

République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique

Université mouhamed boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة محمد بوضياف - المسيلة

كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER 02

En Génie Mécanique

OPTION : Productique

Thème :

**Évaluation de la qualité d'alésages obtenus par fraisage
circulaire**

Proposé et dirigé par :

Slamani mohamed

Présenté par :

kermiche younes

Année Universitaire : :2015/2016

Remerciement

*A l'issue de cette étude, je remercie le **ALLAH** clément et miséricordieux tout puissant qui m'a donné tant de courage, de volonté, de patience, de force, de sagesse et d'abnégation pour mener à terme ce mémoire.*

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération Particulière que je remercie mon encadreur Mr: **Slamani mohamed** pour avoir accepté de m'encadrer, pour son aide, Son soutien, ses conseils et ses encouragements.*

Mes sincères remerciements à l'ensemble des enseignants qui ont Contribué à notre formation avec beaucoup de dévouement et de compétence en n'oubliant jamais les personnes qui ont participés de près ou de loin à ce modeste travail.

Kermiche younes

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

La personne la plus chère dans le monde, la lumière de ma vie, la source de tendresse, celle qui a sacrifiée et souffert les plus belles années de sa vie pour me voir un jour réussir :

♥♥ *Ma chère mère* ♥♥

A mon cher père, le plus noble qui par son courage a consacré toutes ses efforts, et ses moyens pour m'aider à accomplir ce mémoire, et pour me faire réussir.

*A mes chers frères **Mohcen**.*

*A mes chères sœurs **hanen et israa***

*A toutes la famille **kermiche***

A mes chers amis :hakim ,soufyane ,nasser , mohamed



Table des matières

Introduction.....	1
-------------------	---

Chapitre 1

Cadre théorique et revue de littérature

1.1 Fabrication des alésages	3
1.2 Revue littéraire	5
1.3 Utilisation de l'aluminium.....	7
1.4 Introduction à la mise en forme par fraisage.....	8
1.4.1 Mouvements générateurs de la coupe.....	9
1.4.2 Les avantages du fraisage	10
1.4.3 Classification et présentation des outils de fraisage.....	10
1.5 Modélisation des efforts de coupe en fraisage	12
1.5.1 Fraises monoblocs cylindriques	13
1.6 L'analyse modale expérimentale en fraisage.....	15
1.7 Les vibrations d'usinage.....	15
1.7.1 vibrations libres	15
1.7.2 vibrations forcées	15
1.7.3 vibrations auto-entretenues	15
1.8 Diagramme de lobes de stabilité.....	16
1.9 Systèmes d'entraînement des MOCN.....	17
1.9.1 Le contrôleur à commande numérique CNC.....	18
1.9.2 Les systèmes d'entraînement par vis à billes.....	19
1.9.3 Les systèmes d'entraînement à moteurs linéaires.....	20

Table des matières

1.10 Modélisation d'un profil interpolé sur deux axes	22
1.10.1 Modélisation de la vitesse d'avance pour une interpolation linéaire.....	22
1.10.2 Modélisation de la vitesse d'avance sur une interpolation circulaire.....	24
1.11 Métrologie machine : Tests de circularité.....	26

Chapitre 2

Méthodologie expérimentale

2.1 Machine-outil à commande numérique CNC.....	28
2.2 Pièce à usiner.....	29
2.3 Outil de cou.....	29
2.4 Choix des paramètres d'usinage.....	30
2.5 Etaux de fraisage	31
2.6 Simulation graphique sur CATIA V5r20.....	31
2.7 Système de mesure	31
2.8 Mesure avec contact (palpage)	33
2.9 Tête de palpage.....	33
2.9.1 La tête dynamique.....	33
2.9.2 Tête statique.....	33
2.10 Palpeurs FaroArm.....	34

Table des matières

Chapitre 3

Conception de la pièce et simulation d'usinage sur CATIA V5

3.1 : Conception de la pièce sur CATIA V5R20.....	35
3.2 : Simulation d'usinage sur CATIA V5.....	39
3.2.1 : Définir les éléments de la phase.....	39
3.2.2 Choix des fonctions d'usinages.....	22
3.2.3 Génération du programme code G	42

Chapitre 4

Analyse des résultats et discussion

4.1 Machine-outil.....	43
4.2 Tests de circularité.....	44
4.3 Pièces usinées.....	45
4.4 Test comparatif.....	50
Conclusion	55
Bibliographie.....	57

List de Figure

Figure1.1 : Pièces types dans l'industrie	3
Figure1.2 : Fabrication d'un alésage à l'aide d'une barre à aléser	4
Figure1.3 : Fabrication d'un alésage en fraisage circulaire.....	5
Figure1.4 : Pics d'inversion avec une échelle 25µm.....	6
Figure1.5 : type de fraisage.....	8
Figure1.6 : Opération de fraisage.....	9
Figure1.7 : Configurations d'usinage en fraisage de profil.....	9
Figure1.8 : familles et types d'outil possibles.....	11
Figure1.9 : classification des outils.....	12
Figure1.9 : discrétisation de l'outil suivant son axe.....	13
Figure1.10 : géométrie de la fraise cylindrique.....	14
Figure1.11 : trace des lobes de stabilité.....	17
Figure1.12 : exemple de mocn verticale trois axes.....	18
Figure1.13 : modèle de la structure du CNC.....	19
Figure1.14 : modèle de système d'entraînement par vis à billes.....	20
Figure1.15 : modèle des systèmes d'entraînement à moteur linéaire.....	21
Figure1.16 : paramétrage du suivi du profil dans le repère de frenet	22
Figure 1.17 : interpolation linéaire.....	22
Figure1.17 : comparaison entre la dynamique curviligne de référence et la loi de mouvement des axes pour un profil linéaire (loi à jerk limité).....	24
Figure1.20 : interpolation circulaire.....	25

Chapitre2 Méthodologie expérimentale

Figure2.1 : Fraiseuse a 5 axe.....	29
Figure2.2 : Pièce à usinée.....	29
Figure2.3 : Fraise cylindrique monobloc.....	30
Figure2.4 : Bras poly-articulé faro.....	32
Figure2.5 : Encodeur rotative.....	32
Figure2.6 : tête dynamique	33
Figure2.7 : Tête statique.....	34

Figure 2.8 : palpeur standard de faro Arm	34
--	----

Capitre 4 ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Figure 4.1 : MOCN HU-40 de Mitsui Seiki.....	43
Figure 4.2 : Erreurs de circularité obtenues par des tests de KGM pour un rayon R = 90 mm avant la compensation du jeu d'inversion et les pics à l'inversion.....	44
Figure 4.3 : Erreurs de circularité obtenues par des tests de KGM pour un rayon R = 90 mm après la compensation du jeu d'inversion et les pics à l'inversion.....	45
Figure 4.6 : Tracé provenant de mesures sur la MMT d'une surface usinée.....	46
Figure 4.7 : Première surface usinée avec une trajectoire spiralée.....	48
Figure 4.8 : Deuxième surface usinée avec une trajectoire spiralée.....	48
Figure 4.9 : Troisième surface usinée avec une trajectoire spiralée.....	49
Figure 4.10 : Surface usinée avec une trajectoire hélicoïdale.....	49
Figure 3.12 : Usinage d'un alésage avec la barre à aléser.....	51
Figure 3.13 : Erreurs de circularité obtenues par MMT pour un alésage usiné par barre à aléser pour un rayon R = 35mm.....	51
Figure 4.16 : Usinage d'un alésage par fraisage circulaire.....	52
Figure 4.14 : Erreurs de circularité obtenues par MMT et par KGM pour un rayon R = 35 mm pour le procédé d'alésage circulaire après la compensation du jeu d'inversion et les pics à l'inversion, a) Fraisage circulaire, b) KGM.....	53
Figure 4.15 : Alésage par fraisage circulaire R = 140 mm.....	55

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les gains de productivité et le partage de ces gains sont des enjeux économiques, politiques et sociaux majeurs. Les entreprises abordent souvent leur désir d'augmenter leur productivité, ce qui leur permettra d'accroître leur bénéfice et/ou de réaliser de nouveaux investissements. Toutefois, cette notion de productivité, essentielle en matière de fabrication, demeure complexe à saisir.

Pour les usines et les entreprises qui se spécialisent dans la production de moteurs de voitures, d'avions et d'hélicoptères, la diminution des coûts de production représente un défi majeur pour ses multiples projets de recherche et de développement. Plusieurs pièces des moteurs comportent une multitude d'alésages avec différents diamètres. Jusqu'à aujourd'hui, ces entreprises doivent se contenter d'usiner ces alésages avec une barre à aléser pour obtenir la précision exigée par le bureau de conception.

La mise en œuvre du fraisage à grande vitesse a permis une augmentation sensible de la productivité. Un exemple, où des gains importants peuvent être obtenus est l'usinage des alésages de précision. Comme mentionné précédemment, les alésages de qualité sont généralement obtenus par le procédé d'alésage par barre à aléser. L'usinage des alésages avec une barre à aléser implique seulement la rotation de la broche de la MOCN : il n'y a aucun mouvement des axes durant cet usinage ce qui élimine le problème des forces de friction. Cependant, ce procédé est relativement lent car il exige la préparation et le réglage d'une barre à aléser spécifique pour chaque diamètre. L'inventaire d'outils est aussi important puisqu'une différente barre à aléser doit être utilisée pour chaque diamètre ce qui augmente aussi les coûts de production.

L'alésage par fraisage circulaire est un procédé de fraisage à grande vitesse. Elle offre des gains substantiels comparés à celui par barre à aléser tel que l'utilisation d'un outil unique pour des diamètres d'alésage multiples. Ce qui veut dire qu'un seul outil pourrait être utilisé pour l'usinage d'une multitude d'alésage (avec différents diamètres) si les géométries de l'outil et des alésages le permettent. Il y aurait donc un seul changement d'outil. Pour les alliages légers, les alésages pourraient être usinés à hautes vitesses. Cela représente donc une diminution importante du temps de production et de l'inventaire d'outils résultant en une diminution importante des

coûts de production. Cependant, la qualité de finition d'alésage doit être comparable à celle obtenue avec une barre à aléser.

L'alésage par fraisage circulaire consiste à effectuer une interpolation circulaire à travers le mouvement combiné de deux axes linéaires de la MOCN. Conséquemment, durant l'alésage par fraisage circulaire, le jeu d'inversion et les forces de friction provenant des composants de la vis à billes des deux axes peuvent ainsi affecter la précision de l'alésage usiné.

L'objectif principal de ce projet est d'exploiter au maximum la capacité des machines-outils à commande numérique pour réaliser des alésages de précision par fraisage circulaire d'alliages légers.

Chpitre 1 :
Cadre théorique et
Revue littéraire

1.1 Fabrication des alésages

Face à la concurrence, les entreprises doivent diminuer les temps de production et les prix tout en améliorant la qualité. Pour atteindre ces objectifs, elles doivent actualiser en permanence leurs méthodes et moyens de production.

Les entreprises de production de produits mécaniques sont plus que jamais concernées par la réduction du cycle de développement de leurs produits. Cette réduction passe forcément par la diminution des délais de conception et de fabrication. Toutefois, l'amélioration permanente de la qualité des produits, de leurs coûts et de la gestion des connaissances de l'entreprise restent aussi des impératifs pour une meilleure compétitivité. Cette réduction des délais de fabrication repose sur une exploitation efficace des méthodes modernes de production, à travers notamment l'automatisation de tâches, et la formalisation des connaissances.

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

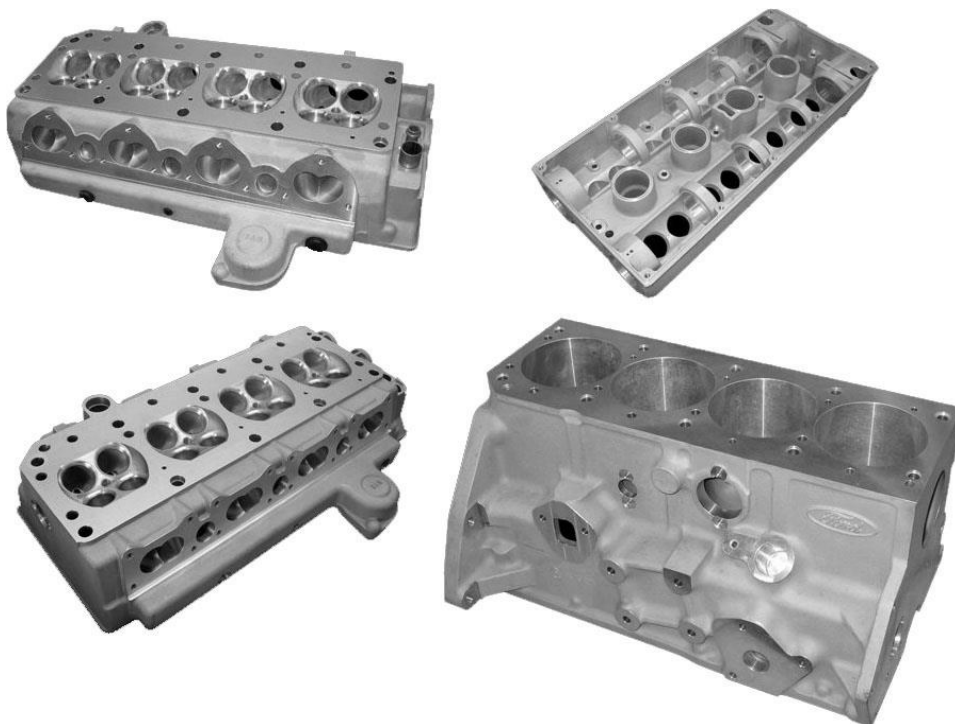


Figure1.1 : Pièces types dans l'industrie [23].

La méthode préconisée pour la fabrication d'alésages précis est l'utilisation de la barre à aléser (Fig. 1.2). Cette méthode possède les avantages et les inconvénients suivants :

Avantage:

- Procédé très précis.

Inconvénients :

- Procédé très long (changements d'outils fréquents, réglages nombreux).
- Une barre à aléser possède un diamètre fixe permettant seulement d'usinage d'un alésage de 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 termes d'outils, de temps de réglage et de temps d'usinage.

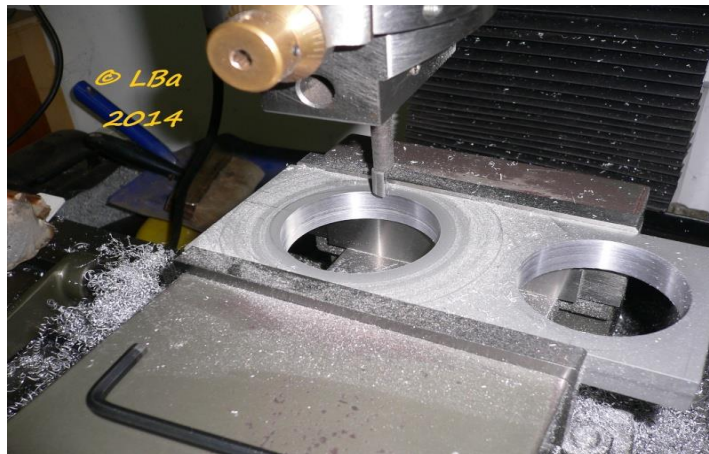


Figure 1.2 : Fabrication d'un alésage à l'aide d'une barre à aléser.

Dans ce projet, nous tentons d'évaluer la précision du fraisage circulaire. 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 :

Avantage :

- 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 1.3 : Fabrication d'un alésage en fraisage circulaire.

1.2 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 [1] ainsi que un de E.D Tung, M. Tomizuka et Y. Urushisaka [2]. 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'emphase 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, Tomizouka 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. [3], de E. Solis et al. [4] ainsi que de Yusuf Altintas [5]. La stabilité du processus de coupe est une condition fondamentale pour l'obtention de bons résultats d'usinage qui sont souvent traduits par l'amélioration de la qualité des surfaces usinées, l'augmentation de la durée de vie

de l'outil de coupe et le bon fonctionnement des machines-outils. Il est établi que la variation des paramètres de coupe participe à perturber ce critère.

D'autre part, le mécanisme d'entraînement, qui se compose des moteurs, des vis à billes et d'une table, produit un grand problème de pics d'inversion quand la direction de mouvement des axes est renversée pendant un mouvement circulaire [25]. Ce problème de pics d'inversion est la cause principale de l'exactitude insatisfaisante de mouvement circulaire tel qu'illustré à la Figure 1.4.

Plusieurs études ont été effectuées pour éliminer les problèmes de pics d'inversion. Tung et al. [24] ont étudié le processus qui produit le problème de pics d'inversion et ont proposé un compensateur de frottement en fonction de la vitesse angulaire et du couple. Ils ont également proposé un compensateur de frottement basé sur le modèle de frottement. ont proposé un compensateur de frottement basé sur un modèle non linéaire de ressort.

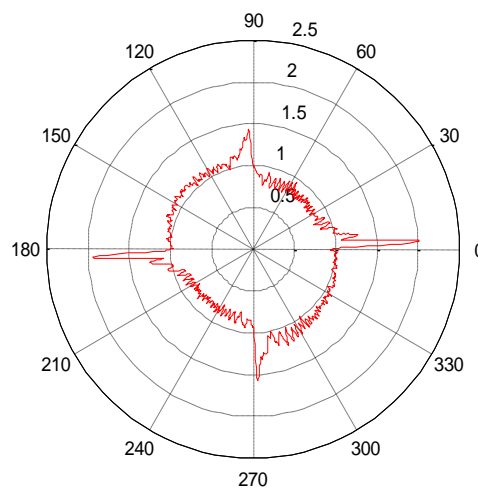


Figure 1.4 : Pics d'inversion avec une échelle $25\mu\text{m}$ [25].

En outre, Suzuki et al. [7] ont proposé un compensateur de frottement qui inclut un modèle dynamique. Sur la base des tests effectués sur un centre d'usinage vertical à grande vitesse, ils ont montré que les pics d'inversion dépendent de l'accélération centrifuge et non pas de la vitesse d'avance. Après avoir mesuré le courant de moteur durant le changement de direction de l'axe de la machine-outil, ils ont observé que le courant moteur change lentement lorsque l'accélération centrifuge est petite. D'autre part, le courant du moteur change rapidement avec des dépassements lorsque l'accélération centrifuge est large. Comme conclusion, ils ont expliqué ce phénomène par la considération que le frottement change rapidement lorsque l'accélération centrifuge est grande. Par conséquent, le contrôleur ne peut pas suivre ce

changement, alors de larges pics d'inversion apparaissent sur le trajet circulaire mesuré. Ils ont suggéré un modèle basé sur l'accélération centrifuge.

Toutes ces études ont réalisé des mouvements circulaires avec des rayons relativement grands de 30 à 100 millimètres et leurs études ont été effectuées sur l'hypothèse que la vitesse devient nulle et les axes arrêtent quand la direction de mouvement change. Cependant, des mouvements de contournage de précision élevée, y compris de petits arcs circulaires, sont généralement exigés dans l'usinage des moules et des pièces aérospatiales. D'après Sato [6], il est important d'étudier les problèmes de pics d'inversion comme un problème dynamique qui dépend de l'accélération, puisque l'accélération centripète devient plus haute plus le rayon du mouvement circulaire est petit.

1.3 Utilisation de l'aluminium : Alliages légers : Al 6061

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.

Les alliages légers à base d'aluminium ont une faible masse volumique. À des basses températures, leur résistance mécanique augmente sans qu'il y ait une diminution de leur ductilité. La formation d'une mince couche d'oxyde invisible à la surface du matériau lui donne une excellente résistance à la corrosion atmosphérique.

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.

La série 6000 des alliages d'aluminium est un groupe d'alliages ayant des propriétés mécaniques moyennes par rapport aux autres alliages d'aluminium à durcissement structural. Ils possèdent une bonne soudabilité et une excellente aptitude à la mise en forme à chaud. La lettre T suivie du chiffre 6 indique le type de traitement thermique. Dans ce cas, le traitement thermique est composé de trois étapes : il y a mise en solution, trempe et un vieillissement accéléré du matériau. Ce traitement thermique est surtout intéressant pour les matériaux qui ne sont pas travaillés à froid suite au traitement thermique.

1.4 Introduction à la mise en forme par fraisage

L'opération de fraisage est un procédé d'enlèvement de matière sous forme de copeaux par l'intermédiaire d'un outil coupant. L'opération de coupe résulte de la combinaison de deux mouvements. Le mouvement de coupe est le mouvement de rotation donné à la fraise. Le(s) mouvement(s) d'avance est (sont) le(s) déplacement(s) donné(s) à la pièce et/ou à la fraise. Trois types d'opération de fraisage peuvent être définis indépendamment de l'outil choisi. Chacune des catégories se différencie en considérant différentes directions d'avance par rapport à l'axe de rotation de l'outil.

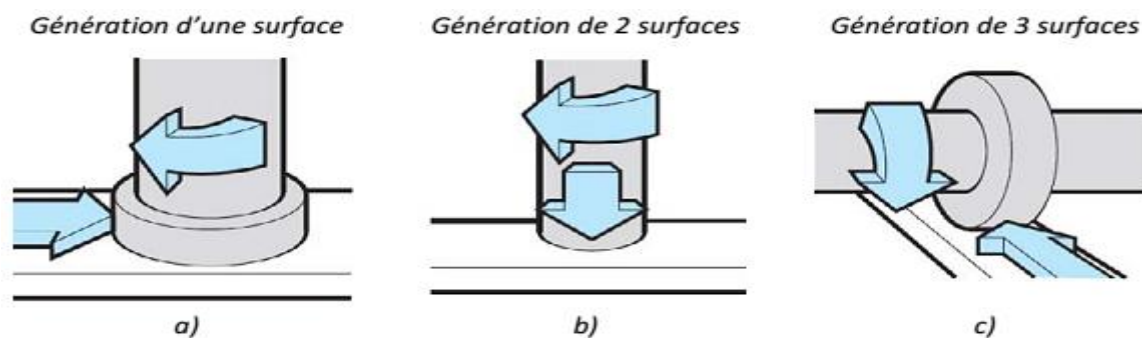


Figure 1.5 : type de fraisage[22].

Le premier type d'opération est le surfaçage (Figure 1.5-a). Dans ce cas, la fraise tourne perpendiculairement à la direction de l'avance radiale. L'ensemble des arêtes de coupe (latérales et frontales) peut être utilisé.

Le fraisage 3 tailles (Figure 1.5-c) est défini lorsqu'un outil tourne autour d'un axe parallèle à l'avance tangentielle. L'opération de coupe est réalisée avec les arêtes de coupe périphériques de l'outil. Enfin une dernière catégorie est définie par des usinages où l'axe de rotation de la fraise et la direction d'avance sont parallèles (Figure 1.5-b). L'usinage est axial et similaire à une opération de perçage. Cette catégorie comprend également les opérations de tréflage. Ce sont principalement les arêtes de coupe centrales de l'outil qui sont sollicitées. D'autre part, les paramètres de coupe sont des grandeurs primordiales lors de l'usinage. Ces paramètres conditionnent les phénomènes physiques rencontrés lors de la coupe. Leur choix est directement lié à l'intégrité de l'outil et à la qualité géométrique de la surface usinée tout en assurant une production optimale à moindre coût. La vitesse de coupe (Figure 1.6) notée V_c est directement liée au mouvement de coupe. Cette vitesse est un paramètre fondamental pour la formation du copeau. Elle dépend de la configuration d'usinage, du procédé et du couple outil/matière. La définition de la vitesse de coupe est très importante car elle détermine la fréquence de rotation de la pièce.

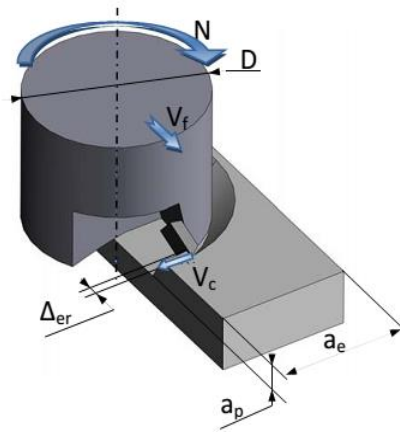


Figure 1.6 : Opération de fraisage[22].

L'avance instantanée radiale Δ_{er} (Figure 1.6) varie de 0 à l'avance par dent, f . Ce paramètre correspond à la différence de déplacement radial de l'outil entre le passage pour une même position angulaire de deux arêtes de coupe successives. La vitesse d'avance est la vitesse de déplacement de l'outil. Cette vitesse dépend de l'avance par dent f , du nombre de dent Z et de la fréquence de rotation.

La profondeur de passe a_p est la profondeur axiale engagée dans la matière (Figure 1.6). La profondeur de passe associée à l'avance influence la formation du copeau car elle modifie la section du copeau et donc l'énergie nécessaire au cisaillement de la matière. L'engagement latéral (Figure 1.7) noté a_e correspond à la profondeur de coupe latérale.

1.4.1 Mouvements générateurs de la coupe

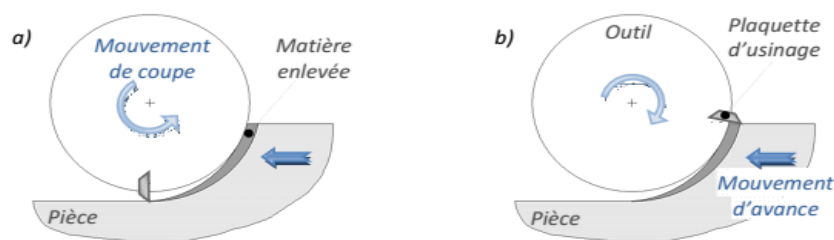


Figure 1.7: Configurations d'usinage en fraisage de profil[22].

La fraise est animée d'un mouvement de rotation tandis que la pièce (ou l'outil) se déplace. Deux configurations peuvent être mises en évidence en fonction du sens de rotation de l'outil et de la direction d'avance. La configuration retenue joue un rôle fondamental et affecte le processus de fraisage sous divers aspects. En fraisage en opposition ou conventionnel (Figure 1.7), la direction d'avance de la pièce est opposée au sens de rotation de la fraise dans la zone de coupe. L'épaisseur des copeaux est nulle au début de la coupe et augmente jusqu'à la fin

de la passe jusqu'à l'avance par dent programmée f . Dans le cas du fraisage en avalant ou en concordance (Figure 1.7-b), la direction d'avance et le sens de rotation de la fraise sont en concordance dans la zone de coupe. L'épaisseur du copeau va donc être égale à l'avance par dent programmée f au début de l'usinage et diminue jusqu'à zéro en fin de passe. Contrairement à la configuration précédente, les forces de coupe tendent à plaquer la pièce contre les appuis du montage d'usinage dans le cas du fraisage de profil. Le fraisage en avalant est donc à préférer chaque fois que la machine, le système de fixation de l'outil et la pièce le permettent. Le fraisage en avalant impose cependant quelques contraintes. La machine ne doit présenter aucun jeu au niveau du système d'avance de la table. De plus, une augmentation non contrôlée de l'avance peut être constatée si l'outil est entraîné vers l'intérieur de la pièce. Cela peut conduire à une épaisseur du copeau excessive voire à une rupture d'arête. Dans ce cas et lorsque de fortes variations de la surépaisseur d'usinage existent, le fraisage conventionnel devra être choisi. La pièce devra être correctement bridée dans un montage adapté à la pièce.

1.4.2 Les avantages du fraisage

Un rendement élevé, un bon fini de surface et haute précision, ainsi qu'une grande souplesse au niveau de la génération de différentes formes. Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des gorges mais son efficacité en contourne va croissante grâce à l'utilisation des techniques CNC (computer numerical controlled)

1.4.3 Classification et présentation des outils de fraisage

Nous avons classé les fraises suivant la famille (fraise cylindrique ou fraise de forme) et le type (monobloc ou porte plaquettes) (figure 1.8). Cette classification n'intègre pas la géométrie de coupe (angle de coupe, préparation d'arête).

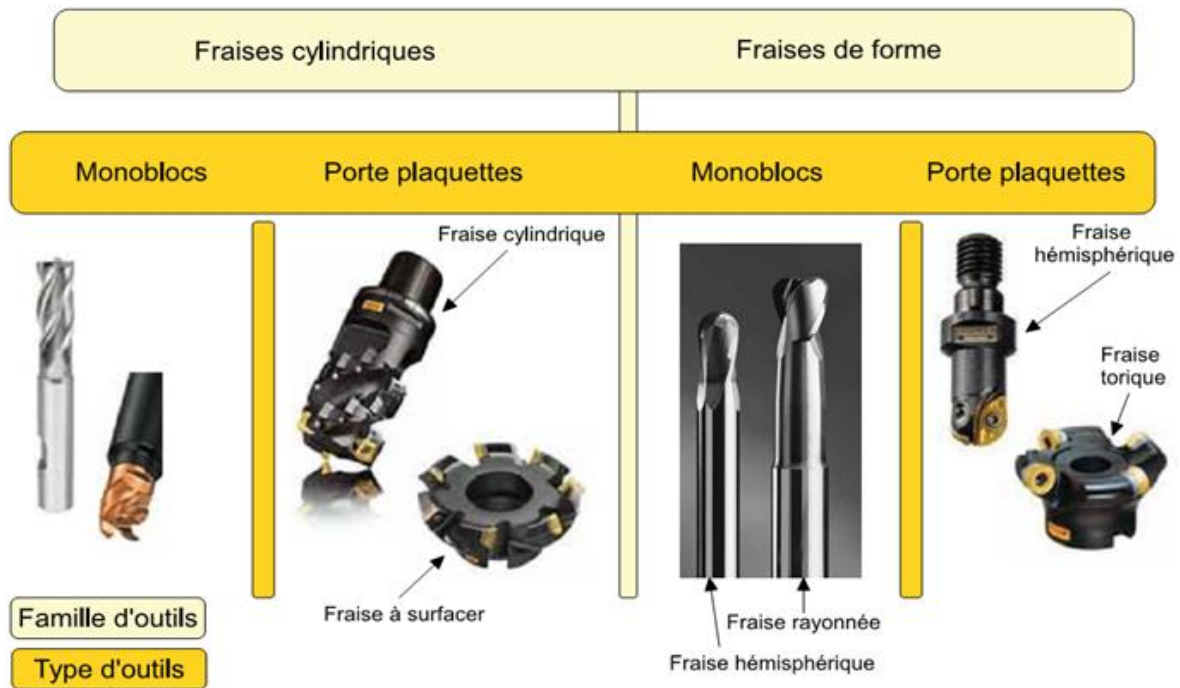


Figure 1.8 : familles et types d'outil possibles[21].

Au niveau de l'état de l'art, nous avons fait le choix de classer les outils en plusieurs familles :

1. les outils monobloc (arête continue).
2. les outils cylindriques à plaquettes rapportées.
3. les outils hémisphériques à plaquettes rapportées.

Cette classification est liée à la méthode d'obtention des efforts de coupe. Pour les outils monobloc, l'effort de coupe est toujours obtenu en intégrant des efforts élémentaires issus d'éléments discrétisés de hauteur dz . La seule différence entre les outils cylindriques et les outils de forme est l'évolution de l'élément discrétisé. Pour les outils monobloc, les efforts de coupe sont la somme des efforts élémentaires. Pour les outils cylindriques à plaquettes rapportées, les efforts de coupe sont définis comme étant la somme des efforts appliqués sur chaque plaquette à une position angulaire donnée. Pour les outils de forme à plaquettes rapportées, la définition de l'effort de coupe est un compromis entre les deux précédentes familles. L'arête de chaque plaquette est discrétisée en différents éléments de hauteur dz . L'effort de coupe est alors la somme des efforts de chaque plaquette en contact avec la matière.

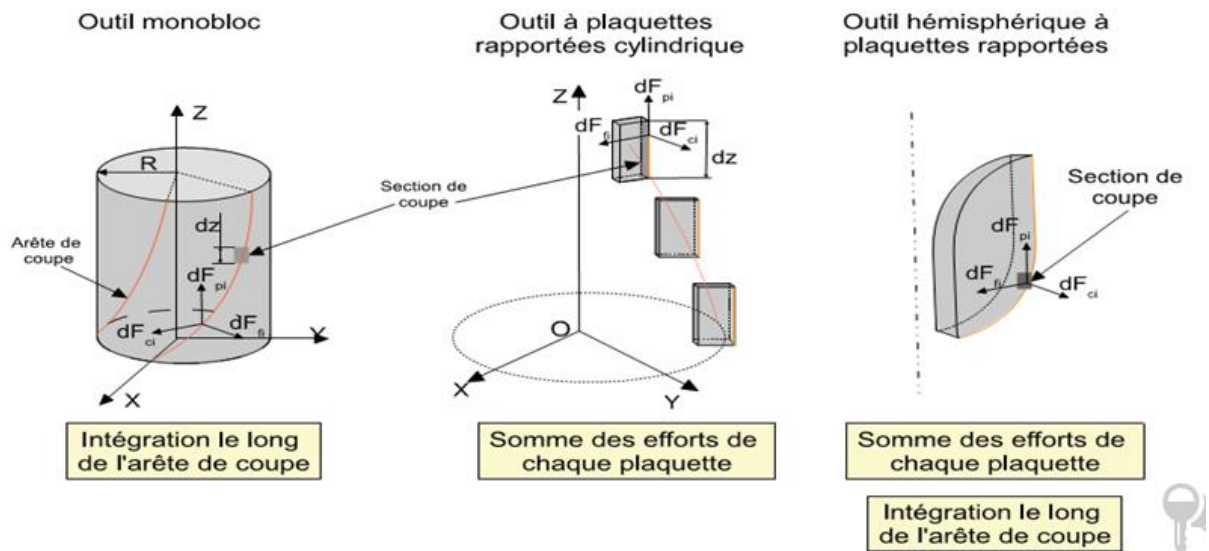


Figure 1.9 : classification des outils[21].

Il existe une différence fondamentale entre les outils monobloc et les outils à plaquettes rapportées. La géométrie de coupe d'un outil à plaquettes rapportées résulte toujours de l'assemblage de différents éléments où nous pouvons identifier plusieurs sources d'erreurs ou de dispersions. En ce qui concerne les outils monobloc, ils sont souvent réalisés à partir d'un barreau et aucun assemblage n'est nécessaire à son obtention limitant ainsi les sources de dispersions.

1.5 Modélisation des efforts de coupe en fraisage

L'approche mécanistique est basée sur le produit de la section et du coefficient de coupe, il est alors possible de définir les efforts sous la forme suivante [7]

$$F_c = K_{cc} \cdot bh + K_{ce} \cdot b$$

$$F_f = K_{fc} \cdot bh + K_{fe} \cdot b$$

$$F_p = K_{pc} \cdot bh + K_{pe} \cdot b$$

avec :

$$K_{cc} = \frac{\tau_s (\cos(\theta_n) + \tan(\theta_i) \tan(\lambda_s))}{[\cos(\theta_n + \phi_n) \cos(\phi_i) + \tan(\theta_i) \sin(\phi_i)] \sin(\phi_n)}$$

$$K_{fc} = \frac{\tau_s \sin(\theta_n)}{[\cos(\theta_n + \phi_n) \cos(\phi_i) + \tan(\theta_i) \sin(\phi_i)] \sin(\phi_n) \cos(\lambda_s)}$$

$$K_{pc} = \frac{\tau_s (\tan(\theta_i) + \cos(\theta_n) \tan(\lambda_s))}{[\cos(\theta_n + \phi_n) \cos(\phi_i) + \tan(\theta_i) \sin(\phi_i)] \sin(\phi_n)}$$

K_{cc} , K_{fc} et K_{pc} sont des coefficients spécifiques de coupe. Les coefficients K_{ce} , K_{fe} et K_{pe} sont des coefficients linéiques et représentent les actions mécaniques autres que le cisaillement. Ils sont définis expérimentalement pour une avance nulle. Il est également

envisageable de définir l'ensemble des coefficients par des modélisations d'effort de coupe réduisant ainsi considérablement l'étude expérimentale.

[7] a défini une méthode permettant d'exprimer des coefficients issus de la coupe orthogonale dans les plans de la coupe oblique. Ses travaux reposent sur la théorie unifiée d'Armarego [8]. Il identifie dans un premier temps l'angle de cisaillement φ , l'angle de frottement moyen λ et la contrainte de cisaillement τ_s à partir d'essais de coupe orthogonale.

Il émet ensuite certaines hypothèses telles que :

- l'angle de cisaillement normal (φ_n) est égal à l'angle de cisaillement (φ),
 - les angles α et α_n sont confondus
 - l'angle d'écoulement du copeau (η_c) est égal à l'angle d'inclinaison d'arête (λ_s).
- L'avantage de la méthode mécanistique réside dans sa simplicité d'utilisation. Elle ne permet cependant pas de comprendre le processus de coupe. Pour une grande précision de détermination des coefficients, il est alors primordial de multiplier le nombre d'essais. Dans le cadre du fraisage où l'engagement varie constamment, il est nécessaire de tester l'ensemble des conditions d'engagement pour garantir un modèle fiable.

1.5.1 Fraises monoblocs cylindriques

Pour les fraises cylindriques monoblocs, la méthode d'obtention des efforts de coupe consiste à :

- discrétiser l'arête de coupe suivant son axe en différents éléments de hauteur dz (figure 1.9)

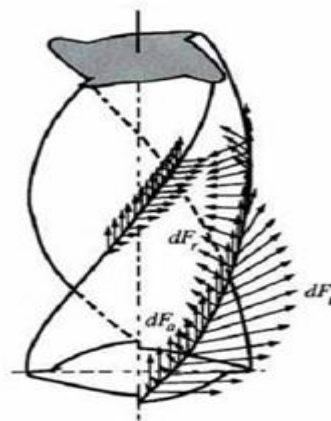


Figure 1.9 : discrétisation de l'outil suivant son axe[21].

- calculer les efforts de chaque élément en prise avec la matière, ce calcul est effectué à partir de la définition géométrique de la fraise et de la matière enlevée précédemment

$$dF_c = K_c h dz$$

$$dF_f = K_f h dz$$

– exprimer ces efforts dans un repère lié à l’outil

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\phi_f) & -\sin(\phi_f) & 0 \\ \sin(\phi_f) & -\cos(\phi_f) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_c \\ dF_f \\ dF_p \end{bmatrix}$$

Liu [9] a présenté un modèle géométrique d’une fraise (figure 1.10). L’angle β représente l’angle d’hélice et R_f est le rayon d’outil. L’arête de coupe est décomposée en arêtes élémentaires de hauteur dz (figure 1.9). Chaque arête est définie dans un repère fixe (X, Y, Z) lié à l’outil et chaque dent est repérée angulairement. La dent i est définie par sa position angulaire ϕ_i dépendant de la position angulaire de l’outil. [10] a également développé une modélisation générique de toutes les formes d’outils. L’intérêt de sa méthode est la paramétrisation totale des outils monoblocs. Une seule modélisation est alors utilisée pour décrire toutes les géométries d’outil (torique, cylindrique, hémisphérique).

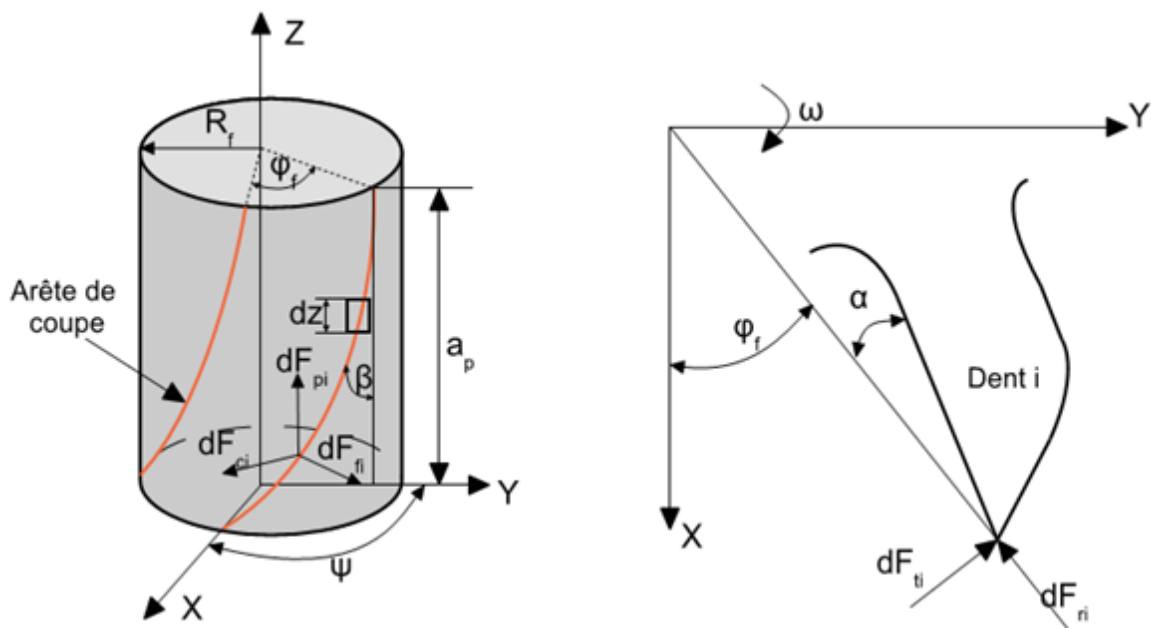


Figure 1. 10 : géométrie de la fraise cylindrique[21].

1.6 L'analyse modale expérimentale en fraisage

L'analyse modale expérimentale est la caractérisation d'une structure mécanique, soit une MOCN dans notre cas, à travers la détermination de ses modes fréquentiels. Chaque mode possède une fréquence à laquelle il peut être excité, une rigidité et un amortissement. À partir de cette caractérisation, il est possible de simuler la vibration d'outil, les lobes de stabilité, etc. En premier lieu, une synthèse des notions des vibrations libres, forcées et autoentretenues sera effectuée. À partir de cette synthèse, les causes du broutement et l'explication de ce phénomène seront ensuite présentés. Pour conclure, les concepts pour la mesure expérimentale de la fonction de transfert d'une MOCN et la détermination de lobes de stabilité seront résumés.

1.7 Les vibrations d'usinage

On a trois types de vibrations sont

1.7.1 vibrations libres : Il s'agit de vibrations d'une structure (outil, broche, pièce) en réponse à un choc ou un lâcher. Ce type de vibrations n'intervient généralement pas pendant l'usinage. Elles sont par contre mises à profit lors des sonnages, afin de déterminer les caractéristiques dynamiques de la structure.

1.7.2 vibrations forcées : qui apparaissent en réponse à un chargement cyclique. Elles sont très présentes en coupe interrompue. En tournage continu où le chargement nominal est constant, elles peuvent être induites par un défaut d'excentricité de la pièce lors de son montage, ou par une pièce ébauchée en « patatoïde ». En fraisage, elles sont plus inhérentes à l'opération, puisque par définition l'effort de fraisage est cyclique à la fréquence de dent. En plus de l'état de surface qui est dégradé, ces vibrations induisent des défauts d'ordre géométrique sur les pièces.

1.7.3 vibrations auto-entretenues : Elles sont également connues sous le nom de « **broutement** » ou de « **chatter** » en anglais. Celles-ci interviennent suite à une perturbation du système, qui peut parfois s'auto-entretenir et mener à des amplitudes importantes. À la différence des vibrations forcées, la structure vibre à des fréquences distinctes de la fréquence de dent en fraisage ou de broche en tournage. Lorsqu'elles surviennent, ces vibrations affectent la rugosité des pièces, induisent des chocs sur les arêtes de coupe et les broches. Pour toutes ces raisons, elles sont fortement redoutées des industriels. Il y a déjà plus d'un siècle, le broutement était présenté par Taylor comme le problème le plus obscur et délicat

auquel est confronté l'usineur. Les instigateurs des travaux publiés se sont d'abord intéressés aux origines du phénomène. Deux d'entre elles sont relatées ci-après.

Le phénomène de broutement régénératif, cause jugée principale actuellement, a été clairement explicité par TOBIAS. En cause, la variation de la section de copeau, issue du passage d'une dent sur la trace laissée par la dent précédente en fraisage (ou au tour précédent en tournage), et qui comporte déjà une ondulation. Cette variation de la section de copeau induit des fluctuations de l'effort de coupe, qui peuvent parfois fortement s'accroître. Cette notion a été communément admise par les membres de la communauté. Elle a été depuis reprise et illustrée dans de nombreux travaux. Parmi d'autres phénomènes inhérents à l'usinage par outil coupant, le couplage des modes a été incriminé. Dans cette configuration la vibration de l'outil selon deux modes orthogonaux lui confère un parcours elliptique. En conséquence, une variation de la section coupée en résulte, ce qui peut être un élément déclencheur de broutement. Historiquement, la dépendance de l'amortissement avec la vitesse avait été la première origine suspectée du broutement, mais son importance s'est révélée mineure par la suite. Suite aux premières explications ainsi avancées, de nombreux travaux ont été menés dans l'objectif de s'affranchir des vibrations. Une majorité d'approches abordent le problème par la modélisation, alors que d'autres impliquent une dominante expérimentale.

1.8 Diagramme de lobes de stabilité

La limite entre une coupe stable (sans broutage) et une coupe instable (avec broutage) peut être visualisée en termes de profondeur axiale de coupe, en fonction de la vitesse de rotation de la broche. Il s'agit du diagramme des lobes de stabilité ou DLS (voir figure 11). Ce type de diagramme peut être utilisé pour trouver la combinaison spécifique des paramètres d'usinage, entraînant un taux maximum d'enlèvement de matière [11]. L'idée consiste à chercher dans le diagramme les zones stables, tirant parti de l'effet des lobes (lobbing effect), tel qu'indiqué dans la figure 1.10. Nous recherchons la meilleure option selon les critères sélectionnés, comme le temps, le coût, les avantages et la précision. A des vitesses de rotation élevées, l'effet stabilisateur du processus d'amortissement diminue, rendant le système plus sujet au broutage, mais cela n'est pas évident car les lobes s'écartent en fournissant des zones stables plus larges. Le processus d'amortissement (process damping) a lieu généralement à de faibles vitesses de rotation. Il assure la stabilité en raison des courtes ondulations laissées sur la surface par les vibrations à haute fréquence. Ces ondulations interfèrent avec la face en dépouille de l'outil et amortissent les vibrations de l'outil.

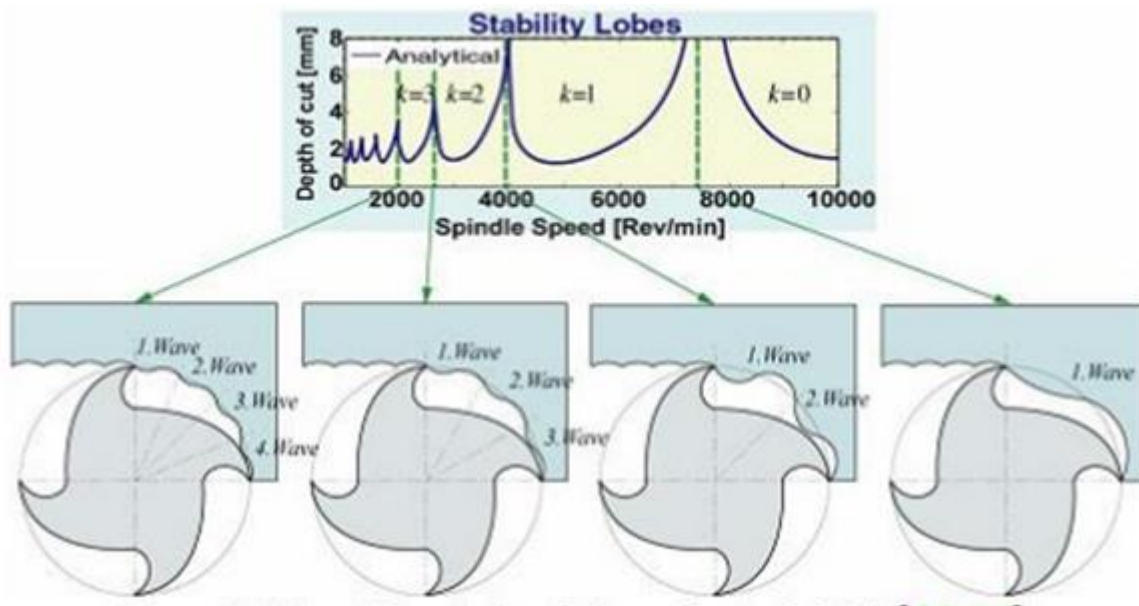


Figure 1.11 : trace des lobes de stabilité.

La construction du diagramme des lobes de stabilité nécessite des informations préalables sur, par exemple, la fonction de transfert du système "outil de coupe, porte-outil et machine-outil". Les coefficients de coupe dépendent du matériau utilisé. Cependant, la modélisation du processus d'identification du diagramme de lobes de stabilité n'est pas une tâche facile, à cause du nombre élevé de degrés de liberté de la structure, des multiples dents de coupe, de la force de coupe variable et de la direction du copeau. Ces paramètres compliquent l'analyse et les calculs. Une fois que la fonction de transfert de la machine-outil a été identifiée, le diagramme des lobes de stabilité peut être calculé pour des données spécifiques (outil de coupe, type de matériau, profondeur axiale et radiale). Par la suite, l'opérateur peut choisir des combinaisons de profondeur de coupe et de vitesse de rotation de la broche qui assurent un fonctionnement sans broutage.

1.9 Systèmes d'entraînement des MOCN

Les systèmes d'entraînement à moteurs linéaires sont plus performants que ceux à vis à billes durant une interpolation circulaire, il est important de connaître les différences fondamentales entre ceux-ci. Il existe deux types de systèmes d'entraînement pour les axes des MOCN : les vis à billes et les moteurs linéaires. Premièrement, un survol des composants typiques d'une MOCN sera effectué suivi d'une synthèse du principe de fonctionnement des contrôleurs CCN, des composants d'un système d'entraînement par vis à billes et des composants d'un système d'entraînement à moteurs linéaires. L'objectif de cette section est

d'avoir une vision d'ensemble globale de chacun des systèmes d'entraînement et une compréhension générale de leur fonctionnement pour être mesure de comprendre les principales différences entre ceux-ci.

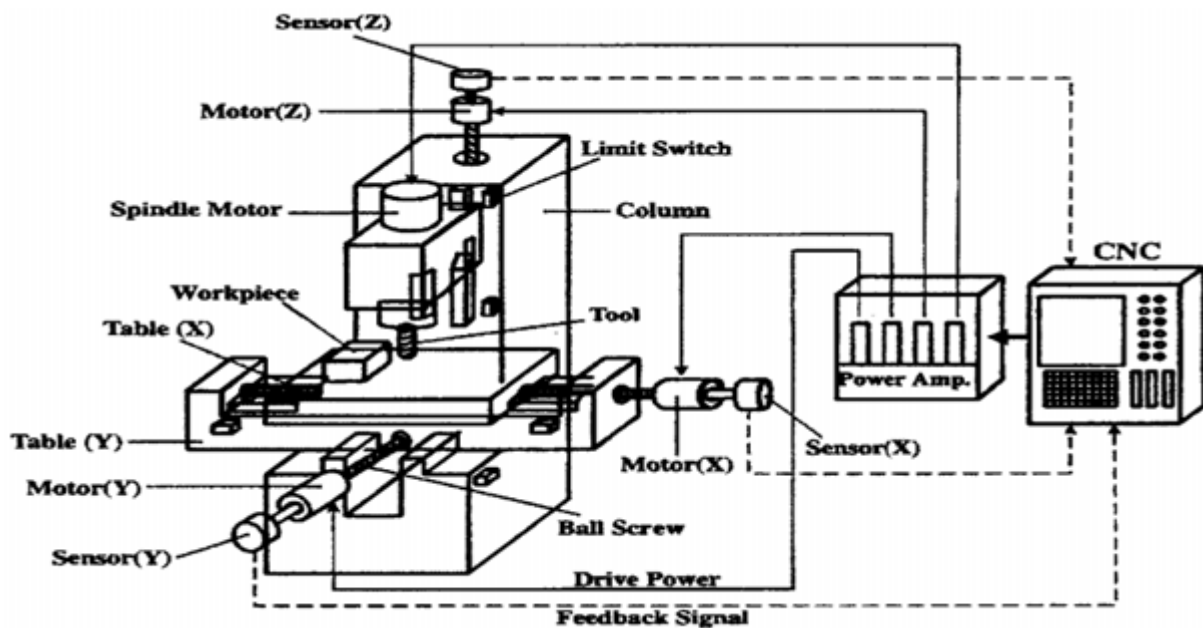


Figure 1. 12 :exemple de mocn verticale trois axes[24].

La Figure 1.12 illustre un schéma d'une MOCN verticale à trois axes avec système d'entraînement par vis à billes. Certains des composants sont standards sans égard au système d'entraînement : le contrôleur (*CNC*), le moteur de la broche (*spindle motor*), le bâtis de la MOCN (*column*) et un moteur associé à chaque axe. Une MOCN peut aussi posséder un ou des axes rotatif(s) qui sont généralement montés sur la table.

1.9.1 Le contrôleur à commande numérique CNC

Chaque axe d'une MOCN possède un moteur (Figure 1.12) et il y a trois boucles d'asservissement au niveau du CCN: une de position, une de vitesse et une de courant. La Figure 1.13 illustre une vulgarisation du système de servocommande dans le but de comprendre son principe de fonctionnement. Le système de servocommande est le système d'asservissement pour le mouvement d'un axe de la MOCN. Le point 1 indique l'entrée du code G fourni au contrôleur par l'utilisateur. Le générateur de commande transforme ce code G en pulsations qui correspondent aux pulsations devant être générées par le moteur (point 2). La position actuelle du moteur (en pulsations) lue par l'encodeur (point 6) est soustraite au signal du point 2. Cette différence correspond à l'erreur de position servo et est le signal d'entrée du contrôleur de position. Le signal de sortie de ce contrôleur est une vitesse à

laquelle est soustraite la vitesse actuelle lue par le tachymètre. Cette différence est l'entrée du contrôleur de vitesse. Le courant est contrôlé pour permettre de faire tourner le moteur à la vitesse requise.

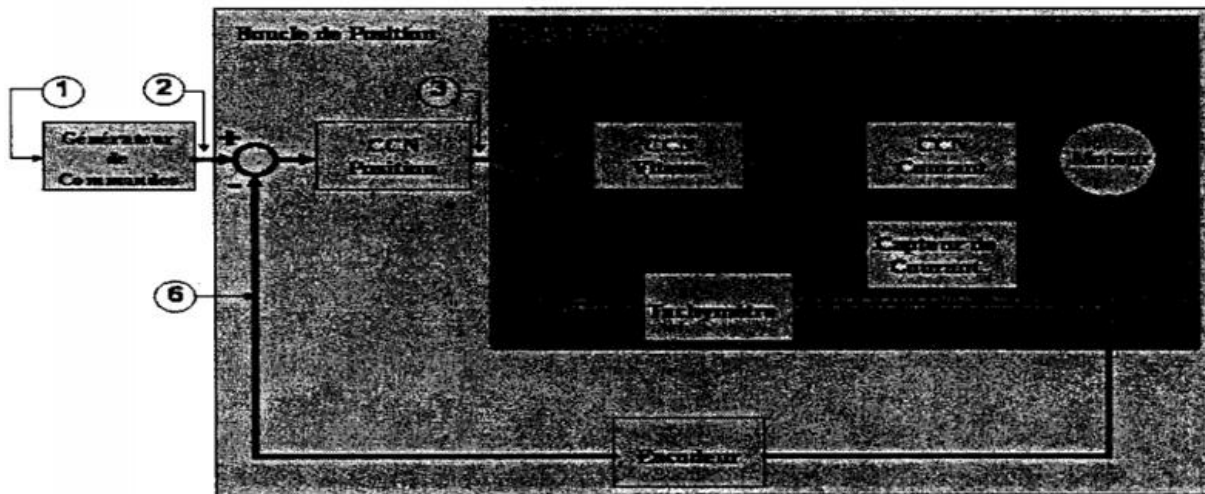


Figure 1.13: modèle de la structure du CNC[24].

1.9.2 Les systèmes d'entraînement par vis à billes

Les systèmes d'entraînement par vis à billes sont les plus communs pour les MOCN. Il s'agit d'un servomoteur qui transmet un mouvement rotatif à la vis mère (*leadscrew*) par l'intermédiaire du réducteur à engrenages comme illustré à la Figure 1.13. La rotation de la vis mère engendre une rotation de l'écrou (*nut*) et ce mouvement résulte en un mouvement de translation de la table. Il est à noter que les forces exercées par le système comme les forces de coupe, le poids de la table, les forces de friction provenant des systèmes de guidage, etc., ne sont pas transmises directement au servomoteur mais plutôt en tant que couple.

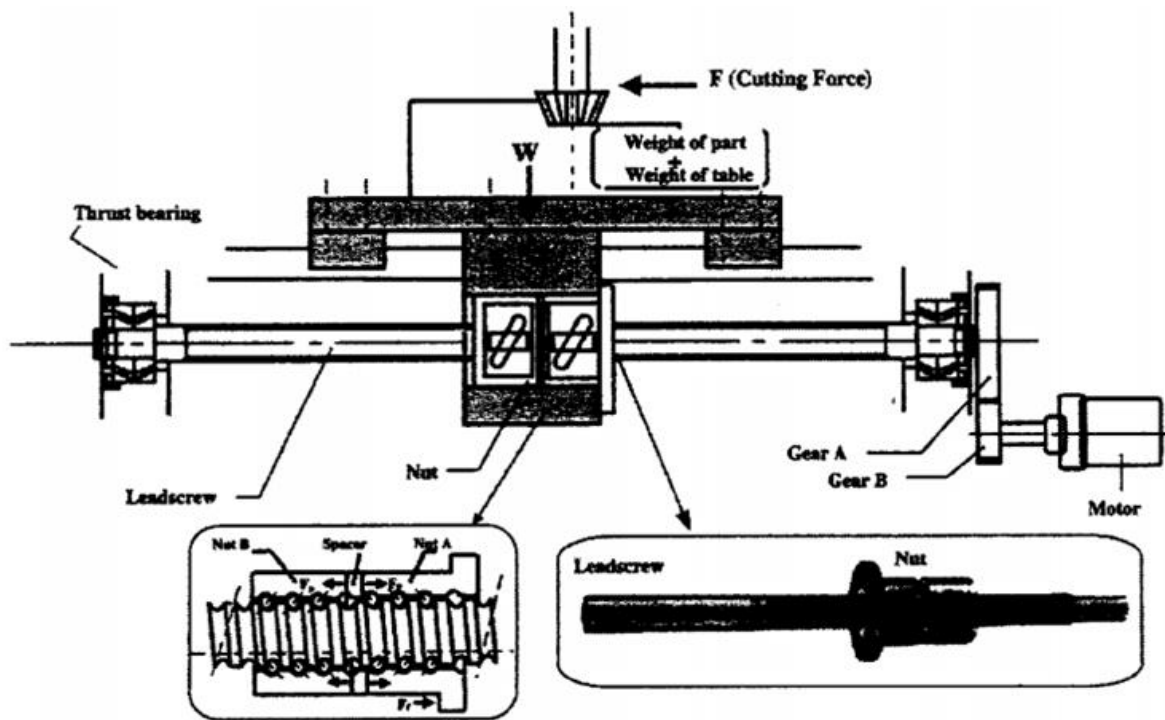


Figure 1.14 : modèle de système d'entraînement par vis à billes[24].

Le signal de retour de la boucle d'asservissement du contrôleur de position (Figure 1.13) est la position lue par l'encodeur. Pour les systèmes d'entraînement par vis à billes, c'est la lecture de l'encodeur rotatif positionné directement sur l'arbre du servomoteur qui est généralement utilisé comme signal de retour pour la boucle d'asservissement de position du contrôleur CNC. Cela signifie que le CNC n'effectue pas de correction sur l'erreur de position du système mécanique de la MOCN car elle n'en est pas tenue compte dans la boucle d'asservissement de position. Des encodeurs linéaires externes situés au niveau de la table peuvent être utilisés pour avoir une correction du mouvement des composants mécaniques.

1.9.3 Les systèmes d'entraînement à moteurs linéaires

Le principe des moteurs linéaires est simple. Il s'agit de prendre un servomoteur rotatif typique et de le dérouler. Le rotor devient donc un rail de guidage magnétique et le stator, une plaque magnétique. La table est directement montée sur le moteur : son poids agit donc directement sur le moteur comme force et non en tant que couple. Il n'y a donc aucun système de transmission de mouvement rotatif à mouvement linéaire et le mouvement résulte d'un champ magnétique. Comme le mouvement résulte d'un champ magnétique, il n'y a pas de contact entre les composants en mouvement du système d'entraînement. Ainsi, il n'y a pas de forces de friction générées entre ces composants. En analysant le modèle de moteur linéaire fourni par Fanuc [12], ces principaux composants

sont les suivants : un rail de guidage magnétique, une plaque magnétique et un encodeur linéaire. La Figure 1.15a illustre l'assemblage entre la table mobile et le rail de guidage magnétique, la Figure 1.15b illustre l'assemblage précédent assemblé à la fondation de la MOCN à laquelle est aussi assemblée la plaque magnétique. Finalement, la Figure 1.14c montre l'allure générale d'un moteur linéaire Fanuc. Il y a un espace d'air entre la plaque magnétique et le rail de guidage magnétique qui est spécifié par le fabricant du moteur. Une variation de cet espace engendre une variation de la force du moteur [12]. Il y a deux types d'encodeurs linéaires : l'encodeur absolu et l'encodeur incrémental. L'absolu est directement branché à l'amplificateur servo. L'encodeur incrémental est branché à l'amplificateur servo par l'intermédiaire d'un circuit de détection de position et doit être utilisé avec un capteur de pôles magnétiques. D'autres composants sont aussi utilisés comme des systèmes de refroidissement, des systèmes de freinage externes, des systèmes de câbles, etc.

Il y a une différence importante entre les systèmes d'entraînement par moteurs linéaires et ceux par vis à billes au niveau de la boucle d'asservissement du contrôleur de position (Figure 1.13). Bien que le signal de retour de la boucle d'asservissement de position correspond pour les deux systèmes d'entraînement à la position lue par l'encodeur, pour les moteurs linéaires, l'encodeur est directement placé sur le système d'entraînement et la position qu'il mesure inclut la structure mécanique. Il y a donc une correction de l'erreur de position du système mécanique effectuée par le contrôleur.

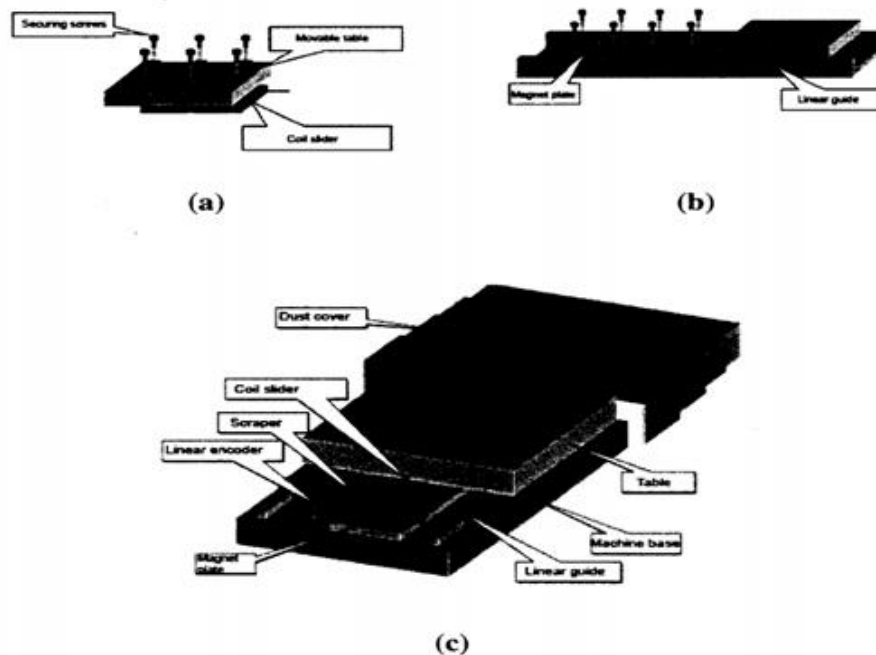


Figure 1.15 : modèle des systèmes d'entraînement à moteur linéaire[24].

1.10 Modélisation d'un profil interpolé sur deux axes

Le comportement cinématique d'une machine-outil lors du suivi d'un trajet dans le plan (XY), présenté sur la figure 1. 16, est déterminé à travers l'étude du comportement cinématique d'un mobile en mouvement possédant une vitesse, une accélération et un jerk contrôlé.

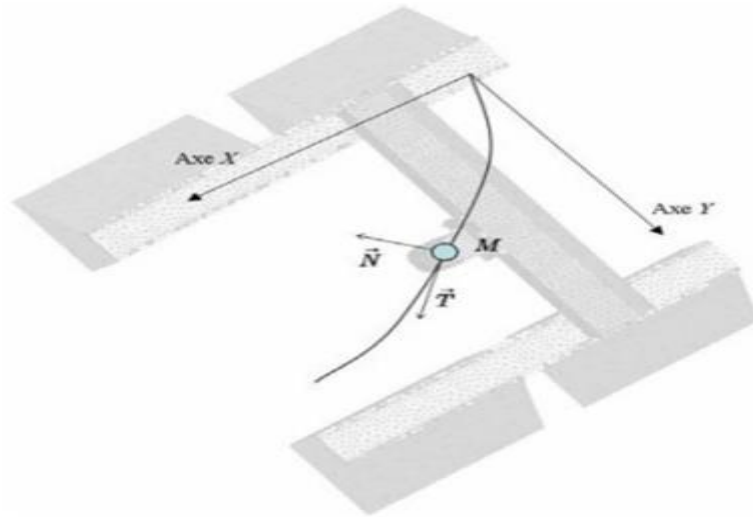


Figure 1.16 : paramétrage du suivi du profil dans le repère de Frenet[21].

1.10.1 Modélisation de la vitesse d'avance pour une interpolation linéaire

Dans le cas d'un trajet linéaire, les équations suivantes montrent que les valeurs normales d'accélération (centripètes) et de jerk sont

$$\vec{A} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{dV(t)}{dt} \cdot \vec{T} = A_t \cdot \vec{T}$$

$$\vec{J} = \frac{d\vec{A}}{dt} = \frac{d^2V(t)}{dt^2} \vec{T} = J_t \vec{T}$$

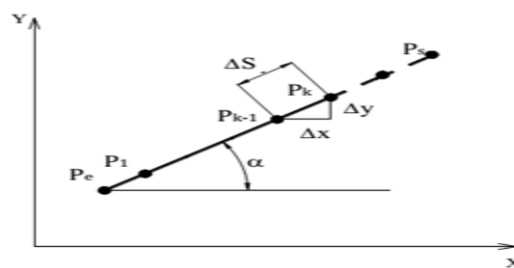


Figure 1.17 : interpolation linéaire[21].

En interpolation linéaire, l'outil se déplace d'un point à un autre en suivant un trajet linéaire (figure 1. 17). La trajectoire interpolée est divisée en petits segments, avec P_e le point de départ, P_s le point final et ΔS est donné par :

$$\Delta S = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

Pour des segments de faibles longueurs, la vitesse d'avance sera limitée par le directeur de commande numérique. Pour éviter ces ralentissements de vitesse, il faut que le calcul de la longueur de ces segments tienne compte du temps de cycle d'interpolation T_{cy}

$$\Delta S = V_m T_{cy}$$

La vitesse d'avance pour un axe est donnée par :

$$V_x = V_m \frac{\Delta X}{\Delta S} = V_m \cos \alpha$$

$$V_y = V_m \frac{\Delta Y}{\Delta S} = V_m \sin \alpha$$

α : est l'angle d'inclinaison de la droite par rapport à l'axe X dans le plan machine. La figure 1. 17 représente le cas du suivi d'une droite inclinée d'un angle $\alpha=25^\circ$ présenté dans, pour les paramètres cinématiques suivants : $V_m = 1,3 \text{ m/s}$, $A_m = 8 \text{ m/s}^2$, $J_m = 100 \text{ m/s}^3$.

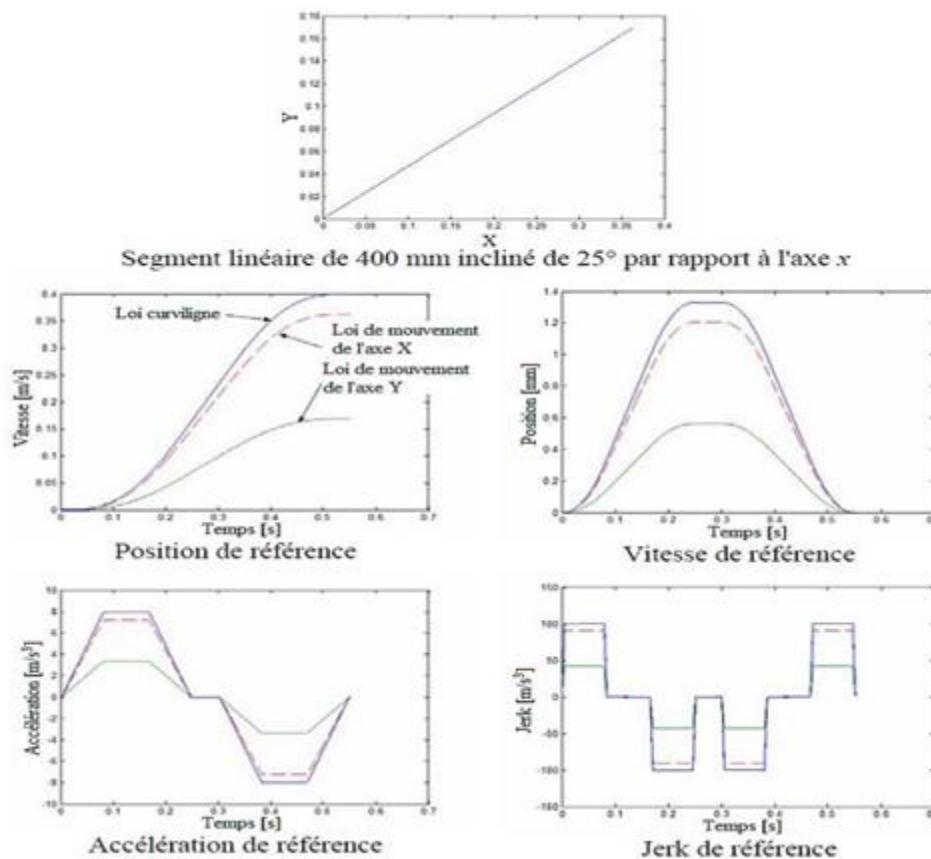


Figure 1.17 : comparaison entre la dynamique curviligne de référence et la loi de mouvement des axes pour un profil linéaire (loi à jerk limité)[21].

La figure 1.17 présente les enregistrements effectués sur la machine-outil étudiée. La vitesse d'avance, l'accélération tangentielle et le jerk au niveau des axes X, Y sont respectivement

$$V_X = V_m \cos \alpha = 1,17 \text{ m/s}, A_X = A_m \cos \alpha = 7,25 \text{ m/s}^2, J_X = J_m \cos \alpha = 90,6 \text{ m/s}^3$$

$$V_Y = V_m \sin \alpha = 0,54 \text{ m/s}, A_Y = A_m \sin \alpha = 3,38 \text{ m/s}^2, J_Y = J_m \sin \alpha = 42,26 \text{ m/s}^3$$

1.10.2 Modélisation de la vitesse d'avance sur une interpolation circulaire

Lors d'une interpolation circulaire de rayon (R), l'accélération est composée d'une accélération tangentielle dans la direction tangente à la trajectoire (t) et d'une accélération normale dans la direction normale à la trajectoire (n) (accélération centripète). Chaque composante est contrôlée respectivement par un jerk dit jerk tangentiel et jerk centripète. L'équation suivante montre que les composantes tangentielles et normales de l'accélération ne sont pas nulles.

$$\vec{a} = A_t \cdot \vec{T} + A_n \cdot \vec{N}$$

$$A_t = \frac{dV(t)}{dt}, A_n = \frac{V^2(t)}{R}$$

$$\vec{J} = J_t \cdot \vec{T} + J_n \cdot \vec{N}$$

$$J_t = \frac{d^2V(t)}{dt^2}, J_n = 2 \frac{V(t)}{R} \frac{dV(t)}{dt} - \frac{V^3(t)}{R^2} \frac{dR}{dt}$$

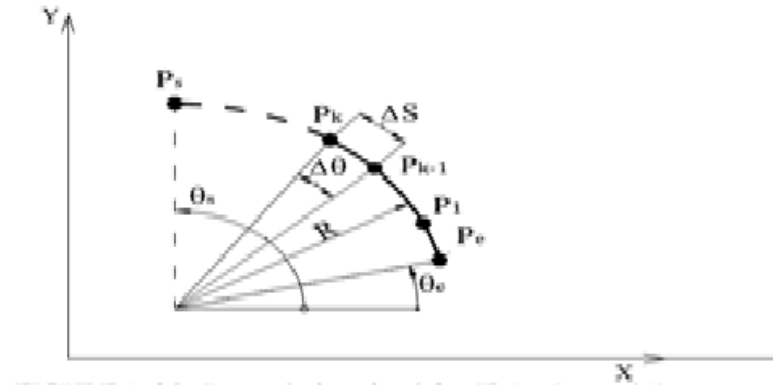


Figure1.20 : interpolation circulaire.

La trajectoire interpolée est divisée en petits arcs, avec P_e le point de départ, P_s le point final et ΔS est donné par :

$$\Delta S = R \Delta \theta$$

Pour des arcs de faibles valeurs, la vitesse d’avance sera limitée par le directeur de commande numérique. La distance de discrétisation ΔS est donnée par l’équation

$$\Delta S = R \Delta \theta = V_m T_{cy}$$

Pour une interpolation circulaire, en plus de la limitation due à la capacité de l’axe présentée dans l’équation, la vitesse d’avance est limitée aussi par l’accélération normale, le jerk tangentiel et la valeur de rayon d’interpolation.

$$V_m = \min \left(\frac{V_{Xmax}}{|\cos \theta_c|}, \frac{V_{Ymax}}{|\sin \theta_c|} \right); A_m = \min \left(\frac{A_{Xmax}}{|\cos \theta_c|}, \frac{A_{Ymax}}{|\sin \theta_c|} \right); J_m = \min \left(\frac{J_{Xmax}}{|\cos \theta_c|}, \frac{J_{Ymax}}{|\sin \theta_c|} \right)$$

Avec $\theta_c \in [\theta_e, \theta_s]$.

La vitesse d’avance correspondant à la limitation de l’accélération normale est donnée par [14]

$$V_{An} = \sqrt{R \times A_n}$$

La vitesse d’avance correspondant à la limitation du jerk tangentiel est donnée par [15]

$$V_{Jt} = \sqrt[3]{J_t \times R^2}$$

Nous pouvons conclure que la vitesse d'avance est liée à trois types de paramètres : les réglages et capacité du DCN, le programme CN et les capacités des axes. D'où la vitesse d'avance autorisée par le DCN ($V_{cir\ m}$) est donnée par :

$$V_{cir\ m} = \min(V_{fprog}; V_{Jt}; V_{An}; V_{tcy}; V_m)$$

1.11 Métrologie machine : Tests de circularité

La justesse de la position de la table d'une MOCN dépend de plusieurs erreurs. Les principales sources d'erreurs pour les MOCN sont : les erreurs géométriques des composants et des structures de la MOCN, les erreurs provenant de déformations thermiques, la friction dans les systèmes d'entraînement, la flexion et les vibrations générées par les forces de coupe, le système de contrôle servo ainsi que des vibrations aléatoires. Plusieurs techniques ont été élaborées pour quantifier et qualifier certaines de ces erreurs. Ces techniques peuvent être regroupées en deux catégories : les tests directs et les tests indirects. Les tests directs consistent à usiner une pièce et à la mesurer. Par contre, ces tests sont fortement influencés par les montages respectifs de la pièce et de l'outil ainsi que par les forces de coupe [16]. Les mesures obtenues de tests d'usinage sont affectées par les forces de coupe et par le fini de surface de la pièce usinée [17]. Les forces de coupe peuvent être minimisées en utilisant des petites profondeurs de coupe et un matériau comme l'aluminium pour lequel les forces de coupe sont petites. Des erreurs peuvent aussi provenir de la procédure de mesure de la pièce. La précision des mesures dépend de la précision des appareils de mesure. Les tests indirects consistent notamment en des mesures statiques au laser, des tests dynamiques de circularité à vide. Une multitude d'appareils existent pour effectuer des tests circulaires à vide (Figure 1.14). Le plus utilisé est la barre à bille. Contrairement aux tests directs, les tests indirects ne sont pas influencés par les forces de coupe. Il pourrait s'agir toutefois d'un inconvénient puisque les tests à vide ne sont pas totalement représentatifs de l'usinage.

Les tests de circularité permettent l'identification de divers types d'erreurs comme les erreurs géométriques, les erreurs servo, les erreurs d'équerrage ainsi que la circularité des MOCN. Selon Knapp [18], des tests circulaires pour lesquels le diamètre est inférieur à 50 mm minimisent les erreurs géométriques et permettent l'étude du comportement des systèmes de contrôle, des systèmes d'entraînement et de l'influence de la vitesse. À l'opposé, des diamètres supérieurs à 50 mm permettent une meilleure étude des erreurs géométriques. Les tests de circularité comportent certains inconvénients. Premièrement, les erreurs obtenues sont une combinaison d'une multitude d'erreurs et l'interpolation circulaire est la

combinaison du mouvement de deux axes. Une même trace d'erreurs peut provenir de différentes sources. Il est donc difficile de conclure sur l'origine des erreurs identifiées. Rahman [16] propose d'effectuer des mesures dans différents plans avec diverses avances et directions d'interpolation circulaires. Cela permet un meilleur diagnostic et une meilleure détermination de l'origine des erreurs.

Chapitre2 :

**MÉTHODOLOGIE
EXPÉRIMENTALE**

CHAPITRE 2. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale utilisée pour l'usinage des alésages de précision par fraisage circulaire.

2.1 Machine-outil à commande numérique CNC

Tous les essais illustres dans ce mémoire ont été réalisés à la société de maintenance des équipements industriels MEI sur une fraiseuse à commande numérique 5 axes « DMG ». Cette MOCN est conçue pour l'ébauche ainsi que la finition de pièce de haute précision en cinq axes. Elle possède une excellente rigidité permettant l'usinage avec des grandes profondeurs de coupe ainsi que des efforts de coupe importants. Elle est également conçue pour assurer une excellente précision géométrique et de positionnement ainsi qu'un contrôle de la vitesse et de la trajectoire pour le fraisage à hautes vitesses en contournage cinq axes. Cette MOCN possède un système d'entérinement à vis à bille sur les axes linéaire les principales caractéristique machine sont présent sur le tableau

le nom de la machine	DMF180
Axes linéaires	X Y Z
Axes Rotatifs 1	C table rotatif
Axes Rotatifs 2	A diviseur
Vitesse de Broche	20-18000 to /min
Avances rapides (axes X, Y)	20-2000mm/min
Avance rapide (axe Z)	20-2000mm/min
Avance d'usinage	200000mm/min
les dimensions de la table	X=1800 ; Y=700 ;Z=700 mm
la masse maximale permise pour la table	500kg pour la table circulaire
Le contrôleur de la MOCN	Siemens 840D
la longueur maximale permise pour les outils	300mm
la masse maximale permise pour le système outil / porte-outil	5Kg

Tableau 2.1 : caractéristique de MOCN.



Figure2.1 : Fraiseuse a 5 axe.

2.2 Pièce à usiner

La pièce à usiner pendant les expériences est un aluminium. Les dimensions des pièces à usiner constituent le volume de coupe et sont illustrées dans la figure 2.2

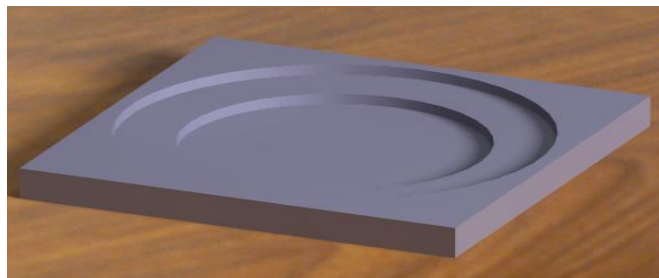


Figure2.2 : Pièce à usinée.

2.3 Outil de coupe

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.

L'outil de coupe utilisé pendant ces essais est un outil utilisé pour les usinages en fraisage des différentes pièces de type cylindrique monobloc comme illustré dans la figure 2.3

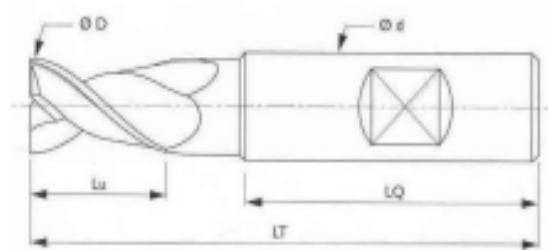


Figure 2.3 : Fraise cylindrique monobloc.

Les caractéristiques dimensionnelles de l'outil de coupe utilisé pendant les essais sont illustrés dans le tableau suivant

Nombre des dents	03
Longueur	144.209 et Ø25mm
Nombre de taille	2 taille
Angle de coupe	24°
Angle de dépouille	5°
Matériaux et revêtement	Carbure de nitrure d'aluminium et titane ((Ti ,Al)N)
Type de queue	Conique ou cylindrique

Tableau 2.2 : Caractéristiques dimensionnelles de l'outil de coupe

2.4 Choix des paramètres d'usage

Le choix des paramètres d'usage 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 circulaire, 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.

2.5 Etau de fraisage

Assurément la méthode de fixation la plus répandue par sa simplicité, sa rapidité d'opération et sa versatilité, l'étau de fraisage est principalement utilisé pour usiner des pièces comportant un seul posage, permettant d'éviter un repositionnement délicat et laborieux. Pour pouvoir atteindre toutes les faces de la pièce, il est toutefois nécessaire de disposer d'un axe rotatif sur la MOCN.

Selon la dimension relative de la pièce à usiner et de l'étau, il peut s'avérer essentiel de combiner plus d'un étau pour maintenir la pièce. Il est fortement déconseillé de laisser la pièce dépasser en porte-à-faux de l'étau, ceci pouvant provoquer des vibrations qui affecteront la qualité de la pièce. L'emprise de la pièce dans les mâchoires de l'étau doit assurer la stabilité de la pièce et garantir qu'elle restera immobile sous l'effet des efforts de coupe et des vibrations transmises.

2.6 Simulation graphique sur CATIA V5r20

Les simulations graphiques sont générées par le module d'usinage du logiciel de FAO de CATIA V5 R20, après introduction des paramètres de coupe de chaque essai, les codes machine sont par la suite générés dans un post processeur et finalement l'usinage sur la machine à commande numérique.

2.7 Système de mesure

L'instrument de mesure utilisé pour mesurer les alésages usinés est un bras Poly-articulé de l'entreprise FARO. Le FaroArm est une MMT (machine de mesure tridimensionnelle) portable qui permet aux fabricants de vérifier facilement la qualité des produits en réalisant des inspections 3D, des certifications d'outils, des comparaisons à la CAO, des analyses dimensionnelles, la rétro-ingénierie de composants, etc.

Le FaroArm est un dispositif de mesure de précision, renforcé afin de pouvoir l'utiliser dans un atelier, cependant, il faut prendre certaines précautions environnementales lorsqu'on utilise le FaroArm. Pour garantir un bon fonctionnement, il faut éviter : les dissolvants, de laisser tomber l'appareil ou de le faire pivoter jusqu'aux fins de courses, l'humidité, les fluctuations de courant, les changements de température excessifs sans temps de stabilisation.

Le FaroArm contient un système électronique complet situé dans le corps du FaroArm. Les signaux provenant de chaque articulation sont convertis en données positionnelles qui sont envoyées à l'ordinateur.

Il s'agit d'un bras articulé à plusieurs axes avec un volume de travail sphérique. Chaque articulation dispose d'un encodeur rotatif. Ces bras ont une grande ergonomie, sont assez simple d'utilisation et sont transportables (à la différence des MMT). Leur portée varie de un à deux mètres. La précision est de l'ordre de quelques centaines voire dizaines de mm. Ils sont utilisés avec une tête laser ligne, ce qui permet de réaliser simultanément l'acquisition complète de la forme et la prise de référence (plans, cylindres, forme complexe)



Figure 2.4 : Bras poly-articulé faro.

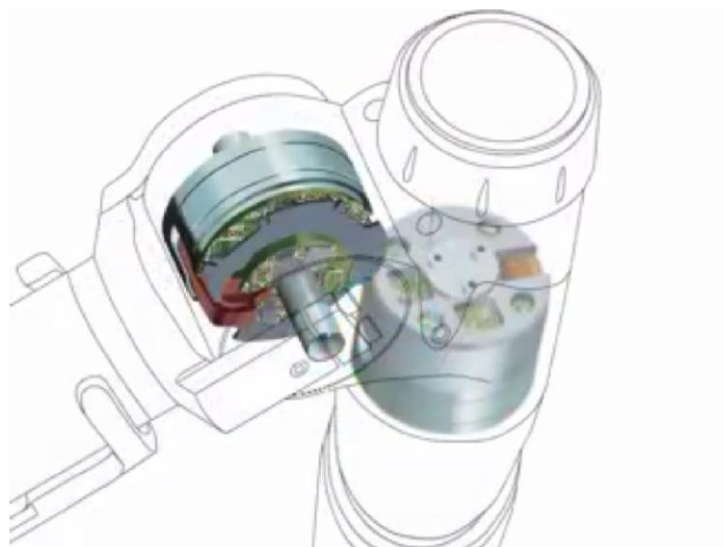


Figure 2.5 : Encodeur rotative.

Le bras est un outil de mesure tridimensionnel 7 axes. Chaque angle du bras est mesuré avec des codeurs. Grâce à une mécanique précise et une bonne connaissance des dimensions du bras, ce dernier peut donner les coordonnées d'un point X,Y,Z dans l'espace.

2.8 Mesure avec contact (palpage)

Pour effectuer les mesures, on déplace un palpeur à contact (rubis sphérique) dans le système de coordonnées de la machine. Ce palpeur délivre un « top » lorsqu'il entre en contact avec la pièce, ce qui permet d'afficher la position du centre du palpeur au moment du contact. Toutes ces informations sont mémorisés par l'ordinateur, afin d'être exploitées par la suite par le logiciel de métrologie. A partir des informations acquises au niveau de l'ordinateur par le palpage des points, le logiciel détermine, par des traitements mathématiques, des éléments géométriques associés (Point, Droite, Cercle, Plan, Cylindre, Cône, Sphère) afin de réaliser la vérification des spécifications (géométriques & dimensionnelles) du dessin de définition de la pièce.

2.9 Tête de palpage:

2.9.1 La tête dynamique consiste à faire la mesure à vitesse de déplacement constant. Il existe deux technologies

a) Capteur de type interrupteur

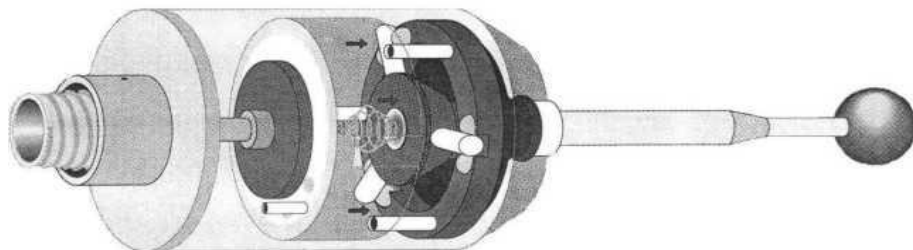


Figure 2.6 : tête dynamique [19].

b) Capteur à chocs.

2.9.2 Tête statique : La tête de mesure est une petite MMT « sans jeu » et de faible course. Il mesure l'effort de contact (0.1 à 0.5 N).

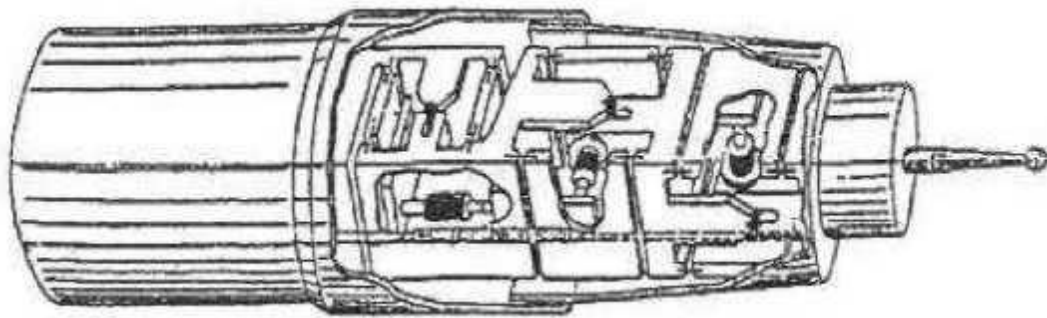


Figure 2.7 : Tête statique.[19]

2.10 Palpeurs FaroArm

Deux palpeurs standards, un sphérique de 6 mm et un sphérique de 3 mm sont inclus avec le FaroArm. Chaque palpeur sphérique est gravé avec le diamètre exact de la sphère (2,9997 mm, 5,9994 mm, etc.).

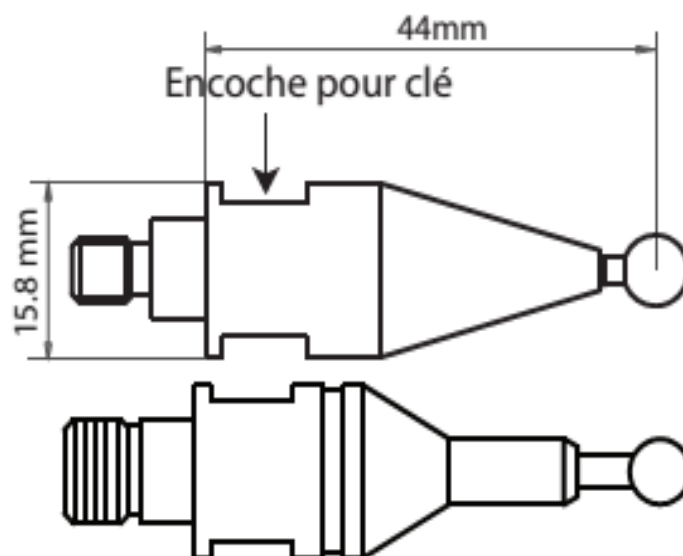


Figure 2.5 : palpeur standard de faro Arm [26].

Le point de mesure du FaroArm sur tous les palpeurs sphériques est le centre de la sphère. Des logiciels de mesure d'entités ou de contrôle de qualité d'autres producteurs compensent le rayon du palpeur sphérique. Les palpeurs à point ne sont recommandés que lorsque le logiciel ne compense pas le rayon du palpeur. Les palpeurs à pointe ont une influence sur la précision de la mesure. L'erreur dépendra de :

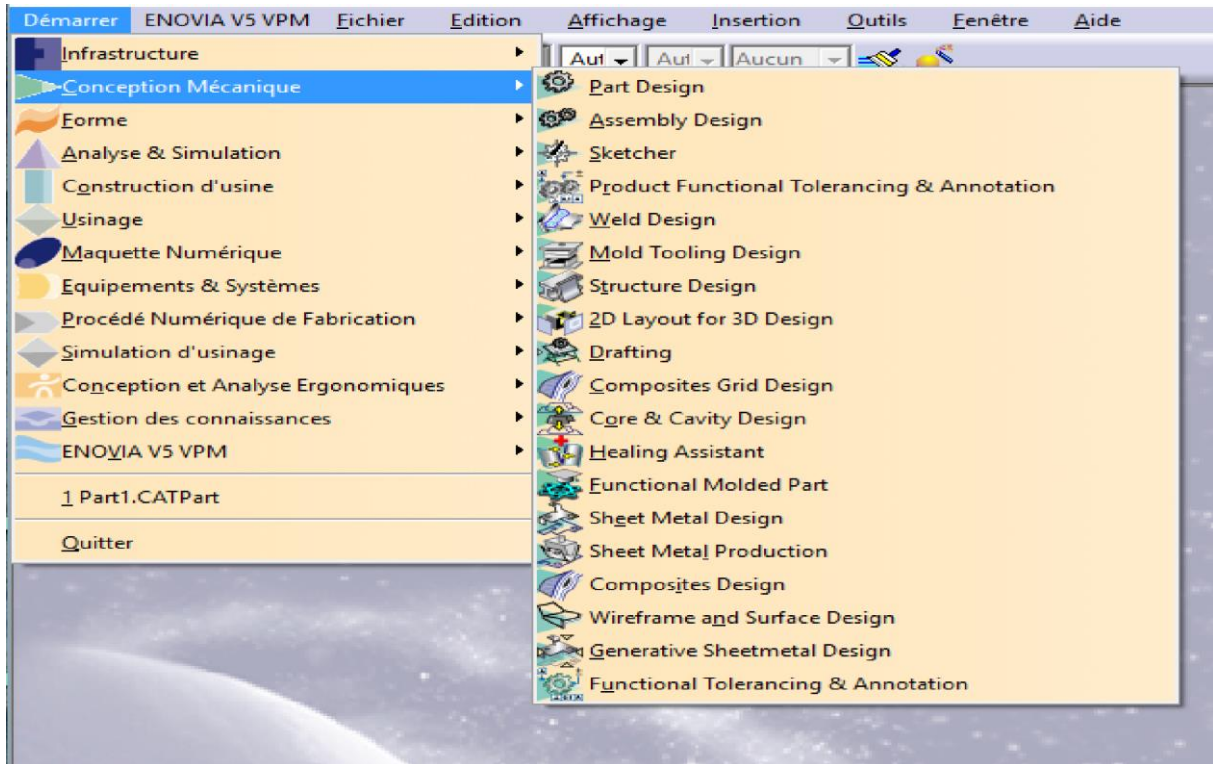
- la largeur de la pointe du palpeur
- la position et remplacement de la pointe sur l'objet

Chapitre3 :
CONCEPTION DE LA PIECE
ET SIMULATION
D'USINAGE SUR CATIA V5

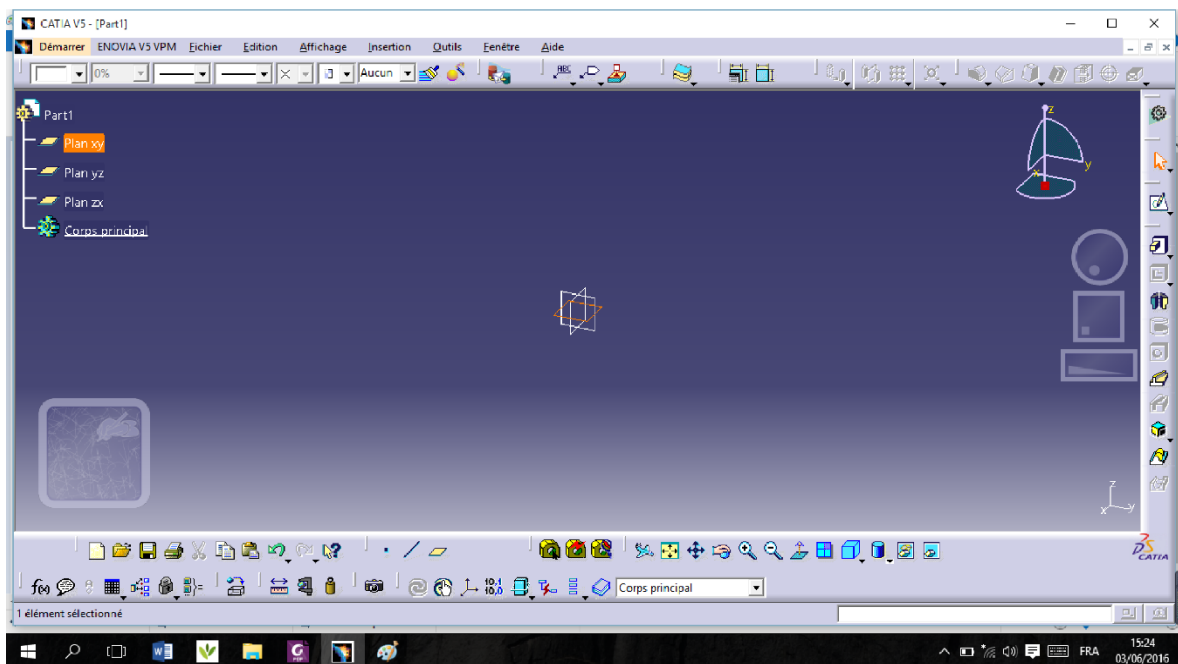
3.1 : Conception de la pièce sur CATIA V5R20


Pour Créer une pièce

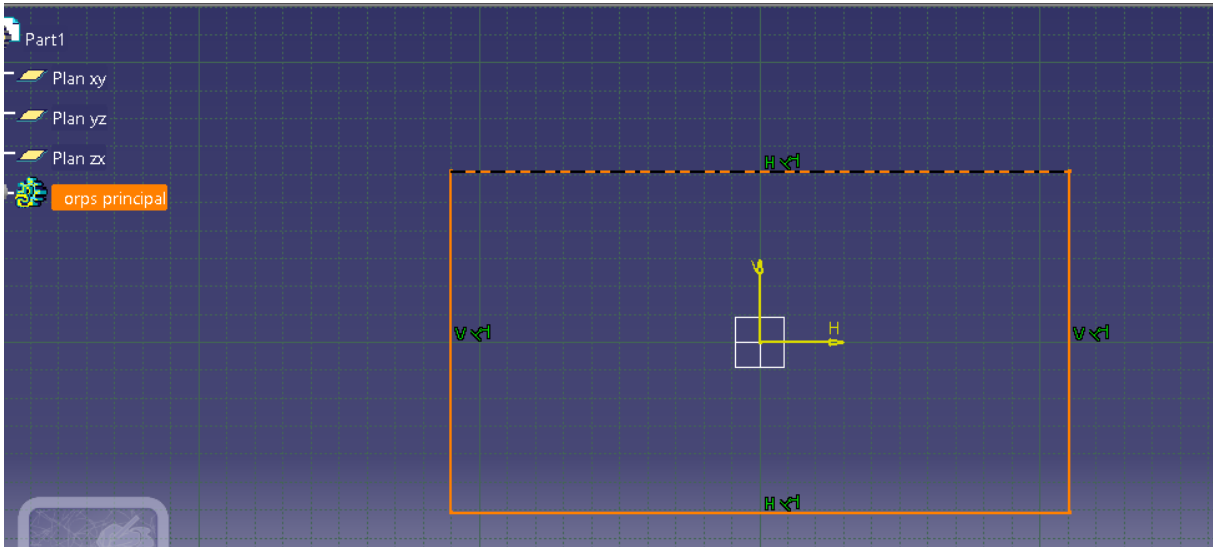
Sélectionner : « Démarrer », « Conception mécanique », « Part Design »





Sélectionner, dans l'arbre le plan XY et démarrer l'éditeur d'esquisse

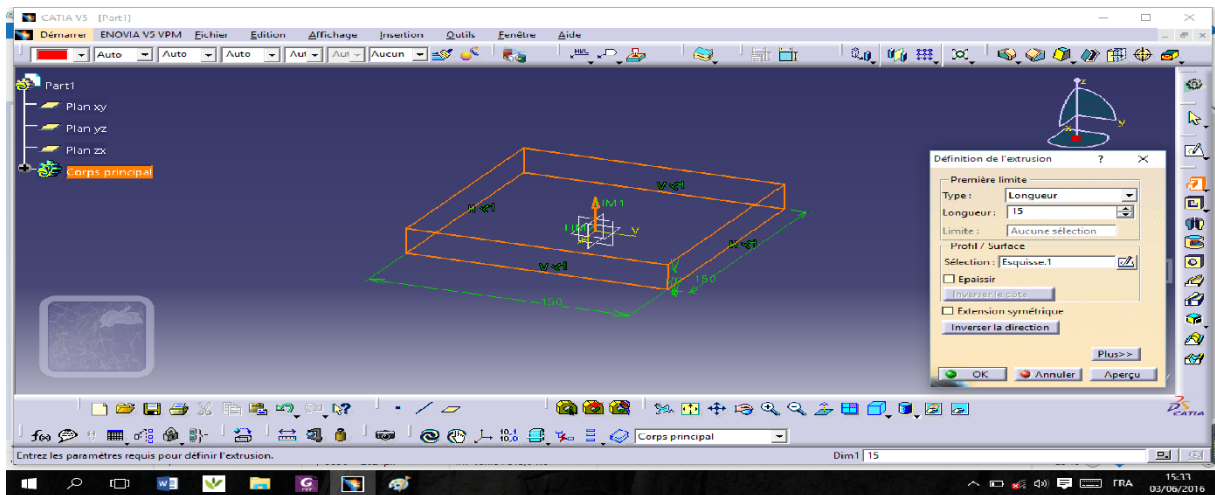


A l'aide des outils  crée le contour carre par deux points.

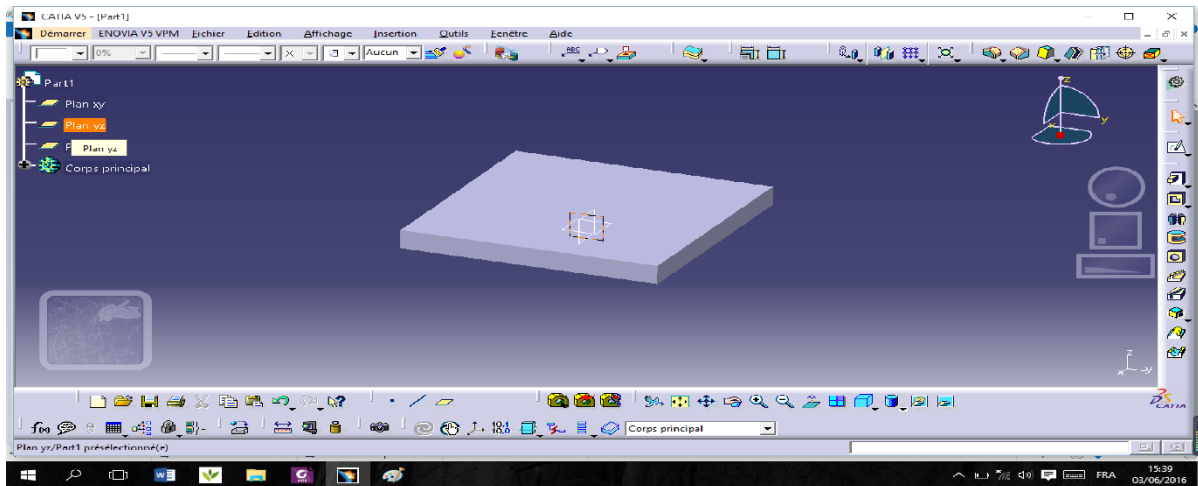


Après création du contour, sortie de l'Edition d'éditeur d'esquisse  et extruder le profil

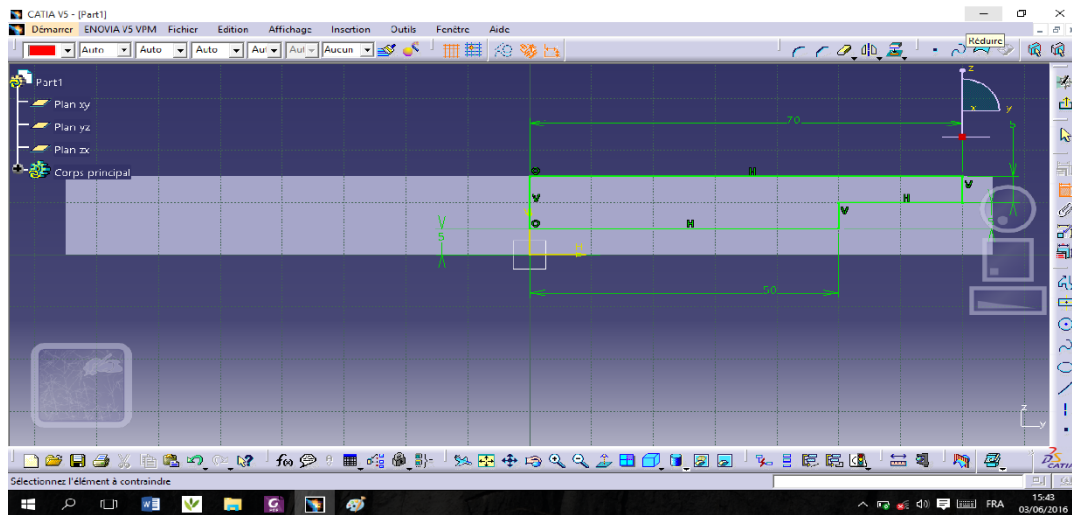
Défini à l'étape précédent  la fenêtre de définition de l'extrusion apparait L'esquisse créée en dernier est sélection par défaut pour l'extrusion.





Pour crée les deux alésages sélectionne le plan YZ



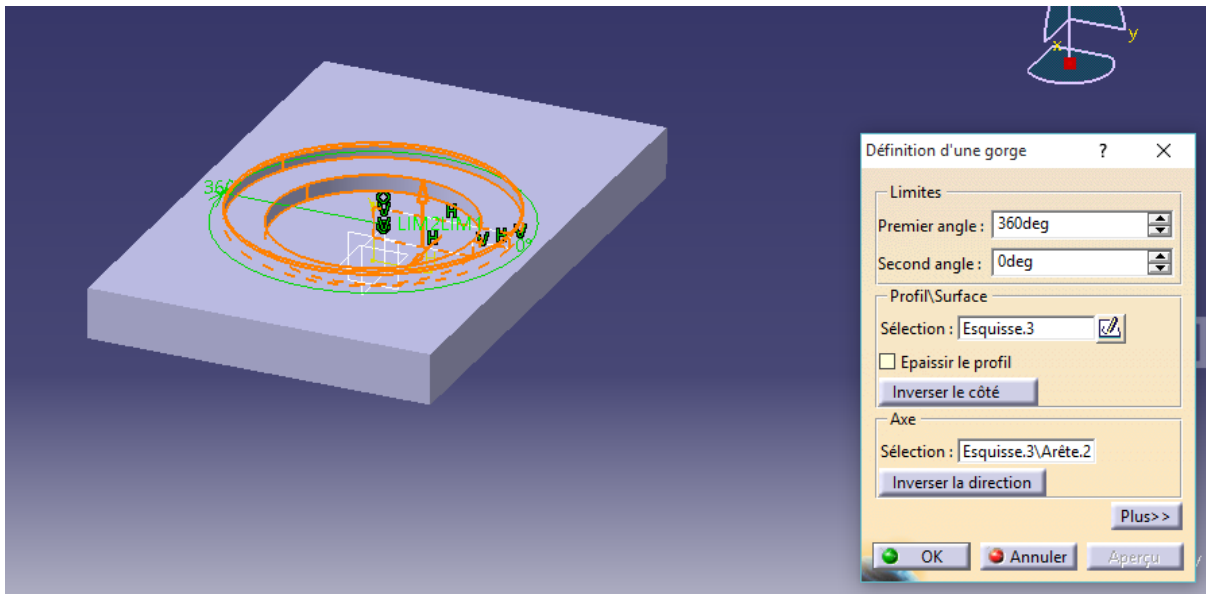
A l'aide de l'outil contour  crée l'esquisse suivant



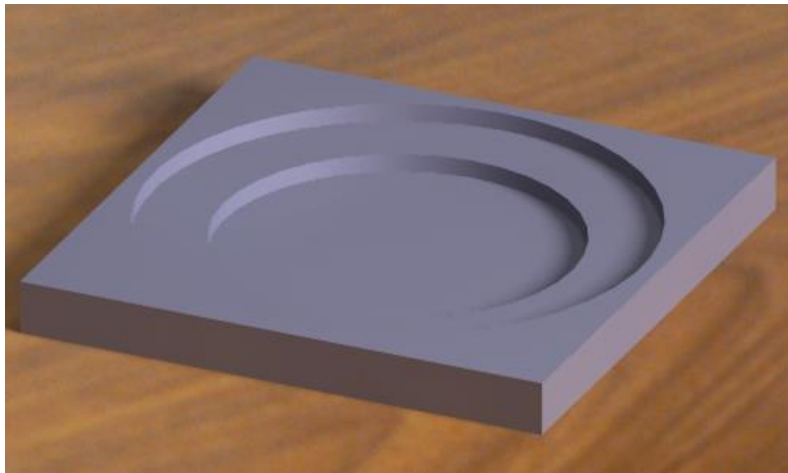
Après création du contour, sortie de l'Edition d'éditeur d'esquisse  et poche le profil

Défini a l'étape précédent  la fenêtre de la définition de la poche apparait L'esquisse

créé en Dernier est sélection a axe Z pour la révolution de poche par rapporté à cet axe.

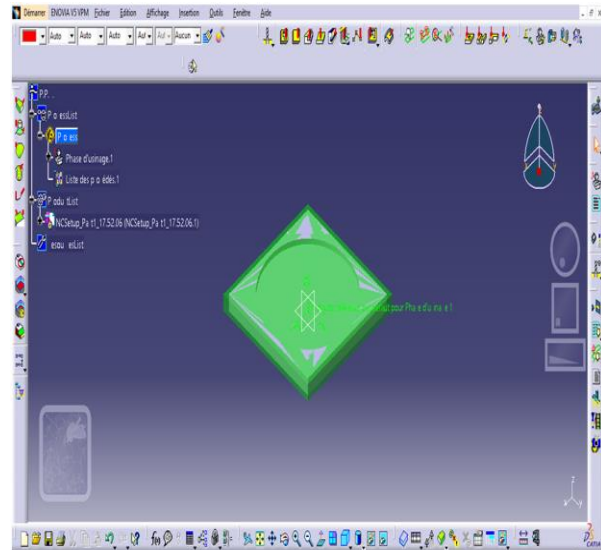
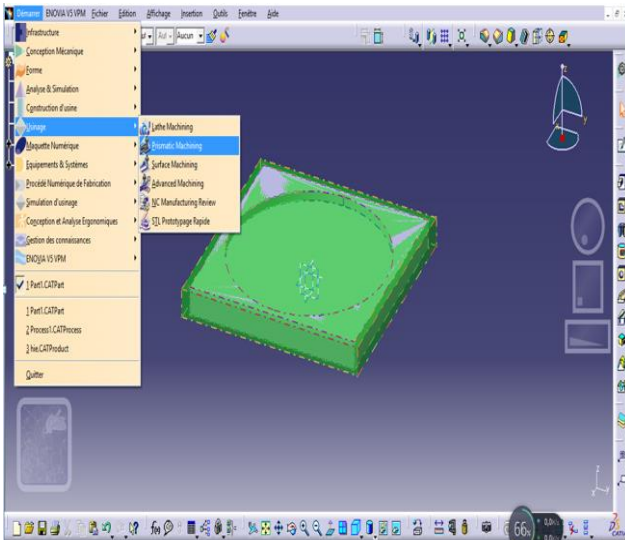


La pièce fini



3.2 : Simulation d'usinage sur CATIA V5

Ouvrir le fichier CAO de la pièce à usinée ex : Part1.CAT, Fichier situé dans le répertoire de travail, puis l'atelier Prismatic Machining



Un nouvel environnement apparaît et le gestionnaire PPR s'affiche à gauche de l'écran.

L'arbre PPR contient 3 niveaux :

-ProcessList:

la ou les phases d'usinages avec leurs opérations.

-ProductList:

la pièce finie avec éventuellement des géométries annexes (points, plans, contours ...) la pièce brute et le montage.

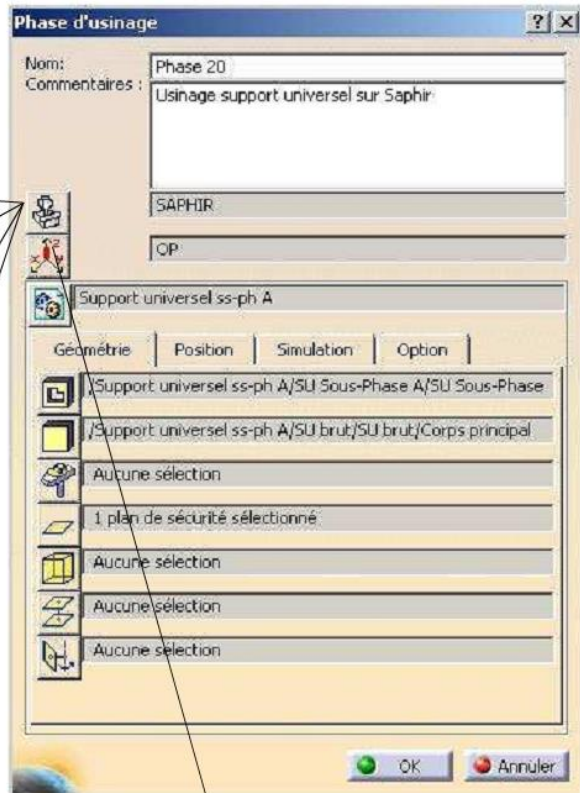
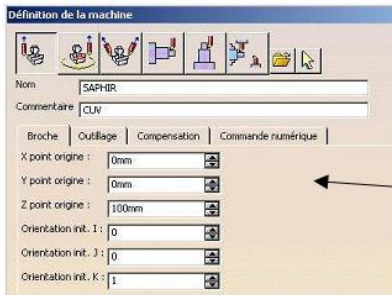
-RessourcesList:

c'est ici que se trouveront la machine et les outils utilisés.

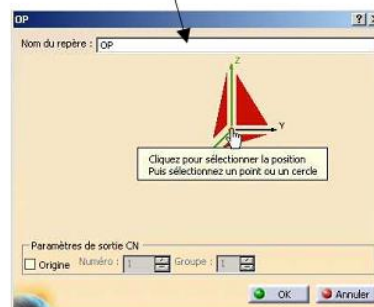
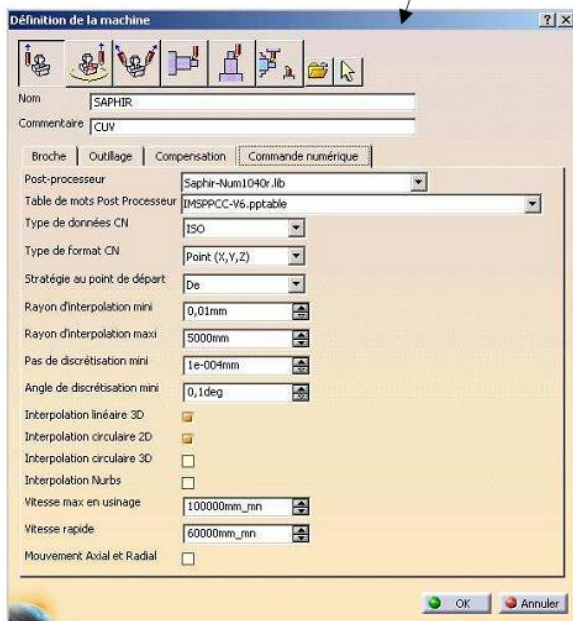
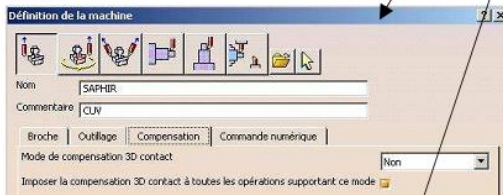
3.2.1 : Définir les éléments de la phase

Double clic sur "Phase d'usinage" pour faire apparaître la fenêtre "Phase d'usinage".

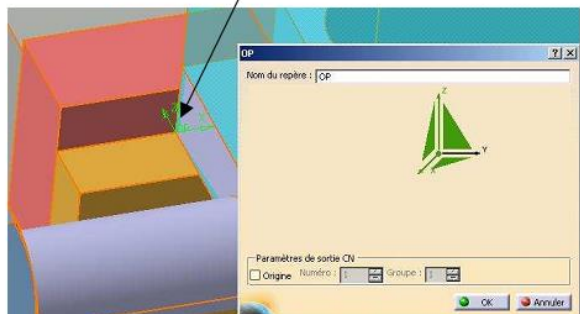
Remplissez les divers champs...



Nota: les saisies dans les masques seront amenées à évoluer en fonction des résultats sur la MOCN.



Ici, l'angle de la pièce finie.



L'axe Z du repère doit être vertical.
Le repère OP passe en vert.
Définir éventuellement l'orientation afin d'avoir la direction principale d'usinage parallèle à l'axe X.

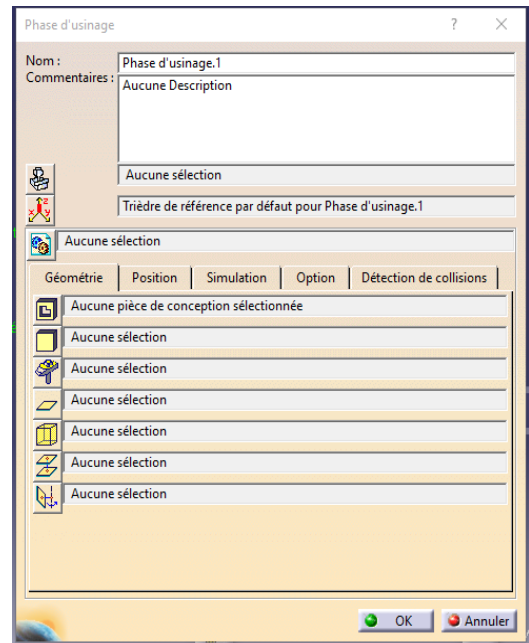
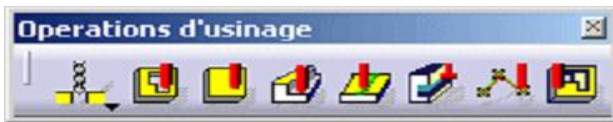
Nom du produit à utiliser : Cliquez l'icône correspondante puis désigné la géométrie ou les géométries à utiliser.

Pour sortir, faire un double clic dans une zone neutre de l'écran. Ne pas modifier les valeurs dans les autres masques.

3.2.2 Choix des fonctions d'usinages

Barre d'outils opérations d'usinage

Cette barre d'outils contient les commandes permettant de créer et de modifier des opérations d'usinage axial et des opérations de fraisage 3axes.



Celles présentées sur cette barre d'outils permettent de créer et de modifier des opérations d'usinage axial.

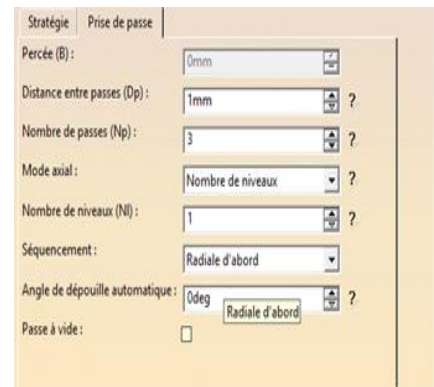
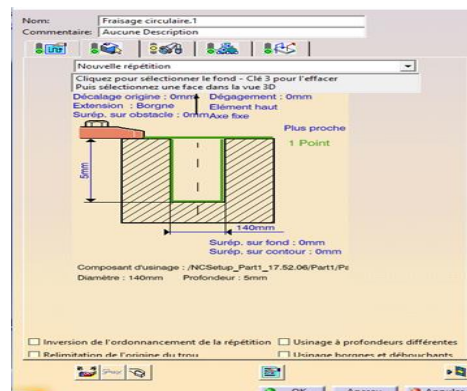
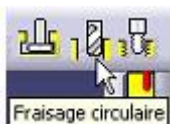


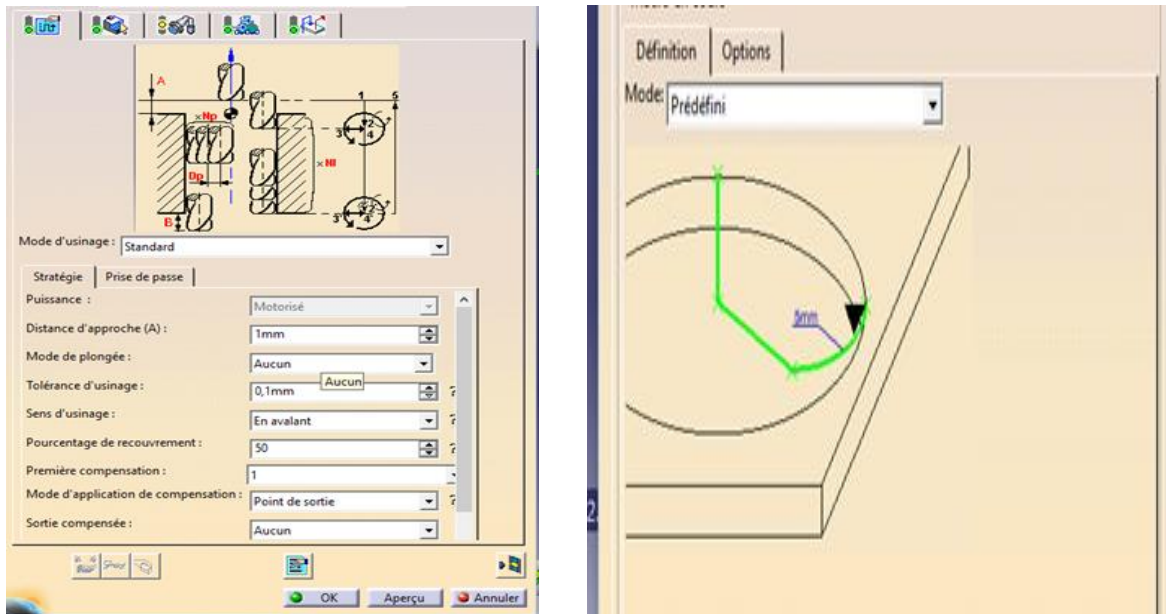
Pour chaque opération d'usinage, choisir la fonction d'usinage correspondante dans la barre d'outils puis régler les divers paramètres regroupés sous 5 onglets de la fenêtre de l'opération.



Création de l'opération de fraisage circulaire,

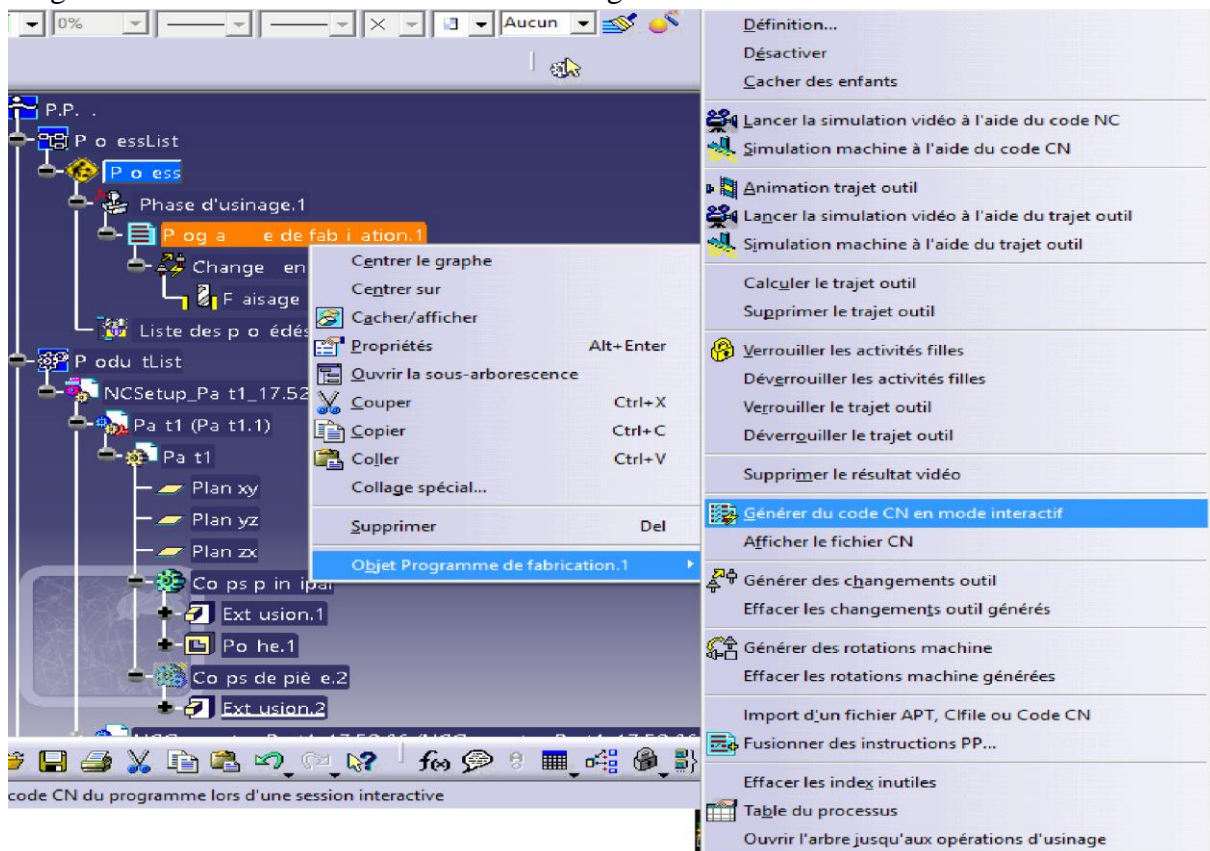
Choisir un cycle de un cycle de fraisage circulaire situé dans la barre d'outils des opérations axiales





3.2.3 Génération du programme code G

La génération du code G est montrée dans la figure suivante :



Chapitre4 :

Analyse des résultats et discussion

Capitre4 ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le présent chapitre présente quelques résultats expérimentaux pertinents réalisés par Benjamin Carrier et Mohamed Slamani au sein du Laboratoire de Recherche en Fabrication Virtuelle à l'École Polytechnique de Montréal. Les résultats sont présentés en trois sections distinctes : les tests de circularité, les pièces usinées et le test comparatif.

4.1 Machine-outil

La MOCN sur laquelle les tests de Benjamin Carrier et Mohamed Slamani ont été réalisés est la HU-40 de Mitsui Seiki (Fig4.1), 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.



Figure 4.1: MOCN HU-40 de Mitsui Seiki[24].

4.2 Tests de circularité

Les premiers tests réalisés sont des tests préliminaires de circularité faits avec le KGM. Ces tests 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.

La figure 4.2 montre les erreurs de contournage (circularité) pour la machine-outil Mitsui Seiki HU40 à des vitesses d'avance de 1000 mm/min et 10,000 mm/min, respectivement. Nous pouvons observer que les pics à l'inversion et le jeu d'inversion sont les sources importantes d'erreurs qui affectent la circularité.

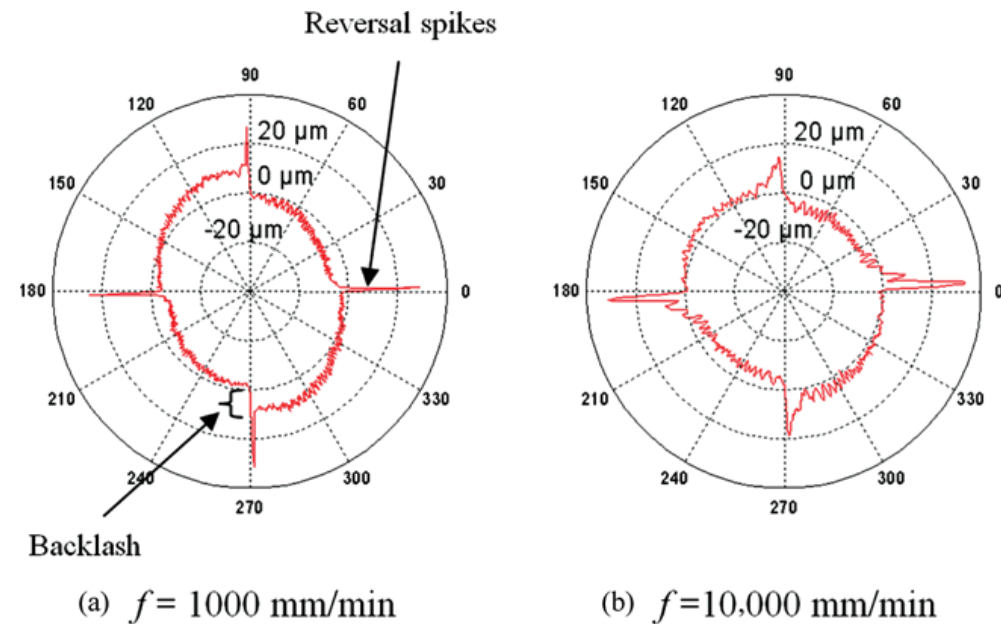


Fig 4.2 : Erreurs de circularité obtenues par des tests de KGM pour un rayon $R = 90 \text{ mm}$ avant la compensation du jeu d'inversion et les pics à l'inversion [25].

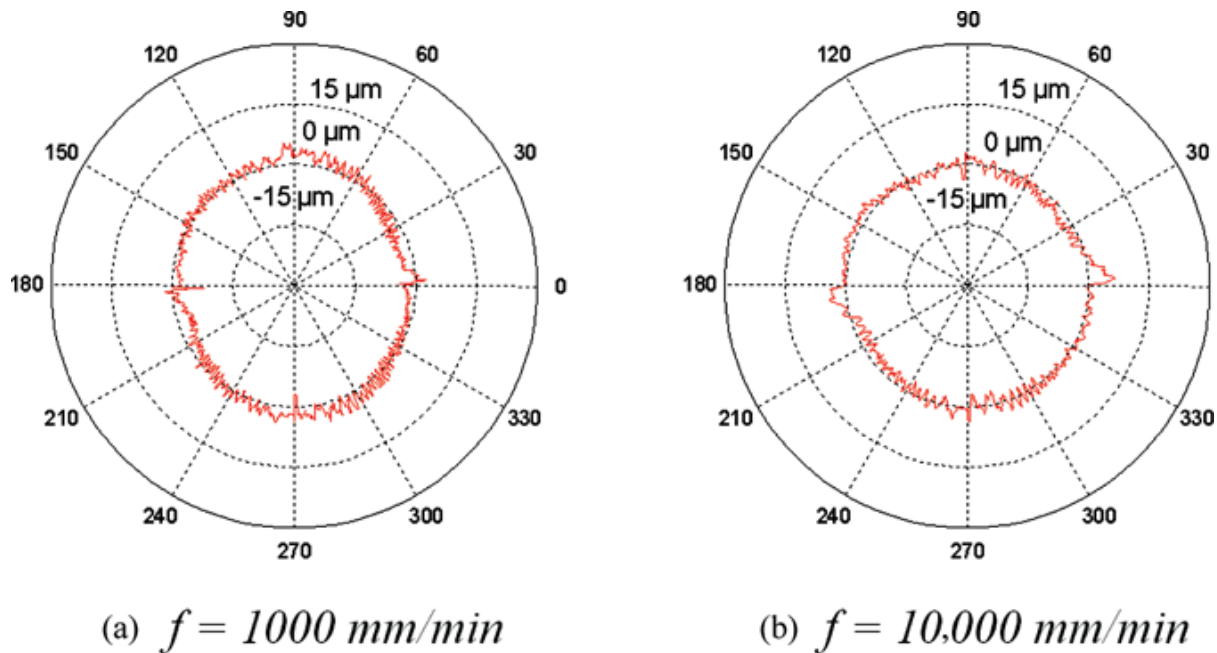


Fig 4.3 Erreurs de circularité obtenues par des tests de KGM pour un rayon $R = 90 \text{ mm}$ après la compensation du jeu d'inversion et les pics à l'inversion [25].

On sait que les erreurs de pics à l'inversion et le jeu d'inversion sont dues au changement de direction d'un des axes de la MOCN. Afin de contrôler ces erreurs, 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. Ces corrections faites à l'intérieur du contrôleur ont été appliquées pour l'usinage de la pièce finale de comparaison entre le fraisage circulaire et la barre à aléser.

Les graphiques polaires de la figure 4.3, obtenus pour les mêmes conditions expérimentales que la figure 4.2, montrent que les pics à l'inversion et le jeu d'inversion peuvent être compensés par un réglage fin du paramètre #1860 dans le contrôleur. Le réglage de ce paramètre a conduit à une réduction de l'erreur de circularité de $45 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$.

4.3 Pièces usinées

L'usinage de la première pièce test a été faite dans le but de voir quels types d'erreurs pouvaient se retrouver sur les surfaces usinées en utilisant le fraisage circulaire 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 4.6 montre un tracé type de MMT d'une des surfaces usinées.

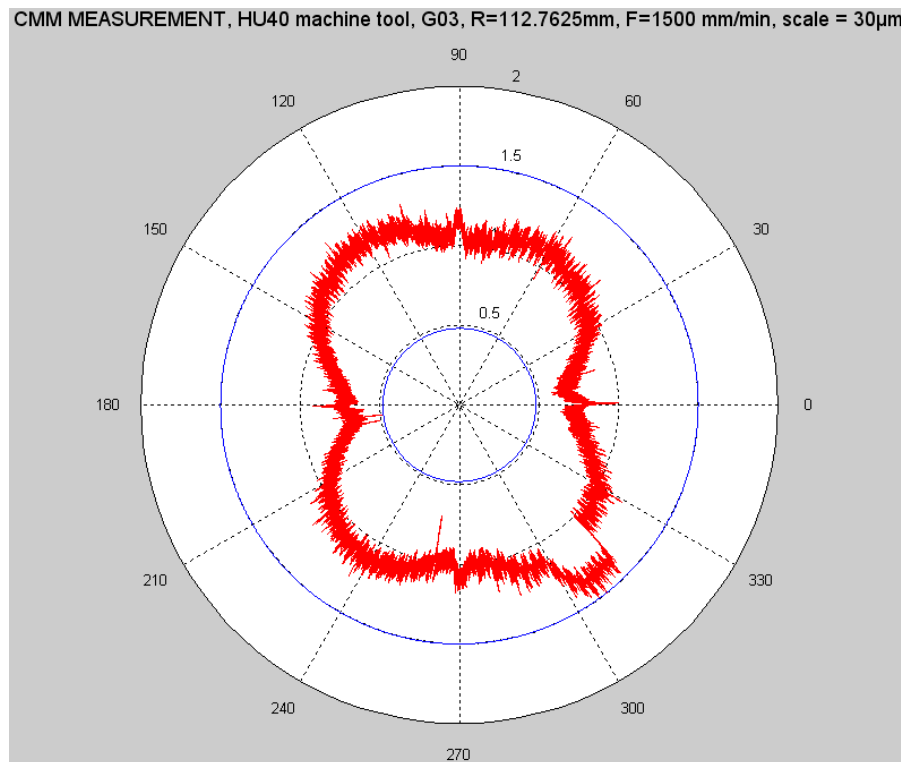


Figure 4.6 : Tracé provenant de mesures sur la MMT d'une surface usinée [23].

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

- 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.

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.

Pour ce qui est de la forme de trèfle à quatre feuilles observées 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.

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 4.7 à 4.10.

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

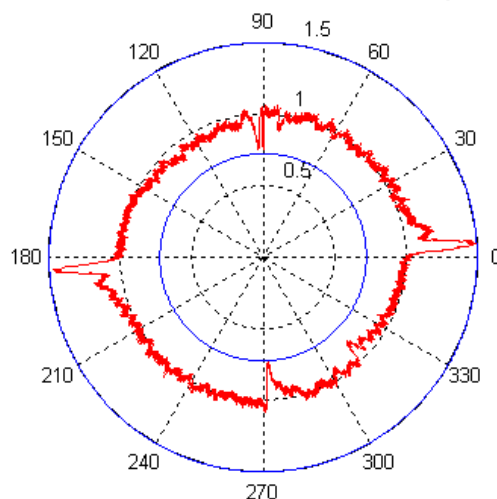


Figure 4.7 : Première surface usinée avec une trajectoire spiralée [23]

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

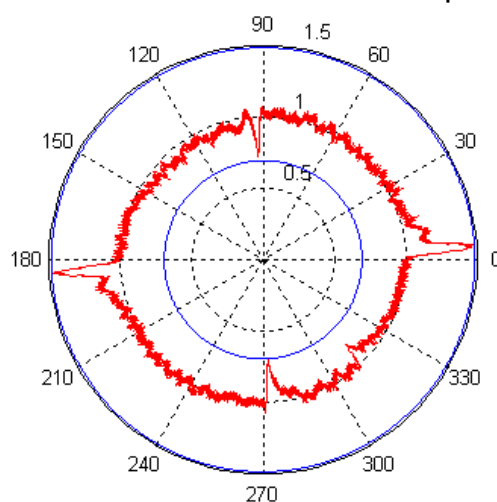


Figure 4.8 : Deuxième surface usinée avec une trajectoire spiralée [23]

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

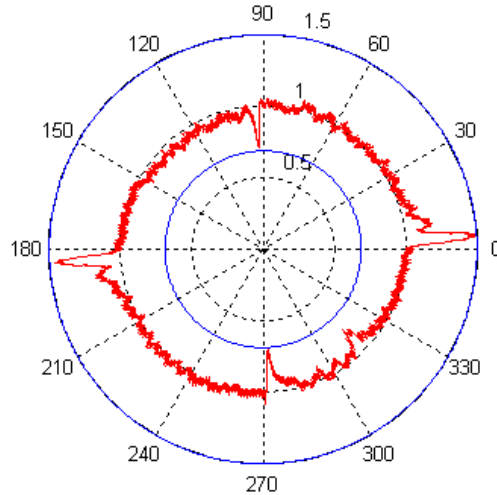


Figure 4.9 : Troisième surface usinée avec une trajectoire spiralee [23]

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

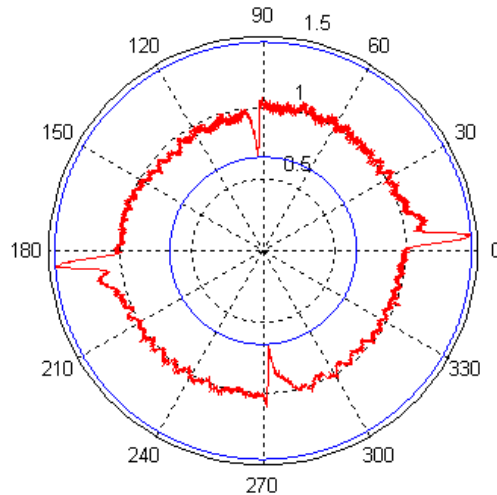


Figure 4.10 : Surface usinée avec une trajectoire hélicoïdale [23]

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 μ m 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 4.10. Cette stratégie sera donc celle préconisée pour effectuer le test final de comparaison entre le fraisage circulaire 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 devraient 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.

4.4 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 circulaire, 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.

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 4.12.

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 à la figure 4.13.

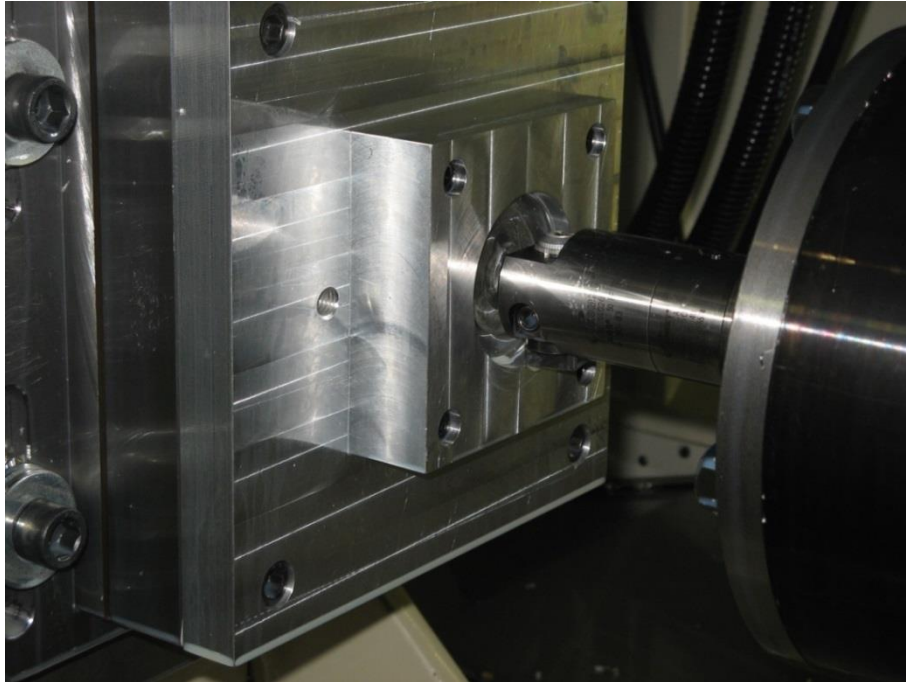


Figure 3.12 : Usinage d'un alésage avec la barre à aléser [23]

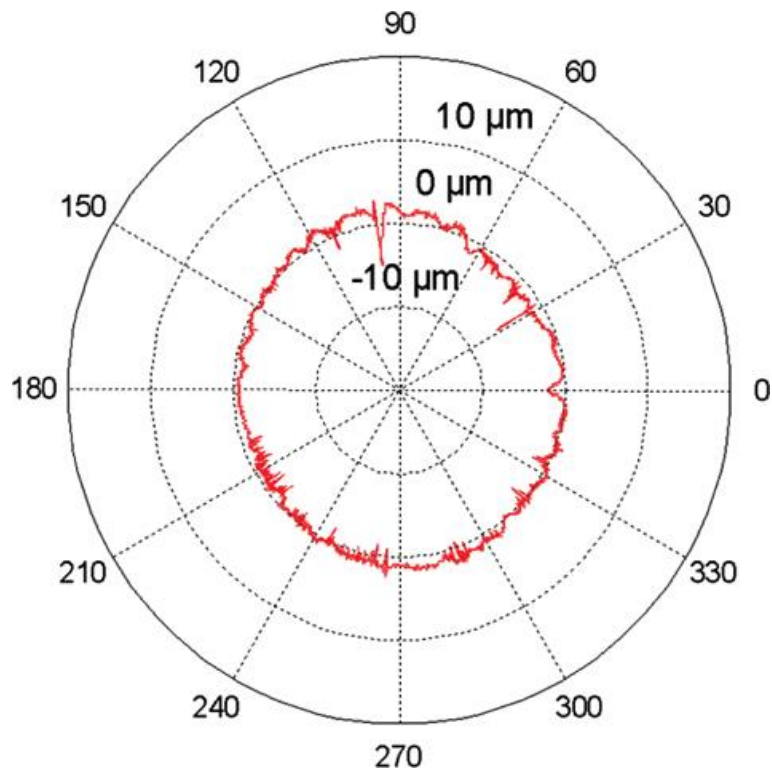


FIGURE 3.13 : Erreurs de circularité obtenues par MMT pour un alésage usiné par barre à aléser pour un rayon $R = 35$ mm [25].

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 $10\ \mu\text{m}$.

La deuxième partie de ce test consistait à usiner l'alésage avec le fraisage circulaire, comme le montre la figure 4.16.

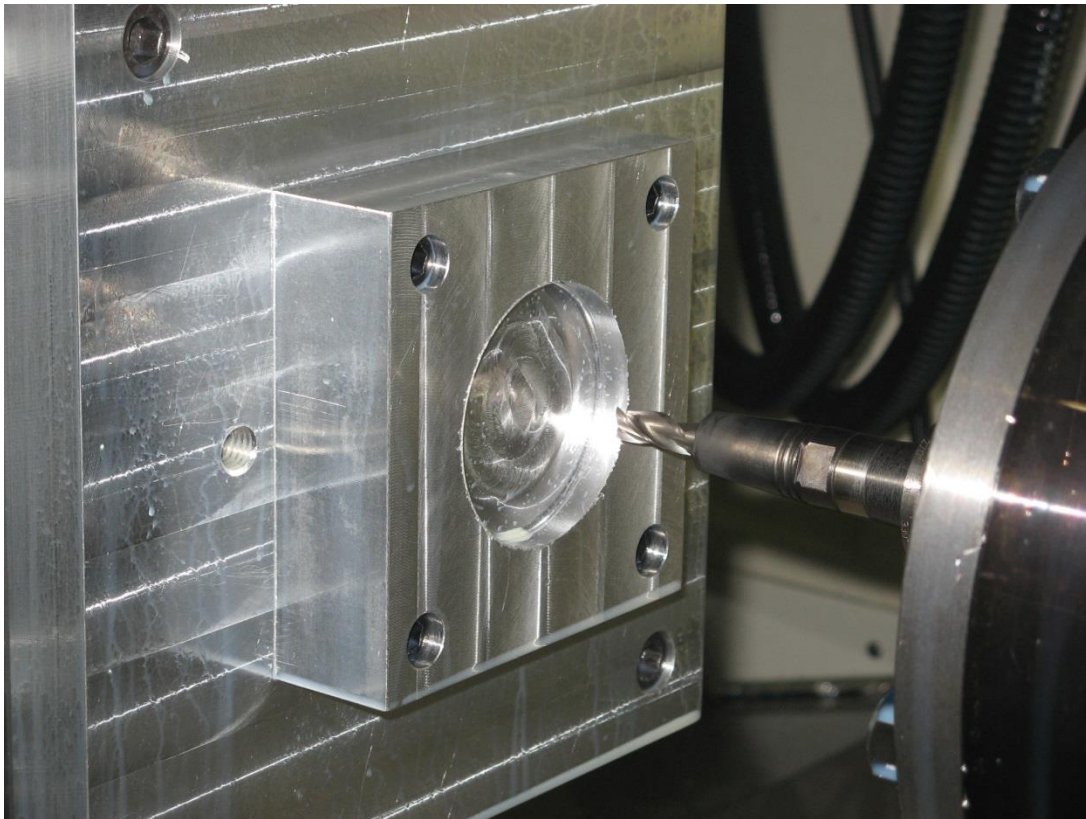


Figure 4.16 : Usinage d'un alésage par fraisage circulaire [25].

Encore ici la surface usinée a été mesurée sur la MMT avec exactement les mêmes conditions de mesure utilisées pour la pièce faite avec la barre à aléser. Les résultats de ces mesures sont présentés à la figure 4.17.

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 circulaire. 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 circulaire et le tracé obtenu du KGM lors de l'optimisation des paramètres du contrôleur (figure 4.11), on peut remarquer qu'ils sont pratiquement identiques.

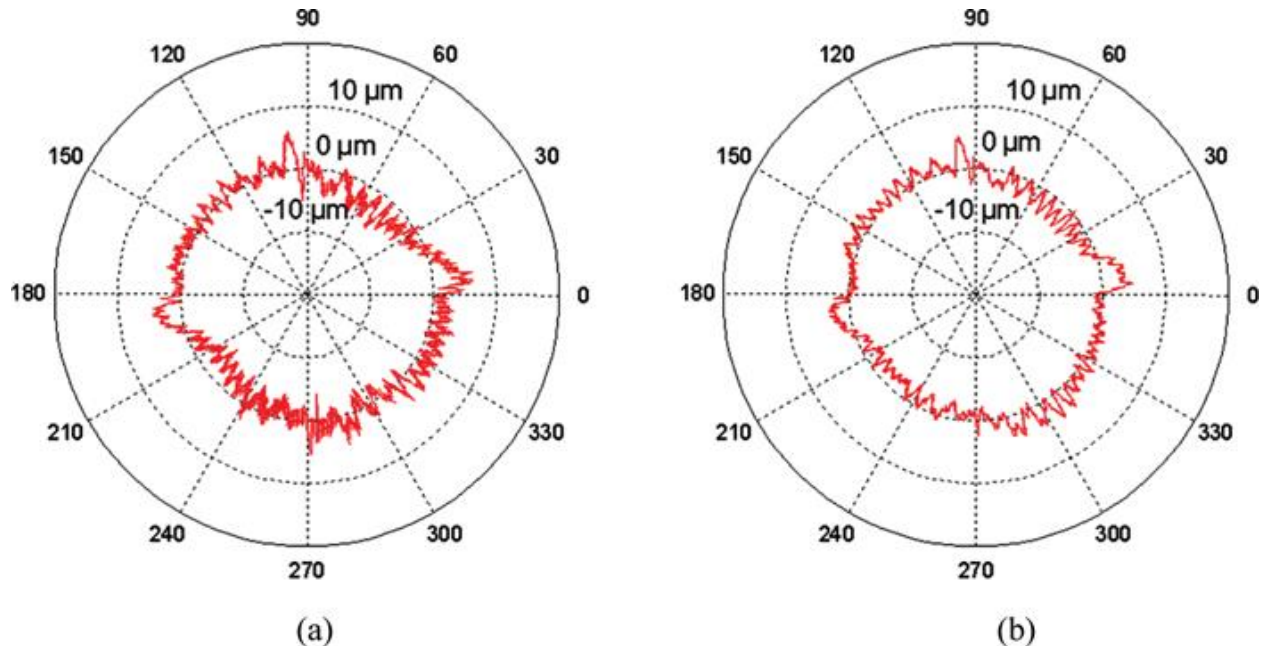


FIGURE 1.14 : Erreurs de circularité obtenues par MMT et par KGM pour un rayon $R = 35$ mm pour le procédé d'alésage circulaire après la compensation du jeu d'inversion et les pics à l'inversion, a) Fraisage circulaire, b) KGM.

La trajectoire empruntée par l'outil à vide (Fig4.14b) est donc très semblable à la trajectoire de l'outil lors de l'usinage (Fig4.14a). 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 fraisage orbital. Cependant, l'amplitude des défauts avec le fraisage orbital est du même ordre de grandeur que ceux observés avec la barre à aléser. Le fraisage 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

fraisage circulaire 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 circulaire 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 circulaire 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.

4.5 Analyse des résultats réalisés au niveau de la société de maintenance des équipements industriels MEI :

La même approche développée par Benjamin Carrier et Mohamed Slamani a été utilisée au niveau de la société de maintenance des équipements industriels MEI de M'sila pour réaliser un alésage de diamètre $D = 140$ mm par fraisage circulaire. La machine utilisée est une fraiseuse à commande numérique 5 axes « DMF180 ».

Une fois l'alésage usiné, la surface produite a été mesurée par un bras Poly-articulé de type FARO. La pièce usinée est présentée à la figure 4.5

Normalement le bras Poly-articulé n'est pas l'instrument de mesure approprié pour ce type d'alésage. Puisque la machine de mesure tridimensionnelle (MMT) de l'entreprise MEI n'était pas disponible, nous avons donc été obligés d'utiliser le bras Faro pour acquérir des données et le faire analyser par la suite.

La figure 4.6 montre un tracé type de bras FARO de l'alésage usiné.

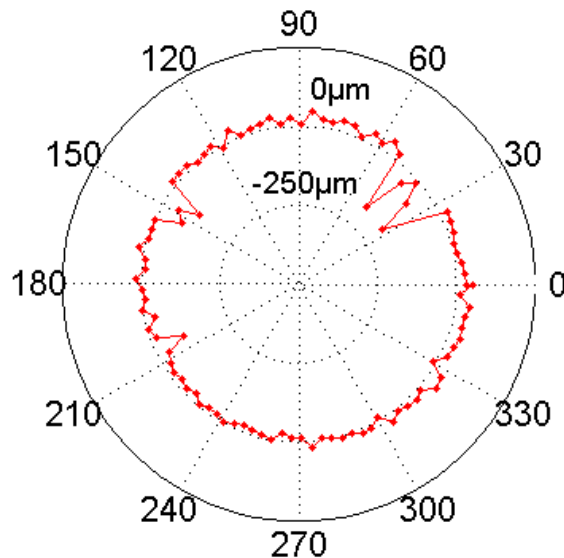


Fig. 4.15 : Alésage par fraisage circulaire $R = 140$ mm

CONCLUSION

CONCLUSION

Durant ce projet quatre types d'erreurs dominantes sur les surfaces usinées en fraisage circulaire ont été identifiés:

- 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. Cette erreur devient pratiquement négligeable suite à des compensations adéquates du paramètre #1860.

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

Du côté de la productivité, l'usinage d'alésage par fraisage circulaire 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 circulaire, 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 circulaire sont grandement diminués.

L'usinage d'alésages par fraisage circulaire 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.

Bibliographies:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] altintas, yusuf, *machining automation*, cambridge university press, cambridge, 2000, 286 pages.
- [24] ylh-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.
- [6] 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.
- [7] e. budak, y. altintas & e. j. a. armarego. *prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data*. *journal of manufacturing science and engineering*, vol. 118, no. 2, pages 216–224, 1996.
- [8] e.j.a. armarego & r.c. withfield. *computer based modelling of popular machining operations for force and power predictions*. *annals of the cirp*, vol. 34, pages 65–69, 1985.
- [9] x-w liu, cheng k., webb d. & luo x-c. *prediction of cutting force distribution and its influence on dimensional accuracy in peripheral milling*. *int. j. of mach. tools & manuf.*, vol. 42, pages 791–800, 2002.
- [10] s. engin & y. altintas. *mechanics and dynamics of general milling cutters. part i : helical end mills*. *international journal of machine tools & manufacture*, vol. 41, pages 2195–2212, 2001.
- [11] r. p. h. faassen, n. van de ·ouw, j. a. j. oosterling, and h. nijmeijer. prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of highspeed milling. *international journal of machine tools and manufacture*, 43(14) :1437-1446, 2003.
- [12] ge fanuc automation. 2001. *computer numerical control products: linear motor séries descriptions*. ge fanuc automation north america, inc. 227p. gfz-65222en/03.

- [13] r. béarée, prise en compte des phénomènes vibratoires dans la génération de commande des machines-outils a dynamique élevée, thèse de doctorat, école nationale supérieure d'arts et métiers centre de lille, 2005.
- [14] l. tapie, b. k. mawussi, b. anselmetti, circular tests for hsm machine tools : bore machining application, *international journal of machine tools and manufacture*, 47, 805-819, 2007.
- [15] l. tapie, décomposition topologique des outillages de forge pour la génération de trajectoires ugv, école normale supérieure de cachan 2007
- [16] rahman, mahbubur. 2004. modeling and measurement of multi-axis machine tools to improve positioning accuracy in a software way. 124p. dissertation académique en génie mécanique, university of oulu.
- [17] kakino, y., ihara, y., shinohara, a. 1993. accuracy inspection of nc machine tools by double bail bar method. munich, germany: hanser publishers, 191p.
- [18] knapp, w., zürich, e. 1983. « test of the three-dimensional uncertainty of machine tools and measuring machines and its relation to the machine errors ». *annals of the cirp*. 32. 459-464.
- [19] machines à mesurer tridimensionnelles et contrôle 3d
- [20] toufic wehbe .2010. « étude des vibrations de pièce mince durant l'usinage par stéréo corrélation d'images». thèse de doctorat institut national polytechnique de toulouse
- [21] vincent wagner 2011 « amélioration de la productivité en usinage d'un titane réfractaire ». thèse de doctorat institut national polytechnique de toulouse
- [21] bassem gassara « conditions de coupe en fraisage a grande vitesse : effet de la variation de la vitesse d'avance ». Thèse de doctorat institut national polytechnique de toulouse
- [22]gaëtan albert 2010 «identification et modélisation du torseur des actions de coupe en fraisage» thèse doctorat école des sciences physiques et de l'ingénieur
- [23] benjamin carrier 2007« amélioration de procédé du fabrication d'alésage par fraisage orbitale» thèse de de maîtrise ès sciences appliquées. école polytechnique de montréal
- [24] michael zervoudis 2005« caractérisation d'une machine-outil à système d'entraînement par moteurs linéaires durant le fraisage orbital à hautes vitesses d'alliages légers» thèse de de maîtrise ès sciences appliquées. école polytechnique de montréal
- [25] slamani mohamed « improvement to high-speed end mill boring accuracy by a simple compensation strategy » article en École Polytechnique de Montréal

RESUME

Actuellement, l'usinage des alésages à grande précision est effectué par barre à aléser. Malheureusement, la barre à aléser ne permet pas l'usinage de plusieurs diamètres et elle ne peut pas être utilisée à des vitesses d'avance élevées pour éviter un mauvais enlèvement de matière.

Le fraisage circulaire consiste à effectuer une interpolation circulaire à travers le mouvement combiné de deux axes linéaires de la MOCN. Ce procédé d'alésage offre des gains importants comparés à celui par barre à aléser. Dans ce procédé, un seul outil pourrait être utilisé pour l'usinage d'une multitude d'alésage (avec différents diamètres). Il y aurait donc un seul changement d'outil. Cela représente donc une diminution importante du temps de production et de l'inventaire d'outils résultant en une diminution importante des coûts de production.

Dans ce travail, des pièces usinées ont été analysées pour faire une comparaison entre la barre à aléser et le fraisage circulaire. L'usinage des deux pièces avec les deux méthodes a donné des résultats très semblables en termes de qualité de surface. La barre à aléser offre un meilleur fini de surface que le fraisage circulaire, 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 circulaire 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 termes de préparation d'outils et de changement d'outils.

Mots clés : Fraisage circulaire, Alésage par barre à aléser, Fraisage à grande vitesse, Circularité