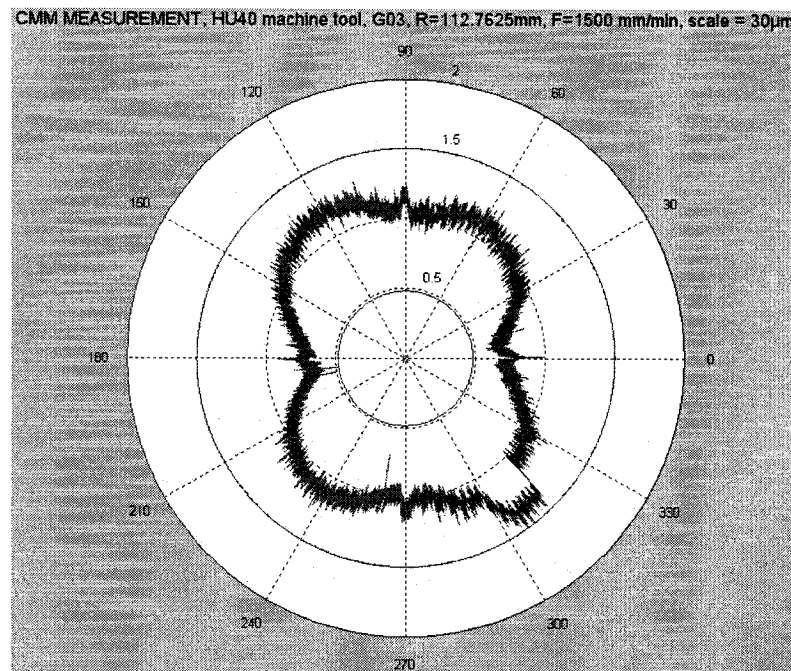


Figure B-11 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 112.7625 mm, Profondeur de coupe de 5 mm

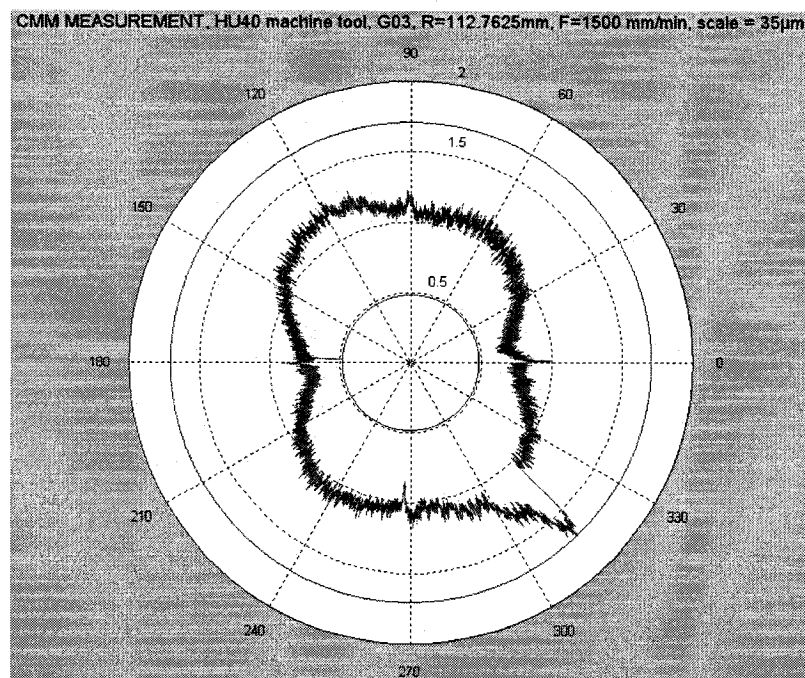


Figure B-12 : MMT, Avance de 1500 mm/min, 5000 rpm, Rayon de 112.7625 mm, Profondeur de coupe de 5 mm

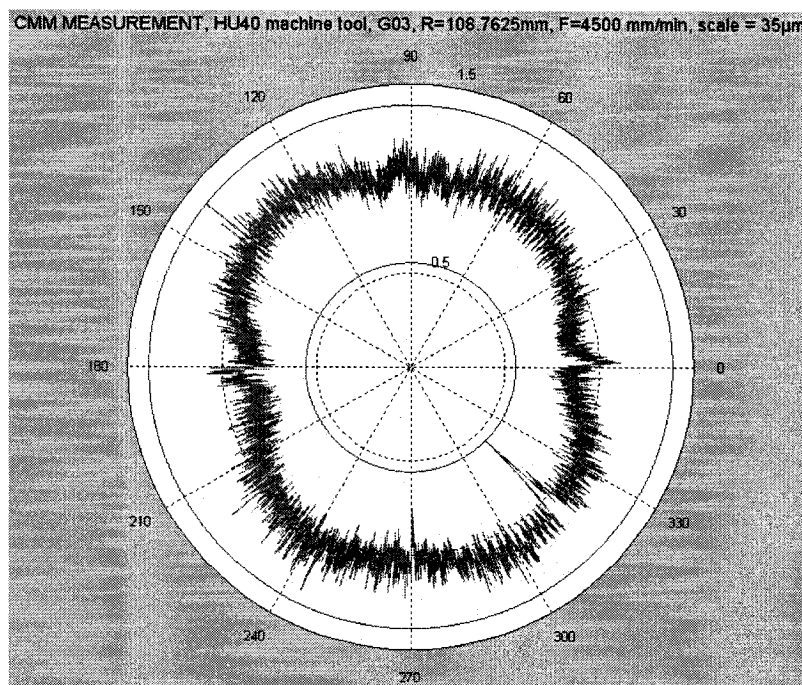


Figure B-13 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 108.7625 mm, Profondeur de coupe de 2 mm

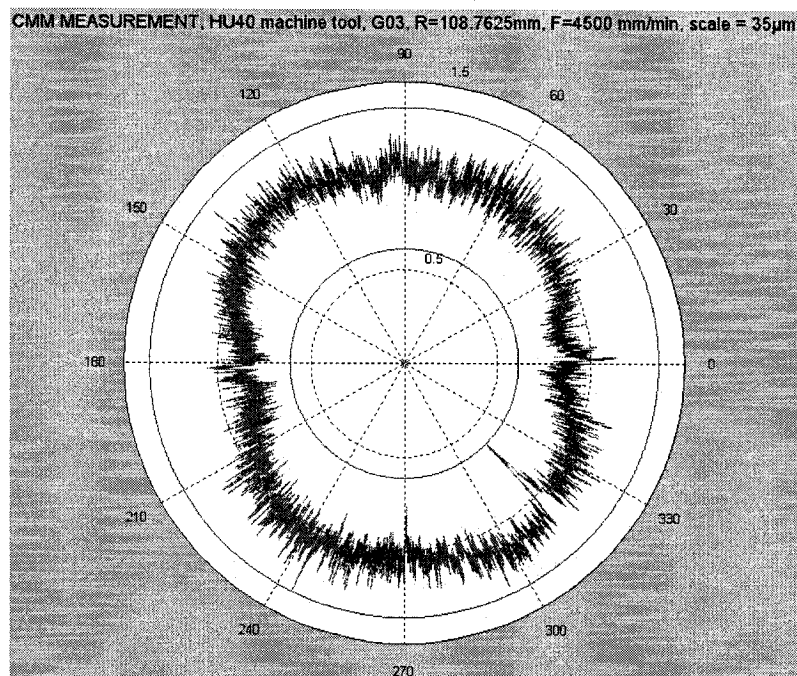


Figure B-14 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 108.7625 mm, Profondeur de coupe de 2 mm

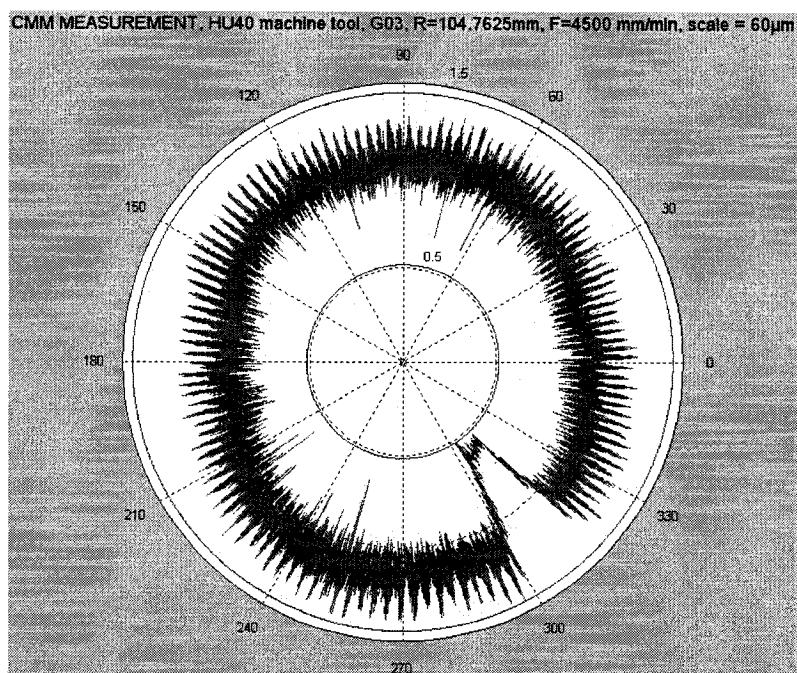


Figure B-15 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 104.7625 mm, Profondeur de coupe de 5 mm

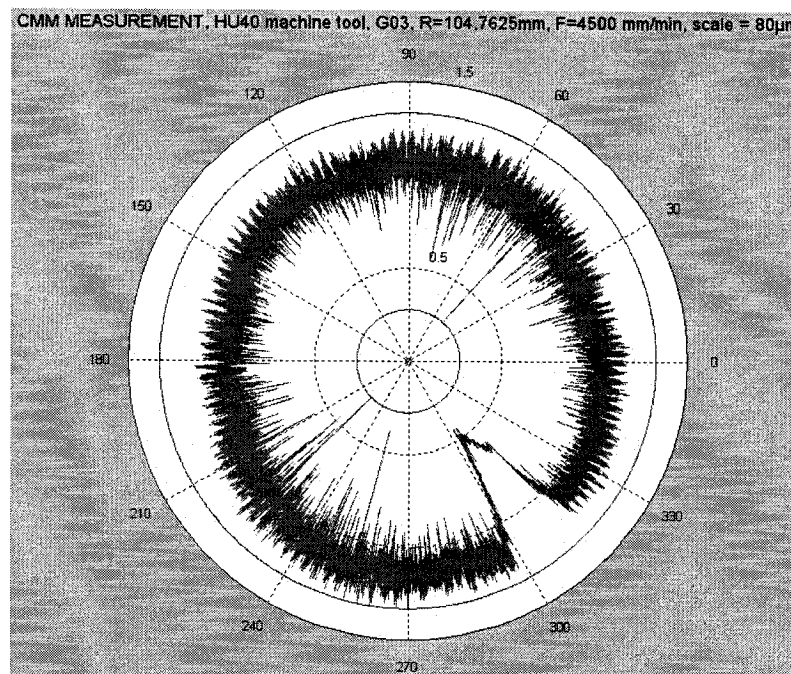


Figure B-16 : MMT, Avance de 4500 mm/min, 15000 rpm, Rayon de 104.7625 mm, Profondeur de coupe de 5 mm