

Titre: Comparaison des outils Guhring et Iscar dans le perçage de
Title: composites à matrice d'aluminium

Auteur: Massoud Hosseiny
Author:

Date: 2006

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Hosseiny, M. (2006). Comparaison des outils Guhring et Iscar dans le perçage de
composites à matrice d'aluminium [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7817/>
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7817/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Marek Balazinski
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**COMPARAISON DES OUTILS GUHRING ET ISCAR DANS LE PERÇAGE DE
COMPOSITES À MATRICE D'ALUMINIUM**

**MASSOUD HOSSEINY
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
DÉCEMBRE 2006**



Library and
Archives Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 978-0-494-25547-6

Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-25547-6

NOTICE:

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

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

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

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

AVIS:

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

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

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

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

**
Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

**COMPARAISON DES OUTILS GUHRING ET ISCAR DANS LE PERÇAGE DE
COMPOSITES À MATRICE D'ALUMINIUM**

présenté par : HOSSEINY Massoud

**en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :**

M. MASCLE Christian, Doct. ès sciences, président

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. KLIM Zdzislaw, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

À la fin de ce travail, qu'il me soit permis de remercier les personnes qui ont contribué à sa réalisation. Mes remerciements sont adressés principalement au professeur Marek Balazinski pour avoir accepté la direction de ma recherche et financé ma recherche.

J'exprime également ma reconnaissance pour le support financier accordé par le projet Auto21.

J'exprime également ma reconnaissance auprès des techniciens du laboratoire d'usinage ainsi que le personnel administratif du département de génie mécanique. Je les remercie pour leur support de chaque jour.

Je désire aussi remercier mon épouse, Dr. Atefeh Farzindar, pour l'aide qu'elle m'a apportée pour l'organisation de ce travail ainsi que son support moral.

Toute ma gratitude envers ma famille qui m'a supporté sans relâche dans mon choix de carrière et m'a encouragé à persévéérer.

Et finalement je tiens à remercier globalement les professeurs de l'École Polytechnique pour leur ouverture d'esprit et pour leur volonté à accepter de discuter, d'analyser et de commenter avec moi les différents aspects de la technologie.

RÉSUMÉ

Plus de 75 % des pièces dans l'industrie automobile ou aérospatiale ont des trous. Le niveau de la qualité de trou percé et aussi sa répétitivité (plusieurs dizaines de milliers de trous) a un coût élevé qui doit être maîtrisé. Donc, les constructeurs industriels sont obligés d'investir dans le développement de nouveaux matériaux et également vérifier le processus de fabrication de ces nouveaux produits.

Parmi les nouveaux matériaux, on retrouve le CMM qui est un composite à matrice de métal à base d'aluminium renforcé de particules de céramique. Les particules de renfort qui améliorent la résistance à l'usure de ce nouveau composite usent rapidement les outils de coupe. Il y a un composite graphitique (GrA-Ni®) consistant en une matrice d'aluminium renforcée avec des particules molles de graphite revêtu de nickel et des particules dures de Al_2O_3 ou SiC.

Durant l'usinage par tournage ou par fraisage, l'outil est placé à l'extérieur de la matière. Par contre, pour les perçages, l'outil est placé à l'intérieur du matériau et les copeaux restent dans la zone de coupe et participent dans le processus d'usure de l'outil. Pour ce processus, la particule de renfort qui améliore la résistance à l'usure de ces nouveaux composites use rapidement les outils de coupe. À cause de cette complexité, nous avons besoin d'une étude précise de chacun des paramètres de perçage et une comparaison quantitative entre eux.

Ce travail est basé sur la comparaison des forets. Il y a deux types d'outil de perçage : le foret hélicoïdal¹ et le foret en plaquette². Nos essais de perçage ont été effectués pour ces deux outils : l'outil en carbure solide qui représente le type hélicoïdal et l'outil à tête amovible qui représente le type en plaquette. Nous avons choisi deux exemples industriels, Guhring (pour le carbure solide) et Iscar (pour la tête amovible) pour nos expériences.

¹ twist

² Indexable

En général, les comparaisons sont quantitatives et subjectives, mais dans notre travail, nous avons besoin d'une comparaison qualificative. Nous voulons faire une comparaison des outils dans un contexte spécifique et notre objectif est d'obtenir tous les paramètres importants de coupe.

Dans la première étape, pour chaque foret, il faut savoir qu'il est utilisé dans quelle industrie et connaître le degré d'importance des éléments de perçage. Dans notre projet, nous avons étudié les PME de l'industrie automobile.

La deuxième étape est de trouver la zone la plus stable de perçage pour avoir le meilleur rendement pour les deux forets. D'après l'étude de Margarit (Margarit L., avril 2006), cette zone stable est la combinaison d'avance 0.2 mm/tr et vitesse 6000 rpm.

Pour la troisième étape, nous avons besoin d'une méthode pour une comparaison qualificative entre les deux forets Guhring et Iscar. Pour arriver à cet objectif, nous avons choisi la méthode *Goal Question Metric* (GQM).

Afin de trouver la relation entre le principe de la *qualité* et les paramètres utilisés dans notre expérience, nous avons adopté pour la première fois l'approche *Goal Question Metric* (GQM) (BASILI, 1992), qui est une méthode utilisée dans l'autre domaine de science comme génie logiciel. Nous avons essayé de quantifier (numériser) notre définition de la qualité en fonction des indicateurs mesurables (nos paramètres de perçage) pour les appliquer dans un cadre de l'approche GQM. L'avantage de GQM est qu'on peut appliquer n'importe quel paramètre (par exemple le paramètre de prix de l'outil) dans notre évaluation de la qualité. En d'autres mots, nous définissons le terme de qualité sous la forme d'un polynôme dans lequel chaque paramètre de mesure a un poids d'importance.

Parlant plus spécifiquement, nous comparons l'attribut numérisé de qualité de deux outils, selon sa relation avec trois critères secondaires (considérés comme les questions de mesure) : qualité de trou, prix de l'outil et durée de vie de l'outil. Finalement, nous avons défini chacune de ces questions en fonction des métriques suivantes :

- 1-usure,
- 2-force & moment,

3- rugosité,

4- circularité & cylindricité.

Pour les perçages d'un composite à matrice métallique (CMM) à grande série, le meilleur choix de foret est le foret en diamant. Mais dans notre étude de la comparaison des outils, nous avons considéré les PME, qui ont différentes limites. Par exemple, pour certaines PME, les pièces sont très chères, la qualité de trou est plus importante que la durée de vie de l'outil, donc le facteur importance pour la durée de vie de l'outil peut être très dominant sur le facteur de prix. Par contre, pour beaucoup de PME, comme les compagnies dans l'industrie automobile, la durée de vie de l'outil est plus importante que la qualité de trou. Donc, dans une PME où on fait le perçage de CMM, le facteur de coût de l'outil peut être très dominant sur la durée de vie de l'outil.

Afin de s'assurer des résultats obtenus pour notre mesure, nous avons refait nos expériences pour la deuxième fois. D'après nos expériences, la qualité de foret en carbure solide était la meilleure par rapport à l'autre foret. En plus, la durée de vie du foret en carbure solide est (2200 mm) environ 4 fois plus que celle du foret à tête amovible (450 mm). Nous avons identifié 3 différentes classes de comportements d'usure par rapport au changement de la longueur de perçage de trou. Le comportement le plus stable d'usure est pour le foret en carbure solide et s'identifie entre 0 et 1800 mm de la longueur de perçage dans lequel le changement maximal d'usure est environ 1 mm. Comme l'autre résultat, les outils à tête amovible ne sont pas recommandés pour les trous plus profonds que 1.5 fois le diamètre de la plaquette.

ABSTRACT

More than 75% of the parts in the car and aerospace industry have holes. The quality level of bored holes (several tens of thousands of holes) has a high cost which must be controlled. Thus the industrial manufacturers are obliged to invest in the development of new materials and also to check the manufacturing process of these new products. Among the new materials we can find the CMM that is a composite with metal matrix containing reinforced ceramics with aluminum particle. The reinforcement particles which improve the wearing resistance of this new composite use the cutting tools. There is a graphitic composite (GrA-Ni®) containing an aluminum matrix reinforced with soft covered nickel graphite particles and hard particles of Al_2O_3 or SiC.

During fabrication by turning or milling, the tool is placed outside the substance. On the other hand, for drilling, the tool is placed inside the material and the chips remain in the zone of cut and take part in the process of wear of the tool. For this process, the particle of reinforcement which improves the wear resistance of these new composites uses the cutting tools quickly. Because of this complexity, we need a careful study of each parameter of drilling and a quantitative comparison between them. This study is based on the comparison of the drills. There are two types of drilling tool, the twist drill and the plate type. Our drilling tests were carried out for these two tools: a solid carbide tool which represents the helicoids type and the tool with a removable head which represents in plate type. We chose two industrial examples, Guhring (for solid carbide) and Iscar (for the removable head) for our experiments. In general, the comparisons are quantitative and subjective, but in our work, we need a qualificative comparison. We want compare the tools in a specific context and our objective are to obtain all the important parameters of cut.

In the first stage, for each drill, we need to know what is used in every industry and the degree of importance of the elements of drilling. In our project, we studied the SME of the car industry. The second stage is to find the most stable zone of drilling to have the best output for the two drills. According to the study of Margarit (Margarit L April 2006), this stable zone is the combination of progress 0.2 mm/rev and speed 6000 rpm. For the third stage, we need a method for a qualifying comparison between the two drills Guhring and Iscar. To arrive at this objective, we chose the method Goal Question Metric (GQM). In order to find the relationship between the principle of quality and the parameters used in our experiment, we adopted for the first time the approach Goal Question Metric (GQM) (BASILI, 1992), which is a method used in other fields of science such as software engineering. We tried to quantify (define numerically) our definition of quality according to the measurable indicators (our parameters of drilling) to apply them within the framework of GQM. The advantage of GQM is that one can apply any parameter (for example the parameter of the price of the tool) in our evaluation of quality. In other words, we define quality in the form of a polynomial in which each measured parameter has a weight of importance. More specifically, we compare the numerically expressed attribute of quality of two tools according to its relationship with three secondary criteria (view as the questions of measurement): the quality of hole, price of the tool and the lifespan of the tool. Finally, we defined each one of these questions according to metric following:

- 1-wear,
- 2-force & moment,
- 3-roughness,
- 4-circularity & cylindricity.

For drillings of a composite with metal matrix (CMM) with mass production, the best choice of drill is the diamond drill. But in our comparative study of the tools, we considered SME, which have different limitations. For example, for certain SME, the parts are very expensive, the quality of the hole is more important than the lifespan of the tool, therefore the factor of importance for the lifespan of the tool can dominate over

the factor of the price. On the other hand, for many other SME, like the companies in the car industry, the lifespan of the tool is more important than the quality of hole. Therefore, in SME where the drilling of CMM is made, the factor of cost of the tool can be very dominating over the lifespan of the tool. In order to be certain of the results obtained for our measurements, we have repeated our experiments. According to our experiments, the quality of solid carbide drill was better in comparison to the other drill. Moreover, the lifespan of the solid carbide drill is (2200mm) approximately 4 times longer than that of the drill with a removable head (450mm). We identified 3 different classes of behaviors of wear compared to the change length of drilling of hole. The most stable behavior of wear is for the solid carbide drill and is identified between 0 and 1800 mm length of drilling in which the maximum change of wear is approximately 1mm. Like in other studies, the tools with removable head are not recommended for the holes deeper than 1.5 times the diameter of the plate.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VIII
TABLE DES MATIÈRES	XI
LISTE DES FIGURES.....	XV
LISTE DES SYMBOLES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	XX
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 - CADRE THÉORIQUE.....	5
1.1 COMPOSITES À MATRICE MÉTALLIQUE (CMM)	6
1.2 PROPRIÉTÉS DES CMM.....	8
1.3 APPLICATIONS DES CMM.....	8
1.4 COMPOSITE GRAPHITIQUE GRA-NI®.....	15
1.5 MÉTHODES D'USINAGE (CMM).....	18
CHAPITRE 2 - ORGANISATION GÉNÉRALE DE TRAVAIL	20
2.1 IMPORTANCE DU DOMAINE	20
2.2 OBJECTIF DE RECHERCHE	20
2.3 TRAVAUX EXISTANTS	21
2.4. MISE EN SITUATION	22
2.5. CRITÈRES DE CHOIX DES OUTILS	23
2.5.1 <i>Foret</i>	23
2.5.1.1. Éléments du foret.....	23
2.5.1.2. Angle du foret.....	25
2.5.2 <i>Types du foret</i>	30
2.5.2.1 Foret hélicoïdal.....	30

2.5.2.2 Foret à tête amovible	31
2.5.2.3 Foret à lame (spade drills)	32
2.5.3 USURE DE L 'OUTIL DE COUPE.....	33
2.5.4 <i>Choix d'outil</i>	38
2.5.4.1 Foret carbure solide	38
2.5.4.2. Foret à tête amovible	39
2.5.5 <i>Machine</i>	40
2.5.6. <i>Acquisition des données</i>	42
2.5.7 <i>Capteur de force et de charge</i>	42
2.5.8 <i>Capteur de couples</i>	42
2.5.9 <i>Force et moment</i>	42
2.5.10 <i>Logiciel utilisé pour faire l'acquisition des données</i>	43
2.5.11 <i>Rugosité</i>	49
2.5.12 <i>Géométrie du trou : circularité et cylindricité</i>	51
CHAPITRE 3 - ARCHITECTURE DE SYSTÈME ET AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES	55
3.1 MODÈLE THÉORIQUE ET ARCHITECTURE DU PERÇAGE (LAPORTE S. 2005).....	60
3.1.1 <i>Modèles expérimentaux (1-2)</i>	61
3.1.1.1 Définition force	61
3.1.1.2. Définition du moment de coupe	63
3.1.1.3. Pression spécifique	64
3.1.2 <i>Modèle phénoménologique (2-3)</i>	65
3.1.2.1 Usure.....	65
3.1.2.2 Forme de copeau.....	67
3.1.2.3 Rugosité.....	68
3.1.2.4 Géométrie du trou.....	69
3.1.2.5 Durée de vie de l'outil	70
3.1.3 <i>Solution optimale et corrélation entre les modèles (1-3)</i>	72

3.2. PLAN FINAL DE COMPARAISON	77
CHAPITRE 4 - TEST DE PERÇAGE ET COMPARAISON DES OUTILS PAR LA MÉTHODE GQM.....	80
4.1 DESCRIPTION DES TESTS	80
4.2 TESTS EFFECTUÉS	81
4.2.1 <i>Mesure de l'usure Vb</i>	81
4.2.1.1 Forets en carbure solide.....	81
4.2.1.2 Forets à tête amovible.....	87
4.2.2 <i>Vérification forces et moments</i>	91
4.2.2.1 Forets en carbure solide.....	91
4.2.2.2 Forets à tête amovible.....	99
4.2.3 <i>Études de la rugosité</i>	106
4.2.3.1. Forets en carbure solide.....	106
4.2.3.2 Forets à tête amovible.....	109
4.2.4 <i>Vérification de circularité et cylindricité</i>	112
4.2.4.1 Foret en carbure solide	112
4.2.4.2 Foret à tête amovible	117
CHAPITRE 5 - COMPARAISON DE FORET EN CARBURE SOLIDE ET FORET À TÊTE AMOVIBLE SELON L'APPROCHE GQM.....	121
5.1 Comparaison d'usure.....	124
5.2 Comparaison de force (Fz)	126
5.3 Comparaison de la rugosité	127
5.4 Comparaison de circularité et cylindricité.....	129
CONCLUSIONS.....	132
BIBLIOGRAPHIE	136

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 - Relation entre G et Q.....	56
Tableau 3.2 - Relation entre la qualité (Q) et les paramètres métriques (M)	58
Tableau 3.3 - Matrice de corrélation entre les entrées et les sorties métrologiques.....	74
Tableau 3.4 - Solution optimale de perçage	76
Tableau 3.5 - Relation entre la qualité et les paramètres finaux	78
Tableau 4.1 - Résultats d'usure pour le premier test	84
Tableau 4.2 - Résultats d'usure du deuxième test	84
Tableau 4.3 - Résultats d'usure pour le 1 ^{er} test	89
Tableau 4.4 - Résultats d'usure du 2 ^e test.....	89

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 - Pistons pour l'industrie automobile.....	10
Figure 1.2 - Pièces pour l'industrie automobile.....	10
Figure 1.3 - Piston : pièce coulée et pièce machinée.....	11
Figure 1.4 - Disque de frein.....	11
Figure 1.5 - CMM versus fonte.	12
Figure 1.6 - Composante du système de freinage du Boeing 767.	13
Figure 1.7 - Utilisation des CMM dans la construction des moteurs d'avion.....	13
Figure 1.8 - Composantes pour générateurs.	14
Figure 1.9 - Quelques applications des composites à matrice d'aluminium.....	15
Figure 1.10 - Échantillon en matériau composite GrA-Ni®.	16
Figure 1.11 - Microstructure du composite GrA-Ni® 10S.4G.....	17
Figure 2.1 - Éléments de forets.....	24
Figure 2.2 - Différents types de foret.	24
Figure 2.3 - Angle au sommet δ	26
Figure 2.4 - Angle de dépouille normale L_f	27
Figure 2.5 - Angle de dépouille latérale αf_0	27
Figure 2.6 - Angle de dépouille nominale αf_0	28
Figure 2.7 - Variation de l'angle γf (due à la forme de la goujure).	28
Figure 2.8 - Angle du foret.	29
Figure 2.9 - Formes de goujures./	29
Figure 2.10 - Foret classique monobloc en carbure.	31
Figure 2.11 - Foret à tête amovible.	31
Figure 2.12 - Forets à lame (spade drills).....	32
Figure 2.13 - Forets à tête amovible.....	32
Figure 2.14 - Foret à trois lèvres.	33
Figure 2.15 - Usure du foret.	35
Figure 2.16 - Usure des plaquettes (recommandation ISCAR).....	36

Figure 2.17 - Schéma de mesure pour l'usure Vb (source : Davim 2001).....	37
Figure 2.18 - Foret carbure solide.	38
Figure 2.19 - Plaquette Iscar.....	40
Figure 2.20 - Machine HU 40-T.....	41
Figure 2.21 - Montage de la pièce à percer sur la machine.....	41
Figure 2.22 - Schéma de l'installation des équipements.	43
Figure 2.23 - Interface graphique du programme.....	44
Figure 2.24 - Schéma du câble.	47
Figure 2.25 - Moments et forces.....	48
Figure 2.26 - Repère pour les moments et les forces.	49
Figure 2.27 - Photo du rugosimètre/profilographe (SV-C 4000H4).	51
Figure 2.28 - Schéma de la MMT LK (réf. : DMIS LAB MANUAL).	52
Figure 2.29 - Schéma du probe PH10M.....	52
Figure 2.30 - Axes de rotations A et B.	53
Figure 2.31 - Direction des axes X, Y et Z de la MMT.	54
Figure 3.1 - Schématique de relation entre G et Q.	55
Figure 3.2 - Schématique de G et Q avec M.	58
Figure 3.3 - Diagramme de corrélation entre les paramètres de perçage et la qualité de trou [Laporte 2005].....	60
Figure 3.4 - Force normale des alliages d'aluminium et de composites en fonction de la vitesse de coupe [Balout 2003].....	61
Figure 3.5 - Force normale en fonction de l'avance pendant le perçage des alliages d'aluminium et de composites.....	62
Figure 3.6 - Moment en fonction de l'avance dans l'opération de perçage.	63
Figure 3.7 - Pression spécifique de coupe K_s en fonction du temps d'usinage pour une opération de perçage [Balout 2003].	64
Figure 3.8 - Force normale et moment en fonction de l'usure de l'outil VB lors du perçage [J. P. Davim2001].	65

Figure 3.9 - Usure du foret vs la profondeur de coupe [J. P. Davim2001].	66
Figure 3.10 - Longueur des copeaux en fonction de la vitesse de coupe. [Balout 2003].....	67
Figure 3.11 - Rugosité en fonction du temps d'usinage [J F Davim 2001].....	68
Figure 3.12 - Mesures de la géométrie de trou [S. Laporte 2004].....	69
Figure 3.13 - Nombre de trous versus les valeurs normalisées des mesures de la géométrie de trou.....	70
Figure 3.14 - Durée de vie de l'outil (T) en fonction de l'avance (f).....	71
Figure 3.15 - Durée de vie de l'outil (T) en fonction de la vitesse de coupe.	71
Figure 3.16 - Mesures de la géométrie de trou [S. Laporte 2004].....	72
Figure 3.17 - Comparaison des signaux A et B par rapport à N et f [S. Laporte 2004].	73
Figure 3.18 - Comparaison des coefficients de corrélation des signaux A et B par rapport à N et f [S. Laporte 2004].	74
Figure 3.19 - Valeur optimale en fonction de la génération retenue utilisant l'algorithme génétique.....	76
Figure 3.20 - Schéma de qualité d'outil avec des paramètres finaux métriques.....	78
Figure 4.1 -Progression de l'usure pour le foret en carbure solide Guhring(G).....	82
Figure 4.2 -Usure foret Guhring.....	83
Figure 4.3 - Usure de l'outil vs longueur de perçage (1er test).....	85
Figure 4.4 - Usure de l'outil vs longueur de perçage (2e test).	86
Figure 4.5 - Moyenne de l'usure de l'outil vs longueur de perçage.....	87
Figure 4.6 -Photos (P) d'usure pour le foret à tête amovible Iscar (I).....	88
Figure 4. 7 - Usure de l'outil vs longueur de perçage (1er test).....	90
Figure 4.8 - Usure de l'outil V_B vs longueur de perçage (2e test).....	90
Figure 4.9 - Comparaison usure pour foret à tête amovible 6000 rpm.....	91
Figure 4.10 - Mesure de la force et le moment (foret).	92
Figure 4.11 - Matériau collé sur le foret carbure solide.	93
Figure 4.12 - Variation de la force F_z , foret Guhring (2e test).	94
Figure 4.13 - Répétitivité des données pour la force F_z , foret Guhring.....	95

Figure 4.14 - Moyenne de la force Fz, foret Guhring, pour le premier et le deuxième tests.....	95
Figure 4.15 - Force Fz versus usure Vb, perçage avec foret en carbure solide Guhring	96
Figure 4.16 - Usure Vb versus Force Fz, perçage avec foret Guhring, carbure solide. .	97
Figure 4.17 - Comparaison des tests nos 1 et 2.....	98
Figure 4.18 - Variation du moment Mz par rapport à la longueur de perçage.	98
Figure 4.19 - Force Fz. Outil à tête amovible, f=0.2 mm/tr, 6000 rpm.....	100
Figure 4.20 - Force Fz, Outil à tête amovible, f=0.2 mm/tr, 6000 rpm.....	101
Figure 4.21 - Répétitivité des données pour la force Fz, foret à tête amovible.....	102
Figure 4.22 - Moyenne de la force Fz versus de la longueur de perçage, foret Iscar...	103
Figure 4.23 - Usure Vb versus force Fz, pour foret à tête amovible (1 ^{er} test).....	104
Figure 4.24 - Usure Vb versus force Fz pour foret à tête amovible (2 ^e test).....	104
Figure 4.25 - Répétitivité des données pour la force Fz, foret à tête amovible.....	105
Figure 4.26 - Rugosité Ra en fonction de la longueur de perçage pour forets en carbure solide, test 1.....	107
Figure 4.27 - Rugosité Ra en fonction de la longueur de perçage pour forets en carbure solide, test 2.....	108
Figure 4.28 - Rugosité Ra en fonction de la longueur de perçage pour forets à tête amovible, test 1.....	110
Figure 4.29 - Rugosité Ra en fonction de la longueur de perçage pour forets en carbure solide, test 2.....	111
Figure 4.30 - Variation du diamètre de trou à 15 mm de profondeur en fonction de la longueur de perçage.....	112
Figure 4.31 - Variation du diamètre en fonction de la longueur de perçage.	113
Figure 4.32 - Variation du diamètre en fonction de la longueur de perçage.	114
Figure 4.33 - Erreur de circularité par rapport à la longueur de perçage.	114
Figure 4.34 - Changement de la géométrie de trou par rapport à la longueur de perçage pour foret en carbure solide.....	115
Figure 4.35 - Changement de la géométrie pour le foret en carbure solide.	116

Figure 4.36 - Variation du diamètre par rapport à la longueur de perçage.	117
Figure 4.37 - Erreurs de circularité par rapport à la longueur de perçage.....	118
Figure 4.38 - Variation de diamètre en fonction de la longueur de perçage.	119
Figure 4.39 - Erreur de circularité par rapport à la longueur de perçage.	120
Figure 4.40 - Changement de la géométrie de trou pour le foret à tête amovible.	120
Figure 5.1 - Schématique de relation entre G et Q.	122
Figure 5.2 - Trois phases de courbes de l'usure pour foret en carbure solide.....	125
Figure 5.3 - Variation de la force pour deux forets Guhring et Iscar	126
Figure 5.4 - Profilogramme de la surface pour guhring 6000 rpm, avance 0.2	128
Figure 5.5 - Profilogramme de la surface, 6000 rpm, avance 0.2 mm/tr, Iscar	129

LISTE DES SYMBOLES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

d	diamètre du foret (mm)
f	avance par tour (mm/tr)
l	profondeur de trou (mm)
v	vitesse de coupe (m/min)
D	diamètre du trou réalisé
F	effort de pénétration (daN)
M	couple nécessaire à la coupe (Nm)
N	vitesse de rotation de l'outil (tr/min)
α_f	dépouille latérale (degré)
α_n	dépouille normale (degré)
α_{f0}	dépouille nominale (degré)
δ	angle de pointe ou angle au sommet (degré)
γ_f	angle de coupe latérale (degré)
γ_n	angle de coupe normale (degré)
MMC	Metal Matrix Composite, acronyme en langue anglaise
CMM	Composites à Matrice Métallique, acronyme en langue française
RPM	Révolution par minute, acronyme anglais pour la vitesse de rotation de l'outil

INTRODUCTION

Le perçage est une opération stratégique pour toute opération d'usinage. Il représente 40 % de toutes les opérations d'usinage. Plus de 75% des pièces dans l'industrie automobile ou aérospatial ont des trous. Depuis les années soixante-dix, le développement du matériau composite à matrice métallique s'est répandu grandement dans l'industrie aéronautique, puis dans l'industrie automobile. La raison pour laquelle ils sont utilisés est due aux distinctions des propriétés qu'ils ont par rapport à celles des métaux traditionnels, notamment dans le rapport poids/volume et sa résistance à l'usure. À titre d'exemple, dépendamment de sa composition et mode de fabrication, la densité d'un composite à matrice métallique peut être 3 fois plus petite qu'un acier et avoir la même résistance à la rupture, une meilleure résistance à l'usure, une meilleure conductivité thermique, etc. En 1993, la compagnie INCO a fabriqué une matrice d'alliage d'aluminium renforcée avec un mélange de SiC et de graphite revêtu de nickel. Cette famille de composite a été nommée GrA-Ni®.

Toutefois, le problème pour ce genre de composites se trouve dans la difficulté d'usinage. Étant donné leur nature abrasive, les matériaux composites à matrice métallique font que les outils de coupe s'usent très rapidement, ce qui a comme effet les coûts d'usinage élevés. Les particules de céramiques utilisées comme renfort (carbure de silicium, alumine ou carbure de bore) usent vite les outils de coupe. Cet aspect a été souligné depuis le début de la recherche en usinage des composites (Lane 1990 et 1992) et ultérieurement confirmé par des études approfondies (Songméné 2002). L'usinage des composites à matrice métallique est comparé avec l'usinage d'une meule abrasive.

Durant l'usinage par tournage ou par fraisage, l'outil est placé à l'extérieur de la matière. Par contre, pour le perçage, l'outil est placé à l'intérieur du matériau et les copeaux restent dans la zone de coupe et participent dans le processus d'usure de l'outil.

Aussi des particules de renfort qui améliorent la résistance à l'usure de ces nouveaux composites augmentent rapidement l'usure des outils de coupe. Le niveau de la qualité conditionne la tenue en service, donc la longévité des appareils; sa répétitivité (plusieurs dizaines de milliers de trous) a un coût élevé qui doit être maîtrisé. Les structures des appareils récents ou en cours d'étude font appel à des alliages d'aluminium toujours plus performants et à des volumes croissants de matériau composites et/ou de titane.

Il y a quelques récents travaux effectués dans ce domaine. Un de ces travaux est le projet *Auto21*, une partie faite par Margarit (Margarit L., avril 2006) qui se concentre sur la qualité de perçage du composite. L'objectif de la première partie de ce projet était de tester l'influence. Les différents outils de coupe ainsi que les différents paramètres d'usinage sur l'usure des outils et la qualité de surface afin de trouver les meilleurs paramètres de coupe.

Dans le présent travail, l'objectif de notre recherche est l'investigation d'influence de longueur de perçage sur l'usure des outils dans le processus de perçage des composites à matrice d'aluminium ainsi que sur la rugosité et la précision d'alésage. Pour atteindre cet objectif, nous avons adopté pour le domaine de génie mécanique pour la première fois le paradigme ***Goal Question Metric*** (GQM), qui est une méthode utilisée dans le domaine de génie de logiciel.

En effet, le paradigme GQM sert de modèle pour donner à une organisation des moyens de quoi mesurer. D'abord on doit déterminer le but, puis développer les questions associées à chaque but et finalement fournir des métriques qui peuvent mesurer ces questions. Le paradigme GQM permet d'avoir une meilleure planification, ce qui conduit à une meilleure implantation du programme (Basili 1992).

Nous avons adopté ce paradigme selon notre cadre de travail. Les détails de cette méthodologie seront présentés au chapitre 3. Par cette méthode, nous essayons

d'effectuer les tests pour deux outils de coupe avec les paramètres optimaux obtenus du projet précédent (la vitesse de coupe 6000 rpm et l'avance de coupe 0.2 mm/tr) et d'analyser ses résultats. Le cadre de notre projet se base sur deux séries de tests qui ont été effectuées pour des forets en carbure solide (GUHRING³) et des forets avec des plaquettes amovibles (ISCAR⁴) (*Indexable Head Drill*).

Dans notre méthode, pour utiliser le paradigme *Goal Question Metric*, nous avons besoin des étapes suivantes :

1. Plan de GQM :

Le plan d'organisation de notre étude est de mesurer la qualité des outils de perçage (voir chapitre 3).

2. Questions et paramètre de GQM :

Pour les questions et paramètre de comparaison des outils, nous avons considéré (voir chapitre 3) :

- qualité de trou;
- prix de l'outil;
- durée de vie de l'outil.

3. Données et tests :

Pour appliquer la méthode GQM, les activités suivantes sont nécessaires :

- identification des mécanismes d'usure des types de forets et comparaison des deux types de forets;
- étude de la rugosité et des dislocations pour chaque trou à percer;
- étude de la force et du moment pour les forets en carbure solide;
- étude de la force et du moment pour les forets à tête amovible;
- caractérisation du processus de perçage du point de vue de l'énergie nécessaire de coupe;

³ GUHRING est un fabricant d'outils de coupe avancés et de haute qualité.

⁴ ISCAR est un fournisseur d'outils de métallurgie de carbure de précision produisant un éventail d'insertions de carbure.

- évaluation de la qualité de surface des trous percés;
- étude de l'influence de la longueur de perçage de l'outil sur l'usure des outils, sur la force axiale F_z et le moment résistant à la broche M_z avec la vitesse constante de coupe (6000 rpm) et d'avance (0.2 mm/tr);
- étude de l'influence de longueur de perçage de l'outil sur la rugosité des surfaces obtenues ainsi que les erreurs de forme des trous (circularité, variation du diamètre et déviation de l'axe de trou).

Ce mémoire est structuré comme suit :

- Le chapitre 1 : Cadre théorique présente un aperçu global des composites à matrice métallique et regarde l'ensemble des travaux de recherche pour l'usinage de ces matériaux par l'enlèvement des copeaux, spécialement regardant le domaine du perçage.
- Le chapitre 2 : Organisation générale du travail présente le cadre théorique de notre travail, ainsi que les aspects théoriques et les outils de test et de mesure dans le cadre défini.
- Le chapitre 3 : Architecture de système et ajustement des paramètres présente l'architecture et la méthodologie prévues pour atteindre l'objectif de recherche.
- Le chapitre 4 : Test de perçage et comparaison des outils par la méthode GQM présente les résultats de recherche effectués selon le cadre défini dans les chapitres précédents.
- Le chapitre 5 : Comparaison de foret en carbure solide et foret à tête amovible présente les résultats des tests obtenus dans le chapitre 4.
- Conclusion et perspectives de recherche.

CHAPITRE 1 - CADRE THÉORIQUE

Dans ce chapitre, suite à de nombreuses recherches bibliographiques, nous allons faire ressortir les principaux éléments théoriques reliés au perçage d'un composite à matrice métallique (CMM). Les notions nécessaires pour comprendre la structure et les propriétés des CMM sont également présentées. Des exemples (photos) des pièces en CMM seront présentés pour souligner le rôle de l'usinage par enlèvement des copeaux dans la production des composantes industrielles.

Durant les 15 dernières années, le matériau composite à matrice métallique a évolué rapidement vu le développement des procédés métallurgiques d'obtention.

Les bénéficiaires traditionnels de ce type de matériau sont l'industrie avionique, les domaines militaires (aérospatial et armement) et la production des composantes pour les automobiles.

Les domaines militaires (armements, satellites) utilisent fréquemment les CMM mais la bibliographie donne seulement des informations génériques. Les propriétés tribologiques ainsi que la facilité de moduler les propriétés mécaniques et physiques font des CMM un domaine de recherche en pleine croissance.

Une étape de référence dans le domaine des CMM est représentée par le revêtement des particules de graphite avec du nickel ainsi que l'utilisation de carbure de silicium. Vu l'environnement concurrentiel sur le marché, les produits du point de vue métallurgique sont brevetés (Bell 1992). Les matériaux utilisés pour les tests présentés dans ce mémoire sont aussi des marques enregistrées (GrA-Ni®). Les applications des CMM dans la production des composantes pour l'industrie automobile sont aussi brevetées (Ford, Mercedes).

1.1 *Composites à matrice métallique (CMM)*

La possibilité de profiter des propriétés particulières du matériau pour répondre aux besoins spécifiques est la motivation la plus importante pour le développement des composites. De nos jours, de plus en plus de matériaux composites à matrice métallique remplacent des métaux classiques de façon à optimiser les propriétés de ces derniers, surtout au niveau de la densité et de la résistance à l'usure.

Les matériaux composites sont constitués d'une matrice « molle » (qui en général offre une très bonne ductilité, formabilité et conductivité thermique) dans laquelle sont introduits des renforts « durs » de dureté élevée et de faible expansion thermique. Les renforts peuvent être continus ou discontinus, orientés ou désorientés. Du point de vue de la nature des particules de renfort, la même source bibliographique (Masounave et al. 1994) donne la classification suivante:

- les particules molles, telles que le graphite et le talc; leur incorporation dans la structure des composites apporte des propriétés de friction appréciables;
- les particules dures, telles que le carbure de silicium (SiC), ont comme effet l'augmentation de la résistance à l'abrasion mais usent très agressivement les outils de coupe;
- les particules d'alumine, intermédiaires entre les deux classes précédentes.

Ces renforts sont classifiés aussi par leur nature chimique (oxydes, carbures, nitrides), leur forme (fibre continues, fibres courtes, particules) et leur orientation.

Les composites à matrice métallique sont du matériau d'une grande résistance à l'usure. Cette résistance dépend du type, de la taille et de la quantité de renforts tels que l'alumine ou le carbure de silicium. Les CMM ont aussi une contrainte d'écoulement et un module d'élasticité qui est équivalent à 1.5 fois ceux des alliages d'aluminium à

haute résistance. Ils ont aussi un coefficient d'expansion thermique semblable à celui du beryllium.

Ce type de particules abrasives est aussi la cause principale de problèmes d'usinage de composites à matrice métallique puisqu'ils entraînent, entre autres, une perte de précision et de qualité des pièces finies par rapport à l'usinage du matériau de base, étant donné que les outils de coupe en acier et carbure s'usent très rapidement et que leur taux d'usure est proportionnel à la nature abrasive de la pièce. Pour améliorer l'usinabilité, on peut aussi introduire des particules molles telles que le graphite, qui apportent des propriétés de lubrification.

Comme il existe une infinité de combinaisons possibles de constituants pour les composites métalliques, il est à constater que chaque type de composite à matrice métallique nécessite une optimisation des longueurs de perçage lors de l'usinage de ce matériau.

Les composites métalliques à base de particules font partie de la famille du matériau composites à matrice métallique à renfort discontinu, dont les particules ont une forme soit sphérique, soit polyédrique et une taille de diamètre entre 0,5 et 100 μm . Masounave et al. (1994) reconnaît trois groupes en terme de la nature des particules de renfort de CMM, soit les particules dures (SiC), les particules molles (le graphite et le talc) et les particules d'alumine.

Les CMM ont été utilisés pour la première fois dans les années soixante-dix dans les industries aérospatiale et aéronautique. Dix ans plus tard, leur application s'est répandue dans l'industrie automobile et aujourd'hui ils sont utilisés dans un grand nombre d'industries.

1.2 *Propriétés des CMM*

Les composites à matrice d'aluminium renforcée de particules de céramique sont caractérisés par :

- un faible rapport poids / volume;
- une haute résistance à l'usure;
- une conductibilité et une diffusibilité thermique élevées;
- une facilité à remplir les formes complexes de fonderie (Clark 1995);
- une bonne résistance à la fatigue;
- la possibilité d'être modulés afin d'obtenir :
 - o une rigidité et une résistance à la déformation comparables à celles du titane;
 - o une contrainte d'écoulement et un module d'élasticité d'une fois et demie plus grande par rapport aux alliages d'aluminium à haute résistance;
 - o une résistance à l'usure près de l'acier;
 - o un coefficient d'expansion thermique près de l'acier inoxydable ou du beryllium;
 - o une capacité élevée d'amortissement;
 - o une bonne conductibilité électrique.

1.3 *Applications des CMM*

Ci-dessus nous allons étudier en détail l'application des CMM dans différents domaines industriels :

À cause de leur faible coefficient de dilatation thermique, les CMM ont une importance particulière dans le domaine de l'aéronautique et l'aérospatial. Dans la construction des hélicoptères, les composites sont utilisés depuis plus d'une dizaine d'années (Clarke 1995, par la gracieuseté de Westland Helicopters).

Les CMM ont acquis une grande importance dans l'industrie des loisirs et articles tout usage à cause des propriétés comme :

- poids léger;
- coefficient de dilatation thermique faible ;
- bonne conductivité thermique;
- grande rigidité en assurant des déformations réduites.

On peut mentionner tout d'abord Duralcan et Aerospace Metal Composites (Clarke 1995, en se basant sur des travaux publiés en 1994 et 1995) qui ont développé des cadres de bicyclette pour la vente commerciale. L'industrie d'articles de golf peut devenir un bénéficiaire des composantes en CMM (Clarke 1995).

Voici d'autres domaines d'applications des CMM (<http://www.almmc.com>) :

- composantes pour le moteur d'aviation Pratt & Whitney 4000;
- composantes pour les avions de chasse F-16;
- pistons pour les moteurs Toyota diesel;
- disque et tambours de frein pour Plymouth Prowler et pour GM EV;
- arbres de transmission pour Chevrolet Corvette et GM S/T pick-up;
- composantes pour Motorola's Iridium Satellites;
- composantes pour les systèmes électroniques des automobiles (GM).

Dans le domaine de l'automobile, les applications les plus utilisées sont par Ford compagnie pour les chemises de piston et les disques de frein.

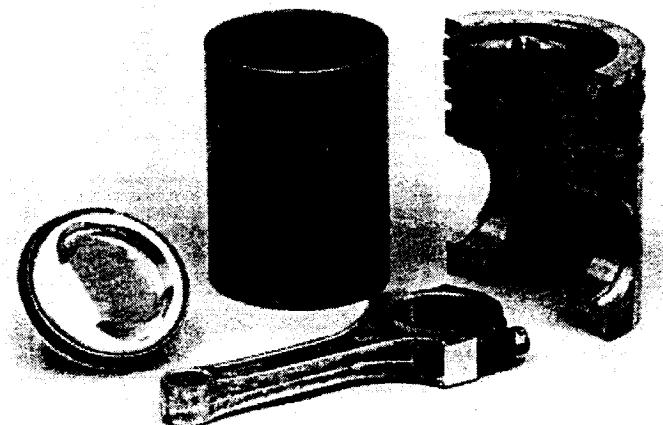


Figure 1.1 - Pistons pour l'industrie automobile.

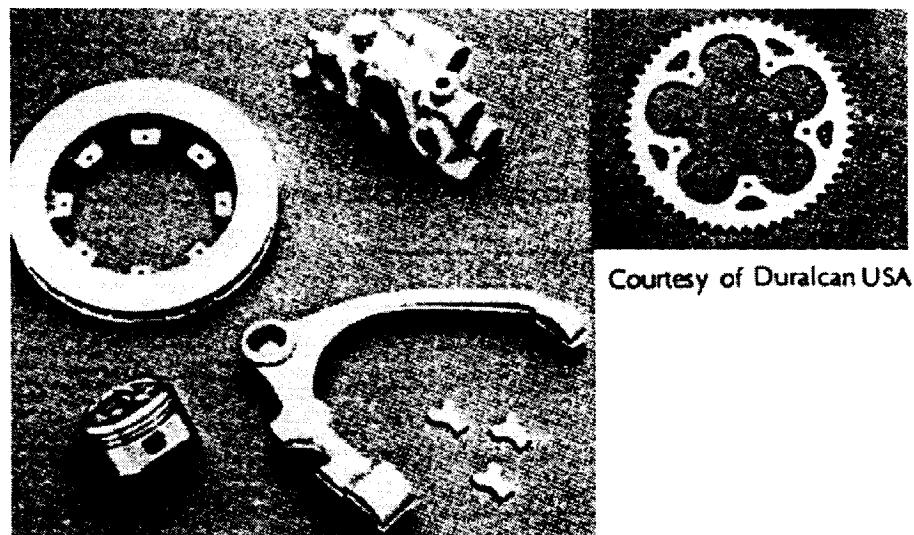


Figure 1.2 - Pièces pour l'industrie automobile.

Pour des zones où les sollicitations de contraintes sont élevées, plusieurs recherches ont eu lieu pour développer des CMM avec de meilleures propriétés.

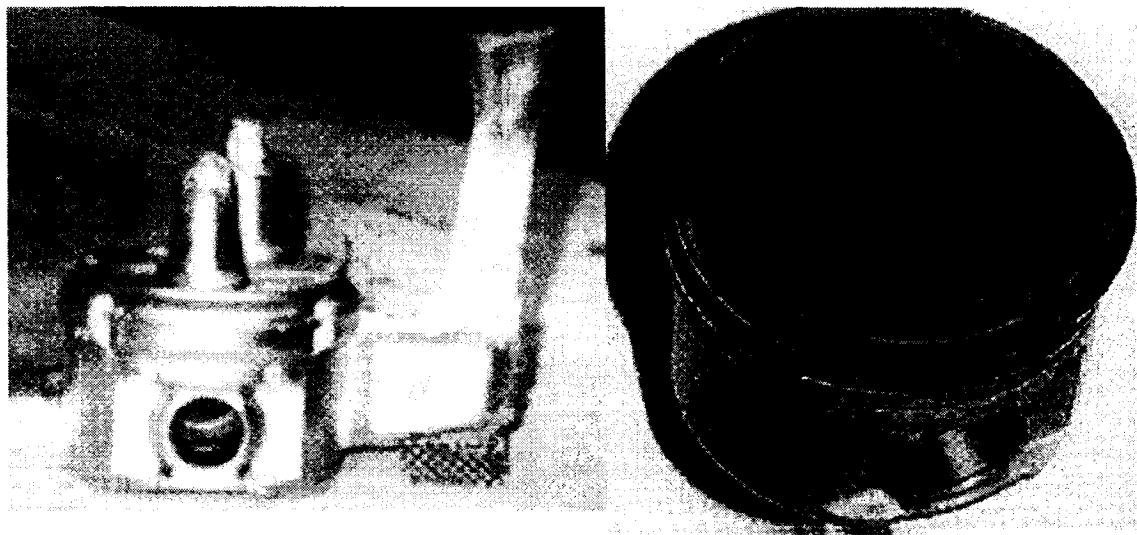


Figure 1.3 - Piston : pièce coulée et pièce machinée.

Concernant les disques à frein, les recherches se sont concentrées sur la résistance à l'usure et pour améliorer les propriétés thermiques.

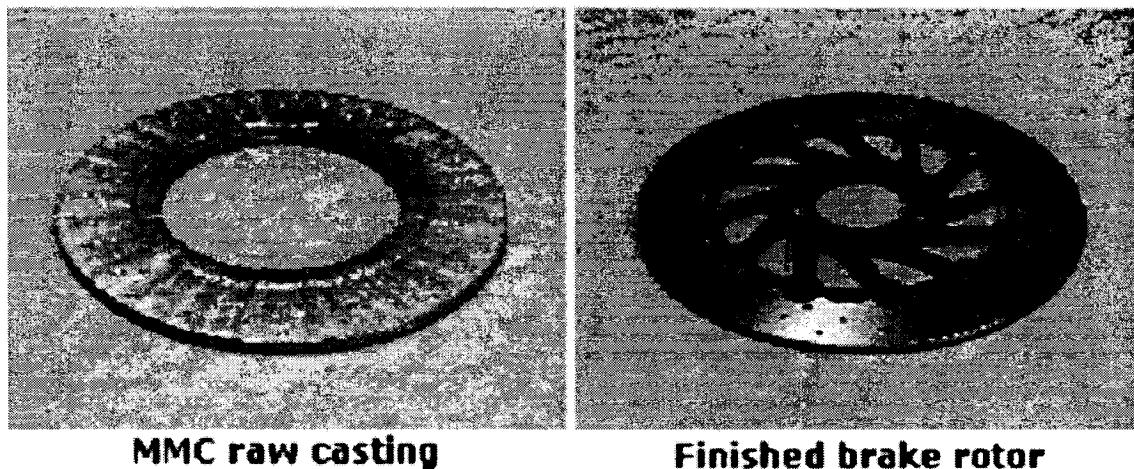


Figure 1.4 - Disque de frein.

Grâce aux composantes en CMM, la compagnie 3M a pu remplacer les systèmes de freinage en fonte, ce qui a comme avantage de réduire le poids de moitié et l'amortissement des vibrations.

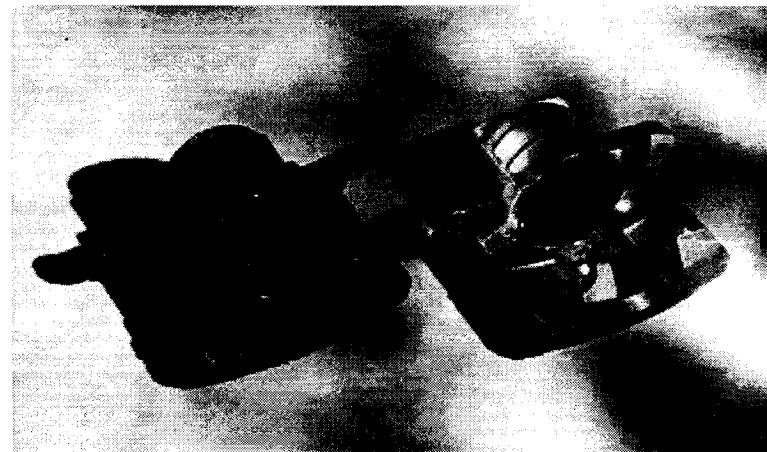


Figure 1.5 - CMM versus fonte.

Dans le domaine aéronautique durant certaines opérations telles que l'atterrissement d'urgence ou l'annulation de l'opération de décollage, une très grande quantité d'énergie est absorbée par les systèmes de freinage. L'utilisation des CMM pour les systèmes de freinage (parmi d'autres) est donc un très bon choix. La construction est basée sur de multiples disques stationnaires ou en mouvement de rotation. Ces disques doivent donc avoir une très bonne capacité de dissipation thermique ainsi qu'une résistance très élevée au choc thermique. Comme les CMM ont une bonne propriété face aux chocs et une bonne transmission de chaleur, ils sont de grande utilité dans ce domaine. Les compagnies Boeing et Airbus utilisent des CMM dans leurs montages. Afin de montrer le rôle des recherches en usinage des composites, une pièce composante du système de freinage du Boeing 767 sera présentée.

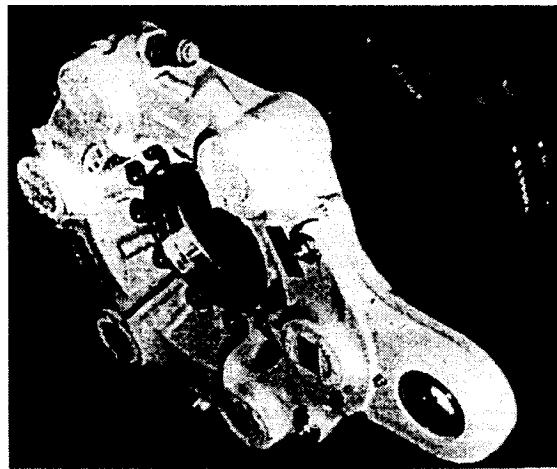


Figure 1.6 - Composante du système de freinage du Boeing 767.

On peut aussi mentionner l'utilisation des CMM pour les composantes hydrauliques destinées au domaine aéronautique (Orsborn) 1993. La propriété spécifique soulignée est la résistance à la fatigue donnée par des chocs hydrauliques. Vu le nombre et la variété des pompes hydrauliques, distributeurs et autres éléments de commande connus génétiquement comme actuateurs, l'usinage de précision va jouer pour longtemps un rôle majeur. Les tolérances hautement serrées des composantes hydrauliques font de l'usinage presque la seule modalité d'obtention de la forme finale.

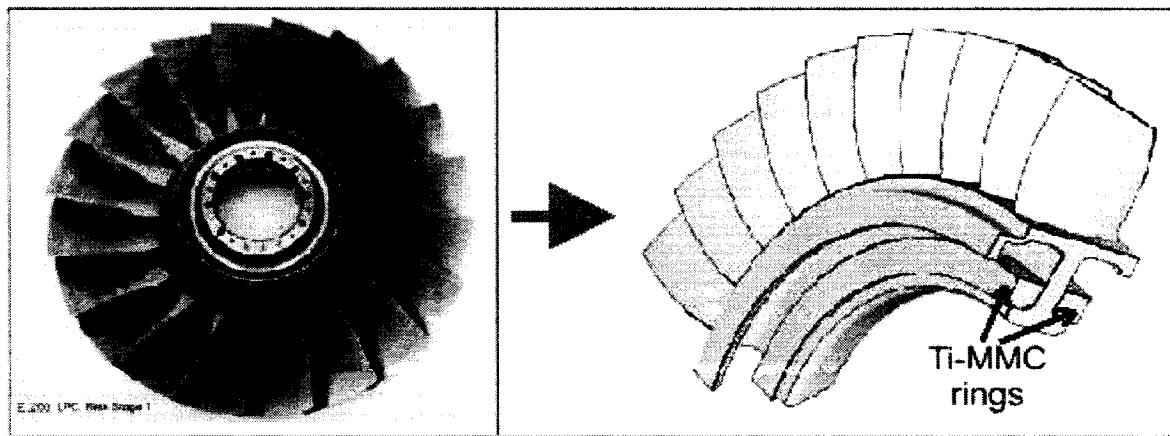


Figure 1.7 - Utilisation des CMM dans la construction des moteurs d'avion.

La compagnie 3M offre des composantes en CMM dans le but de permettre aux générateurs de tourner à une grande vitesse rotationnelle, utilisant la bonne propriété d'amortissement des vibrations.

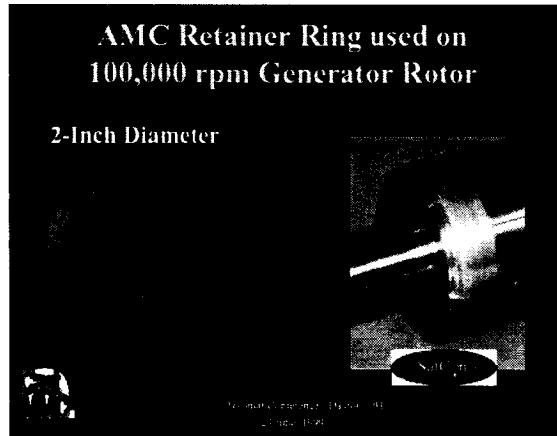


Figure 1.8 - Composantes pour générateurs.

Les difficultés en usinage ont été signalées par les travaux des pionniers du domaine (Lane 1992). La résistance à l'usure des CMM à matrice d'alliage d'aluminium reste dépendante de la grandeur et de la qualité des composantes de renfort (Lane 1992). Dans le deuxième chapitre seront présentées les notions reliées au perçage des CMM.

La durée de vie réduite des outils de coupe a comme effet immédiat le ralentissement de la fabrication en changeant les outils, une augmentation du coût de fabrication, une perte de précision dimensionnelle (circularité, direction du trou) et une détérioration de la qualité des surfaces usinées ainsi que la formation des bavures qui nécessitent une deuxième opération d'enlèvement des bavures. Dans le troisième chapitre seront présentés les résultats expérimentaux du perçage en faisant le point sur la durée de vie des outils.

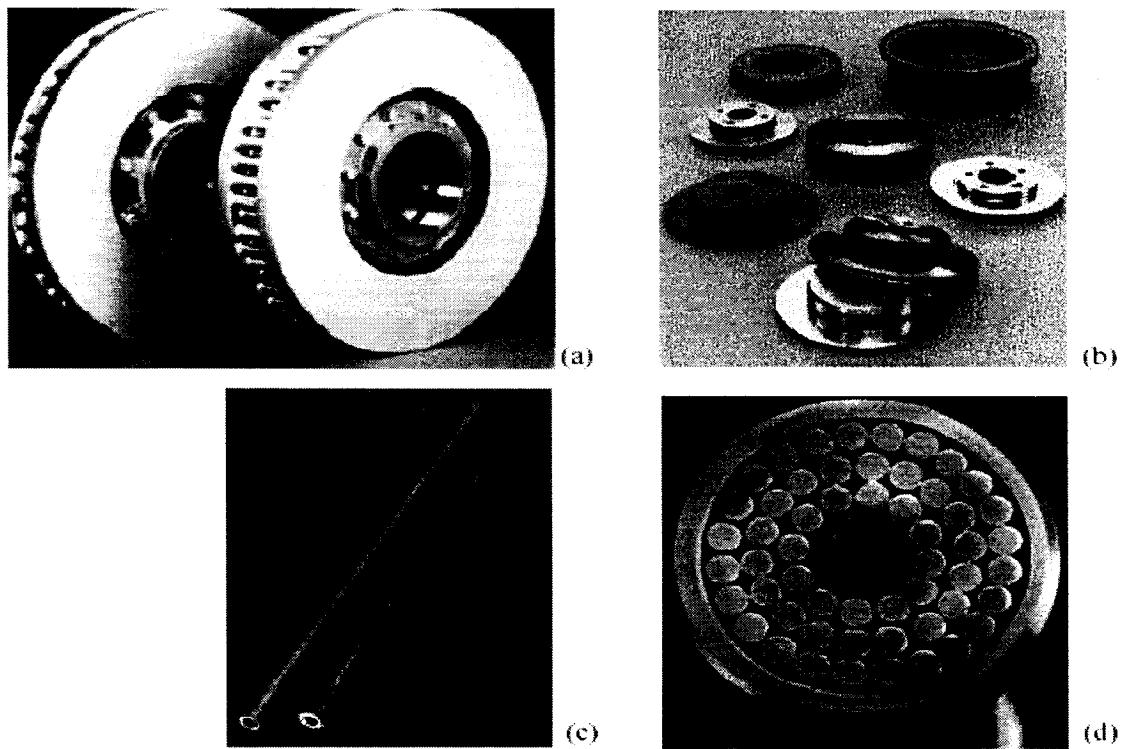


Figure 1.9 - Quelques applications des composites à matrice d'aluminium.

1.4 *Composite graphitique GrA-Ni®*

Le concept GrA-Ni® représente une famille de composites à matrice d'aluminium renforcée avec des particules de céramique (SiC ou Al₂O₃) et des particules de graphite revêtu de nickel (Songméné 2000).

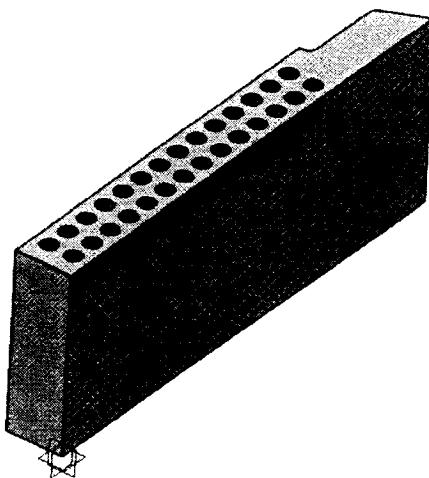


Figure 1.10 - Échantillon en matériau composite GrA-Ni®.

La technologie d'obtention des composites GrA-Ni® a été brevetée par la compagnie Inco Ltd en 1993 sous le numéro "Brevet Européen EP0567287A2" (Rohatgi). Le graphite est revêtu de nickel afin de faciliter la mouillabilité des particules et de les incorporer dans l'alliage d'aluminium. Depuis le début des travaux dans le domaine métallurgique des CMM, Badia et Rohatgi (1969) parlent de la difficulté de mélanger les particules de graphite dans les alliages d'aluminium en fusion à cause des tensions interfaciales dues au fait que le graphite ne se mouille pas dans l'aluminium et que les deux matériau ont des masses volumiques différentes (2.25 g/cm³ pour le graphite et aux alentours de 2.7 g/cm³ pour les alliages d'aluminium). En revêtant le graphite avec du nickel, le nickel offre une surface appropriée pour l'adhérence de l'aluminium et accroît la densité des particules de telle sorte qu'elles sont plus facilement étirées dans le mélange de l'alliage d'aluminium. Les informations bibliographiques compilées par Songméné (Songméné, 2000) démontrent que maintenant le rapport du volume du SiC à celui des particules de graphite à 1.8, la suspension du graphite et des particules de SiC se stabilise. L'évidence que le revêtement de la surface graphite par le nickel accroît sa mouillabilité dans l'aluminium en fusion a aussi été démontrée par Prévot et al. (1996).

Une synthèse professionnelle concernant les propriétés physiques des CMM est présentée dans Bell et al. (1997).

Les GrA-Ni® qui se trouvent sur le marché sont :

- GrA-Ni® 10S.4G (SiC et Ni-Gr),
- GrA-Ni® 5A.4G (Al₂O₃ et Ni-Gr) et
- GrA-Ni® 6S.2.5G (SiC et Ni-Gr).

Dans le cadre de ce projet, on étudiera le matériau GrA-Ni® 10S.4G, qui est le produit commercial le plus abrasif et difficile à usiner d'une compagnie automobile. Ce matériau est composé de 10 vol% de particules de SiC d'une taille de l'ordre de 14 µm et de 4 vol% de graphite revêtu de nickel où la taille des particules de graphite est de l'ordre de 80 µm et celle du revêtement de 5 à 10 µm.

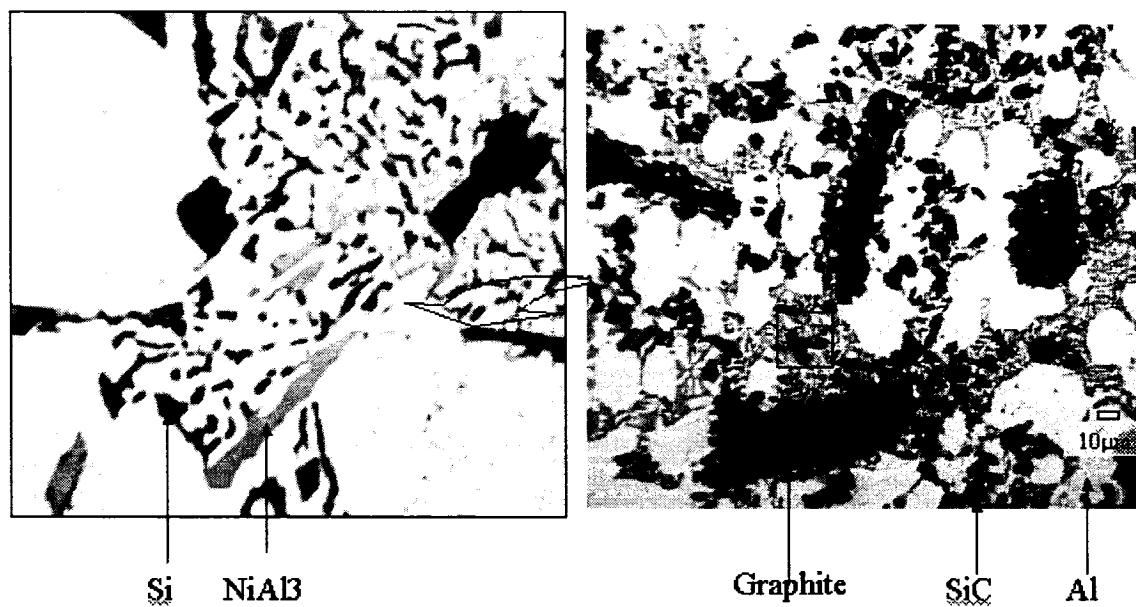


Figure 1.11 - Microstructure du composite GrA-Ni® 10S.4G.

Le revêtement de nickel sur le graphite augmente la densité du graphite et facilite le mélange dans l'aluminium.

1.5 Méthodes d'usinage (CMM)

Les méthodes traditionnelles d'usinage des composites à matrice d'aluminium sont le tournage, le sciage, le fraisage et le perçage dépendamment de l'application du composite. Parmi ces méthodes, le perçage introduit des défis importants notamment la présence d'une erreur dimensionnelle élevée et une mauvaise circularité due à la géométrie du bec et de la pointe des forets qui est plus complexe que celle des outils utilisés pour les autres méthodes.

D'autres méthodes non conventionnelles qui sont utilisées pour usiner les CMM sont entre autres :

- l'usinage par jet d'eau (Neussen, 1987);
- l'usinage par ultrasons (Gilmore, 1993);
- l'usinage par laser (Scheehan, 1993) et
- l'usinage par électroérosion (Manami et al, 1986).

En étudiant l'usinabilité des composites à matrice métallique de type GrA-Ni®, Songméné et Balazinski (1999) ont montré que l'augmentation de la densité des particules dures entraîne une usure abrasive des outils de coupe. Ceci explique pourquoi les outils qui coupent des alliages ayant plus de 15 vol% de carbure de silicium s'usent plus vite que ceux qui coupent des composites ayant 5 vol% de carbure de silicium. Par expérience, les alliages contenant plus de 10 vol% composantes de silicium sont traités de matériaux "abrasifs". Le composite GrANi 5A. 4G a montré le plus bas taux d'usure en comparaison aux autres composites. Les observations de Songméné et Balazinski (1999) font la remarque que les particules en céramique dans la matrice d'aluminium améliorent les propriétés de résistance à l'usure mais produisent une forte usure abrasive

des outils de coupe. Les mêmes auteurs (Songméné et Balazinski, 1999) ont trouvé que les composites GrA-Ni® jusqu'à une vitesse de coupe de 200 m/min présentent un exposant de Taylor élevé (0.69-0.95) qui dénote une faible influence des vitesses de coupe sur la vie d'outils.

Les résultats de recherche publiés par Davim (2001) montrent que la force F_z augmente avec l'usure de l'outil mais le moment n'est pas directement proportionnel. L'usure V_b est présentée comme linéaire croissante par rapport au temps, la courbe de tendance est une droite.

Les tests effectués par L. Margarit ont confirmé les résultats obtenus précédemment par Davim et par la compagnie Guhring. L'idée qui se dégage des travaux présentés par Hung (1997) vient de confirmer des observations similaires antérieures: le liquide de coupe avec les particules abrasives du matériau à percer forme une "pâte" abrasive et use vite les outils. L'enlèvement des copeaux à l'aide de l'air sous pression peut réduire l'usure des outils. Du point de vue industriel, la méthode est plus difficile à appliquer parce que les machines ne sont pas étanches et ne sont pas toujours équipées avec des systèmes d'aspersion des particules abrasives.

Par rapport aux besoins ou contraintes spécifiques pour chaque application, l'usinabilité peut être abordée du point de vue :

- quantité de matériau enlevé/ débit de copeaux dans une unité de temps ou entre deux affûtages de l'outil;
- durée de vie de l'outil pour des conditions imposées;
- état de surface et erreur de géométrie;
- puissance nécessaire;
- forme des copeaux.

Avant 1996, toutes les références bibliographiques publiées ne traitent pas les Gra_NiC. Et aussi dans la majorité des articles publiés, l'usinage de CMM est traité sans graphite.

CHAPITRE 2 - ORGANISATION GÉNÉRALE DE TRAVAIL

Dans ce chapitre, nous organisons les différents aspects de notre travail, ainsi que les aspects théoriques et les outils de test et de mesure dans le cadre défini.

2.1 *Importance du domaine*

Le prix du foret est l'aspect le plus important dans l'opération de perçage car le prix d'une plaquette en carbure est environ quatre fois plus élevé qu'une plaquette en carbure utilisée pour le tournage. Aussi le prix d'un porte-outil utilisé pour le perçage est deux fois plus élevé que le prix d'un porte-outil de tournage. La troisième raison est qu'il y a des trous dans plus de 75 % des pièces de l'industrie automobile ou aérospatiale. Finalement, la géométrie des forets est plus compliquée que la géométrie de la plaquette de tournage ou fraisage.

2.2 *Objectif de recherche*

Vu que la grande quantité des informations bibliographiques et la multitude des options de choix des outils de perçage ne présente pas de comparaisons entre les différents forets, nous proposons dans le présent mémoire une étude de qualité comparative entre les outils en carbure solide et les outils à tête amovible. Nous adoptons le paradigme GQM selon notre cadre du travail.

La recherche du perçage des composites CMM a comme objectifs:

- d'étudier l'influence de l'usure de l'outil sur la variation du diamètre de trou et la circularité de trou;
- d'étudier l'influence de l'usure sur la rugosité des surfaces de trous;
- de choisir une zone "acceptable" d'usure du point de vue qualité de trou pour la vitesse de rotation de l'outil constante (6000 rpm) et la vitesse d'avance constante (0.2 mm/tr);

- de faire des tests de perçage (dans la zone choisie comme rpm et avance) pour mesurer la force de pénétration (thrust) et le couple à la broche. Des enregistrements de vibrations et émission acoustique ont été également faits;
- de comparer les résultats obtenus pour les outils en carbure solide et les outils avec des plaquettes amovibles et de faire des recommandations pour le perçage industriel.

2.3 *Travaux existants*

1. L'usinage de GrA-Ni® par enlèvement des copeaux a été amplement traité par Songméné pour le fraisage; aussi ses travaux en perçage représentent la référence de départ.
2. L'usinabilité des CMM impose des recherches au cas par cas; la modélisation mathématique classique en usinage n'est pas toujours applicable pour CMM.
3. Jusqu'à date, il n'existe pas de modèle mathématique global pour l'usinage des composites GrA-Ni®.
4. La documentation bibliographique ne fournit pas de recommandation concernant le choix des outils en particulier vu leurs performances observées durant les tests.
5. L'usinabilité des CMM à base de particules varie selon la nature, la taille et la quantité des renforts.
6. L'influence du recouvrement des outils n'est pas soutenue dans la bibliographie par des études comparatives.
7. L'idée générale est que le liquide de coupe favorise la formation d'une pâte abrasive qui use très vite les outils.
8. L'enregistrement des forces, moments, vibrations et émission acoustique pour le perçage des composites n'est pas traité en détail; nos travaux apporteront à la communauté professionnelle des résultats supplémentaires issus d'un grand nombre de tests.

Les chercheurs ont accordé plus d'intérêt pour les tests de tournage et de fraisage et non pour le perçage (le travail se déroule "à l'extérieur de la pièce" et de plus le prix pour une tête amovible en tournage est beaucoup plus réduit que le prix d'un foret, et de plus une plaquette à plusieurs coins pour travailler).

2.4. *Mise en situation*

L'objectif de la première partie du projet (Margarit L., avril 2006) a été l'investigation d'influence des paramètres de coupe sur l'usure des outils dans le processus de perçage des composites à matrice d'aluminium. Dans ce projet, deux séries de tests ont été effectuées pour des forets en carbure solide et des forets avec des plaquettes amovibles afin de vérifier les objectifs suivants:

- l'étude de l'influence de la vitesse de coupe de l'outil et de la vitesse d'avance sur l'usure des outils, sur la force axiale F_z et le couple à la broche M_z ;
- l'étude de l'influence de coupe de l'outil et de la vitesse d'avance sur la rugosité des surfaces obtenues ainsi que les erreurs de forme des trous (circularité, variation du diamètre et déviation de l'axe de trou).

Les résultats obtenus de la première partie du travail étaient:

- les résultats du perçage sont dépendants du matériau, de la géométrie du revêtement des forets ainsi que des longueurs de perçage (avance et vitesse de rotation de l'outil);
- la zone la plus stable, du point de vue de la longueur de perçage, se trouve dans les limites suivantes :
 1. pour avance : 0.2 - 0.22 mm/tr;
 2. pour la vitesse de rotation de l'outil : 6000-8000 rpm.

Notre travail se base sur les résultats optimaux ci-dessus (la vitesse 6000 et la vitesse d'avance 0.2) afin de compléter les travaux suivants :

- étude de l'influence de la longueur de perçage de l'outil sur l'usure des outils, sur la force axiale F_z et le couple à la broche M_z avec la vitesse constante de coupe (6000 rpm) et d'avance (0.2 mm/tr);
- étude de l'influence de longueur de perçage de l'outil sur la rugosité des surfaces obtenues ainsi que les erreurs de forme des trous (circularité, variation du diamètre et déviation de l'axe de trou);
- comparaison de deux forets ayant la même situation du test;
- faire des tests de perçage (dans la zone choisie comme rpm et avance) pour mesurer la force d'avance (thrust) et le moment résistant à la broche, des enregistrements de vibrations et émission acoustique ont été également faits;
- comparer les résultats obtenus pour les outils en carbure solide et les outils avec des plaquettes amovibles et faire des recommandations pour le perçage industriel;
- étude de l'influence de la longueur de perçage sur l'apparition des dislocations.

2.5. *Critères de choix des outils*

2.5.1 Foret

2.5.1.1. Éléments du foret

Les éléments principaux d'un foret sont :

- face de dépouille,
- arête centrale,
- arête principale,
- bec d'outil,
- âme,
- face de coupe,
- listel,
- goujure.

On peut constater ces différentes parties dans la figure ci-dessous.

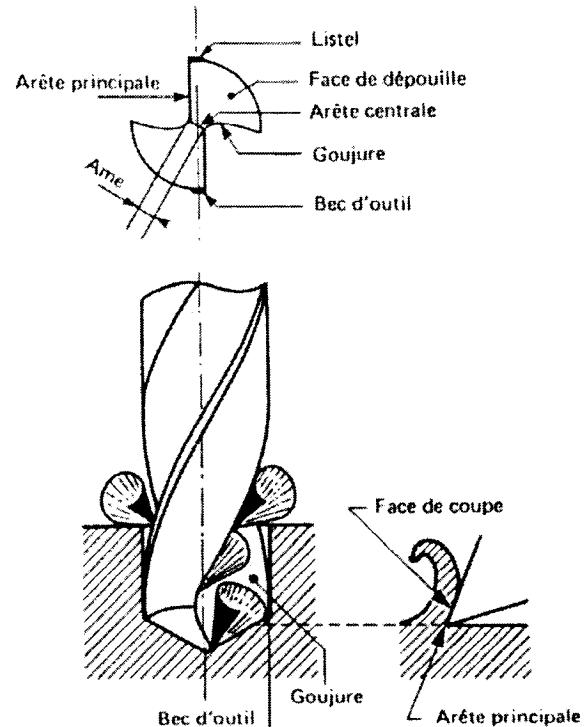


Figure 2.1 - Éléments de forets.

Nous constatons dans ces figures la diversité de la forme des canaux hélicoïdaux pour l'évacuation des copeaux. Chaque type de foret possède aussi une grande diversité de formes d'affûtages du point.

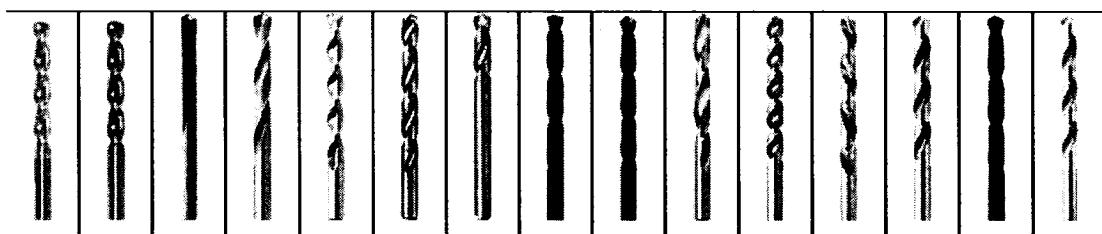


Figure 2.2 - Différents types de foret.

Un outil de coupe est défini en trois systèmes de références :

- système cinématique (les angles de positionnement sur le montage de la machine);
- système constructif ou les angles constructifs, nommé « outil en main »;
- système dynamique (l'outil au travail).

Selon le constructeur, les goujures ont des formes différentes dépendamment du procédé de fabrication utilisé et de la profondeur du trou ou du matériel à percer.

2.5.1.2. Angle du foret

Les principaux éléments dans le système constructif de l'outil sont :

- angle de dépouille normale;
- angle de dépouille latérale;
- angle au sommet ou angle du point;
- angle latéral de coupe.

L'angle du point ou l'angle au sommet est traditionnellement à 118 degrés, les outils produits pendant les dernières dix années ont la tendance d'augmenter l'angle de point, d'offrir de nouvelles géométries du point.

L'angle au sommet par définition est l'angle compris entre les projections des arêtes de coupe sur un plan parallèle à celles-ci et contenant l'axe de l'outil.

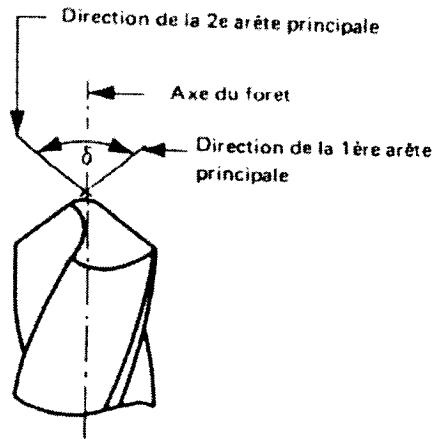


Figure 2.3 - Angle au sommet δ .

L'angle de normale α_n , c'est l'angle du dièdre formé par le plan tangent à la face de dépouille et le plan tangent au cône usiné par la pointe du foret, il est mesuré au point considéré comme l'arête de coupe dans le plan P_n perpendiculaire à l'arête de coupe.

L'angle α_n est utilisé pour faire le réglage des affûteuses de forets et au contrôle de la géométrie par le projecteur de profil en positionnant l'arête du foret perpendiculairement au plan de projection.

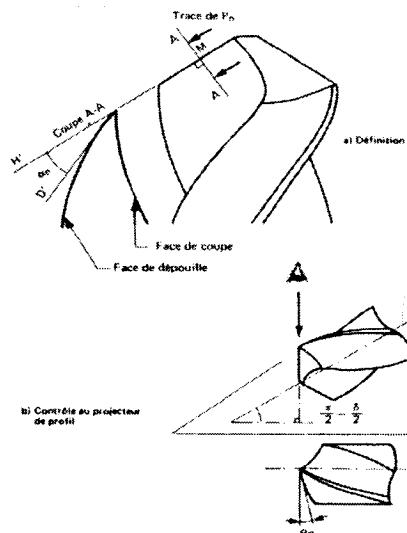


Figure 2.4 - Angle de dépouille normale L_f .

Aussi l'angle de dépouille latérale α_f est mesuré au point considéré de l'arête de coupe dans le plan perpendiculaire au rayon joignant ce point à l'axe de l'outil.

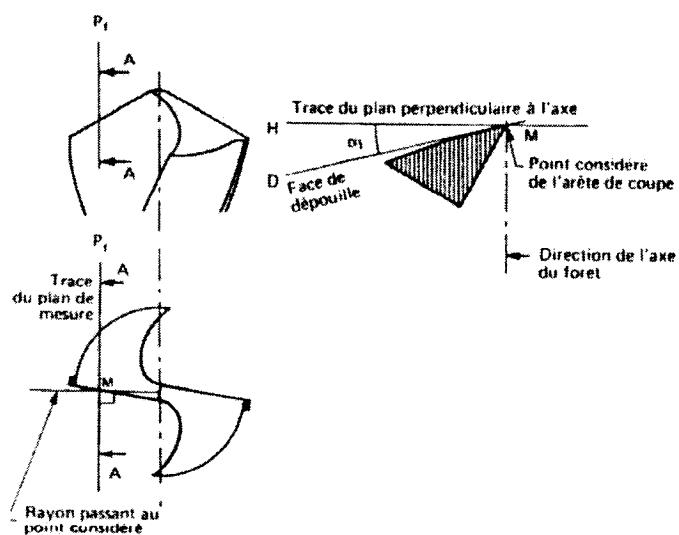


Figure 2.5 - Angle de dépouille latérale α_f .

Afin de contrôler la dépouille du foret, l'angle α_f sera mesuré au point du foret et sera noté α_{f0} , ce que l'on nommera « dépouille nominale du foret ».

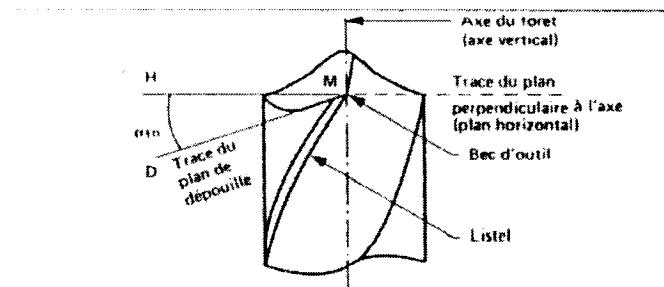


Figure 2.6 - Angle de dépouille nominale α_{f0} .

De plus, l'angle latéral de coupe γ_f est considéré comme l'angle γ_f compris entre le parallèle à l'axe du foret passant par le point considéré et la tangente au profil de la goujure dans le plan de mesure. Cet angle est mesuré dans le même plan que α_f .

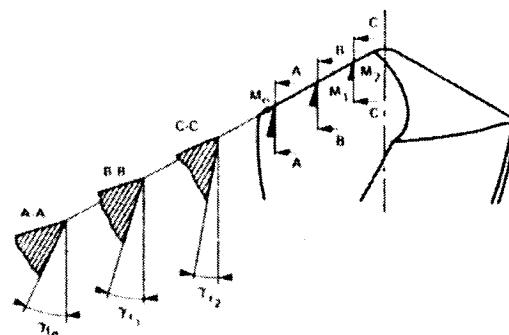


Figure 2.7 - Variation de l'angle γ_f (due à la forme de la goujure).

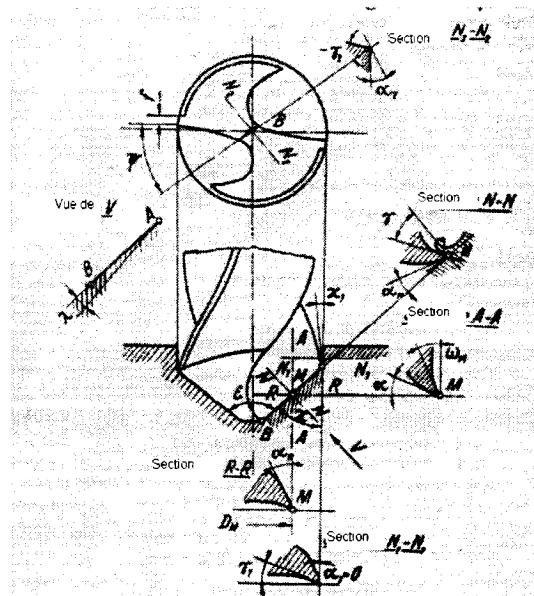


Figure 2.8 - Angle du foret.

Dans la figure ci-dessus, on remarque différentes formes de goujures :

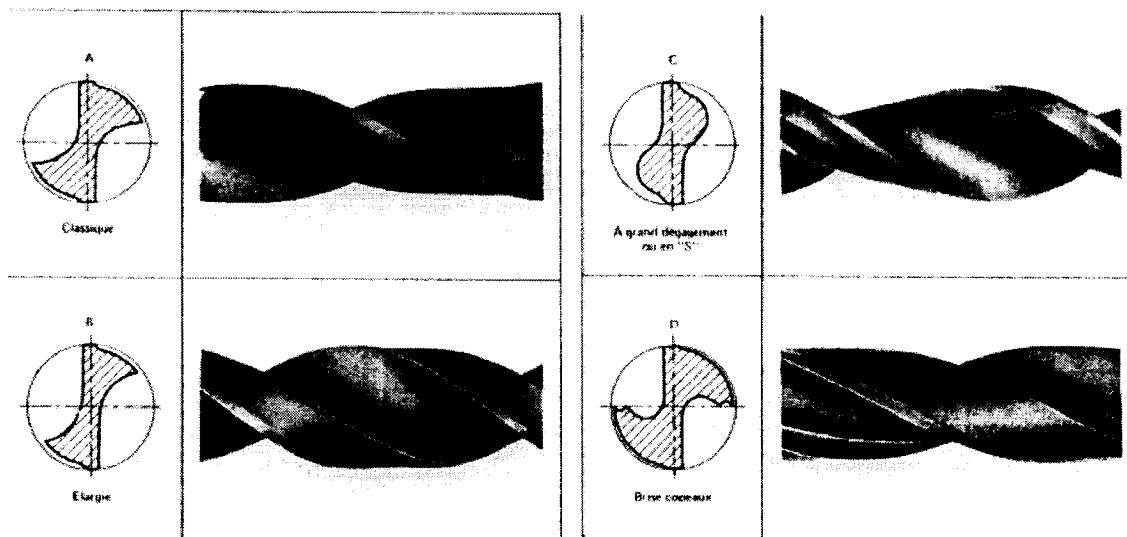


Figure 2.9 - Formes de goujures.

Cependant, la corrélation directe entre la qualité finale du trou et les paramètres de perçage nécessite une étude statistique qui a été jugée de dépasser nos capacités en

termes de temps, argent et moyen. Pour cette raison, nous planterons des modèles. Néanmoins, des modèles requièrent l'utilisation des quantités mécaniques mesurables. Ces quantités peuvent être la force mécanique, la pression, la température, le déplacement, etc. Malheureusement, pendant l'opération de perçage, l'outil est gardé à l'intérieur du matériau, ce qui rend les moyens classiques de mesure (tels que les approches thermiques ou vidéo) inappropriés. La mesure de la force mécanique nous aide à éliminer les restrictions qui nous ont été imposées. En effet, peu importe la position de l'outil dans le matériau, il est toujours possible de recueillir de l'information, en terme de force ou de moment, sur ce qui se passe réellement pendant la phase de coupe. Alors, l'étape intermédiaire qui a été choisie, pour analyser et lier les paramètres de perçage aux paramètres représentant la qualité de trou est l'évolution de forces et de moments.

2.5.2 Types du foret

2.5.2.1 Foret hélicoïdal

Les paramètres caractéristiques sont: l'angle de point, l'angle de l'hélice pour les cannelures d'évacuation des copeaux, la forme de la queue (ronde ou fraisé nommée Weldon).

La géométrie du point peut différer d'un fournisseur à l'autre ou le même fournisseur peut offrir divers modèles.

Burkes (1993) fait la revue des principaux modèles traditionnels sans trouver d'avantages spécifiques pour un type ou un autre.

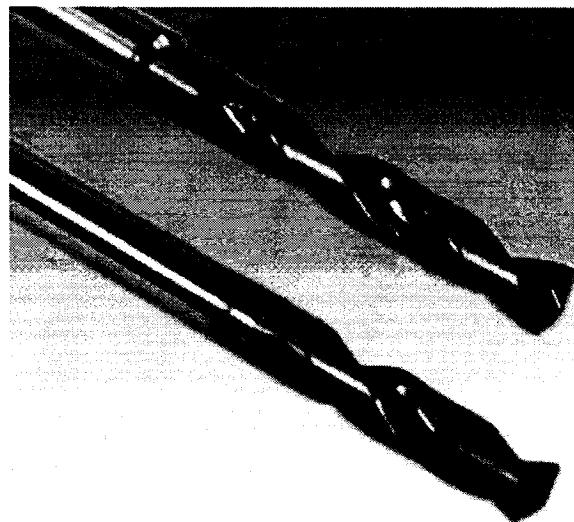


Figure 2.10 - Foret classique monobloc en carbure.

2.5.2.2 Foret à tête amovible

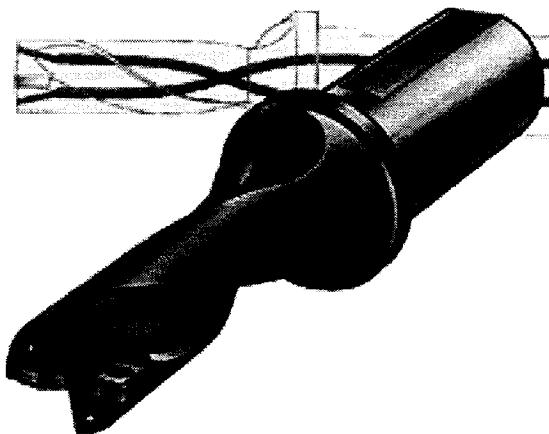


Figure 2.11 - Foret à tête amovible.

Les forets avec plaquettes amovibles ne sont pas disponibles régulièrement pour les diamètres plus petits que 12 mm. Ils peuvent être avec du refroidissement intérieur ou non. Leur avantage est le coût plus réduit des plaquettes comparativement à la solution "point rechargeable".

2.5.2.3 Foret à lame (spade drills)

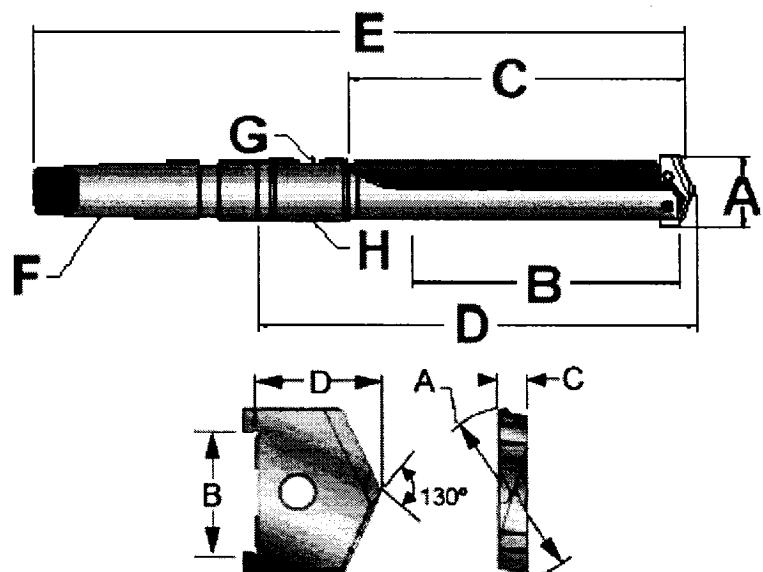


Figure 2.12 - Forets à lame (spade drills).

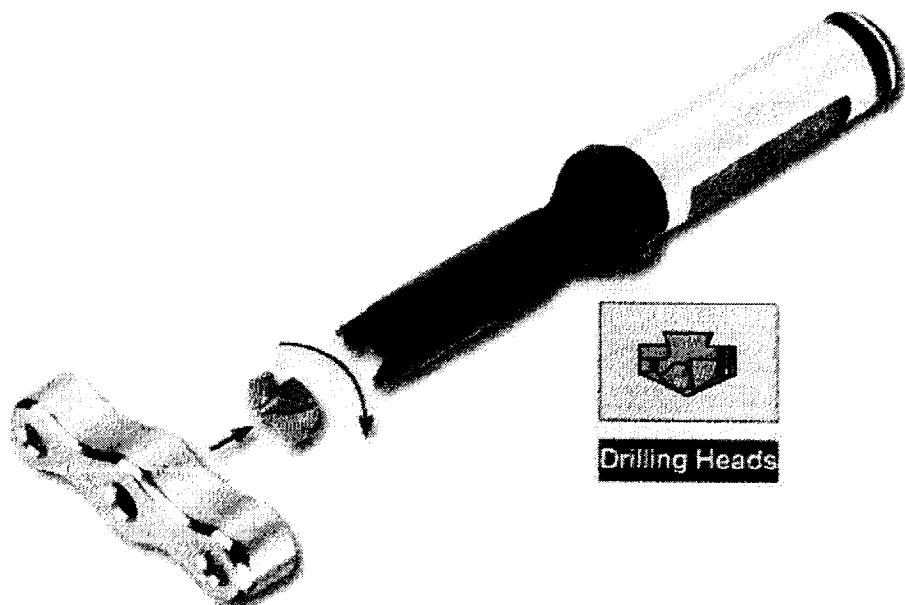


Figure 2.13 - Forets à tête amovible.

Les forets à lame ont l'avantage que l'affûtage est très facile à effectuer par les sous-traitants locaux pour un prix réduit. Ils resteront un type d'outils à suivre. Des références bibliographiques citées antérieurement ont mentionné que les forets monoblocs avec des canaux d'évacuation droits n'ont pas donné de bons résultats. Reste à voir si les nouveaux porte-outils ayant des nouveaux recouvrements donneront des résultats à retenir.

Foret à trois lèvres

L'avantage des forets à trois lèvres est la supériorité des trous (circularité et variation du diamètre).

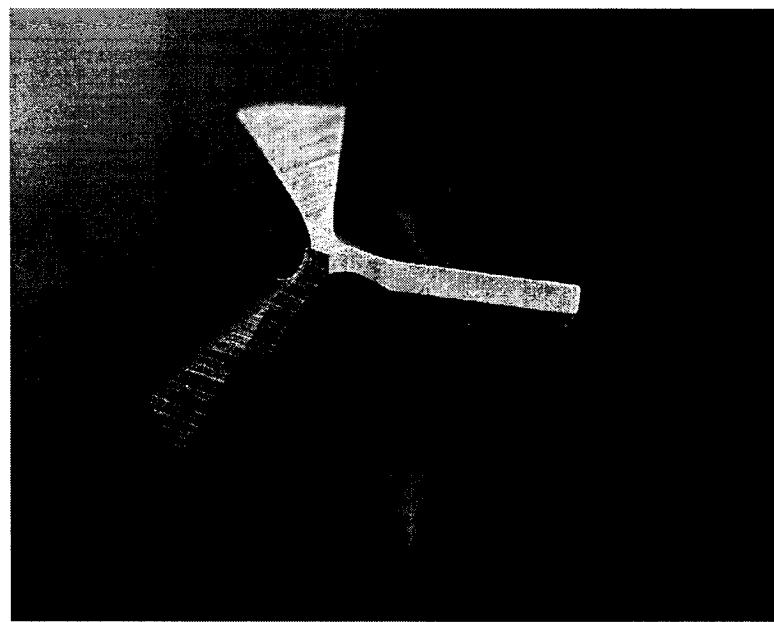


Figure 2.14 - Foret à trois lèvres.

2.5.3 Usure de l'outil de coupe

L'usure est normalement du frottement d'une surface dure sur une surface molle ou la présence d'une particule libre (telle que les particules de copeaux) entre les deux surfaces lors de l'opération de coupe.

Il y a des conséquences importantes dues à l'usure de l'outil de coupe telles que la détérioration de l'état de la nouvelle surface de notre composite ou l'apparition des erreurs dimensionnelles. En étudiant le phénomène de l'usure, on peut minimiser les erreurs et trouver des conditions de coupe optimale pour un composite et une méthode d'usinage donnée.

Il existe différents modes d'usure (Sandvik, 1994) :

- usure en cratère sur la face de coupe qui se produit sous l'effet des contraintes thermiques ou mécaniques causées par le frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil;
- usure en dépouille causée par l'abrasion due aux frottements entre la face en dépouille de l'outil et la pièce;
- mini-écaillages de l'arête de coupe sont aussi considérés comme une forme d'usure lors de l'usinage des CMM;
- arête rapportée;
- déformation plastique;
- fissures thermiques qui sont causées par des conditions thermiques qui dépassent les limites du matériel utilisé dans l'outil;
- fissures mécaniques qui sont causées par des conditions mécaniques qui dépassent les limites du matériau utilisé dans l'outil;
- effondrement;
- usure en entaille.

Afin de réduire l'usure, on pourrait penser à utiliser un lubrifiant, mais dans le cas des composites, la lubrification ne réduit pas le taux de l'usure (Baptista et Daqin, 1995). On peut donc tenter de faire des choix plus recensés sur les paramètres de coupe. On peut aussi essayer de fabriquer des outils de coupe plus durs. La résistance à l'usure de l'outil de coupe est déterminée par sa dureté superficielle qui doit être au moins 20 %

plus grande que celle de la pièce. On peut donc utiliser un revêtement de diamants ou des carbures (de titane par exemple) pour usiner les AMC.

Les éléments caractéristiques concernant l'usure des forets sont:

- usure de la dépouille;
- usure des listels;
- usure de la face de coupe.

Dans le chapitre 3 seront présentés les résultats de mesure de l'usure pour différentes valeurs des paramètres de coupe.

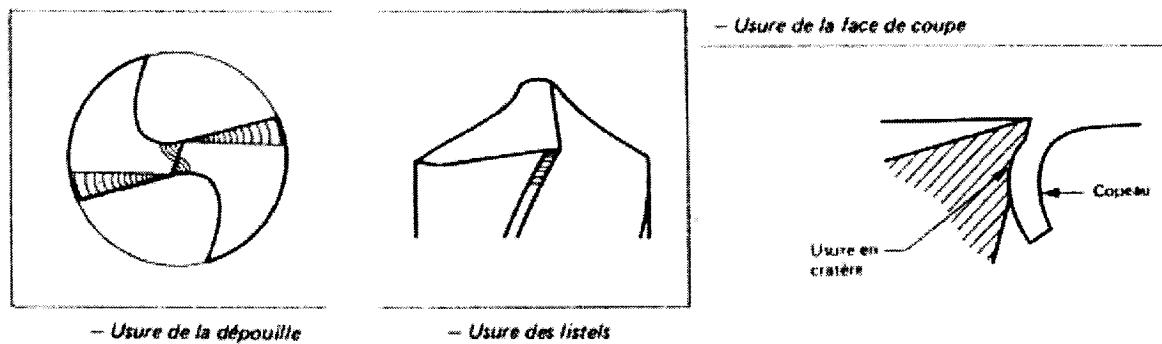


Figure 2.15 - Usure du foret.

Le constructeur Iscar, dans son catalogue d'outils, présente seulement une recommandation pour la valeur d'usure "au coin".

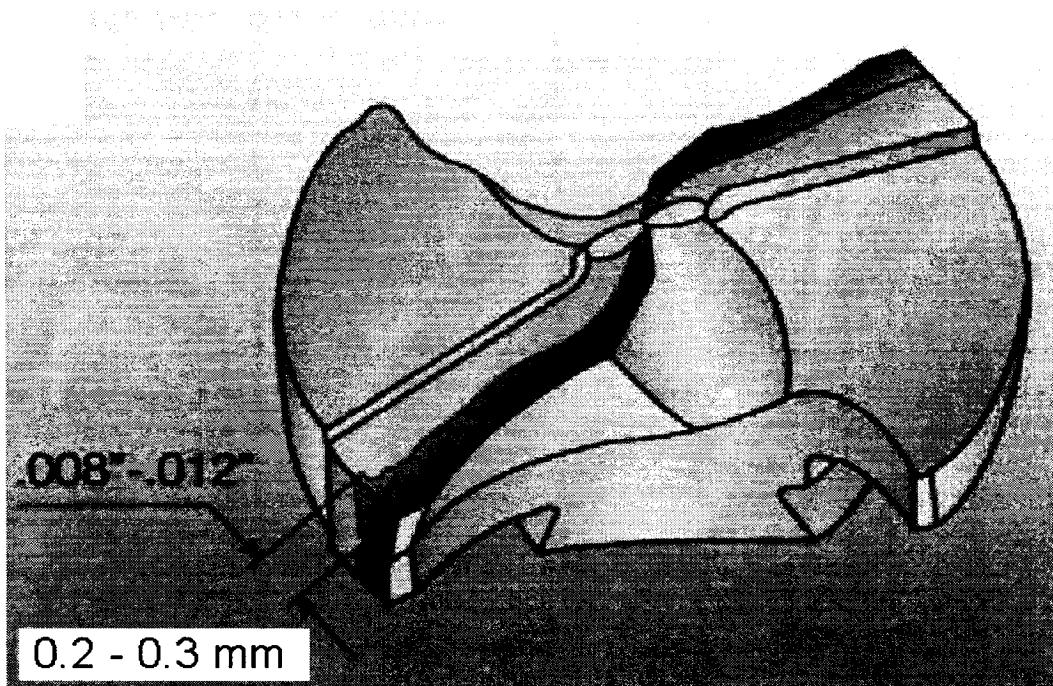


Figure 2.16 - Usure des plaquettes (recommandation ISCAR).

Afin d'établir le cadre pour les prochaines analyses de données, le concept classique d'usure V_B dans l'acceptation de la norme américaine ANSI/ASME B94.55M-1985 sera présenté. Pour faciliter la compréhension du concept, les explications sont données pour une arête coupante "droite" (en effet une plaquette pour tournage). L'analyse est identique pour les forets à lame. L'arête coupante est divisée en 3 zones : la zone C est la partie "ronde" au coin de l'outil, la zone N est le quart de l'arête de coupe de longueur b_w et la zone B est le restant de l'arête de coupe entre les zones C et N. Pour les outils en carbure, la valeur de l'usure $V_B = 0.3$ mm si l'usure de flanc est uniforme dans la zone B. La valeur maximale de $V_B = 0.6$ mm si l'usure de flanc n'est pas uniforme. La valeur maximale pour $V_{BN} = 1$ mm.

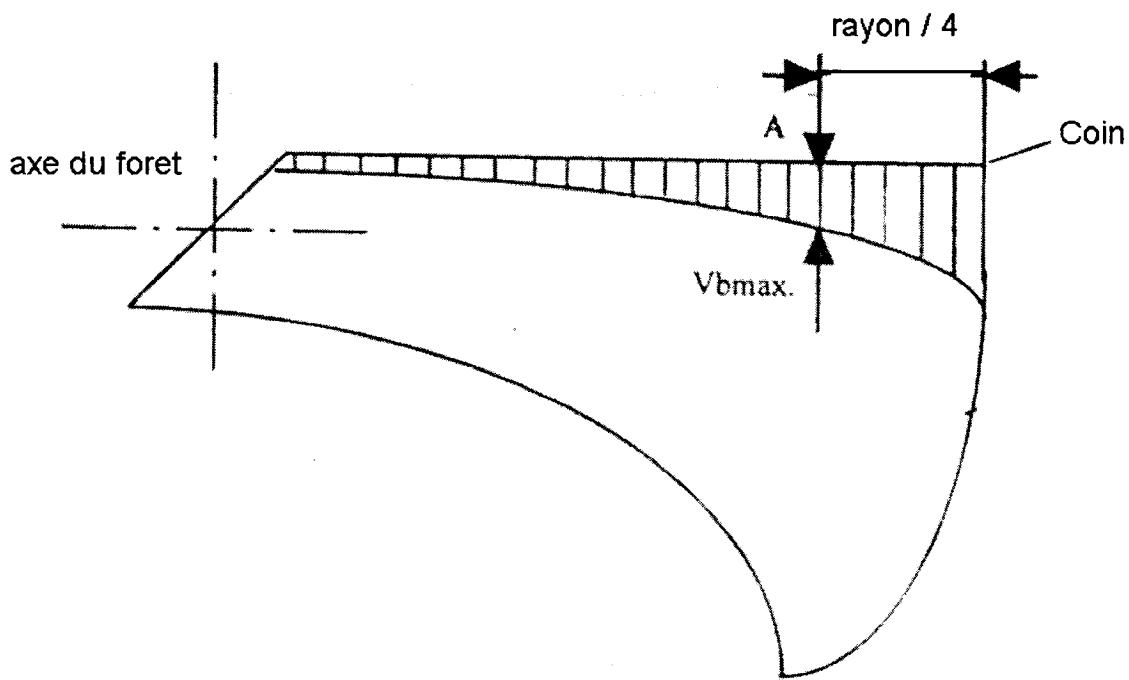


Figure 2.17 - Schéma de mesure pour l'usure V_b (source : Davim 2001).

La limitation de ce modèle ne tient pas compte des autres angles (flank angle, rack angle, cutting edge angle). Le modèle d'estimation de l'usure n'est pas relié aux conditions de coupe dans lesquelles les résultats ont été obtenus, n'est pas relié à la quantité de matériau enlevé ou à la durée de temps que l'outil a travaillé.

Dans la littérature sont présentés des points de vue concernant l'abrasion, l'adhésion, la diffusion métallurgique et l'oxydation dans la région de coupe. Pour les matériaux difficiles à usiner et de plus quand l'usinage se fait à haute vitesse, l'arête de coupe a présenté une déformation plastique locale (lawering). Cet aspect n'est pas pris en considération. La température dans la zone de coupe est estimée à 1000 - 1200 grades Celsius. Dans le cas des CMM, vu la nature dure des particules composantes, la température augmente. Le contact entre l'arête de coupe et les particules dures et discontinu donc la sollicitation thermique est de type "train d'impulses apériodique"

provoquant une fatigue thermique dans la région de coupe. Des recherches des mesures de température dans la zone de coupe s'imposent. Le liant utilisé dans la construction des plaquettes de coupe pour les carbures de tungstène est le cobalt. La déformation plastique de l'arête de coupe permettra d'arracher les grains de carbure existants dans les couches de cobalt et jeter le matériau de l'outil dans les copeaux et sur la surface de la pièce usinée.

Les tests faits par Astakhov sur différents matériaux lui permettent d'affirmer que l'influence de la vitesse de coupe sur les caractéristiques de contact à l'interface matériau de coupe - arête coupante n'accepte pas un traitement général (sont différentes d'un matériau à l'autre). Retenons que plusieurs chercheurs dans le domaine de l'usinage des composites ont recommandé de faire des tests sur chaque matériau ou à la limite pour les classes de matériau. Le concept de vitesse optimale de coupe a été poussé dans les années '75 (Makarow cité par Astakhov) mais seulement dans les dernières années la technique d'acquisition des données a permis de collecter un grand volume d'informations / seconde pour traiter les phénomènes comme des " phénomènes rapides".

2.5.4 Choix d'outil

2.5.4.1 Foret carbure solide

Outils monoblocs en carbure produits par Guhring. Critère de sélection: les résultats industriels des outils produits par la compagnie Guhring.



Figure 2.18 - Foret carbure solide.

Le foret est de type auto centrant ayant un angle au point de 140 degrés avec une géométrie "renforcée". Dans le catalogue de constructeur (Guhring Source Book 2003), il est présenté sous le nom DK460UF ayant une équivalence ISO : K30-K40. Il s'agit d'un produit en carbure ayant 90 % WC, 10 % Co de dernières générations avec granulations de 0.5 micron. Peut travailler des alliages ayant un haut contenu en silicium (+10 %). Accepte une avance jusqu'à 0.4 mm/tr et une vitesse de coupe jusqu'à 260 m/min.

Le recouvrement est de type multicouche connu commercialement sous le nom de Firex™. En effet, il s'agit d'un recouvrement multicouche de type TiAlN obtenu par la méthode PVD (au total ce type de recouvrement à 6 sub-layers) L'épaisseur totale du recouvrement est de 2-4 microns. Sa couleur est violette. Le foret choisi est recommandé par le constructeur pour usinage à sec.

2.5.4.2. Foret à tête amovible

Outils à tête amovible produits par Iscar. Critère de sélection: l'orientation d'Iscar de s'impliquer dans les solutions destinées aux domaines automobile et aérospatial. La compagnie Iscar a développé des lignes de produits spécialement pour l'industrie automobile.

La dénomination commerciale des plaquettes choisies est IC908 avec un équivalent ISO : K20-K30. Le type de recouvrement est TiAlN par la méthode PVD (physical vapor deposition). Le producteur recommande ce type de plaquette pour leur résistance à l'usure.

Le grade IC908 élimine les arrêts rapportés et de plus présente une bonne résistance à la déformation thermique (conformément aux présentations faites par le producteur).

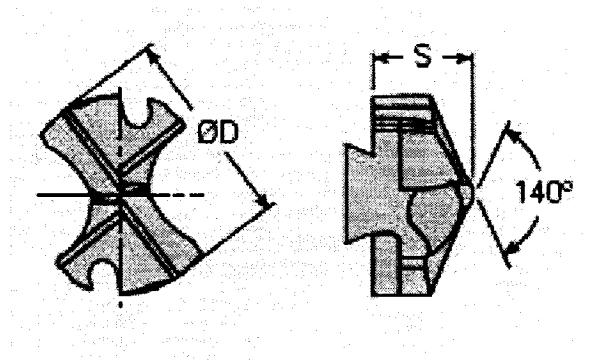


Figure 2.19 - Plaquette Iscar.

2.5.5 Machine

Les tests ont été faits sur une machine Mitsui Seiki HU40-T avec broche horizontale disponible dans le laboratoire de l'École Polytechnique. Du point de vue cinématique, il s'agit d'une machine à 5 axes (trois axes linéaires et deux rotatifs). La machine est munie d'un chargeur à quatre palettes pour permettre de faire les montages en dehors du temps de machinage. Constructif, la machine est de type guidages hydrostatiques et positionnement par vis à bille. Le contrôleur est de type Fanuc (série 16). La broche peut tourner jusqu'à 15 000 rpm. Les dimensions de la table sont de 400 par 400 mm et le poids maximal de la pièce est de 400 kg. Les porte-outils sont de type BT-4. La longueur maximale permise pour les outils est de 320 mm et la masse maximale pour l'ensemble outil - porte-outil est de 8 kg. La machine est très rigide et admet des moments résistants à la broche jusqu'à 420 NM.

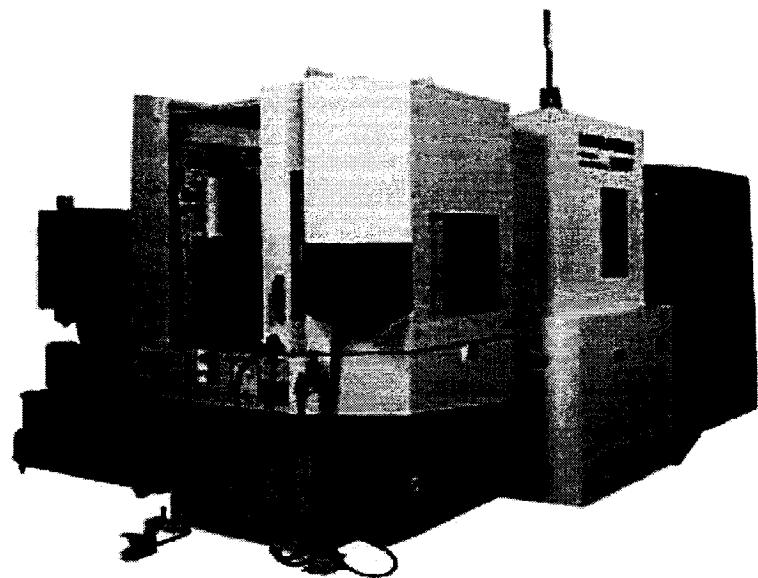


Figure 2.20 - Machine HU 40-T.

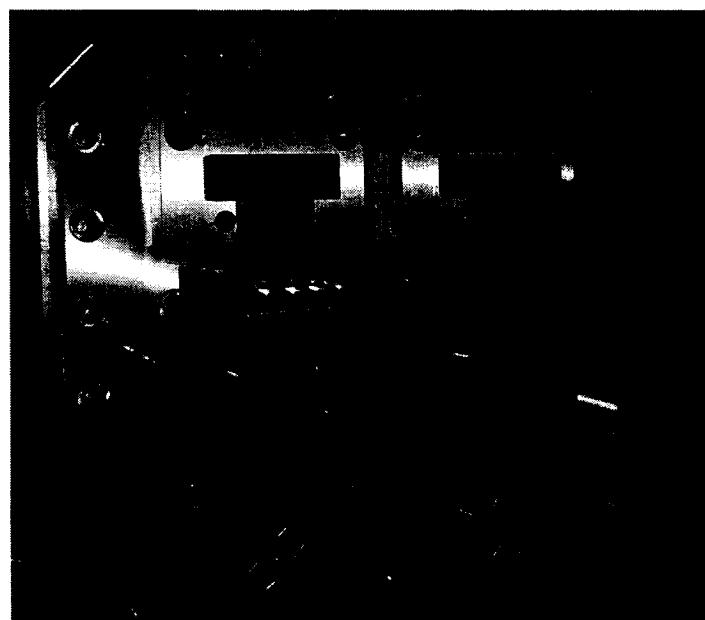


Figure 2.21 – Montage de la pièce à percer sur la machine.

2.5.6. Acquisition des données

L'acquisition des données consiste à faire le traitement de multiples entrées de différents dispositifs tels que les capteurs, les temporiseurs, les relais et les circuits à semi-conducteurs, dans le but de surveillance, analyse et/ou contrôle du système et du processus.

2.5.7 Capteur de force et de charge

Le capteur de force et de charge est un dispositif de perception électrique employé pour mesurer la tension, la compression et les forces de cisaillement. Les deux paramètres importants pour le capteur de force et de charge sont la gamme de mesure et la précision. La gamme de mesure est la gamme requise pour une sortie linéaire.

2.5.8 Capteur de couples

Le moment de torsion est défini comme le moment d'une force et c'est la mesure de la tendance de produire une torsion et une rotation autour de son axe. Les spécifications importantes pour le capteur de moment incluent le moment maximum, la précision et la température de compensation. La température de compensation prévient les erreurs de mesure dues à la variation de la température. La technologie utilisée dans le capteur de moments peut être celle d'aimant élastique ou de piézoélectrique et des jauge des contraintes.

2.5.9 Force et moment

Dans cette partie, nous ferons une analyse de la force de pénétration requise en Z pour faire les trous dans le cas des tests 1 et 2, nous avons utilisé une table dynamométrique afin de trouver les différentes forces qui agissent sur notre matériel.

Une table dynamométrique est un dispositif sur lequel on installe la pièce à usiner. Elle contient quatre senseurs avec des transducteurs piézoélectriques pour surveiller les

forces en x, y et z ainsi que les moments en x, y et z. La sortie de cette table est connectée à un amplificateur. Chaque signal (courant faible) est changé ensuite à un signal avec un facteur d'échelle en N/V pour obtenir un signal qui atteint un maximum de 10V. Le facteur d'échelle est choisi par l'usager donc s'il est trop élevé, on aura une surcharge et on perdra les données, et s'il est trop bas, on perdra de la précision !

Voici le schéma de l'installation des équipements pour cette partie :

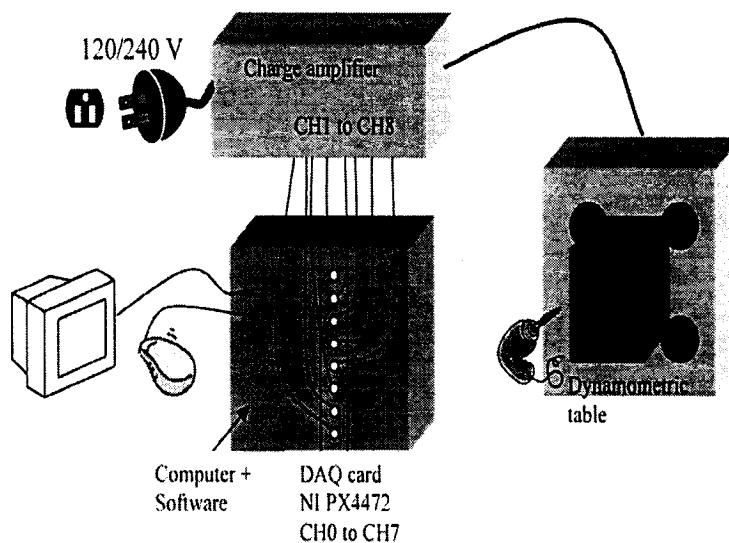


Figure 2.22 - Schéma de l'installation des équipements.

2.5.10 Logiciel utilisé pour faire l'acquisition des données

LabView est fondé sur un langage de programmation graphique : le « G », pour créer un programme sous forme de diagramme. Il est destiné au développement d'applications d'acquisition, d'analyse et de présentation de données. Couplé à des cartes d'entrées/sorties, il permet de gérer des flux d'informations numériques ou analogiques et de créer ou de simuler des appareils de laboratoire.

Le programme développé en LabView pour la mesure des forces de coupes et de moments et pour les acquisitions des données est **mesure_efforts_coupe.llb**. Il s'agit des acquisitions des forces et moments pour la table dynamométrique Kistler et il a été

aussi adapté pour les mesures des forces et de l'acquisition à l'aide du porte-outil dynamométrique Kistler. Dans la figure suivante, l'interface graphique du programme est présentée.

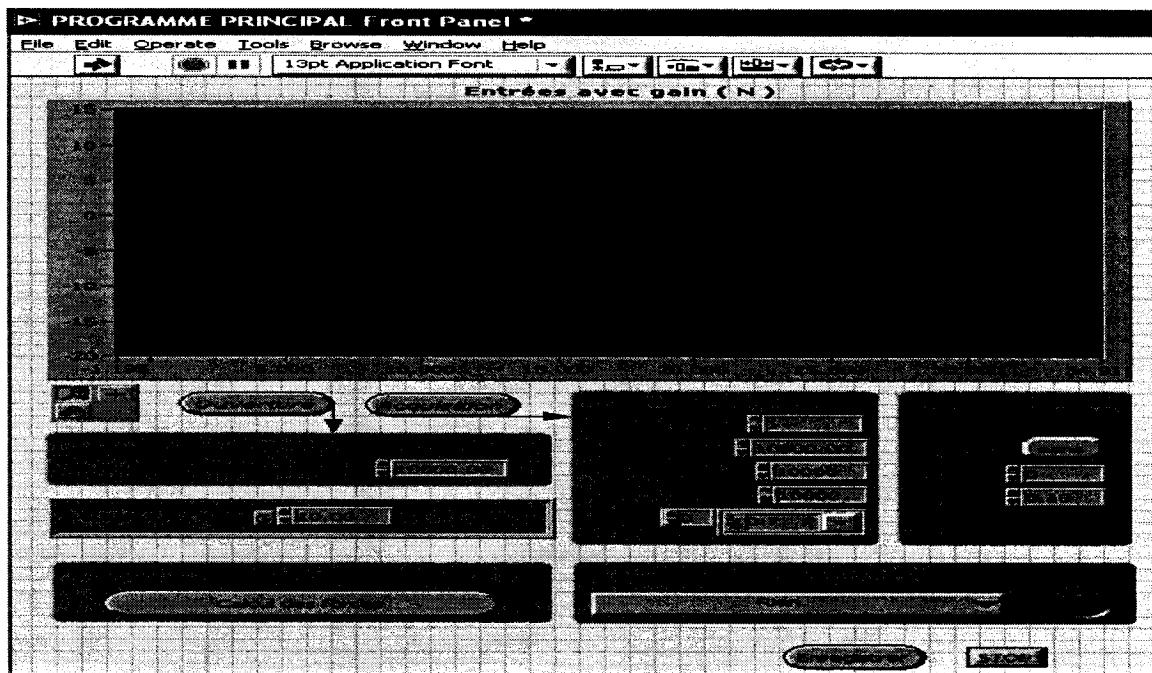


Figure 2.23 - Interface graphique du programme.

Les commandes utilisées pour la mesure se trouvent en-dessous de la grande fenêtre :

Ouverture

Utilisée pour ouvrir un fichier déjà enregistré pour l'analyser. Fréquence balayage de fichier c'est la fréquence d'échantillonnage dans le fichier, le numéro de lignes par l'unité du temps (seconde).

Acquisition

Utilisée pour déclencher l'acquisition des données. Avant d'appuyer sur cette commande, il faut faire toutes les configurations. Pour **Acquisitions**, il y a les sous-commandes suivantes : *No carte* C'est le numéro de panier où se trouve la carte d'acquisition.

Fréq. Balayage

C'est la fréquence d'échantillonnage, numéro d'acquisitions sur l'unité du temps (seconde).

Nb. acquisitions

Sont les numéros d'échantillons totaux.

Nb. affichées

Sont les numéros des lignes dans le fichier de sortie.

Canaux

Sont les canaux utilisés pour l'acquisition. Les 0 c'est le premier canal et I/O (entrée/sortie) les canaux utilisés (0 :7). Pour **Déclenchement**, il y a les sous-commandes suivantes :

Activé

Il y a deux options *sans/avec*. Pour l'activation *sans* l'acquisition s'arrête quand le programme a accompli le numéro d'acquisitions requis *Nb. acquisitions*. Dans le cas *avec* l'acquisition s'arrête avec la commande *STOP*.

Canal

C'est le canal utilisé comme repère. C'est le numéro de canal comme référence pour commencer l'acquisition. Si sur ce canal la tension est plus grande que la valeur dans la commande suivante, *Niveau*, l'acquisition se fait.

Niveau

C'est la valeur minime de la tension pour faire l'acquisition. Dans la figure, cette valeur est 0.10V et le *Gain* 10N/V, donc l'acquisition se fait pour des tensions plus grandes que 0.1V, respectivement 1N (Newton). Ça c'est pour éviter l'acquisition des valeurs petites qui ne sont pas significatives.

Gain

C'est l'échelle en unités mécaniques par volt du signal de sortie. Il a la même valeur que la valeur *SC* sur l'affichage de *l'Amplificateur de charge à plusieurs canaux (type 5017B)*. Dans la figure, cette valeur est 10N/V. Chaque volt est équivalent de 10N (Newtons).

Calcul

C'est utilisé pour faire apparaître sur l'écran les valeurs avec le gain (N) ou les valeurs en volts.

Affichage

Il y a deux options d'avoir les valeurs des forces et des moments. Il est possible de les avoir dans un graphique calculé ou les calculer à partir d'un fichier obtenu avec la commande *Enregistrer*.

Occupé

Le bouton est allumé pendant l'acquisition des données.

Enregistre

Commande pour enregistrer le fichier de sortie avec les valeurs de chaque canal pour chaque acquisition. Contient 8 rangées et le numéro des lignes égal avec la valeur de

Nb. acquisitions. Le fichier peut être lu en Note pad ou Word Pad. Sur le graphique, la valeur sur chaque canal est représentée avec une couleur différente des autres.

Avant de faire l'acquisition, il faut activer la commande *Run* (Operate/Run ou Ctr+R ou appuyer sur la flèche en dessous du menu Edit).

Dans la figure suivante, il y a des commandes pour utiliser le zoom, le pan et la fenêtre de sélection, commandes identiques comme dans les autres programmes LabView.

Utilisé pour sortir du programme.

Calculs des forces et des moments

Les calculs se font en fonction du schéma du câblage (*figure suivante*).

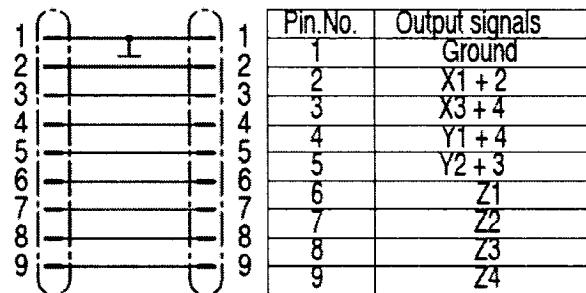


Figure 2.24 - Schéma du câblage.

Les formules de calcul pour chaque force et moments sont :

$$F_x = F_{x1+2} + F_{x3+4}$$

$$F_y = F_{y1+4} + F_{y2+3}$$

$$F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4}$$

$$M_x = b(F_{z1} + F_{z2} - F_{z3} - F_{z4})$$

$$M_y = a(-F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} - F_{z4})$$

$$M_z = b(-F_{x1+2} + F_{x3+4}) + a(F_{y1+4} - F_{y2+3})$$

a = distance entre l'axe des capteurs et l'axe y

b = distance entre l'axe des capteurs et l'axe x

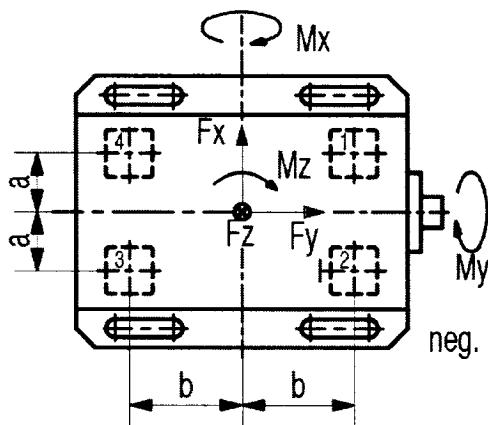


Figure 2.25 - Moments et forces.

Dans le cas du dynamomètre 9255B $a=b=90$ mm et les valeurs $X1+2$ sont dans la rangée 1, $X3+4$, $Y1+4$, $Y2+3$, $Z1$, $Z2$, $Z3$, $Z4$ respectivement en ordre dans les rangées 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

Dans le cas du Dynamomètre porte-outil à 3 composantes F_x , F_y , F_z , le calcul se fait avec premières trois formules, les trois moments sont inexistantes. Même si dans le fichier les valeurs pour les moments ne sont pas zéro, elles sont négligeables et sont dues aux bruits sur les canaux.

Alors, une fois le fichier de sortie préparé, le logiciel Table Dynamomètre a été utilisé pour les tests 1,2 pour calculer le F_z et M_z de façon automatique.

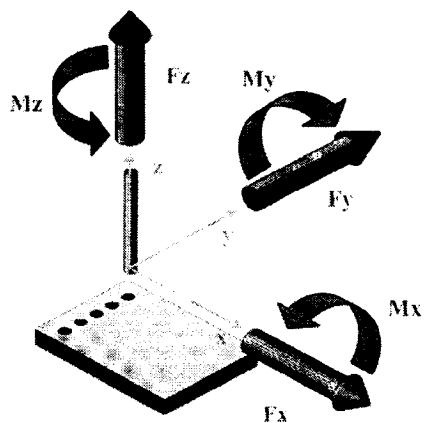


Figure 2.26 - Repère pour les moments et les forces.

2.5.11 Rugosité

Pendant la fabrication d'une pièce, quelle que soit la technique de fabrication, la surface de la pièce subit des perturbations qui se manifestent par des changements dans ses propriétés. L'état de surface de la pièce influence considérablement les propriétés mécaniques comme par exemple la résistance à la fatigue, la résistance à la corrosion, les comportements en frottement, la résistance à l'usure, l'esthétique, etc.

Une surface de qualité peut assurer le bon fonctionnement et la longévité des pièces mécaniques. Généralement, il existe une relation entre la rugosité et la précision de la fabrication des pièces.

Pour chaque trou dans le processus de perçage, nous avons également obtenu des graphiques de la rugosité de la surface et de la corrélation de la rugosité avec la distance le long de la surface.

L'appareil SV-C4000H4 (voir figure ci-dessous) fait partie de la génération SV-C3000/4000 de la famille des analyseurs de surface de Mitutoyo. L'appareil possède deux têtes de mesure : une pour l'état de surface et l'autre pour l'obtention du profil. Nous avons utilisé du logiciel SURFPAK-SV pour l'état de surface pour la création de rapports d'inspection. Le système est situé au C-124, laboratoire de recherche en fabrication virtuelle. C'est dans un environnement de classe 1000 contrôles à 20,00°C et 45+5% Hr.

Les déplacements verticaux transmis par un palpeur à aiguille en diamant, dont l'angle au sommet est de 90° avec un rayon de pointe moyenne de 2,5 μm , sont transformés en signaux électroniques et comportent un ou deux patins d'appui qui jouent le rôle de filtre mécanique et de référence rectiligne.

Les signaux électriques amplifient jusqu'à un million de fois traités par un calculateur qui donne les différents critères physiques (R_z) et statistiques (R_a , R_q). Les appareils courants d'atelier indiquent un ou plusieurs paramètres normaux. On peut aussi déduire les critères physiques à partir d'enregistrements. La figure ci-dessous représente, à l'aide d'un schéma, un appareil du rugosimètre SV-C 4000H4.

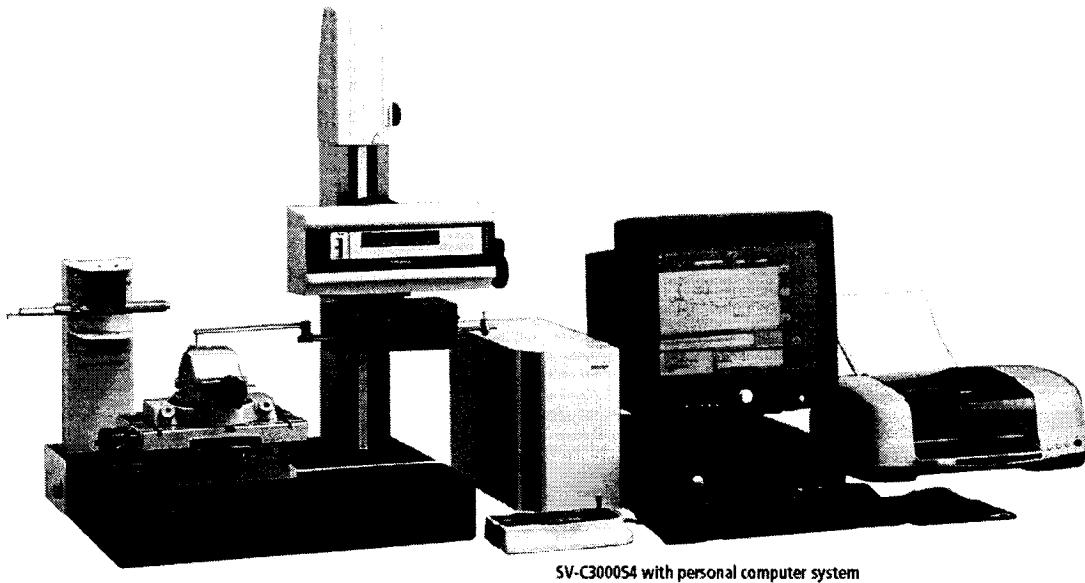


Figure 2.27 - Photo du rugosimètre/profilographe (SV-C 4000H4).

2.5.12 Géométrie du trou : circularité et cylindricité

La première MMT (machine à mesurer tridimensionnelle) a été développée en 1956 par Ferranti en Écosse. À cette époque, l'usinage était en pleine expansion et les fabricants étaient capables d'usiner des pièces en grand tirage. Cependant, en augmentant le nombre de pièces fabriquées, la tâche de l'inspection augmente. Le but de Ferranti était de rendre l'inspection plus rapide et plus automatique. Cette machine à trois axes linéaires a eu une résolution de 0.0005 pouce et une justesse de 0.001 pouce.

La MMT située au laboratoire de métrologie est une MMT de type portique mobile. Les axes X et Z sont contrôlés et articulés par un moteur DC à entraînement par friction et l'axe Y est contrôlé par un entraînement par courroie. Les axes sont indiqués à la figure ci-dessous.

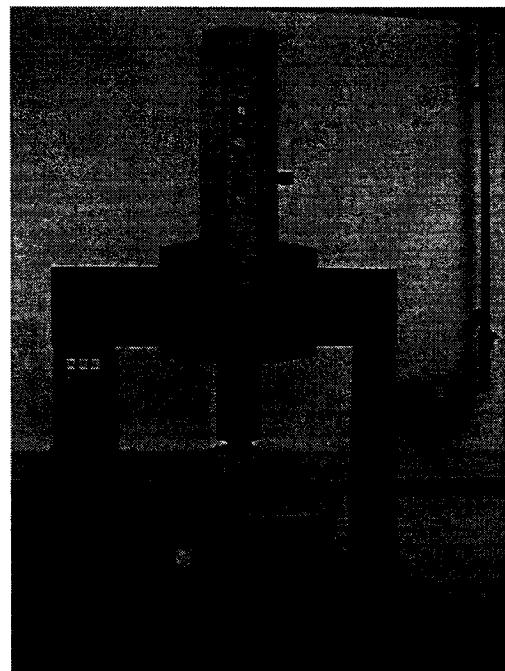


Figure 2.28 - Schéma de la MMT LK (réf. : DMIS LAB MANUAL).

Les axes Y et Z sont fabriqués en céramique ce qui améliore le comportement thermique de la MMT et en conséquence la précision de la machine.

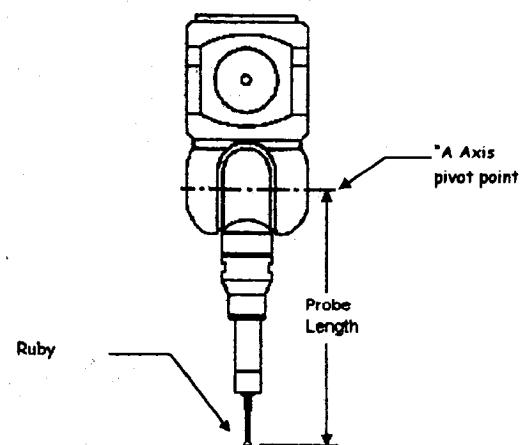


Figure 2.29 - Schéma du probe PH10M.

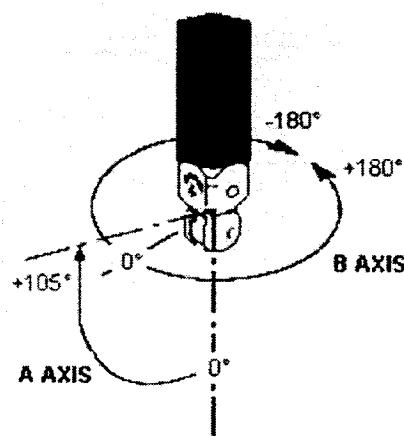


Figure 2.30 - Axes de rotations A et B.

Le palpeur fourni sur la machine est un palpeur PH10M fabriqué par la compagnie RENISHAW. Il y a deux axes de rotation qui donneront à l'opérateur plus de flexibilité de mesure: l'axe horizontal A et l'axe vertical B indiqués. L'angle de rotation de l'axe A peut varier de 0° à 105° et pour l'axe B entre -180° et $+180^\circ$. L'angle de l'indexation pour l'axe A est de $7,5^\circ$. Pour les pièces avec une géométrie complexe, il est parfois impossible de chercher des points sur certains éléments géométriques. Dans ce cas, l'opérateur peut changer les angles des deux axes d'articulations pour inspecter ces éléments géométriques.

À la tête du palpeur est installé un stylet sur lequel se trouve le rubis de mesure. Ce rubis sphérique souvent fabriqué en diamant touche la pièce et à l'aide du stylet déclenche l'interrupteur du palpeur qui indique la prise de mesure d'un point. C'est important d'étalonner la machine pour le diamètre du rubis et la longueur du stylet afin d'obtenir des mesures de bonne qualité.

À la mise en fonction de la MMT, le contrôleur de la machine connaît un repère défini au centre de l'axe de palpeur. Quand l'opérateur procède à la requalification du palpeur par la sphère de requalification, la machine connaîtra la position de centre du rubis par rapport au centre de la sphère de requalification.

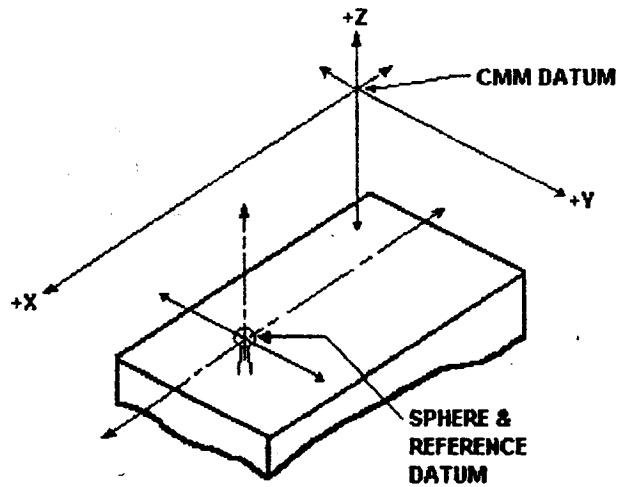


Figure 2.31 - Direction des axes X, Y et Z de la MMT.

La dimension de la sphère de requalification est précisément connue et donc la requalification permet à la machine de connaître le diamètre du rubis, la longueur du stylet et la configuration du palpeur. Il est toujours possible de définir un autre repère qui est plus facile pour l'opérateur à le comprendre et à faire l'inspection plus facilement.

CHAPITRE 3 - ARCHITECTURE DE SYSTÈME ET AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES

Jusqu'à maintenant, dans les chapitres 1 et 2, nous avons vu le cadre théorique, le choix de l'outil et la base générale de notre recherche. Dans le présent chapitre, d'abord nous précisons notre architecture de comparaison des deux outils (Guhring, Iscar). Nous avons choisi une méthode quantitative de comparaison de la qualité qui est basée sur l'approche GQM (Goal Question Metric) introduit par BASILI (BASILI, 1992). Dans cette approche, nous définissons notre objectif primaire de comparaison de la qualité de deux outils, selon sa relation avec trois critères secondaires (considérés comme les questions de mesure) : qualité du trou, prix de l'outil et la durée de vie de l'outil (Figure 3.1).

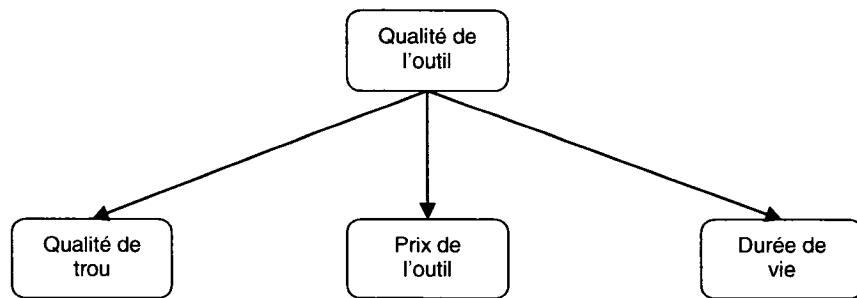


Figure 3.1 – Schématique de relation entre G et Q.

Tableau 3.1 : Relation entre G et Q

Relation entre la Qualité et les paramètres de l'outil			
#	Nom du paramètre	Changement du comportement du paramètre	Efficacité de l'outil
1	Qualité de trou	↓	↓
		↑	↑
2	Prix de l'outil	↓	↑
		↑	↓
3	Cycle de vie de l'outil	↓	↓
		↑	↑

Le tableau 1 nous montre la tendance du comportement de la qualité de l'outil en fonction du changement de chacun de ces trois critères. Par exemple, l'augmentation de la qualité de trou cause une augmentation de la qualité de l'outil, etc.

Puisque les deux critères, la qualité de trou et la durée de vie de l'outil, ne sont pas directement observables, nous avons choisi quelques métriques mesurables (soit par l'observation directe, soit par le calcul des résultats d'observation) pour mesurer chacun des deux critères.

En d'autres mots, dans le diagramme de relation entre G et Q, la qualité de l'outil est un objectif défini en fonction des trois paramètres: la durée de vie de l'outil, le prix de l'outil et la qualité de trou avec les abréviations suivantes :

Qo : qualité de l'outil;

Co : durée de vie de l'outil;

Po : prix de l'outil;

Qt : qualité du trou.

Nous pouvons dire :

$$Qo = f(Co, Po, Qt) \quad (3.1)$$

La fonction ci-dessus peut avoir une forme polynomiale dans laquelle chacun de ces critères a une pondération qui est déterminée selon son importance et son effet sur la qualité de l'outil. En d'autres mots, cette formule peut être écrite comme :

$$Qo = \alpha * Co + \beta * Po + \gamma * Qt \quad (3.2)$$

Dans cette formule, les valeurs des coefficients α , β et γ peuvent être choisies différemment selon la stratégie de comparaison. Le point important est de respecter l'impact de l'effet de chacun de ces éléments sur Qo . Par exemple, le coefficient β a une valeur négative puisque son effet a une relation inverse avec Qo tandis que deux autres coefficients ont le signe positif dans cette formule.

Pour calculer les valeurs de durée de vie de l'outil et la qualité de trou, nous avons besoin d'identifier plusieurs autres paramètres de calcul (voir le diagramme suivant de la relation de G et Q avec M). Pour identifier la qualité de trou, nous avons deux éléments qui sont la variation de géométrie et la variation de l'état de surface. La variation de géométrie est basée sur les deux métriques : la circularité et la cylindricité. D'un autre côté, la variation de l'état de surface est basée sur les paramètres de rugosité.

Dans la partie droite du diagramme ci-dessus, la durée de vie de l'outil se calcule selon les deux métriques : l'usure de l'outil et la longueur du perçage. Ces métriques sont facilement mesurables.

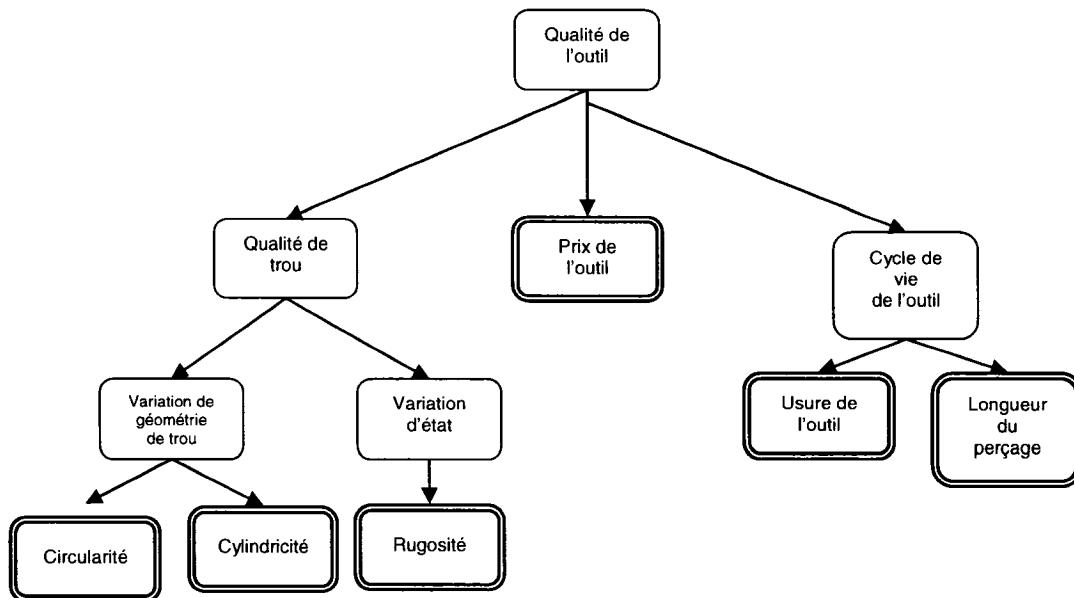


Figure 3.2 – Schématique de G et Q avec M.

Tableau 3.2 : Relation entre la qualité (Q) et les paramètres métriques (M)

Relation entre la Qualité de trou et les paramètres intermédiaires			
#	Nom de paramètre	Changement du comportement de paramètre	Qualité de trou
1	Variation de Géométrie de trou	↓	↑
		↑	↓
2	État de surface	↓	↑
		↑	↓

Pour la partie gauche de ce diagramme, nous avons besoin d'effectuer une étude plus approfondie afin de trouver les relations existantes entre le critère choisi et les métriques reliés à ce critère.

Selon S. Laporte (LAPORTE S. 2005), la qualité de trou est directement reliée aux paramètres de coupe et la force et le moment. Dans notre cadre de travail, les paramètres de coupe sont constantes (la vitesse de coupe 6000 et la vitesse d'avance 0.2 mm/tr). C'est-à-dire que la qualité de l'outil a une relation directe avec la force et le moment. Dans les sections suivantes de ce chapitre nous essayons de présenter les études existantes dans ce domaine (BALOUT B. 2003), (MAISONNEUF et al. 1995) et (DAVIM J.P. 2001)) et d'implanter un modèle de test basé sur ces études qui soit capable d'expliquer la relation entre la force et le moment à l'aide de paramètre mesurable (métrique) de qualité de trou.

La corrélation directe entre la qualité finale de notre trou et les paramètres de perçage (particulièrement l'usure et la défaillance du foret) nécessite une énorme étude statistique qui a été jugée de dépasser nos capacités en termes de temps, argent et moyen. Pour cette raison, nous implanterons des modèles. Néanmoins, des modèles requièrent l'utilisation des quantités mécaniques mesurables. Ces quantités peuvent être la force mécanique, la pression, la température, le déplacement, etc. Malheureusement, pendant l'opération de perçage, l'outil est gardé à l'intérieur du matériau, ce qui rend les moyens classiques de mesure inappropriés. La mesure de la force mécanique nous aide à éliminer les restrictions qui nous ont été imposées. En effet, peu importe la position de l'outil dans le matériau, il est toujours possible de recueillir de l'information, en terme de force ou de moment. Alors, l'étape intermédiaire qui a été choisie pour analyser et lier les paramètres de perçage aux paramètres représentant la qualité de trou est l'évolution de forces et de moments.

3.1 Modèle théorique et architecture du perçage (LAPORTE S. 2005)

Alors, l'étude expérimentale peut être synthétisée de la manière suivante :

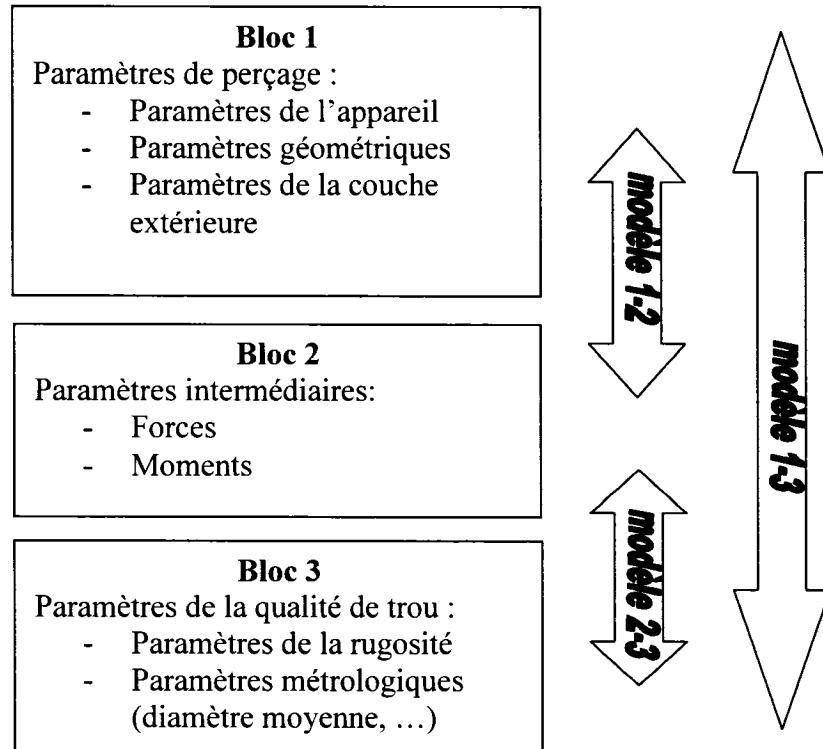


Figure 3.3 – Diagramme de corrélation entre les paramètres de perçage et la qualité de trou [Laporte 2005].

Notre but initial est de trouver un modèle qui décrit le lien entre les blocs 1 et 3. Le bloc intermédiaire 2 qui fait l'étude des forces et des moments nous permet de définir deux modèles, soit :

- le modèle 1-2 que nous appellerons le modèle expérimental de la coupe qui permettra de trouver les relations entre les paramètres de perçage (l'avance, la vitesse de coupe, la durée d'opération, etc.) et les forces-moments (six paramètres);

- le modèle 2-3 ou le modèle phénoménologique qui permettra de relier les paramètres de forces-moments à ceux de la qualité de trou;
- et finalement le modèle 1-3 qui va relier les blocs 1 et 3 et qui est l'objectif de notre étude.

3.1.1 Modèles expérimentaux (1-2)

Pour établir les modèles expérimentaux, nous avons référé à l'article [LAPORTE S. 2005] afin d'appliquer les relations entre les blocs 1 et 2 mentionnés dans le figure 3.4. Le modèle 1-2 que nous appellerons le modèle expérimental de la coupe qui permettra de trouver les relations entre les paramètres de perçage (l'avance, la vitesse de coupe, la durée de vie, etc.) et les forces-moments (six paramètres).

3.1.1.1 Définition force

La force utilisée pour faire l'opération n'est pas dépendante de la vitesse de coupe pour les matériaux non renforcés, mais elle augmente en fonction de cette vitesse pour des composites tels que GrA-Ni® 10S.4G (B. Balout, 2003).

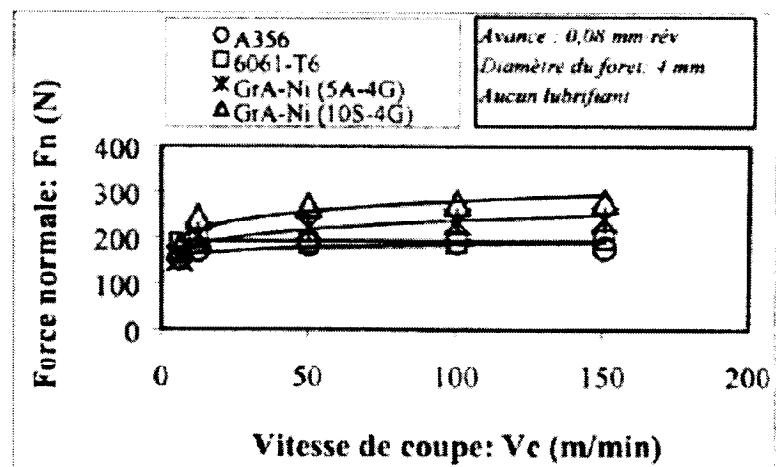


Figure 3.4 - Force normale des alliages d'aluminium et de composites en fonction de la vitesse de coupe [Balout 2003].

Par contre, il a été conclu que la force évolue fortement avec l'avance (Masounave et al. 1995), la relation de Masounave validée par Balout pour une large gamme du matériau est la suivante:

$$F_n = A f^n \quad (3.3)$$

avec :

F_n : force normale (N)

f : avance (mm/tr)

A : une constante (N/mm)

n : proche de l'unité

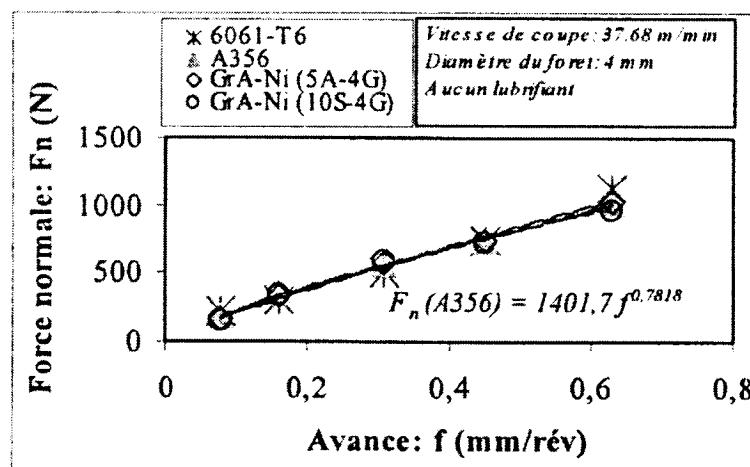


Figure 3.5 - Force normale en fonction de l'avance pendant le perçage des alliages d'aluminium et de composites.

Il est aussi démontré que la force utilisée dans le procédé de perçage dépend fortement de l'usure de l'outil (Masounave et al., 1995), la relation suivante a été trouvée pour faire le lien entre ces deux variables :

$$F = (a + bV_B) f^n \quad (3.4)$$

avec F : force normale (N)

f : avance (mm/tr)

a : caractéristique de la matrice

b : caractéristique de l'usure

VB : usure par talonnage dans le cas de CMMp de type de duralcan (mm)

3.1.1.2. Définition du moment de coupe

- La vitesse de coupe n'a quasiment aucune influence sur le moment quel que soit le matériau renforcé ou non.
- Le moment est proportionnellement lié à l'avance et son évolution peut être montrée par la relation classique suivante (B. Balout, 2003) :

$$M = B \cdot f^a$$

avec M = moment ($N.m$), B = constante et f = avance (mm/tr).

Cette relation est due à l'effet de la chaleur dégagée dans les zones de coupe qui augmentent la ductilité locale et donc une augmentation du frottement entre l'outil et la pièce fait croître le moment.

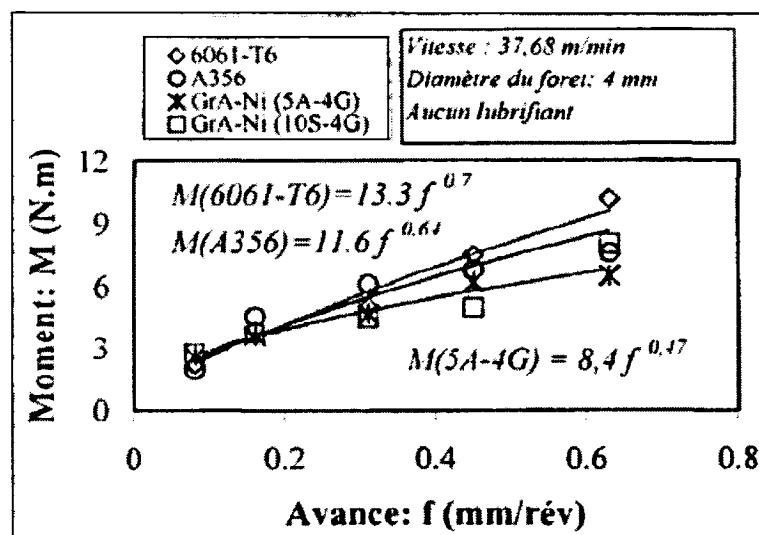


Figure 3.6 – Moment en fonction de l'avance dans l'opération de perçage.

3.1.1.3. Pression spécifique

Une autre valeur intéressante est celle de la pression spécifique qui nous donne une mesure de la puissance nécessaire pour faire l'opération. Elle se calcule avec l'équation suivante :

$$K_s = \frac{8M}{fd^2} \quad (3.5)$$

avec M = moment,

f = avance,

d = diamètre du perçage.

Une analyse de la force normale (ou la pression) en fonction de l'utilisation du foret pour différentes valeurs de vitesse de coupe et de l'avance nous donne le graphique suivant :

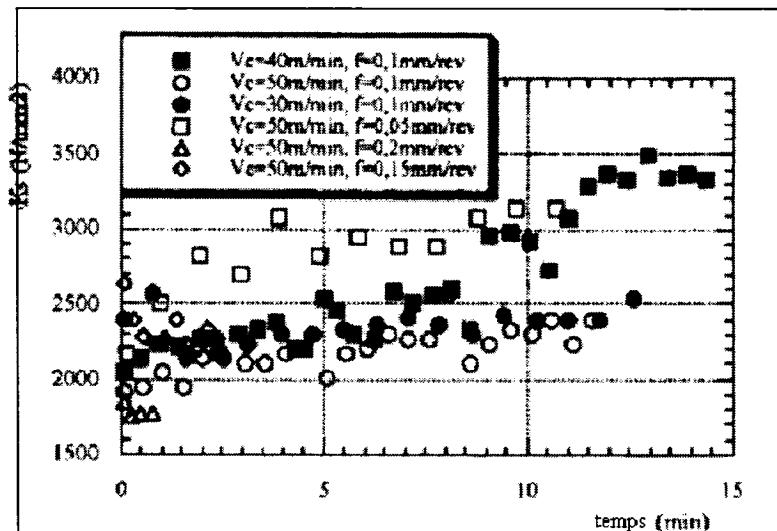


Figure 3.7 – Pression spécifique de coupe K_s en fonction du temps d'usinage pour une opération de perçage [Balout 2003].

On remarque qu'en plus d'une augmentation de K_s en fonction du temps d'usinage, plus l'avance a une valeur plus grande, plus le K_s diminue.

En suivant les techniques de Taguchi et en analysant les résultats utilisant ANOVA (analysis average and analysis of variance), on remarque que l'avance ($P = 63\%$) et la vitesse de coupe ($P = 14\%$) ainsi que la durée d'opération ($P = 14\%$) sont les paramètres qui contribuent au pourcentage représentant la valeur de la pression spécifique de coupe K_s (J. P. Davim, 2001).

3.1.2 Modèle phénoménologique (2-3)

Le modèle 2-3 ou le modèle phénoménologique qui permettra de relier les paramètres de forces-moments à ceux de la qualité de trou.

3.1.2.1 Usure

- En mesurant l'usure sur la face de dépouille par la grandeur notée V_B (correspondant à ISO 3685, mesuré à .75 fois le rayon du perçage), il a été montré que les forces de coupe augmentent l'usure à cause du frottement qui se produit sur la face de dépouille.

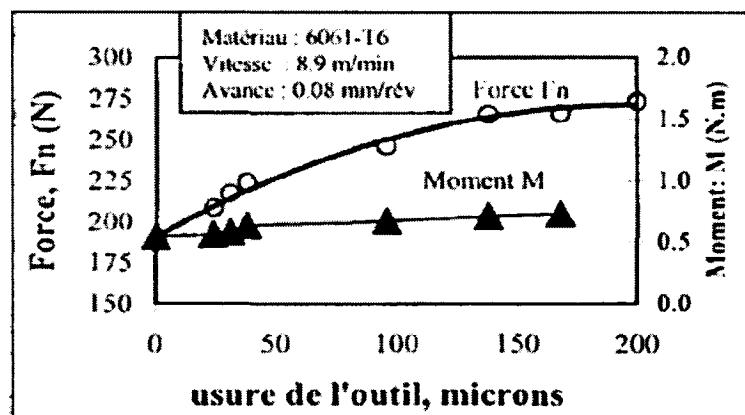


Figure 3.8 - Force normale et moment en fonction de l'usure de l'outil VB lors du perçage [J. P. Davim2001].

- L'usure du foret dépend aussi du volume du matériau enlevé et de la profondeur de coupe aussi. La figure suivante montre le résultat des essais effectués sur le GrA-Ni® 5A-4G, on remarque que l'usure du foret augmente rapidement avec l'avance mais reste moindre comparée à celle observée pour des composites à matrice métallique renforcée par SiC uniquement (Songméné et Balazinski, 1999). Ceci est dû au fait que pendant que les particules de graphite lubrifient la zone de coupe les particules dures (SiC) diminuent la durée de vie de l'outil et s'usent après quelques centimètres du perçage !

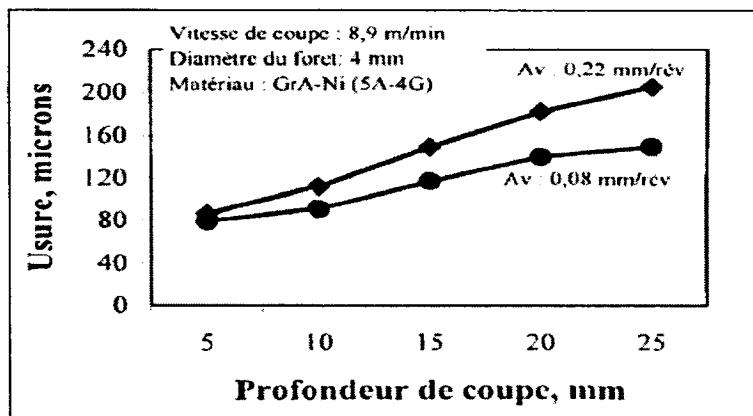


Figure 3.9 – Usure du foret vs la profondeur de coupe [J. P. Davim2001].

- En suivant les techniques de Taguchi et en analysant les résultats utilisant ANOVA (analysis average and analysis of variance), on remarque que la durée d'usinage ($P = 50\%$) et l'avance ($P = 24\%$) influencent beaucoup l'usure, tandis que la vitesse de coupe ($P = 7\%$) ainsi que l'interaction de vitesse de coupe-l'avance ($P = 2\%$) ou vitesse de coupe-durée d'opération ($P = 9\%$) ou même celle de l'avance-durée d'opération (8 %) représentent des contributions moins importantes sur l'usure de l'outil de coupe (J. P. Davim, 2001).

3.1.2.2 Forme de copeau

On a constaté que la microstructure du matériau influence aussi l'usinage. L'étude des copeaux permet une classification du matériau en terme de ductilité-fragilité. À partir de la largeur des copeaux (copeaux longs), on peut déduire que par exemple dans la figure suivante (copeaux courts), l'alliage 6061-T6 est ductile ou que les deux composites de GrA-Ni® sont fragiles :

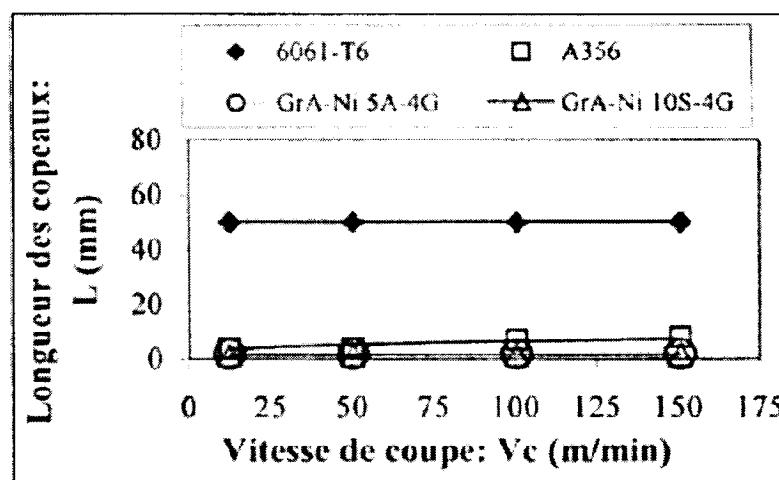


Figure 3.10 - Longueur des copeaux en fonction de la vitesse de coupe. [Balout 2003].

Les alliages fragiles sont peu influencés par la variation de la vitesse de coupe et une augmentation de cette vitesse n'affecte donc pas les forces de coupe. Pour un alliage ductile (6061-T6), une augmentation de vitesse change peu la ductilité du copeau. En général, on peut conclure que la longueur des copeaux demeure quasiment inchangée avec une variation de la vitesse de coupe. On déduit aussi que les composites génèrent des copeaux plus courts à cause de la présence des particules de renfort (B. Balout, 2003).

3.1.2.3 Rugosité

- La rugosité, R_a , est un autre moyen de mesure de la qualité lors d'une opération de coupe. Le graphique suivant (J. P. Davim, 2001) nous donne un aperçu de l'influence de temps des perçages sur la rugosité :

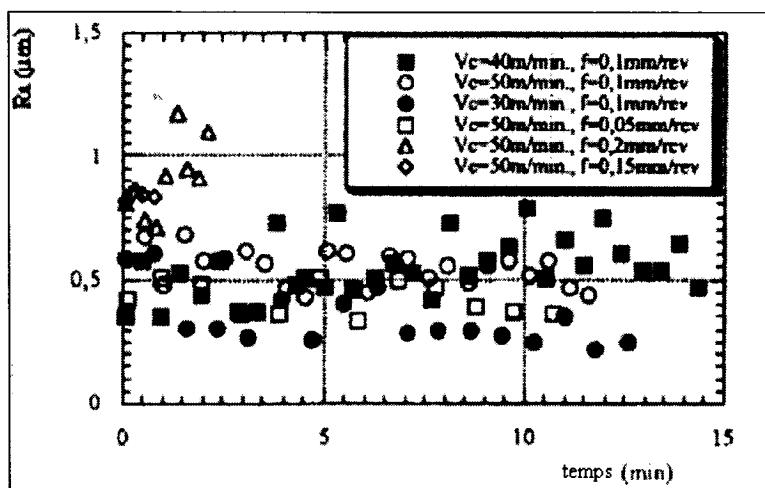


Figure 3.11 - Rugosité en fonction du temps d'usinage [J F Davim 2001].

Il est facile de déduire qu'une augmentation de l'avance, f , conduit à une augmentation de la rugosité. En plus, en observant le graphique précédent, on remarque que la rugosité est inversement proportionnelle à la vitesse de coupe pour la même valeur de l'avance.

En suivant les techniques de Taguchi et en analysant les résultats utilisant ANOVA (analysis average and analysis of variance), on remarque que l'avance ($P = 43\%$) et la vitesse de coupe ($P = 41\%$) ainsi que l'interaction de ces deux variables ($P = 14\%$) sont les paramètres qui contribuent à un pourcentage représentant la valeur de la rugosité (J. P. Davim, 2001).

3.1.2.4 Géométrie du trou

- La géométrie du trou est un autre paramètre important de perçage. L'axe central peut être défini comme le lieu des points P où la force résultante est colinéaire au moment et où le moment est minimal [J. P. Davim 2001] :

$$\vec{OP} = \frac{\vec{R}(\tau) \wedge \vec{M}_\tau(O)}{\|\vec{R}(\tau)\|^2} + \lambda \vec{R}(\tau) \quad (3.6)$$

où λ est le paramètre qui décrit l'axe. Pour chaque point de mesure, l'axe central et ses points de réduction sont calculés (voir la figure ci-dessous), ce qui aide à construire un diagramme circulaire.

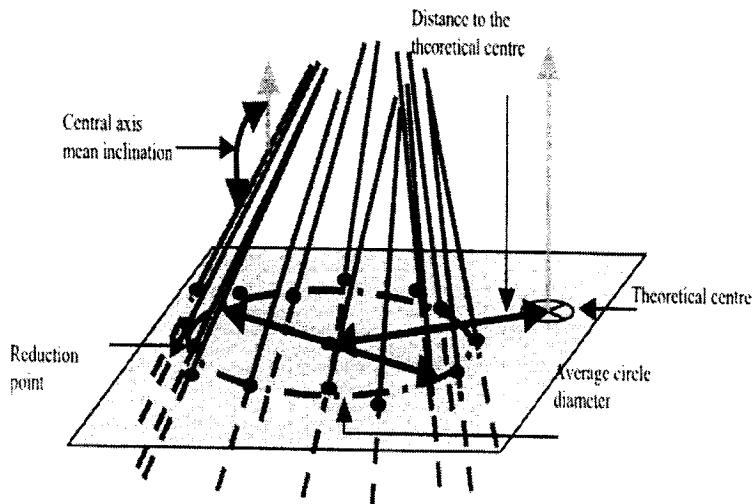


Figure 3.12 - Mesures de la géométrie de trou [S. Laporte 2004].

On obtient alors trois critères importants, soit :

- o le diamètre moyen (D axis);
- o la distance au centre théorique (d axis);
- o l'inclinaison moyenne de l'axe central (inc axis) ou la cylindricité.

D'après les travaux de S. Laporte (2004), on obtient le graphique suivant qui permet d'analyser entre autres l'effet de l'utilisation de l'outil sur les paramètres mentionnés précédemment.

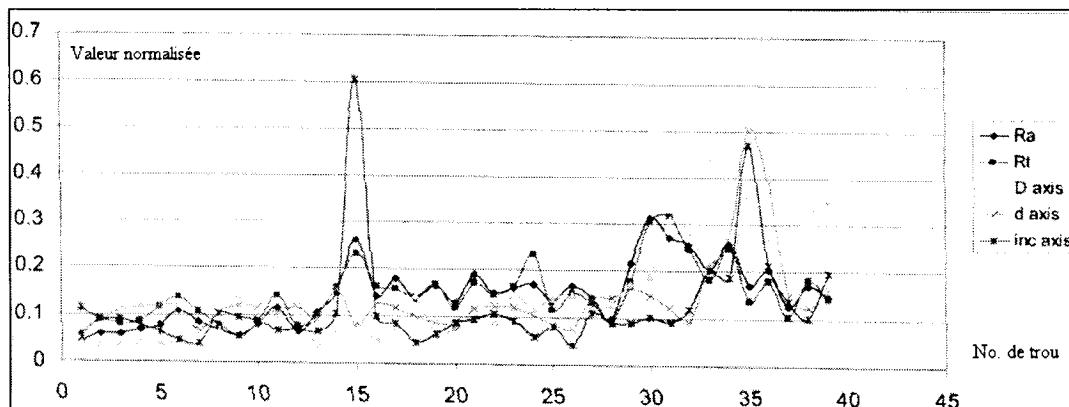


Figure 3.13 - Nombre de trous versus les valeurs normalisées des mesures de la géométrie de trou.

On peut remarquer que le D axis augmente en suivant une oscillation asservie positivement.

3.1.2.5 Durée de vie de l'outil

- Il est aussi très intéressant d'étudier les effets des longueurs de perçage sur la durée de vie de l'outil de coupe. Les graphiques suivants nous aident à étudier ce phénomène en utilisant une approche conventionnelle de Taylor et en prenant un V_b de 0.125 mm comme critère de fin de vie de l'outil (J. P. Davim, 2001):

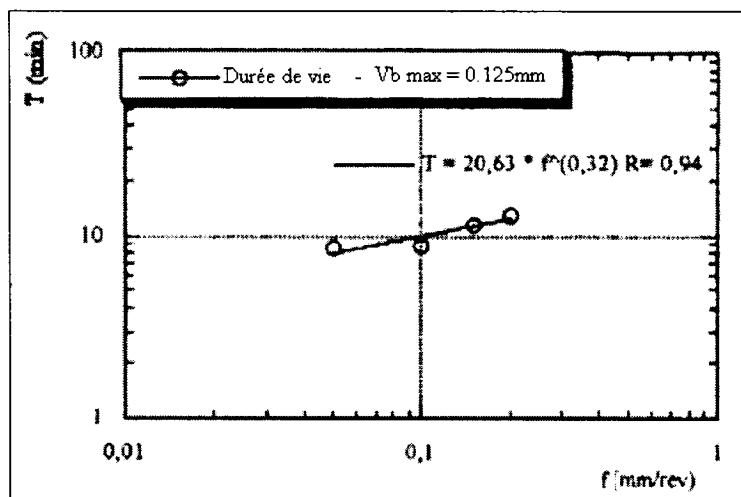


Figure 3.14 - Durée de vie de l'outil (T) en fonction de l'avance (f).

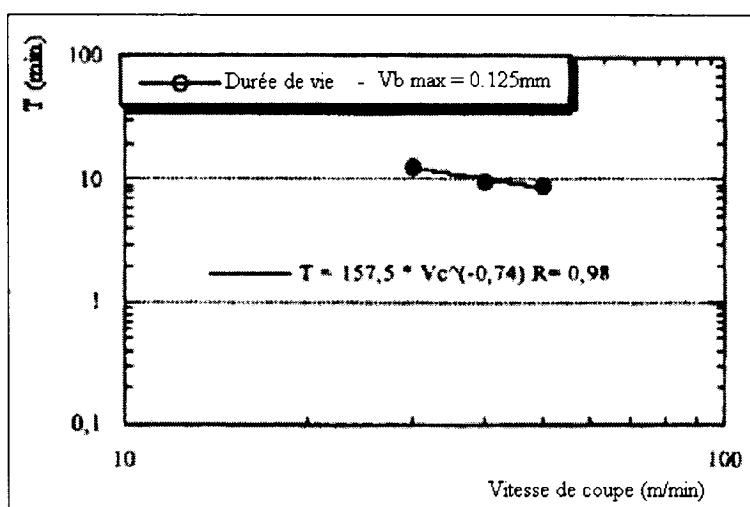


Figure 3.15 - Durée de vie de l'outil (T) en fonction de la vitesse de coupe.

On peut remarquer assez facilement que la durée de vie d'un outil est inversement proportionnelle à la vitesse de coupe. Par contre, contrairement aux matériaux métalliques, on voit que dans le cas de composites à matrice métallique, la durée de vie de l'outil (usure) est directement proportionnelle à l'avance.

3.1.3 Solution optimale et corrélation entre les modèles (1-3)

Dans un dernier lieu après avoir fait l'étude des modèles 1-2 et 2-3, nous avons essayé de trouver un rapport direct entre les blocs 1 et 3 sans se référer au bloc intermédiaire, ce qui nous a conduits aux résultats suivants :

Dans cette section, nous cherchons à bâtir un modèle qui met en relation les deux modèles précédents, en considérant tous les éléments mentionnés :

- Une façon très simple de procéder et de mettre le tout ensemble via une matrice de corrélation. Les travaux de S. Laporte (2004) mettent en corrélation les six composants obtenus par le dynamomètre (les forces et les moments selon les trois axes) et six valeurs métrologiques, soit :
 - Ra, Rt : coefficients de mesure de rugosité;
 - DI moy : diamètre moyen du trou;
 - Bavure : hauteur de la bavure;
 - Delta D : différence entre le diamètre le plus grand et le plus petit le long du trou;
 - Dév. Axe : qui est la différence entre la position réelle des axes et la position théorique (théoriquement) des axes de coupe.

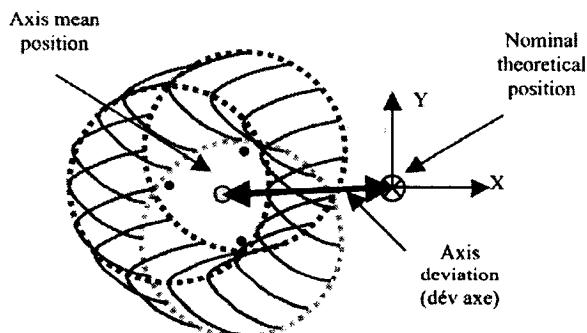


Figure 3.16 - Mesures de la géométrie de trou [S. Laporte 2004].

La corrélation est basée sur une comparaison entre les tendances de sortie lors de l'utilisation d'une certaine gamme de valeur pour les paramètres d'entrée (soit les moments ou les forces). Par exemple, on considère deux signaux A et B et leurs évolutions par rapport aux entrées F (force) et N (moment) comme le montre les graphiques suivants :

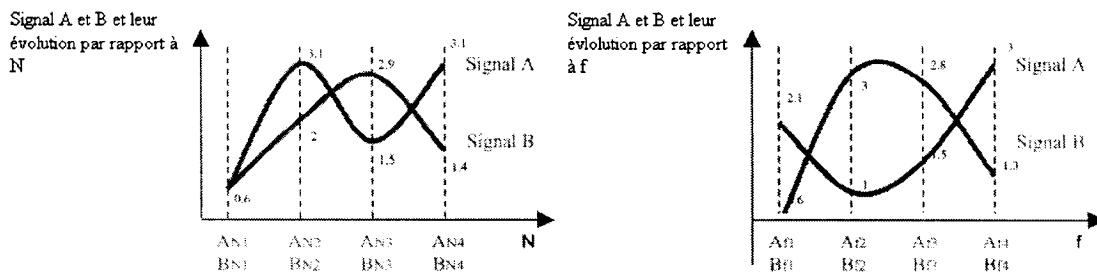


Figure 3.17 - Comparaison des signaux A et B par rapport à N et f [S. Laporte 2004].

Pour chaque point de mesure, les signaux sont comparés avec leur valeur moyenne et la différence est mesurée. Ensuite, cette différence est normalisée et le résultat est multiplié pour chacun des points de mesure pour les deux signaux comme le montre l'exemple suivant :

A et B et leur corrélation par rapport à N					A et B et leur corrélation par rapport à f				
	i=1	i=2	i=3	i=4		i=1	i=2	i=3	i=4
$CNi = ANi - \sum_j ANj / j$	-1.475	1.025	-0.57	1.025	$Cfi = Afj - \sum_j Afj / j$	0.2	-0.9	-0.4	1.1
$DNi = BNi - \sum_j BNj / j$	-1.125	0.275	1.175	-0.325	$Dfi = Bfj - \sum_j Bfj / j$	-1.325	1.075	0.875	-0.625
	i=1	i=2	i=3	i=4		i=1	i=2	i=3	i=4
$ENi = CNi / (\sum_j CNj^2)^{1/2}$	-0.687	0.478	-0.27	0.478	$Efi = Cfj / (\sum_j Cfj^2)^{1/2}$	0.134	-0.604	-0.27	0.738
$FNi = DNi / (\sum_j DNj^2)^{1/2}$	-0.67	0.164	0.699	-0.193	$Ffi = Dfj / (\sum_j Dfj^2)^{1/2}$	-0.657	0.533	0.433	-0.309
	i=1	i=2	i=3	i=4		i=1	i=2	i=3	i=4
$GNi = ENi \times FNi$	0.459	0.078	-0.19	-0.092	$Gfi = Efi \times Ffi$	-0.322	-0.116	-0.23	-0.755
correlation = $\sum_j GNj$	0.258				correlation = $\sum_j Gfj$	-0.755			

Figure 3.18 - Comparaison des coefficients de corrélation des signaux A et B par rapport à N et f [S. Laporte 2004].

Les résultats des travaux de S. Laporte (2004) peuvent être résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3.3 - Matrice de corrélation entre les entrées et les sorties métrologiques. [S. Laporte 2004]

	Fy m	Mx m	Mz m		Fy cc	Mx cc	Mz cc		Ri	Mpo	delta D	bavure			
Fy m		22%	-39%	39%	-20%	-25%	40%	45%	-42%	-10%	-8%	-11%	-48%	35%	
Mx m		-30%	18%	34%	18%	27%	38%	45%		-5%	5%	5%	35%	31%	
Mz m		-20%	-48%			-15%		-40%	-30%		-12%	-3%	5%	-5%	
Mx m	22%	-30%	-20%		31%		15%	-9%			-11%	28%	-10%	7%	
Mz m	-39%	18%	-48%	31%			8%		40%	25%	3%	3%	40%		
Mz m	39%	-34%					-16%						-35%		
	-20%	18%	15%										35%		
Fy cc	-25%	27%	-15%	-9%	8%	-16%		28%	46%	41%	35%	-9%	-22%	24%	
Mx cc	-40%	38%					20%					-7%	28%		
Mz cc	-45%	45%	-40%				48%						32%		
Mx cc	-42%		-30%	40%			41%					-11%	-14%	22%	42%
Mz cc	-10%			25%			35%							40%	
	-8%	5%	-12%		3%		-9%					46%		17%	25%
Ri	-11%	5%	-3%	-11%			-7%					45%		9%	13%
							22%					46%		49%	
delta D		28%	3%									49%		22%	6%
	-48%	35%	-8%	-10%	46%	-36%	36%		28%	32%	22%	17%	9%	22%	
bavure	-35%	31%		7%			24%		42%	40%	25%	13%	6%		

On y remarque par exemple que la hauteur de la bavure est inversement proportionnelle à la force axiale (F_z) et le moment selon cet axe.

- Afin de trouver des conditions optimales de coupe, J.P. Davim propose une autre méthode qui est basée sur l'utilisation d'un modèle inspiré de l'algorithme génétique (GA). Ce modèle considère les paramètres contrôlés suivants : la vitesse de coupe V_c (m/min), l'avance, f (mm/tr) et la durée d'opération t (min). Les paramètres qui ne peuvent pas être contrôlés sont les suivants : la force F et le moment M , l'usure V_b et la rugosité R_a (et R_t). Une solution optimale est celle qui va maximiser la durée de vie de l'outil et minimiser tous les paramètres suivants : F , M , V_b et R_a (et R_t). Donc, on doit établir un terme qui nous donne un compromis entre toutes ces caractéristiques. Ceci peut être achevé en trouvant la valeur optimale du terme suivant :

$$\frac{t^*}{\omega_1 F_1^* + \omega_2 M_1^* + \alpha \omega_3 V_{b\max}^* + \beta \omega_4 R_a^* + \omega_5 R_t^*} \quad (3.7)$$

où les étoiles représentent les valeurs normalisées (par rapport au maximum) de chaque variable.

J.P. Davim a réalisé des tests en regardant le problème avec les différentes approches suivantes :

- approche A : optimiser tous les paramètres de perçage et maximiser la durée de vie de l'outil;
- approche B : minimiser l'usure et R_a et maximiser la durée de vie de l'outil;
- approche C : minimiser la R_a seulement et maximiser la durée de vie de l'outil;
- approche D : minimiser l'usure seulement et maximiser la durée de vie de l'outil.

ce qui peut être résumé par le tableau suivant :

Tableau 3.4 - Solution optimale de perçage

	Situation	V_c (m/min)	A (mm/tr)	t (min)
$w_i=1, i=1..5$	A	50	0.05	10
$w_3=w_4=w_5=1$ et $w_1=w_2=0$	B	30	0.1	10
$w_4=w_5=1$ et $w_1=w_2=w_3=0$	C	30	0.1	9
$w_3=1$ et $w_i=1, i=1,2,4,5$	D	30	0.1	11

Il a donc obtenu donc les résultats suivants :

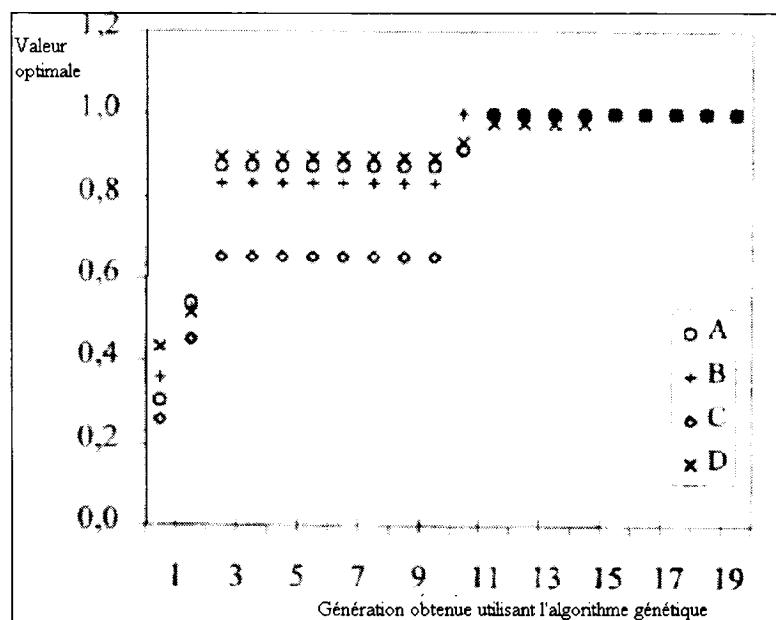


Figure 3.19 - Valeur optimale en fonction de la génération retenue utilisant l'algorithme génétique.

Il est facile de déduire que les solutions C et D sont égales en terme d'optimalité de la vitesse de coupe et de l'avance mais que leur durée de vie optimale est différente.

La solution B représente un compromis entre les solutions C et D en terme de la durée de vie optimale.

En ce qui concerne la solution A, on remarque que l'usure et la finition de surface affectent amplement la durée de vie optimale de l'outil et que la force et le moment affectent directement la vitesse et l'avance optimale. En tout, on peut conclure que la durée de vie est largement affectée par l'usure et la finition de surface (Ra).

3.2. *Plan final de comparaison*

Dans notre plan de GQM aux deux formules (3-7) et (3-8), nous avons eu tous les éléments de comparaison de la qualité de l'outil. La difficulté majeure de notre calcul dans la formule (3-7) était le calcul du paramètre de question Q_t selon les indicateurs mesurables. En d'autres mots, nous n'avons pas eu les formules précises expérimentales qui déterminent la relation de Q_t avec les métriques existantes. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé l'article (LAPORTE S. 2005) et nous avons ajouté le paramètre Q_t par une autre question de mesure FM et ajouter l'arbre de GQM à la figure 3.20. Ayant les études ci-dessus, notre diagramme de mesure aura la forme suivante :

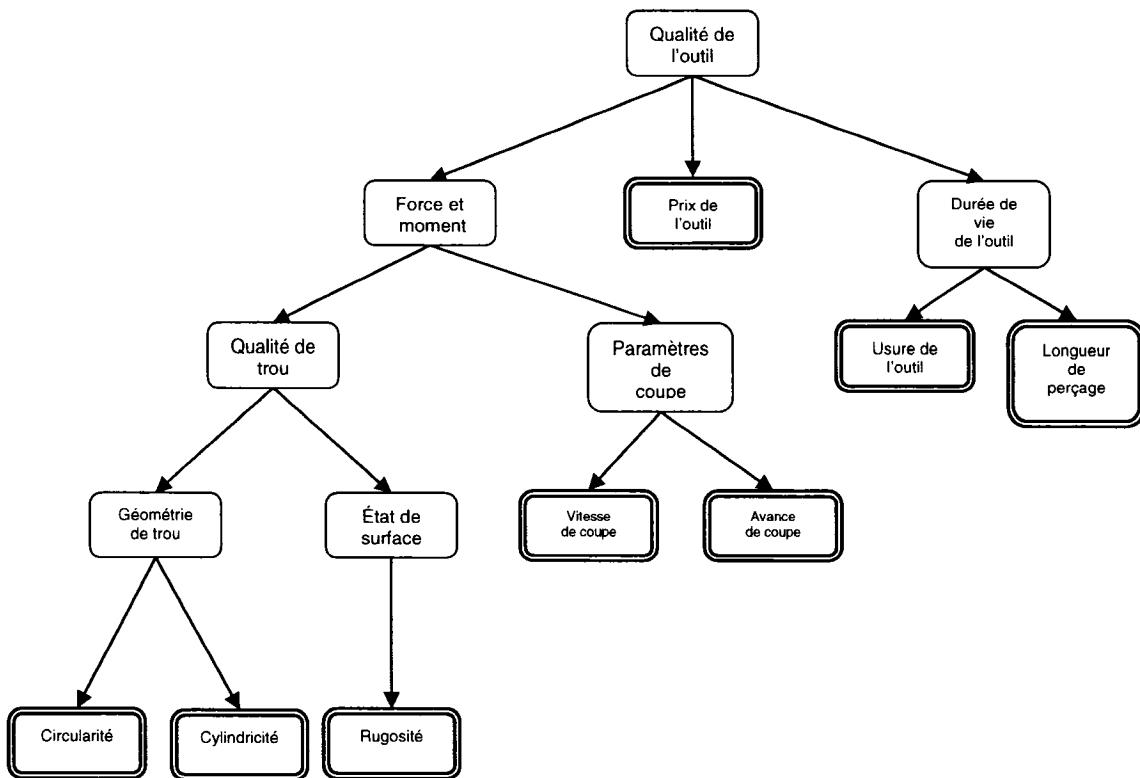


Figure 3.20 - Schéma de qualité d'outil avec des paramètres finaux métriques.

Tableau 3. 5 - Relation entre la qualité et les paramètres finaux

Relation entre la Qualité et les paramètres de l'outil			
#	Nom de paramètre	Changement du comportement de paramètre	Efficacité de l'outil
1	Force et Moment	↓	↑
		↑	↓
2	Prix de l'outil	↓	↑
		↑	↓
3	Durée de vie de l'outil	↓	↓
		↑	↑

Nous avons :

$$Qo = f(Co, Po, FM) \quad (3.8)$$

La fonction ci-dessus peut avoir une forme polynomiale dans laquelle chacun de ces critères a une pondération qui est déterminée selon son importance et son effet sur la tendance de la qualité de l'outil. En d'autres mots, cette formule peut être écrite comme :

$$Qo = \alpha * Co + \beta * Po + \gamma * FM * Qt \quad (3.9)$$

où :

Qo = qualité de l'outil

Co = durée de vie de l'outil

Po = prix de l'outil

FM = force et moment

Qt = qualité de trou

Maintenant, chacun des éléments mentionnés en haut est mesurable dans le laboratoire. Au chapitre 4, nous allons voir les métriques mesurées dans le laboratoire. Avec les résultats obtenus, aussi la formule mentionnée, nous sommes capables de comparer les deux forets dans un cadre prédéfini.

CHAPITRE 4 - TEST DE PERÇAGE ET COMPARAISON DES OUTILS PAR LA MÉTHODE GQM

4.1 *Description des tests*

Les tests ont été effectués dans les conditions suivantes : Ayant le composite GrA-Ni®, nous avons planifié notre test avec les éléments mentionnés au chapitre 2. Nous avons prévu percer ce composite avec deux forets choisis (foret en carbure solide (Guhring) et foret à tête amovible (Iscar)). Le perçage a été sur la machine Mitsui Seiki HU40-T dans laboratoire de recherche en fabrication virtuelle de l'École Polytechnique dans le cadre du processus expérimental proposé au chapitre 2. Les détails du matériau et du type de forets sont:

1. matériau CMM, un composite à matrice de métal à base d'aluminium renforcé de particules de céramique;
2. foret en carbure solide produit par la compagnie Guhring, type DK460UF
3. foret à tête amovible produit par la compagnie Iscar, type IC908 (K20-K30).

Tous les tests ont été effectués dans la condition de la vitesse de rotation de l'outil constante 6000 rpm et la vitesse d'avance 0.2 mm/rev. Afin de mieux observer la réaction des outils en fonction des facteurs définis au chapitre (2), l'usure de l'outil de la surface du trou, la rugosité, la force de pénétration et le moment, la vibration de notre test de perçage jusqu'à la fin de vie de chacun des outils choisis. La profondeur des trous percés (longueur de perçage) est prévue à 30 mm. Enfin, de nos observations de comportements de chacun de ces forets, notre dernière étape de test est prévue comme la comparaison des deux forets en fonction de la stabilité. Les tests ont été répétés deux fois.

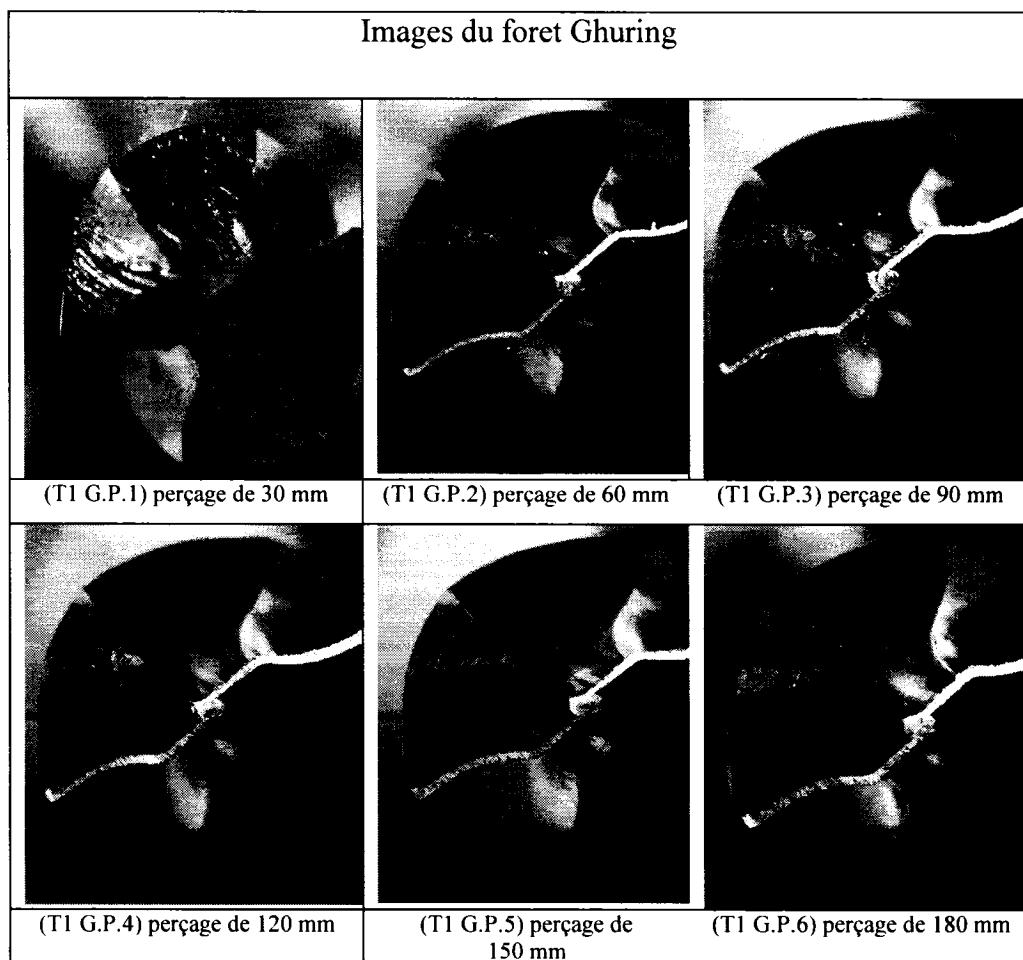
4.2 Tests effectués

Notre premier test est la détermination d'usure des outils. Pour les forets en carbure solide et les forets à tête amovible, des tests préliminaires ont été effectués avec les avances $f = 0.2$ mm/rev pour des vitesses de rotation de l'outil 6000 rpm.

4.2.1 Mesure de l'usure Vb

4.2.1.1 Forets en carbure solide

Le mode d'usure des forets est l'abrasion qui a lieu sur la pointe du foret et sur l'arête principale comme conséquence du frottement entre l'outil et les particules abrasives du composite usiné.



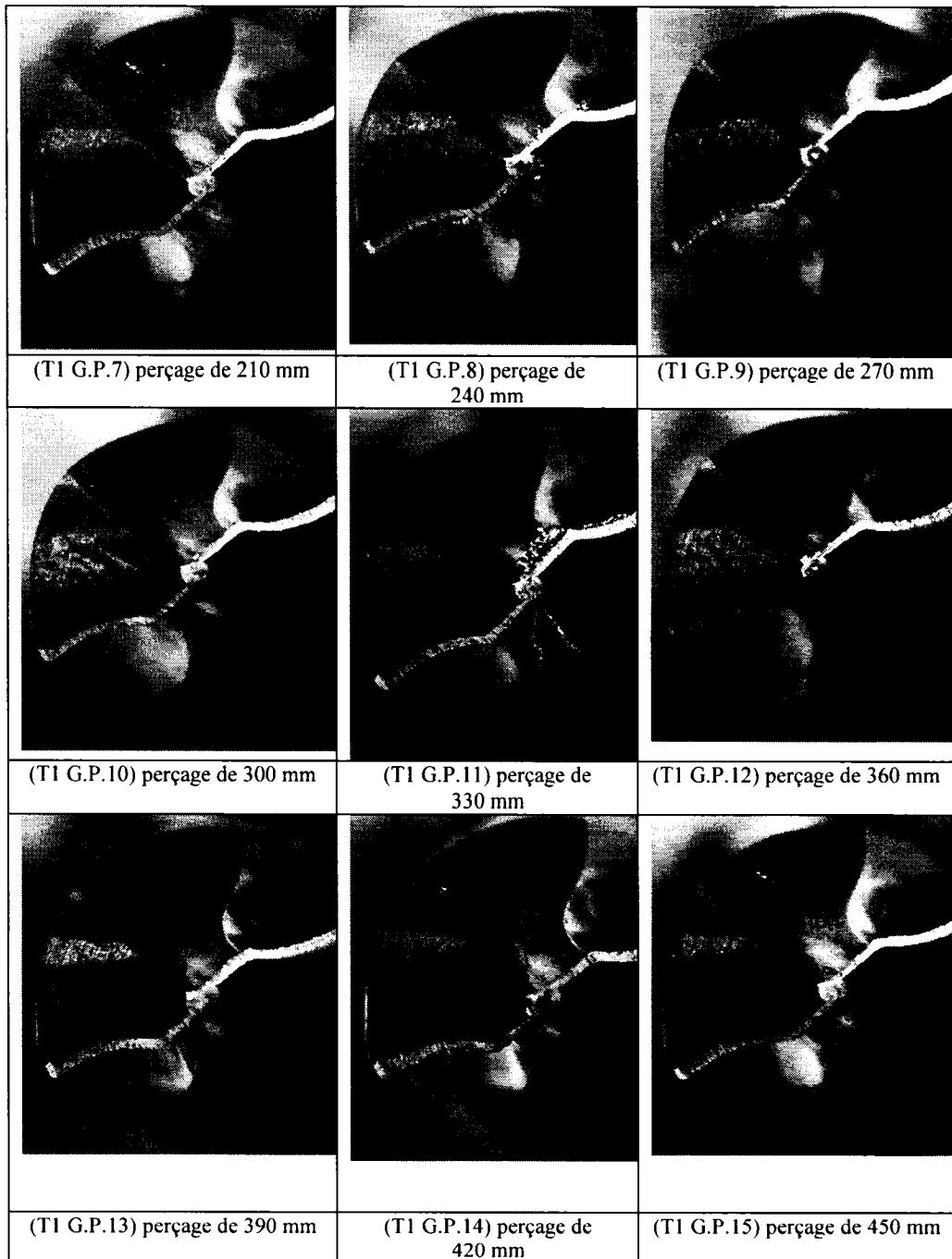


Figure 4.1 -Progression de l'usure pour le foret en carbure solide Guhring(G).

Le premier test.

Où nous avons :

T1 = premier test;

T2 = deuxième test;

G = Guhring;

P = photo correspondant au numéro du trou.

Dans notre cas, pour mesurer l'usure du foret, une procédure très simple a été utilisée ; utilisant le logiciel de traitement d'image *Irfan view*, l'usure a été mesurée en comptant le nombre de pixel situé (verticalement).

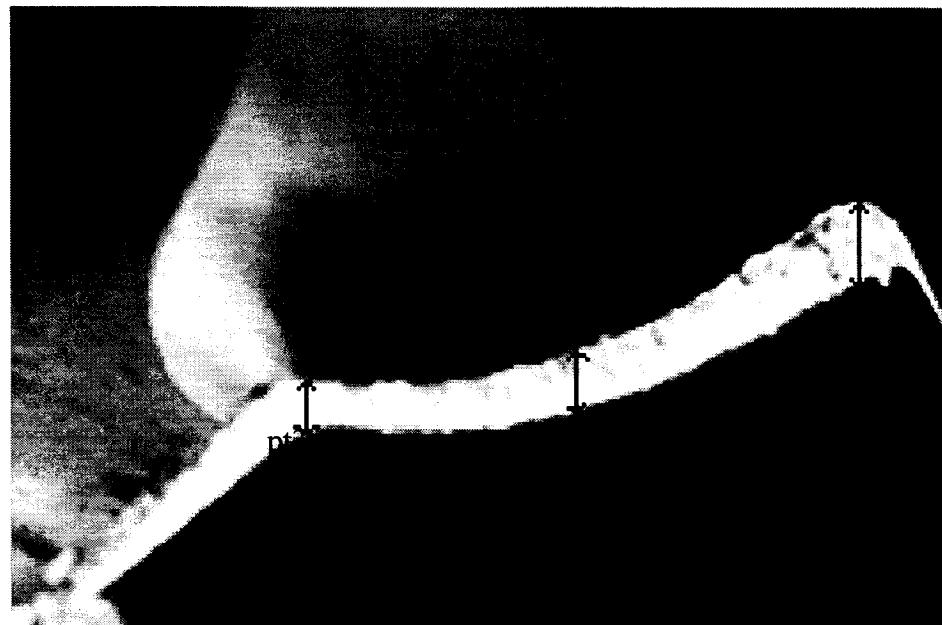


Figure 4.2 -Usure foret Guhring.

Ces tests ont été effectués pour différentes valeurs de perçage dans le 1er et 2e test. (210 mm, 420 mm, etc.). L'usure a été mesurée aux trois endroits indiqués par des flèches. Les résultats suivants ont été obtenus dans les deux tests.

Tableau 4.1 - Résultats d'usure pour le premier test

Longueur de perçage	Usure au point1 (mm)	Usure au point2 (mm)	Usure au point3 (mm)	Vitesse-point1 (m/min)	Vitesse-point2 (m/min)	Vitesse-point3 (m/min)
210	0.497208	0.392532	0.314026	188.4956	122.5221	56.54867
420	0.601883	0.497208	0.418701	188.4956	122.5221	56.54867
630	0.732727	0.575714	0.44487	188.4956	122.5221	56.54867
840	0.837403	0.601883	0.471039	188.4956	122.5221	56.54867
1020	0.863571	0.601883	0.471039	188.4956	122.5221	56.54867
1200	0.863571	0.601883	0.471039	188.4956	122.5221	56.54867
1620	0.994416	0.628052	0.471039	188.4956	122.5221	56.54867
1800	1.256104	0.68039	0.523377	188.4956	122.5221	56.54867
2100	1.517792	0.88974	0.575714	188.4956	122.5221	56.54867

Tableau 4.2 - Résultats d'usure du deuxième test

Longueur de perçage	Usure au point1 (mm)	Usure au point2 (mm)	Usure au point3 (mm)	Vitesse-point1 (m/min)	Vitesse-point2 (m/min)	Vitesse-point3 (m/min)
210	0.598203	0.472266	0.346328	188.4956	122.5221	56.54867
420	0.755625	0.535234	0.440781	188.4956	122.5221	56.54867
630	0.834336	0.582461	0.472266	188.4956	122.5221	56.54867
900	0.944531	0.598203	0.472266	188.4956	122.5221	56.54867
1050	1.070469	0.708398	0.50375	188.4956	122.5221	56.54867
1200	1.101953	0.787109	0.519492	188.4956	122.5221	56.54867
1650	1.338086	0.818594	0.535234	188.4956	122.5221	56.54867
1800	1.306602	0.881563	0.566719	188.4956	122.5221	56.54867
1950	1.495508	1.070469	0.582461	188.4956	122.5221	56.54867

Afin de pouvoir analyser les résultats précédents, on a dressé les graphiques suivants :

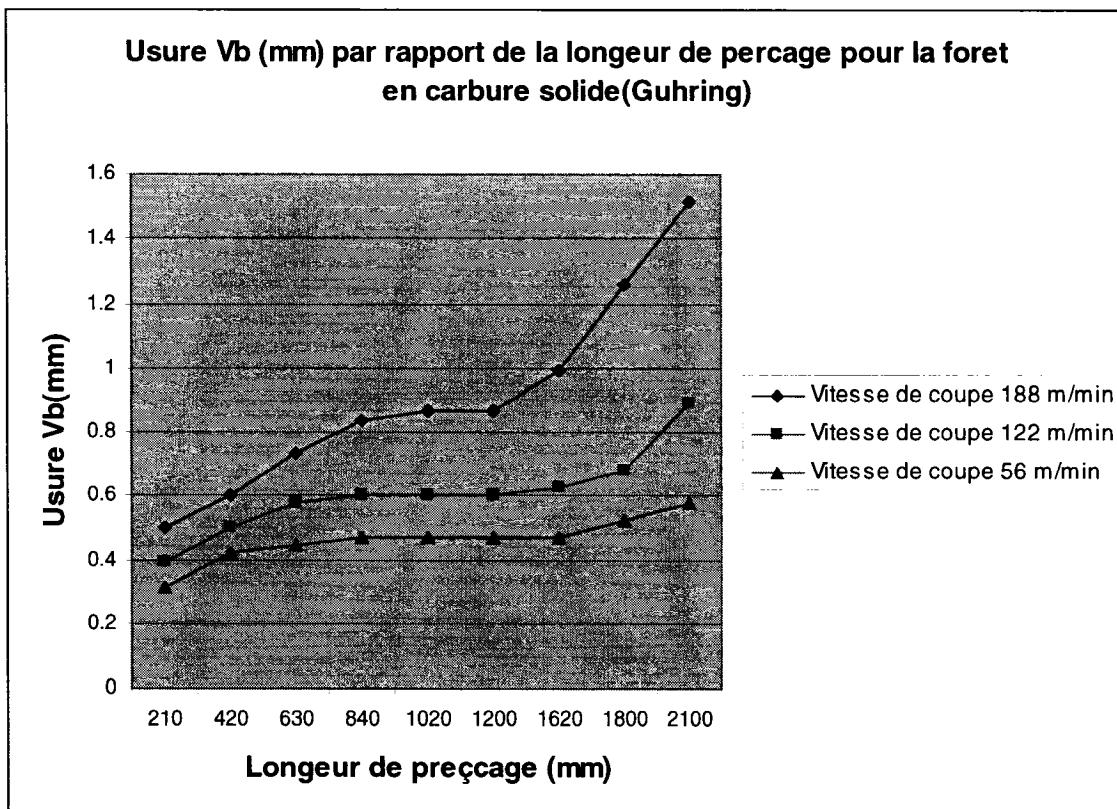


Figure 4.3 - Usure de l'outil vs longueur de perçage (1er test).

La vitesse de rotation 6000 rpm avance $f=0.2$ mm/rev.

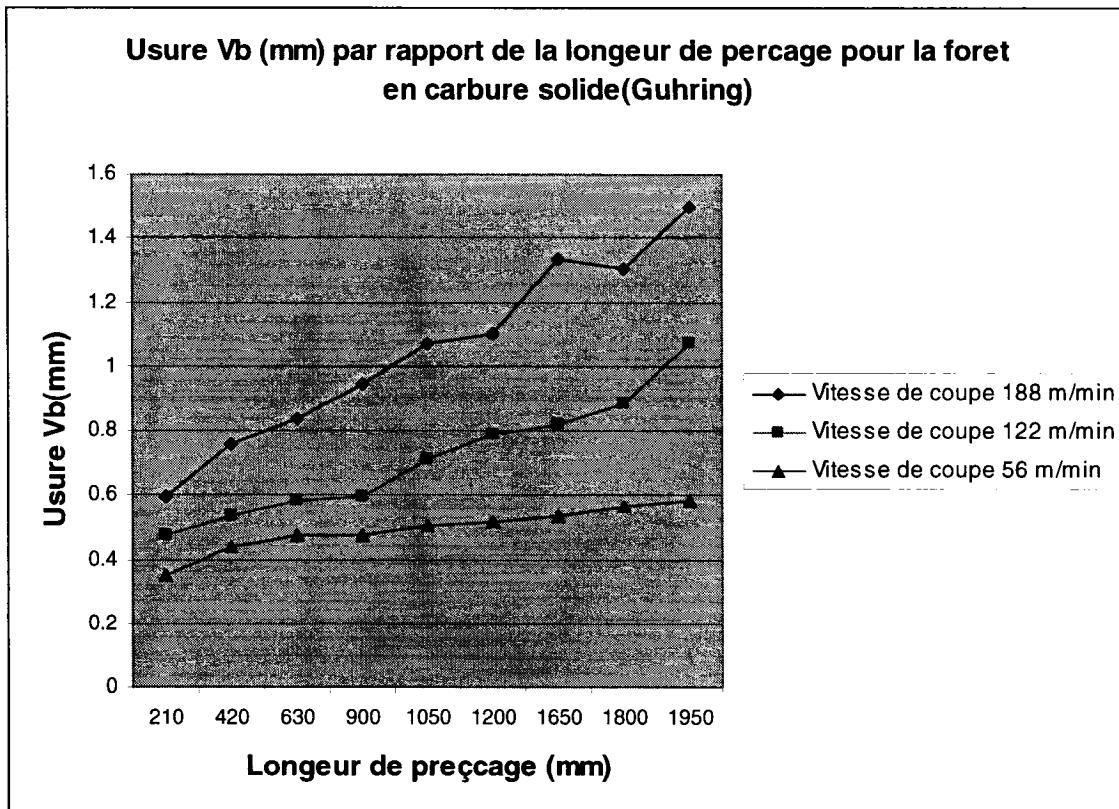


Figure 4.4 - Usure de l'outil vs longueur de perçage (2e test).

La vitesse 6000 rpm f=0.2 mm/rev.

En dressant un graphique de la moyenne pour les trois graphes, on s'assure de la tendance uniforme de cette caractéristique.

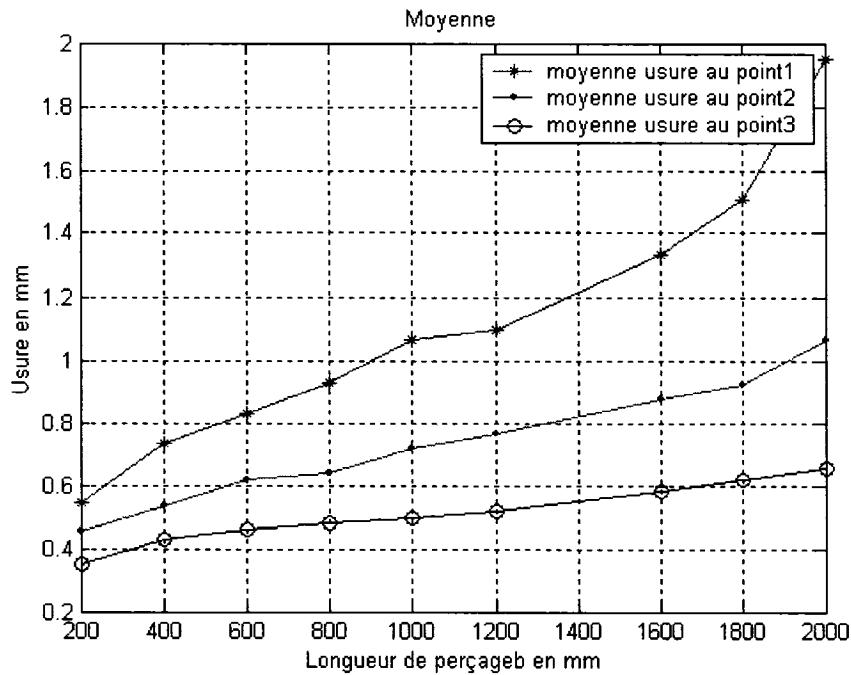


Figure 4.5 - Moyenne de l'usure de l'outil vs longueur de perçage.

- En mesurant l'usure V_B sur la face de dépouille, il a été montré que les forces de coupe augmentent l'usure à cause du frottement qui se produit sur la face de dépouille.

4.2.1.2 Forets à tête amovible

Pour le test de forets à tête amovible (Iscar), nous avons utilisé le même processus afin de trouver l'usure V_b versus longueur de perçage. La profondeur pour les tests effectués était 30 millimètres pour chaque trou à percer dans la condition de coupe 6000 rpm et l'avance de coupe 0.2 mm/rev. Après avoir percé 12 trous, le foret a cassé et a resté dans le matériau.

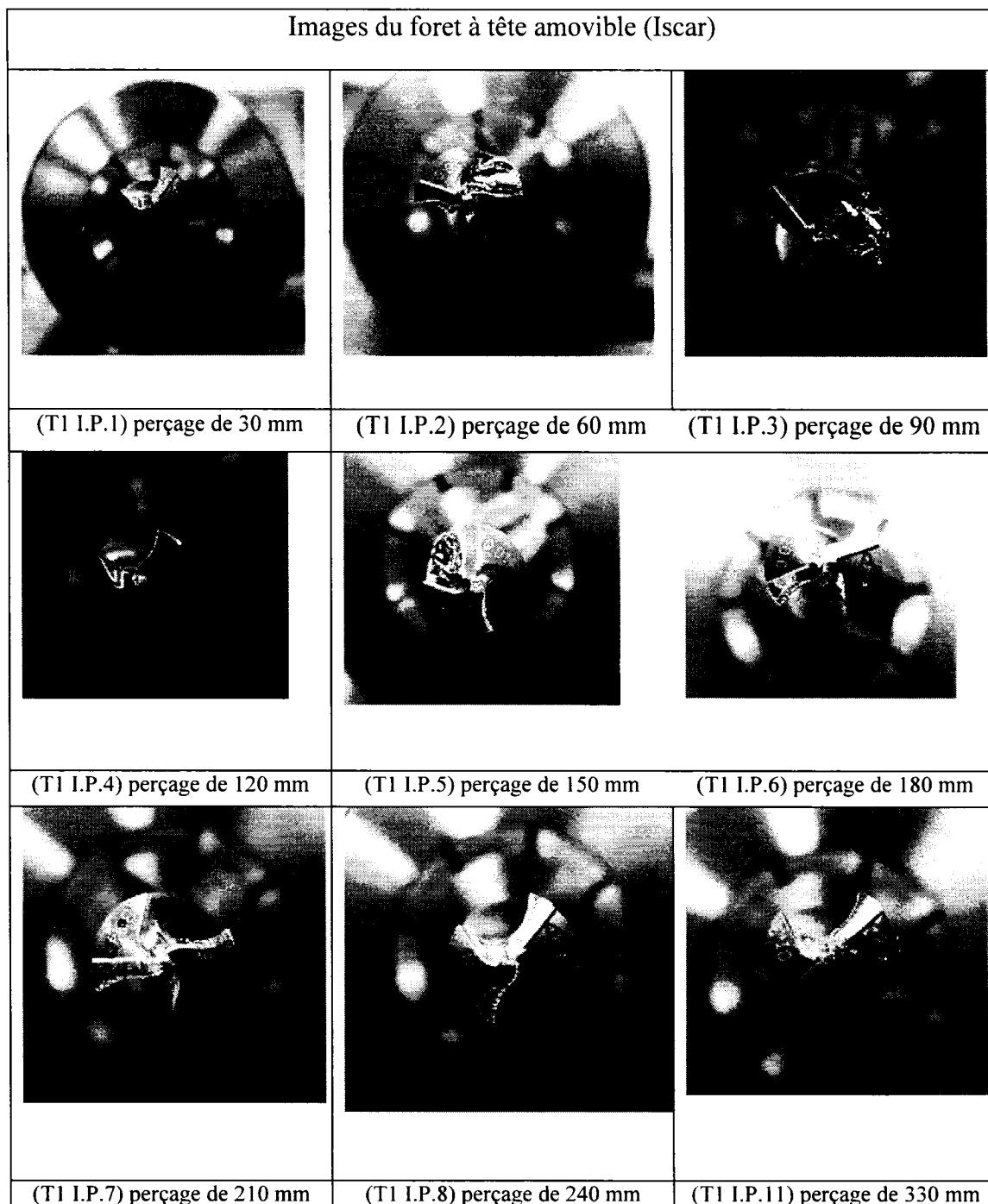


Figure 4.6 -Photos (P) d'usure pour le foret à tête amovible Iscar (I).

Tableau 4.3 - Résultats d'usure pour 1er test

Longueur de perçage	Usure au point1 (mm)	Usure au point2 (mm)	Usure au point3 (mm)	Vitesse-point1 (m/min)	Vitesse-point2 (m/min)	Vitesse-point3 (m/min)
30	0.16	0.15	0.12	188.4956	122.5221	56.54867
60	0.18	0.17	0.15	188.4956	122.5221	56.54867
90	0.24	0.22	0.20	188.4956	122.5221	56.54867
120	0.28	0.26	0.22	188.4956	122.5221	56.54867
150	0.29	0.28	0.26	188.4956	122.5221	56.54867
180	0.30	0.27	0.25	188.4956	122.5221	56.54867
210	0.33	0.30	0.28	188.4956	122.5221	56.54867
240	0.38	0.35	0.33	188.4956	122.5221	56.54867
270	0.40	0.38	0.36	188.4956	122.5221	56.54867
300	0.43	0.41	0.38	188.4956	122.5221	56.54867
330	0.45	0.43	0.41	188.4956	122.5221	56.54867
360	0.48	0.46	0.43	188.4956	122.5221	56.54867

Tableau 4.4 - Résultats d'usure du 2e test

Longueur de perçage	Usure au point1 (mm)	Usure au point2 (mm)	Usure au point3 (mm)	Vitesse-point1 (m/min)	Vitesse-point2 (m/min)	Vitesse-point3 (m/min)
30	0.14	0.13	0.11	188.4956	122.5221	56.54867
60	0.19	0.18	0.17	188.4956	122.5221	56.54867
90	0.25	0.22	0.20	188.4956	122.5221	56.54867
120	0.26	0.24	0.22	188.4956	122.5221	56.54867
150	0.28	0.26	0.24	188.4956	122.5221	56.54867
180	0.30	0.27	0.26	188.4956	122.5221	56.54867
210	0.32	0.29	0.27	188.4956	122.5221	56.54867
240	0.35	0.35	0.33	188.4956	122.5221	56.54867
270	0.41	0.39	0.36	188.4956	122.5221	56.54867
300	0.43	0.41	0.38	188.4956	122.5221	56.54867
330	0.47	0.45	0.42	188.4956	122.5221	56.54867
360	0.48	0.47	0.44	188.4956	122.5221	56.54867

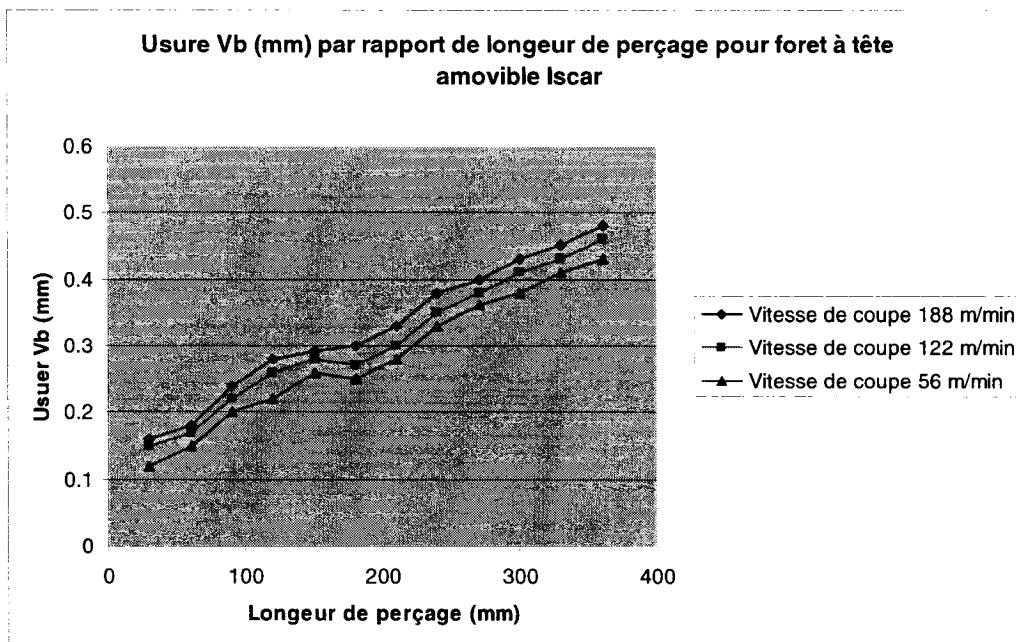


Figure 4.7 - Usure de l'outil vs longueur de perçage (1er test).

La vitesse 6000 rpm $f=0.2$ mm/rev.

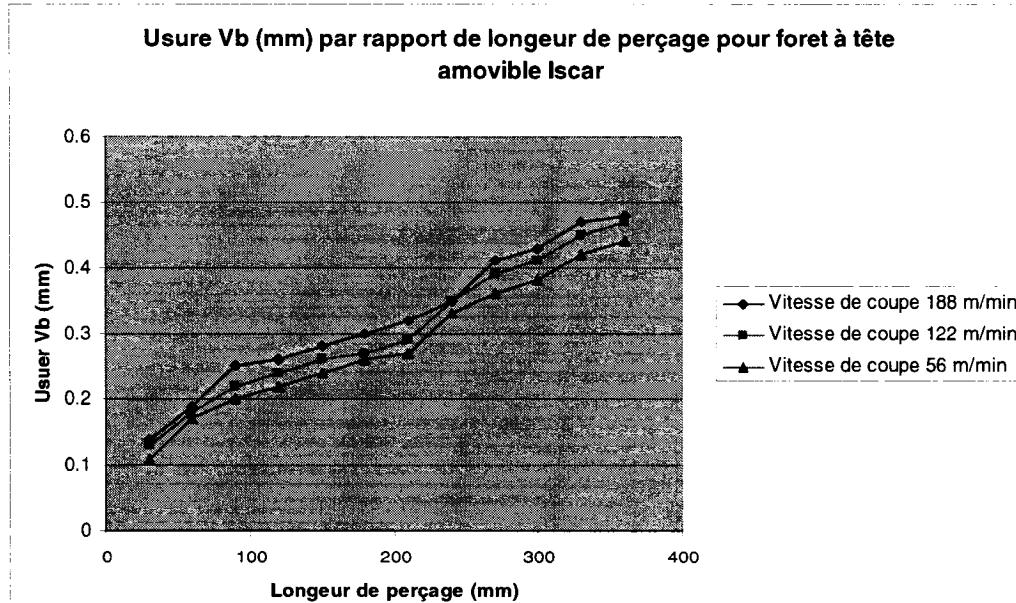


Figure 4.8 - Usure de l'outil V_B vs longueur de perçage (2e test).

La vitesse 6000 rpm $f=0.2$ mm/rev.

Afin d'assurer notre résultat, nous avons répété notre test pour la deuxième fois.

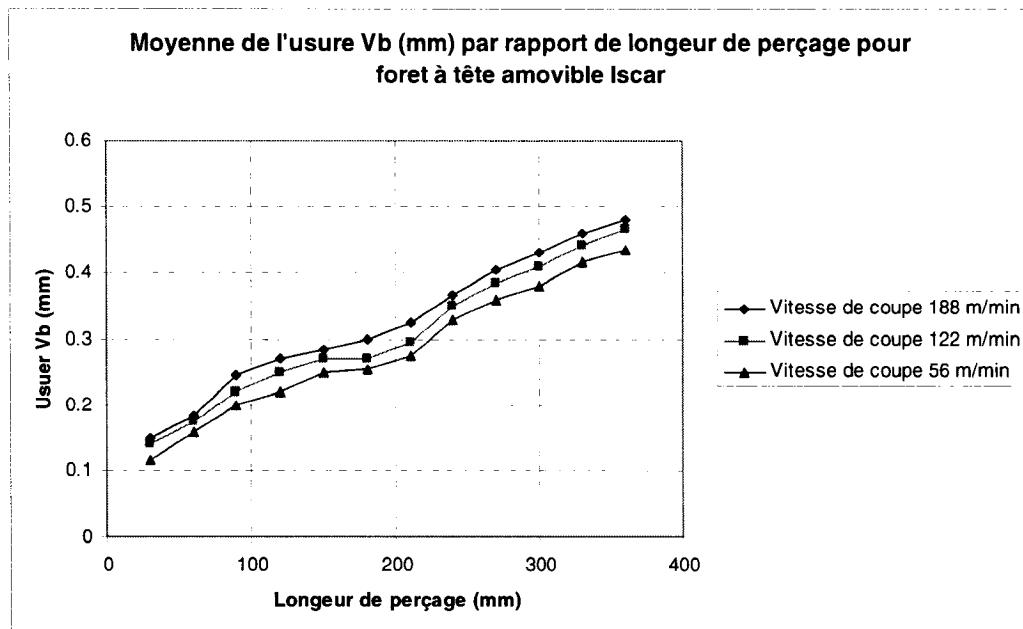


Figure 4.9 - Comparaison usure pour foret à tête amovible 6000 rpm.

Pour une avance de 0.2 mm et une vitesse de rotation 6000 rpm, nous avons observé que l'usure a une tendance à la hausse. Aussi, la durée de vie de l'outil Iscar par le nombre de trou ou la longueur de perçage est moins courte que celle de Guhring. On conclu que l'usure dépend du type de matériau.

4.2.2 Vérification forces et moments

4.2.2.1 Forets en carbure solide

Pour vérifier la force et le moment dans le laboratoire, avec les capteurs de force et de moment présentés au chapitre 2, nous avons enregistré les résultats initiaux en forme de graphe. Ensuite, nous avons déterminé les détails des signaux à l'aide de ce logiciel (K. JEMIELNIAK 1993) (voir les figures suivantes).

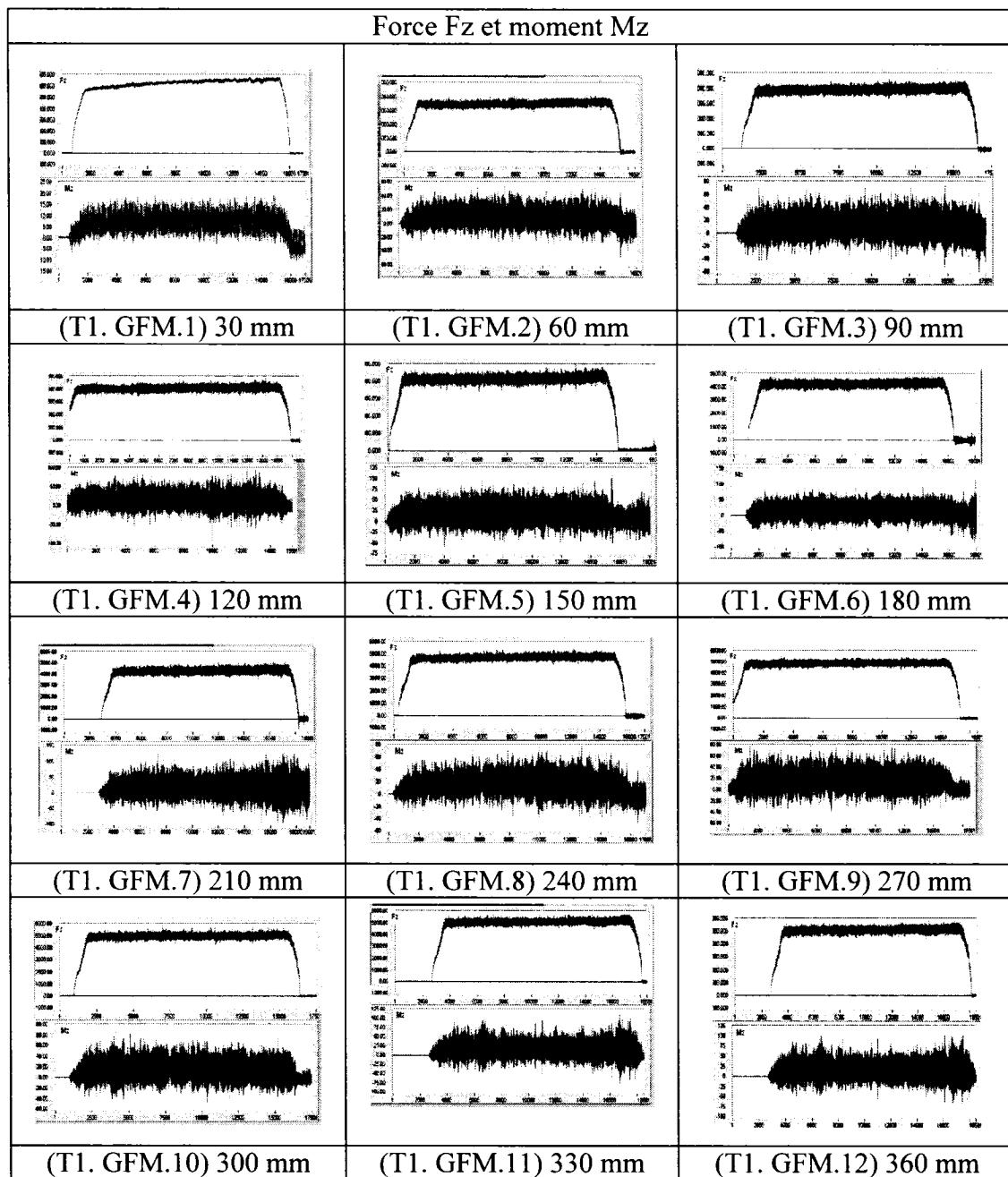


Figure 4.10 - Mesure de la force et le moment (foret).

T = test; G = Guhring; F = force; M = moment; Tn.GFM.n = force et moment pour le test numéro n pour la longueur de perçage après chaque 30 mm.

Ces figures sont présentées pour signaler le comportement de la force F_z pour un trou. Dans le chapitre sera présenté un ensemble d'images où sont présentés progressivement l'outil, la force et le moment ainsi que l'émission acoustique et la vibration. Nous avons mesuré la force et le moment selon la longueur de perçage deux fois dans la condition de coupe constante (la vitesse de coupe 6000 rpm, l'avance de coupe 0.2 mm/rev).

Sur la figure suivante est présentée la variation de la force F_z pour 40 trous, c'est-à-dire pour une longueur de perçage de 1200 millimètres.

Les courbes globales de tendance ont la même allure et la valeur de la force mesurée est du même ordre de grandeur.

Nous avons remarqué qu'après chaque perçage, la force augmente et cette augmentation correspond à la première étape de l'usure de foret (sous le nom de l'usure d'initialisation). Cette augmentation est causée par l'adhésion temporaire du matériau sur les goujures du foret. Dans le sixième ou le dix-septième trou (longueur de perçage de 480 à 540), le matériau collé s'enlève par lui-même et le perçage peut continuer sans l'intervention de l'opérateur humain. Sur le graphe, on remarque que la force commence à augmenter puisque nous sommes entrés dans la deuxième étape de l'usure du foret.



Figure 4.11 - Matériau collé sur le foret carbure solide.

L'augmentation de la force de coupe est donnée par les matériaux collés sur le foret. Après quelques perçages, la force augmente encore. Enfin, pour connaître le comportement de la force F_z quand l'usure augmente fortement, les enregistrements ont été continus au-dessus de la limite normale jusqu'à la fin de vie de l'outil. On remarque une augmentation très rapide de la force F_z , qui correspond à l'usure accélérée.

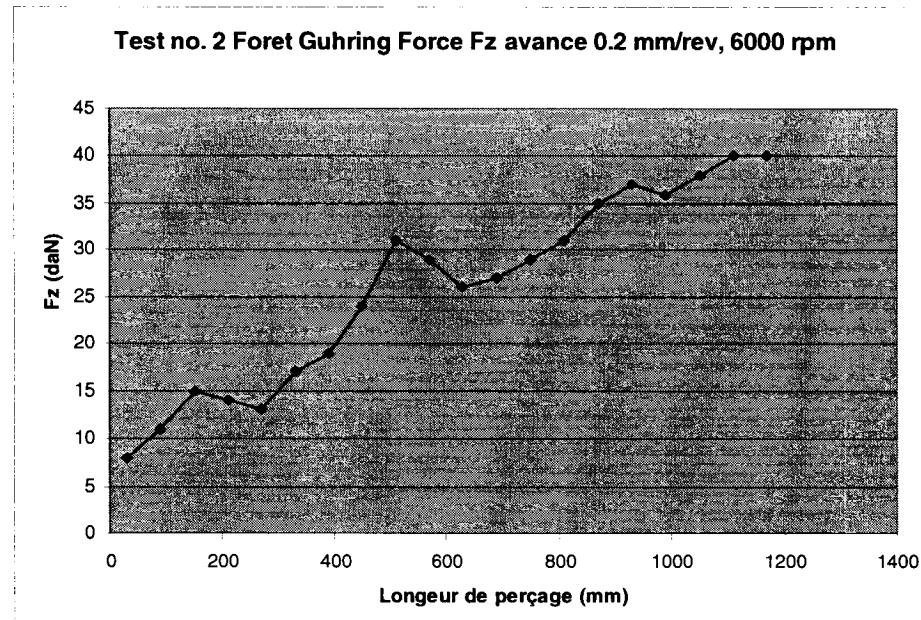


Figure 4.12 - Variation de la force F_z , foret Guhring (2e test).

La répétition des données pour la force est présentée à la figure du premier test. La variation des enregistrements pour F_z donne le même résultat que nous avons obtenu dans notre premier test. Les courbes globales de tendance ont la même allure et les valeurs de la force F_z mesurées sont du même ordre de grandeur. Nous pouvons conclure que le comportement global est pratiquement linéaire avec une tendance en croissance de la valeur de force F_z .

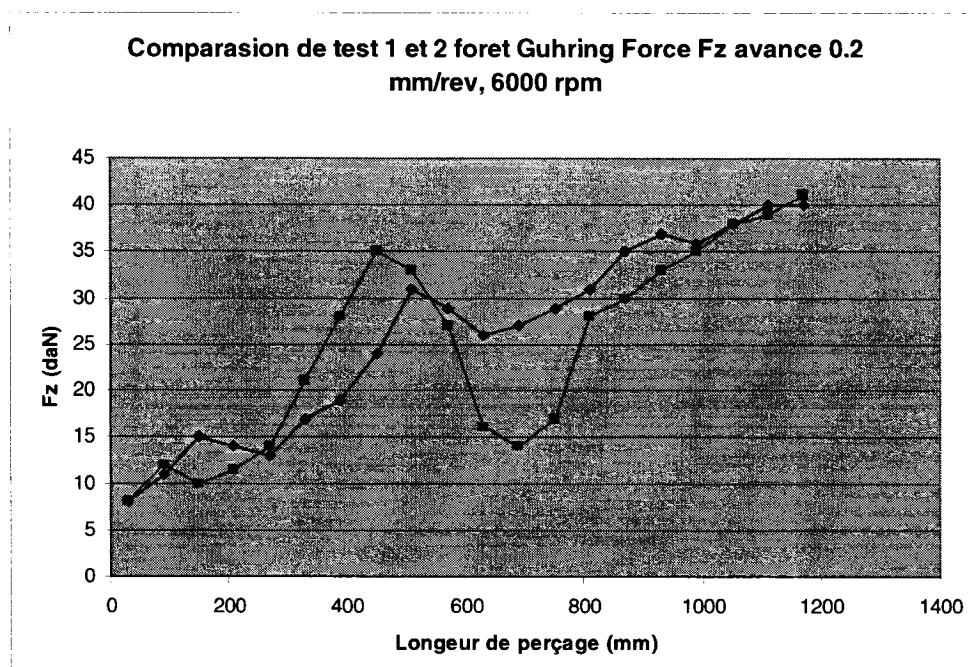


Figure 4.13 - Répétitivité des données pour la force Fz, foret Guhring.

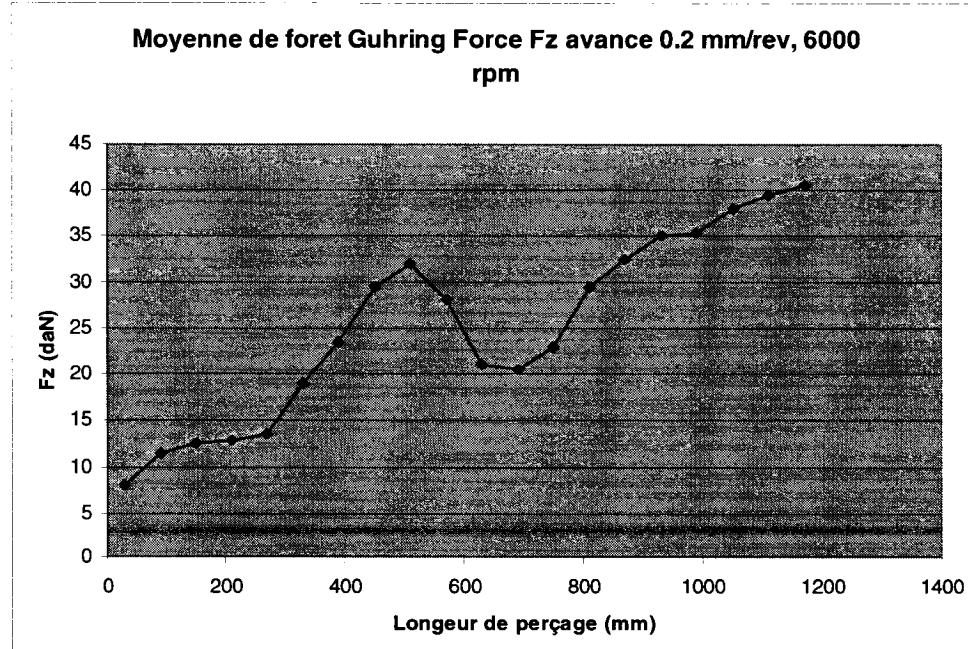


Figure 4.14 - Moyenne de la force Fz, foret Guhring, pour le premier et le deuxième tests.

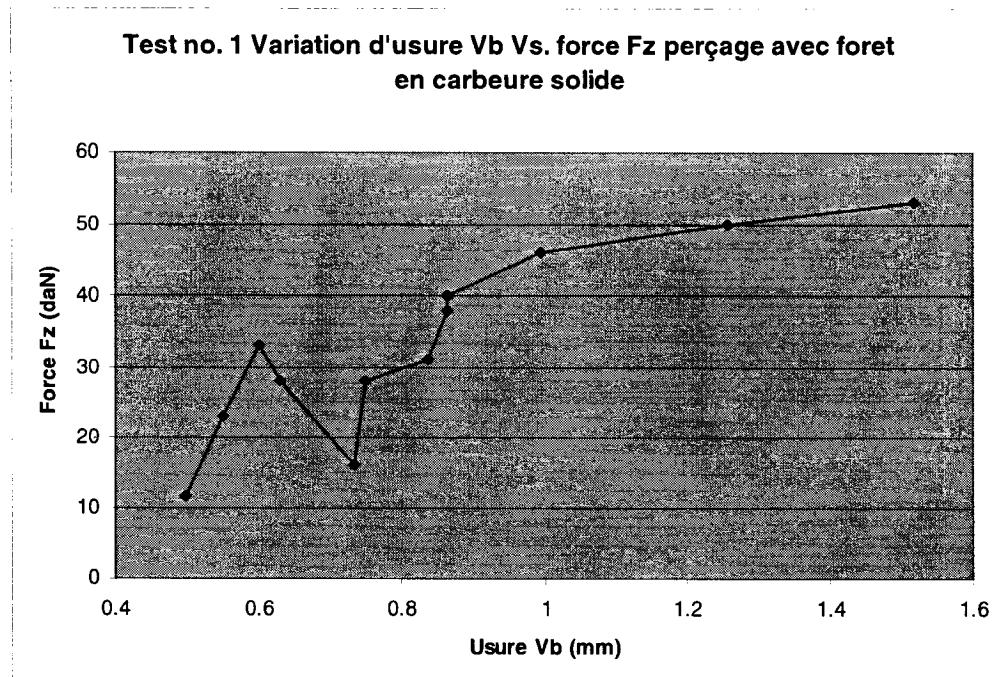


Figure 4.15 - Force Fz versus usure Vb, perçage avec foret en carbure solide Guhring.

Pour étudier l'influence de l'usure sur la force Fz, le graphique de dépendance entre la valeur d'usure Vb et la valeur de la force Fz aux deux figures précédentes. En général, la tendance de la force Fz est très légèrement croissante par rapport à l'usure.

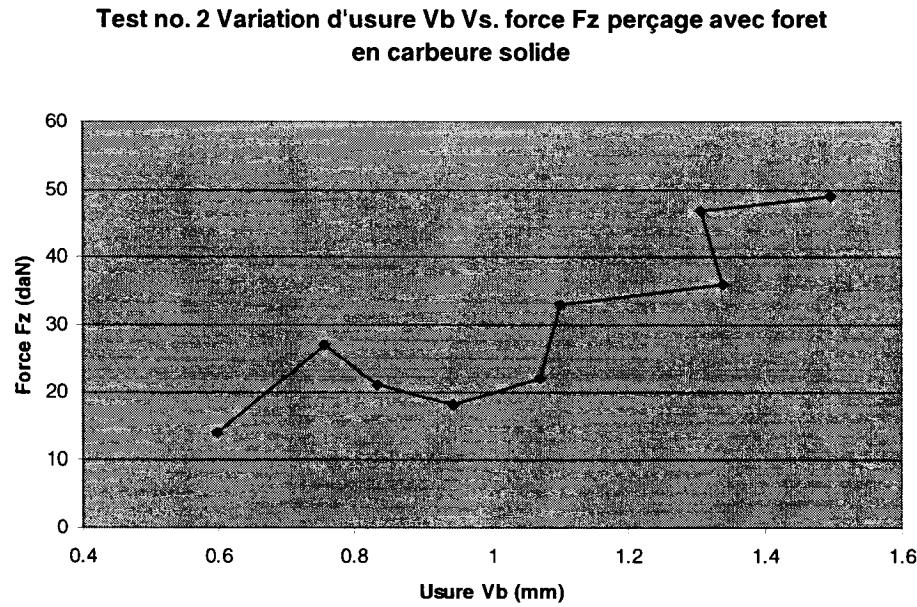


Figure 4.16 – Usure Vb versus Force Fz, perçage avec foret Guhring, carbure solide.

Dans la figure suivante, les différences peuvent être données par la variation de l'homogénéité du matériel à percer. Aussi, la variation de la force Fz correspondant à la première étape de l'usure. L'analyse de la figure de test no 1 montre une croissance linéaire pour la force Fz et l'interprétation de ces données permet d'affirmer que le concept global d'usure s'applique pour le foret en carbure solide durant le perçage de CMM.

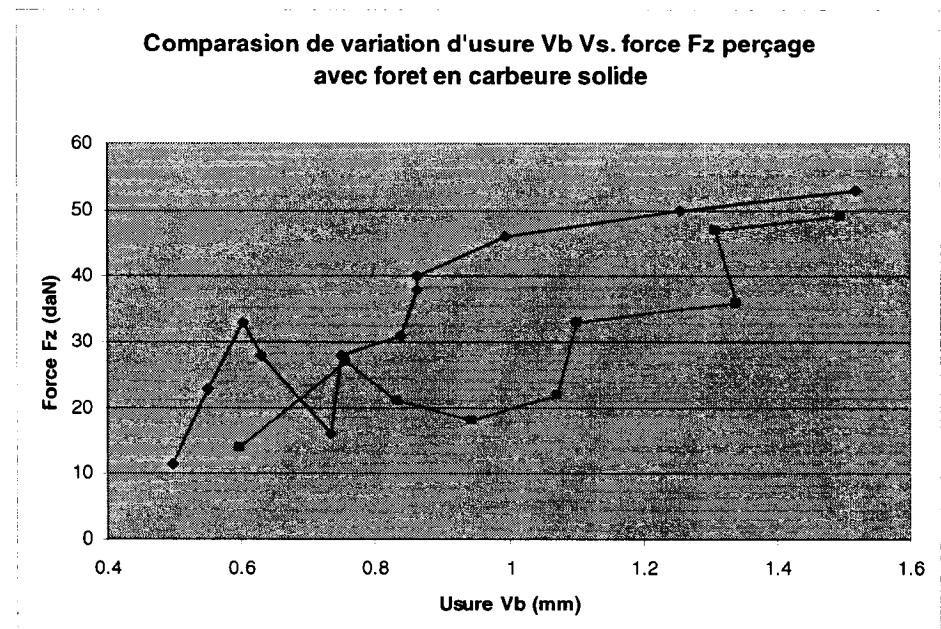


Figure 4.17 - Comparaison des tests nos 1 et 2.

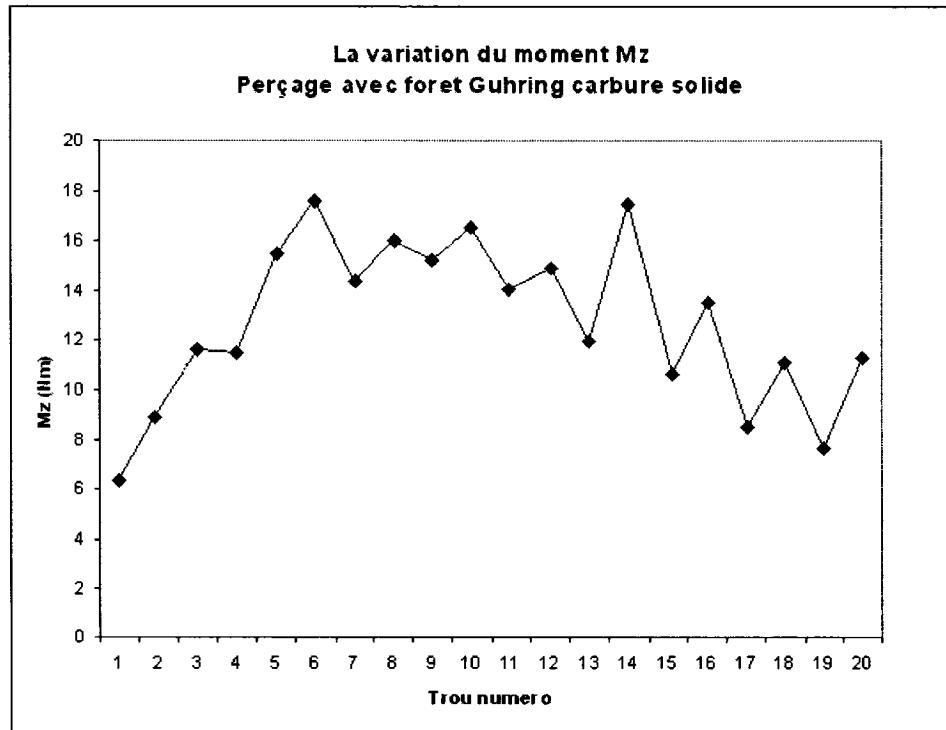


Figure 4.18 - Variation du moment Mz par rapport à la longueur de perçage.

Le graphique de la variation de M_z est présenté à la figure de test no 2 et le moment M_z montré est très sensible par rapport au matériau collé sur le foret. Aussi, on montre que la croissance de force F_z n'implique pas une croissance du moment M_z . En d'autres mots, le moment M_z est beaucoup plus sensible que la force F_z par rapport à la déposition de matériel sur les goujures du foret.

4.2.2.2 Forets à tête amovible

Dans cette section, Présentation des résultats de mesure des forces et des moments pour l'outil à tête amovible Iscar. Dans la figure de comparaison des deux tests, nous avons montré l'allure globale de l'enregistrement de la force et le moment pour l'outil Iscar. Pour vérifier la force et le moment dans le laboratoire, avec les capteurs de force et de moment présentés au chapitre 2, nous avons enregistré les résultats initiaux en forme de graphe. Ensuite, nous avons déterminé les détails des signaux à l'aide de ce logiciel (K. JEMIELNIAK 1993), (voir les figures suivantes).

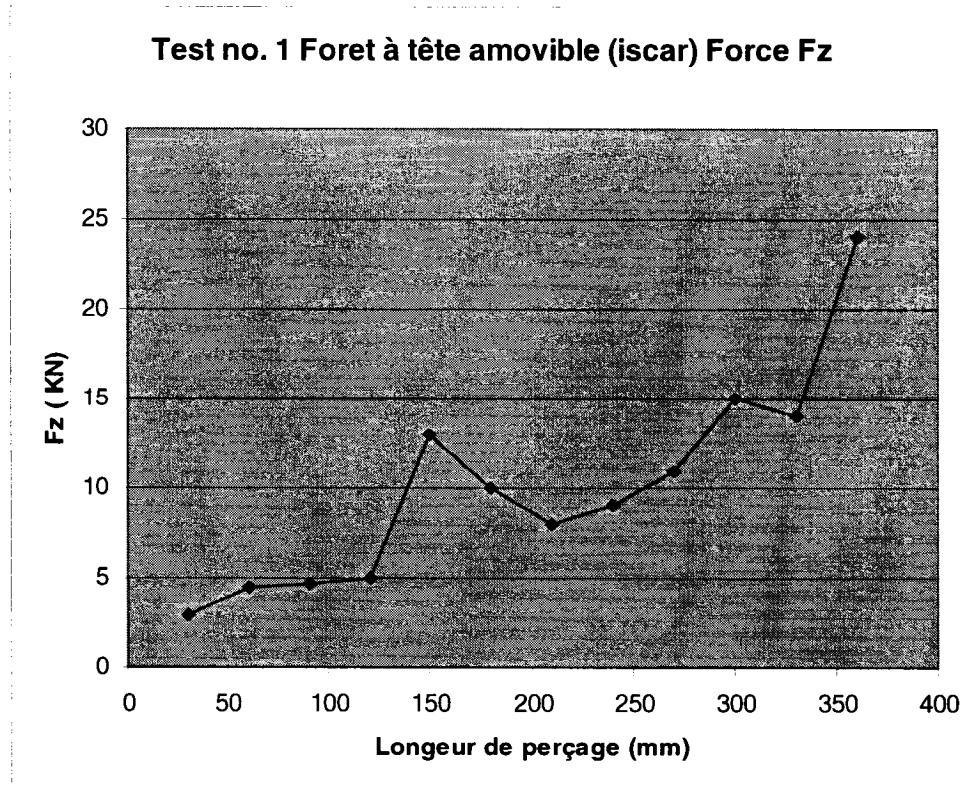


Figure 4.19 - Force Fz. Outil à tête amovible, $f=0.2$ mm/rev, 6000 rpm.

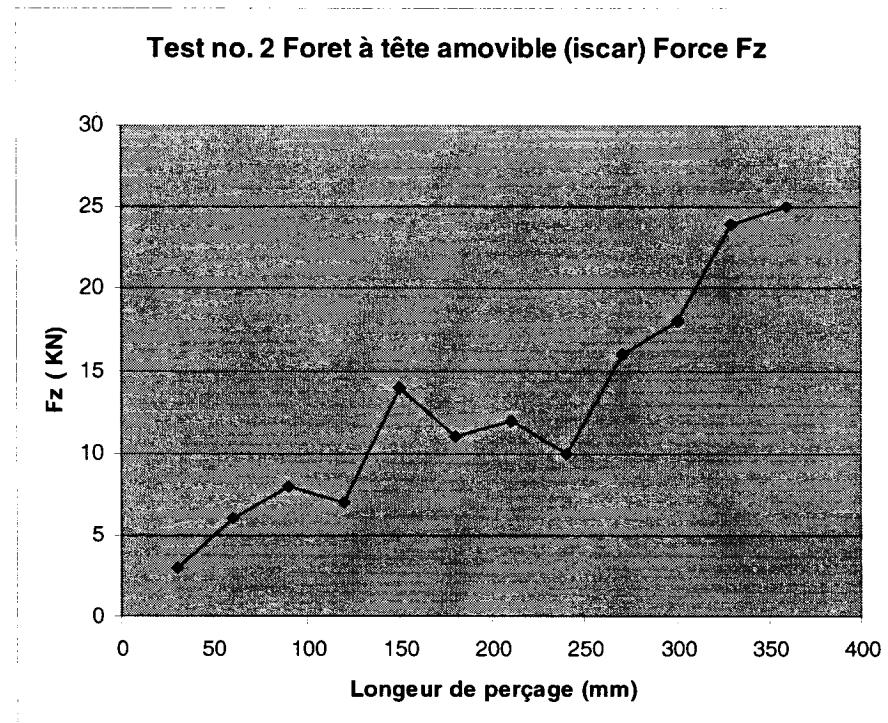


Figure 4.20 - Force Fz, Outil à tête amovible, $f=0.2$ mm/rev, 6000 rpm.

Dans la figure précédente, la variation de la force Fz est présentée par rapport à la longueur de perçage. La durée de vie de l'outil à plaquette était beaucoup plus courte par rapport à celle du foret en carbure solide. Sur les graphiques de la figure précédente seront visibles des enregistrements des essais pour le nombre maximum de 12 trous. Par contre, pour les forets en carbure solide, nous avons réussi à percer jusqu'à 60 trous dans la même condition. La durée de vie de l'outil de plaquette est plus courte en comparaison avec le foret en carbure solide. Mais les graphes obtenus dans les figures donnent les mêmes résultats. En d'autres termes, nous avons une augmentation de la force à cause de l'adhésion temporaire du matériau sur les forets.

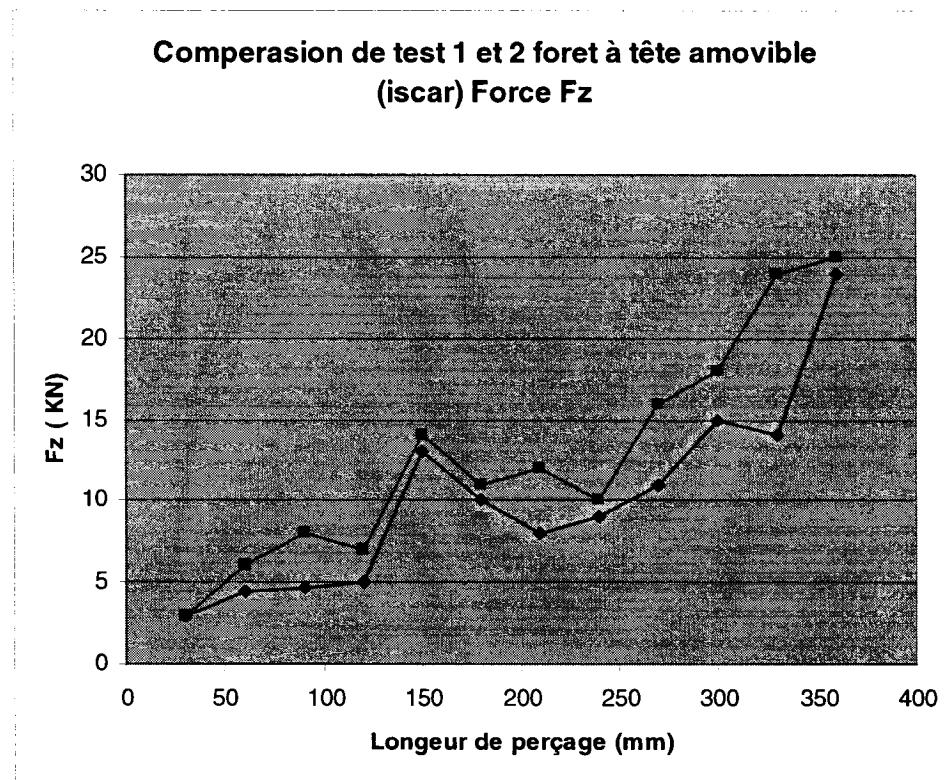


Figure 4.21 - Répétitivité des données pour la force F_z , foret à tête amovible.

Aussi, on peut conclure que le comportement global est pratiquement linéaire et légèrement croissant.

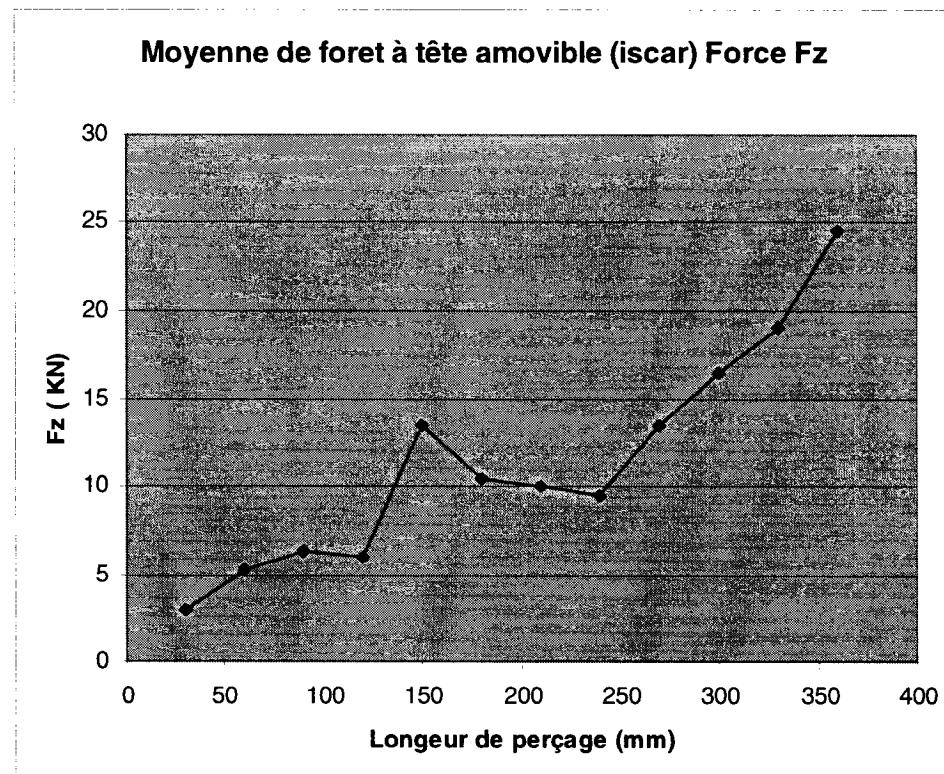


Figure 4.22 – Moyenne de la force F_z versus de la longueur de perçage, foret Iscar.

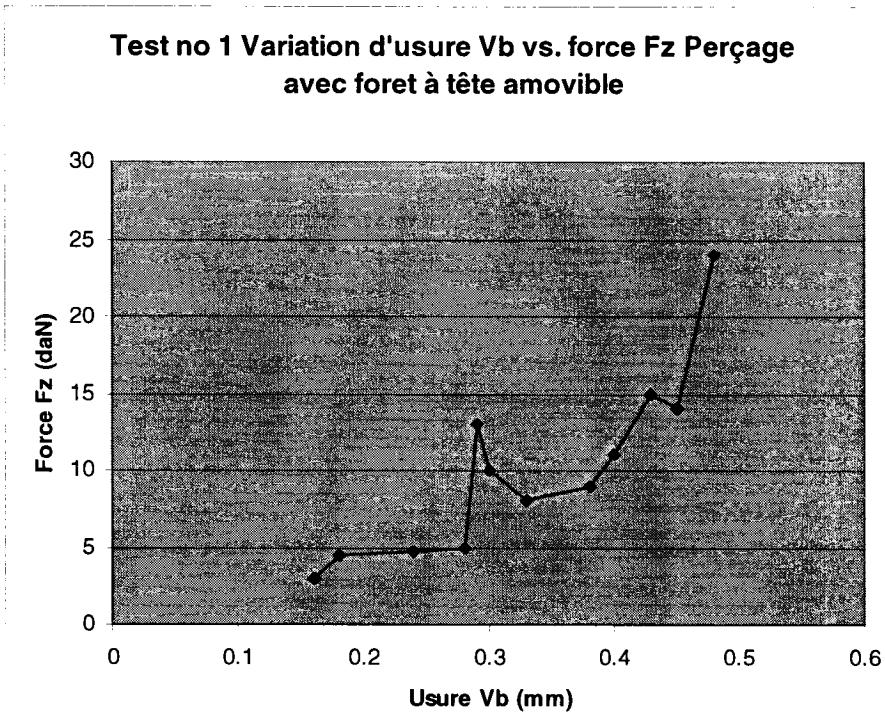


Figure 4.23 - Usure Vb versus force Fz, pour foret à tête amovible (1^{er} test).

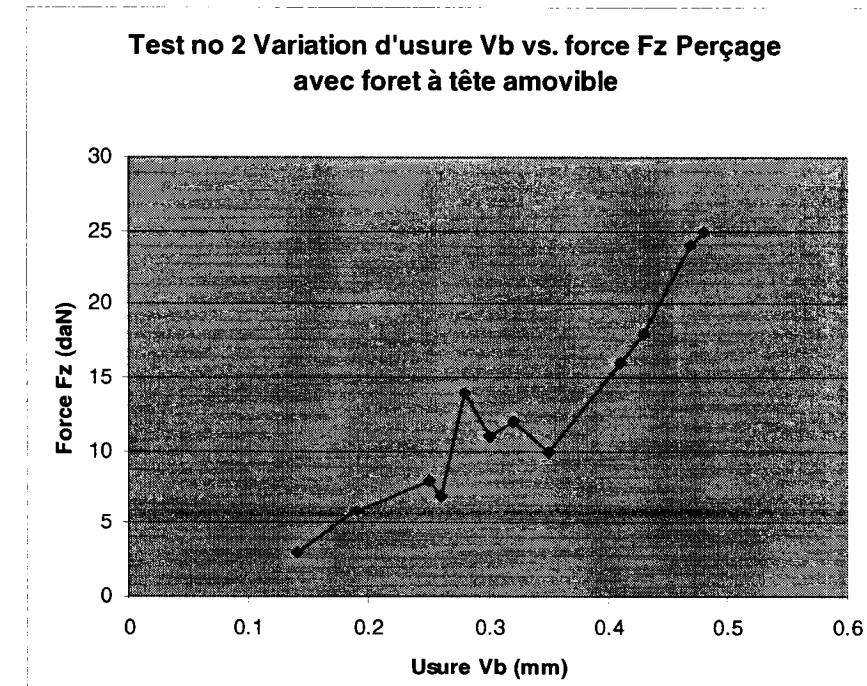


Figure 4.24 - Usure Vb versus force Fz pour foret à tête amovible (2^e test).

Dans la figure suivante, les différences peuvent être données par la variation de l'homogénéité du matériau plutôt que la formation d'une arête rapporte force diminuée où la force augmente à cause de l'adhésion du copeau de MMC sur les goujures du foret. Aussi, la variation de la force F_z correspondant à la première étape de l'usure. L'analyse de la figure 4.24 montre une croissance linéaire pour la force F_z et l'interprétation de ces données permet d'affirmer que le concept global d'usure s'applique pour le foret en carbure solide durant le perçage de CMM.

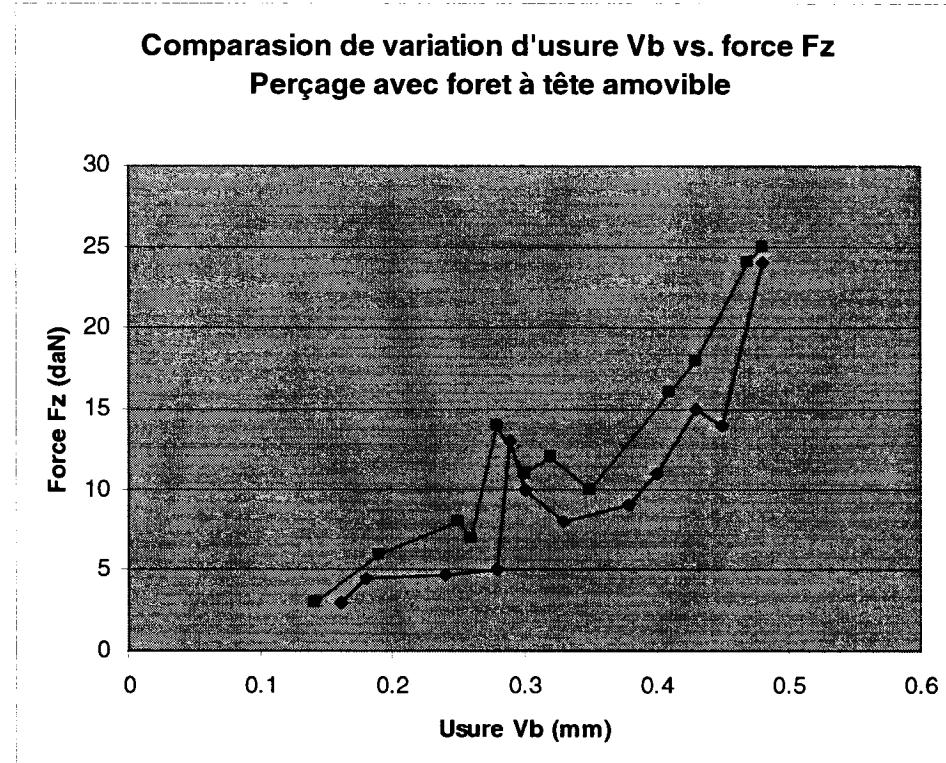


Figure 4.25 - Répétitivité des données pour la force F_z , foret à tête amovible.

Comme on le voit sur les photos, il y a l'adhésion du copeau de MMC sur les goujures du foret.

Pour étudier l'influence de l'usure sur la force F_z pour le foret à tête amovible, le graphique de dépendance entre la valeur d'usure V_b et la valeur de la force F_z aux deux figures précédentes. En général, la tendance de la force F_z est très légèrement croissante par rapport à l'usure.

4.2.3 Études de la rugosité

L'objectif de cette série de tests est d'établir l'influence de la longueur de perçage sur la rugosité. Des mesures de la surface de trou ont été effectuées pour les deux types d'outils: foret en carbure solide et foret à tête amovible, diamètre de 10 mm. La présentation de ces outils de coupe a été faite dans le chapitre 2. Les mesures pour une vitesse de coupe 6000 rpm et avance 0.2 mm/rev sont effectuées. Chaque mesure a été répétée deux fois.

Dans les sections suivantes, nous expliquons en détail notre méthodologie de travail. La rugosité a été évaluée à partir de 5 mm de profondeur de perçage donc dans la zone de perçage stable (à l'entrée du foret dans les matériaux s'enregistre une zone d'une très faible instabilité). Les profilogrammes ont été tracés avec un appareil SVC 4000 H4 avec le logiciel SURFPAK.

4.2.3.1. Forets en carbure solide

Pour le foret en carbure solide (Guhring), la variation de la rugosité R_a est présentée aux figures 4.26 et 4.27.

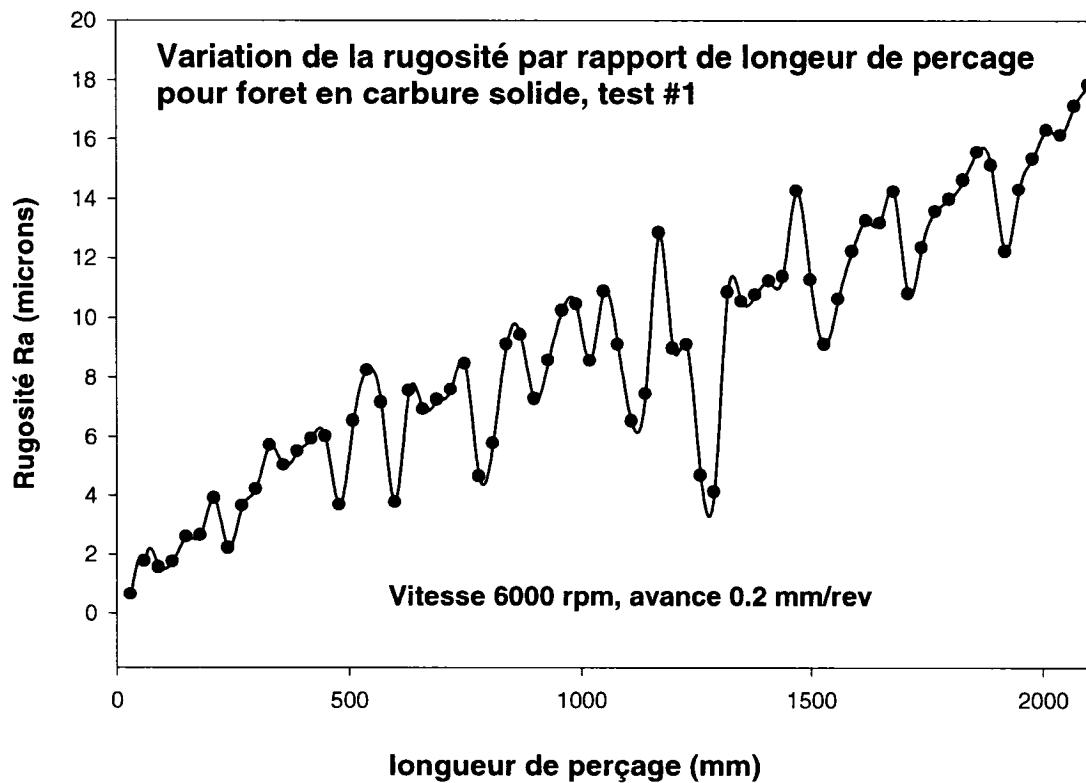


Figure 4.26 - Rugosité Ra en fonction de la longueur de perçage pour forets en carbure solide, test 1.

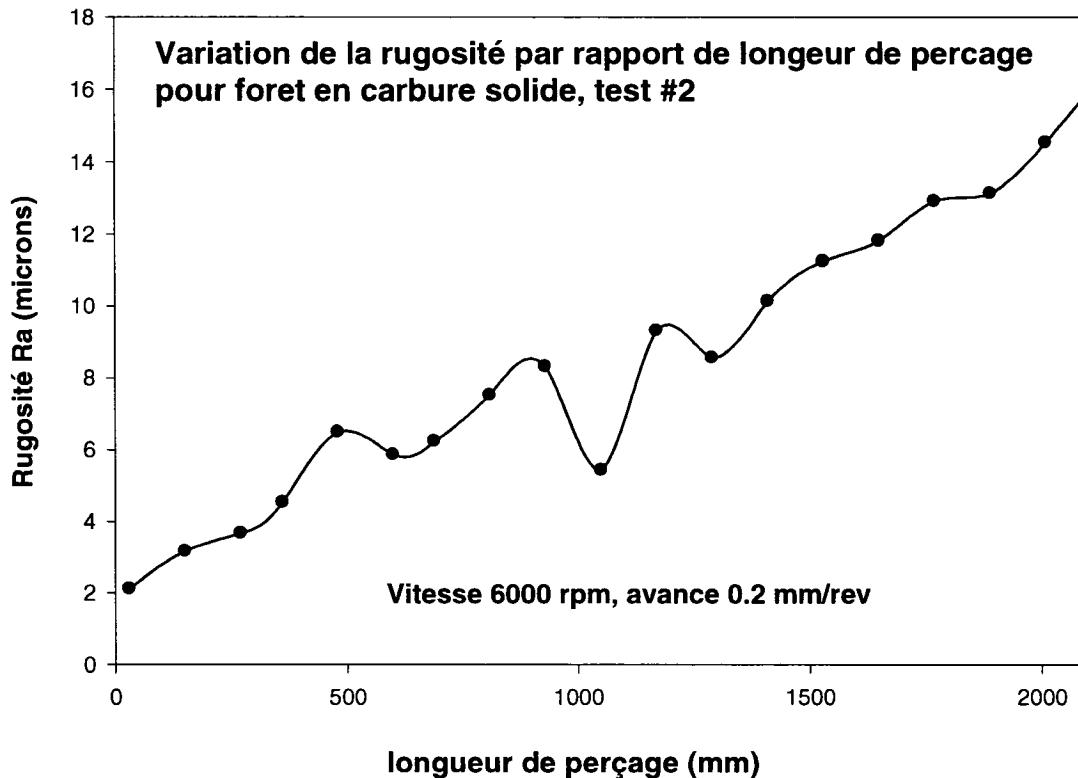


Figure 4.27 - Rugosité Ra en fonction de la longueur de perçage pour forets en carbure solide, test 2.

D'après les résultats obtenus dans les figures 4.27 et 4.28, nous observons que les courbes ont des tendances de croissances. Avec l'augmentation de la longueur de perçage, le foret s'use rapidement, ce qui confirme les résultats obtenus dans la section 4.1.

Nous avons remarqué que la valeur de la rugosité Ra pour chaque trou est très instable. Le fait que l'aluminium s'accumule dans la goujure pour l'évacuation des copeaux a une influence sur tous les paramètres mesurés. La rugosité est affectée par la quantité des copeaux accumulés, bloquant la pénétration du foret dans le matériau. En ajoutant une force supplémentaire, causée par le frottement des copeaux sur les parois du canal, le signal de force est déformé. L'entassement des copeaux au bout de l'outil tend, par

contre, à produire une résistance statique à l'avancement de l'outil. Ce frottement fait que les trous présentent une surface non uniforme, avec des portions lisses si l'outil ou les copeaux agglomérés écrouissent la surface usinée et des portions âpres, à cause de l'arrachement de l'aluminium par microsoudure avec les copeaux durcis ou tout simplement par l'égratignure causée par les particules dures qui se retrouvent dans le matériau composite. Ceci fait que les mesures de rugosité prises sont peu fiables parce que dans le même trou, il est possible de trouver plusieurs sections de rugosité différente, à cause des conditions locales (mode écrouissage, mode arrachement, égratignures, vibrations causées par une distribution particulière des copeaux).

4.2.3.2 Forets à tête amovible

Pour le foret à tête amovible (Iscar), la variation de la rugosité Ra est présentée aux figures 4.28 et 4.29.

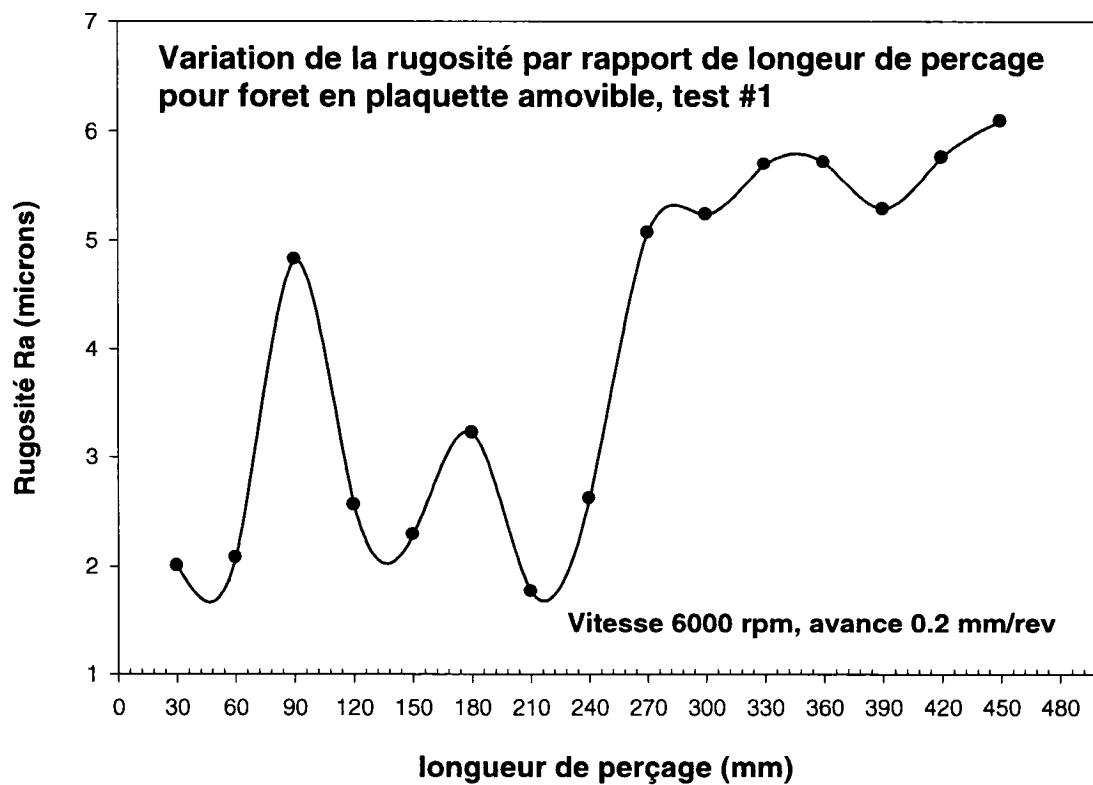


Figure 4.28 - Rugosité Ra en fonction de la longueur de perçage pour forets à tête amovible, test 1.

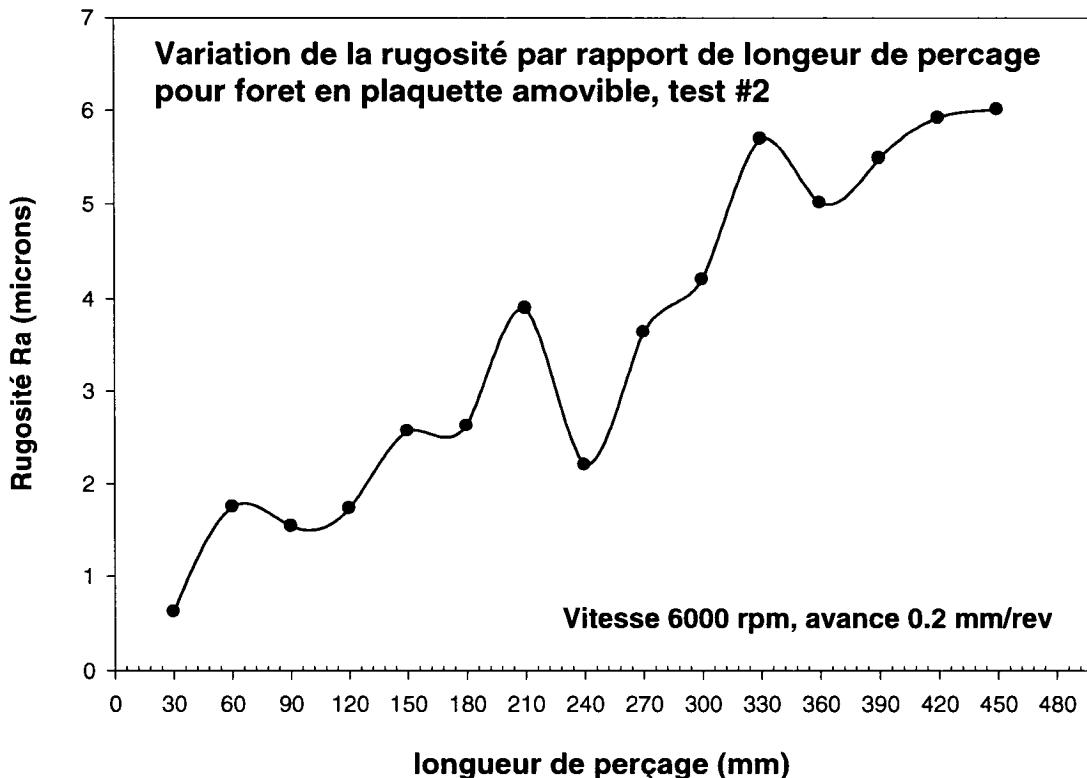


Figure 4.29 - Rugosité Ra en fonction de la longueur de perçage pour forets en carbure solide, test 2.

D'après les résultats obtenus dans les figures 4.28 et 4.29, nous observons que les courbes ont des tendances de croissances avec des variations.

Pour le foret Iscar, nous avons effectué un maximum de 15 trous équivalant à 480 mm de longueur de perçage parce que, après ces longueurs, le foret a cassé. Les résultats obtenus montrent que le Ra pour le foret Iscar sur la longueur de perçage est moins variable que pour le foret Guhring.

Mais pour le foret Iscar, nous avons aussi observé le blocage de la pénétration de la mèche dans le matériau pour la même raison mentionnée auparavant.

Pour les deux forets, dans la longueur de perçage de 480 mm, nous avons obtenu le Ra de 6 microns, équivalant au perçage 16 trous. Mais, après cette longueur, le foret de Istar est abîmé alors que le foret Guhring a continué jusqu'à une longueur de 2100 mm avec le Ra 18 microns qui est équivalant au perçage de 70 trous.

4.2.4 Vérification de circularité et cylindricité

4.2.4.1 Foret en carbure solide

Pour connaître l'influence de la longueur de perçage sur la variation de diamètre pour une avance 0.2mm/rev et la vitesse de rotation 6000rpm, les résultats des tests effectués sont présentés aux figures 4.30 et 4.31.

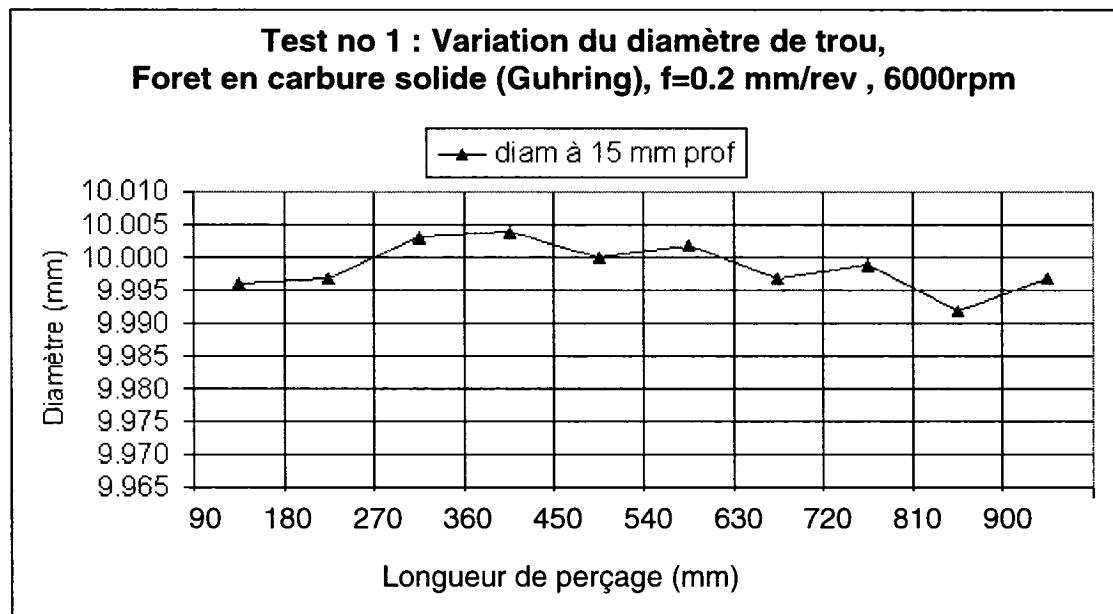


Figure 4.30 – Variation du diamètre de trou à 15 mm de profondeur en fonction de la longueur de perçage.

Les résultats présentés à la figure 4.31 montrent une valeur moyenne du diamètre de trou près de la valeur nominale de 10 mm. Par rapport à la longueur de perçage, la

variation de diamètre pour les forets en carbure solide (Guhring) est acceptable jusqu'à la longueur de perçage de 900 mm. À partir du 30e trou, les résultats obtenus pour le diamètre est perturbé. Cette perturbation est probablement causée par l'usure de l'outil. En regardant la variation de la force et du moment dans la figure 4.32, cette perturbation peut être observée en forme d'un changement du comportement de perçage.

Pour évaluer la longueur de perçage sur la circularité de trou, pour la vitesse de rotation de l'outil 6000 rpm et d'avance 0.2, le diagramme est présenté à la figure 4.31. Du point de vue technologique, pour perçage à foret, une erreur de circularité moins de 0.02 mm est totalement acceptable.

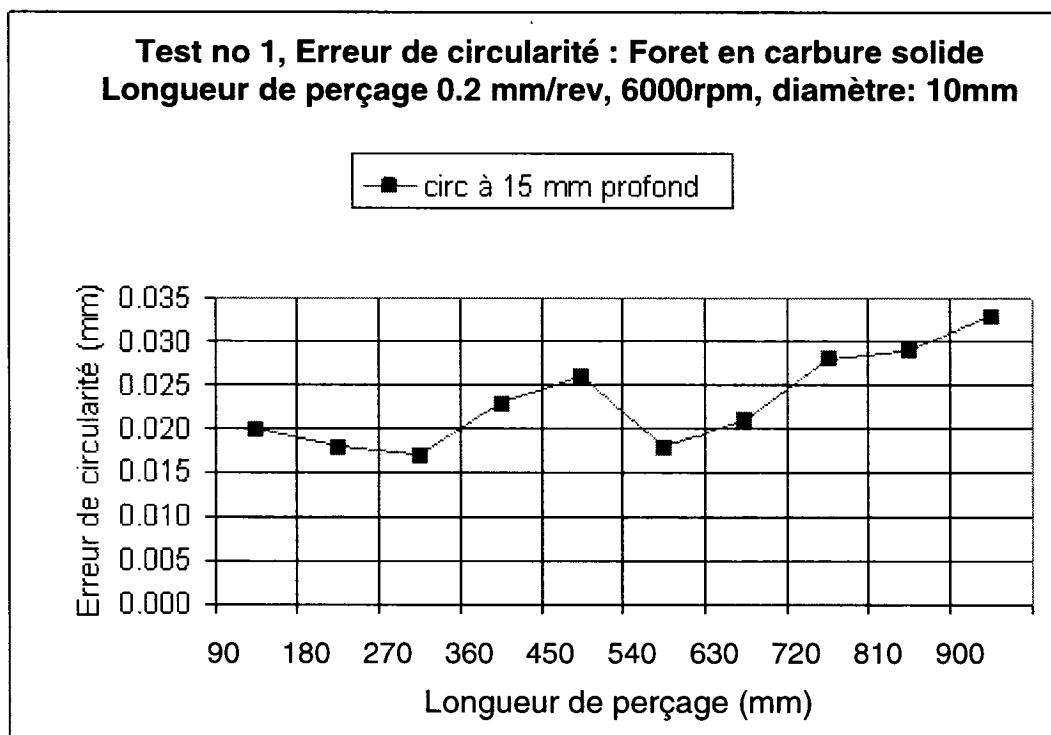


Figure 4.31 - Variation du diamètre en fonction de la longueur de perçage.

Le deuxième test a été effectué dans la même condition que le premier test. Les figures 4.32 et 4.33 illustrent les résultats du deuxième test. Ces figures montrent une cohérence relative entre les résultats du premier et du deuxième tests.

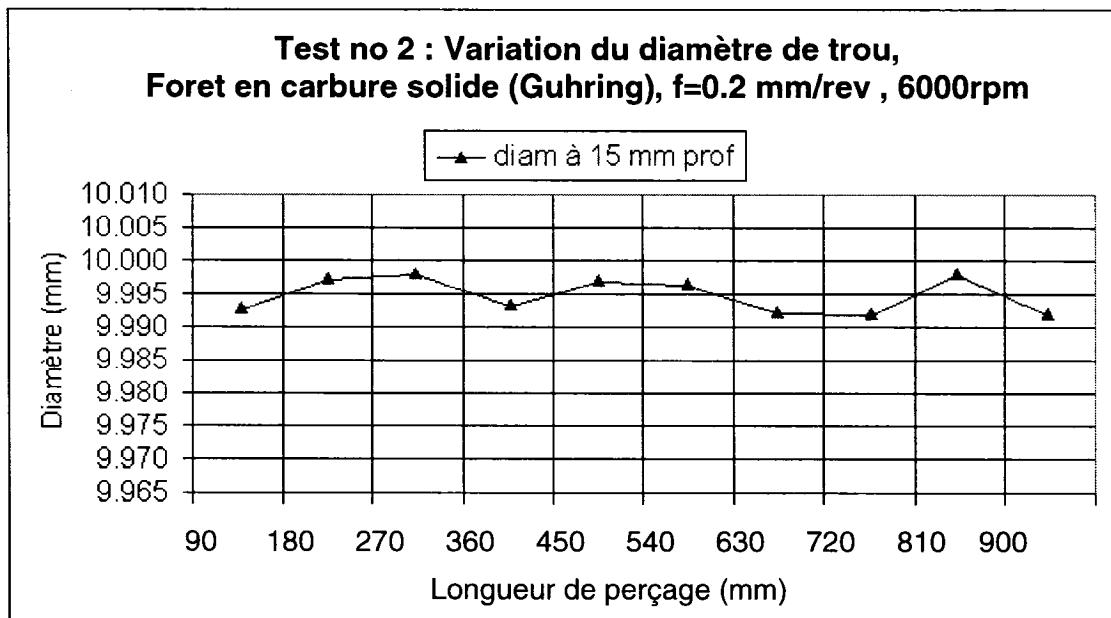


Figure 4.32 - Variation du diamètre en fonction de la longueur de perçage.

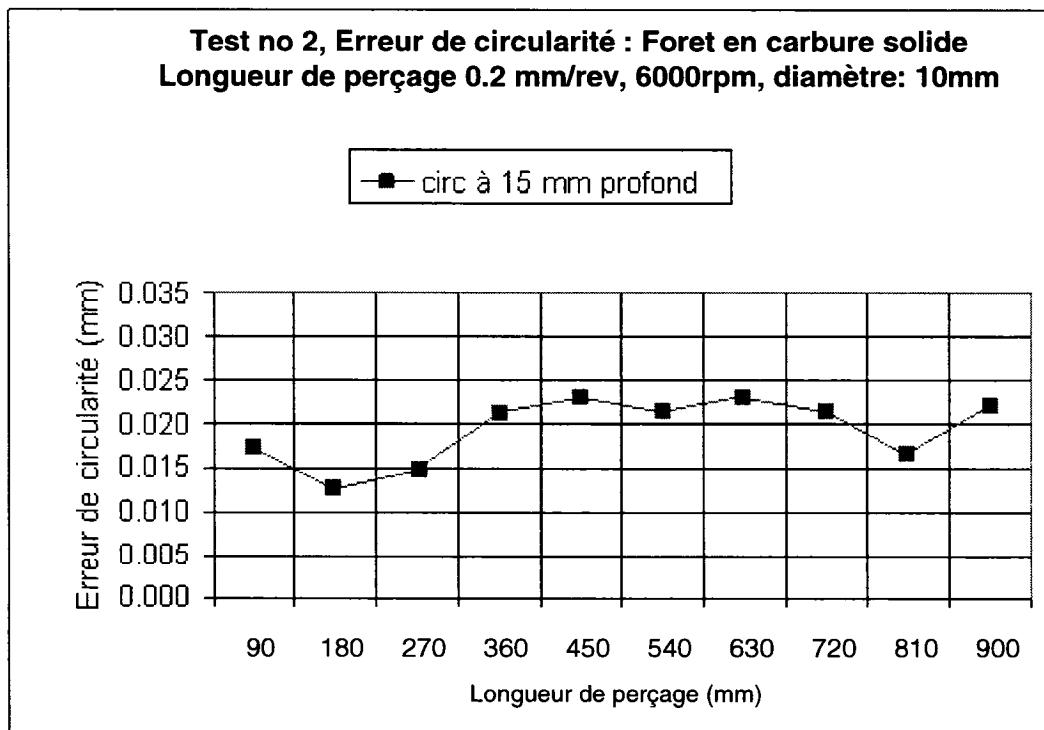


Figure 4.33 – Erreur de circularité par rapport à la longueur de perçage.

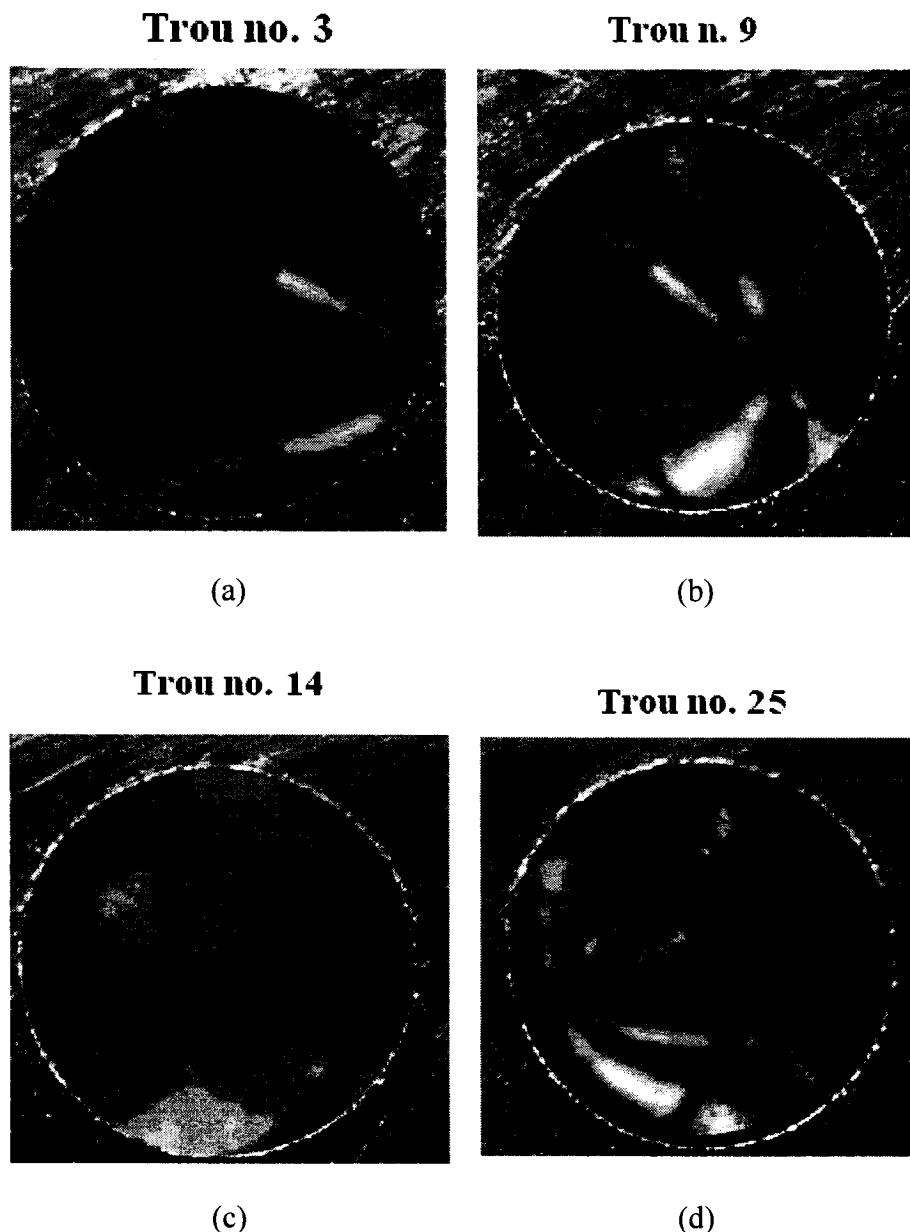
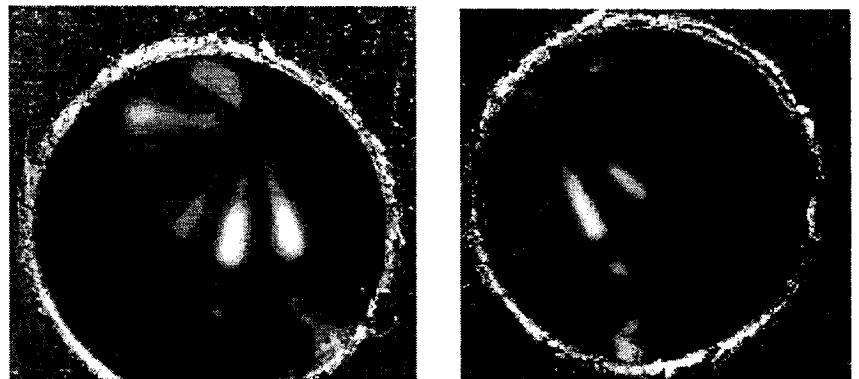


Figure 4.34 – Changement de la géométrie de trou par rapport à la longueur de perçage pour foret en carbure solide.

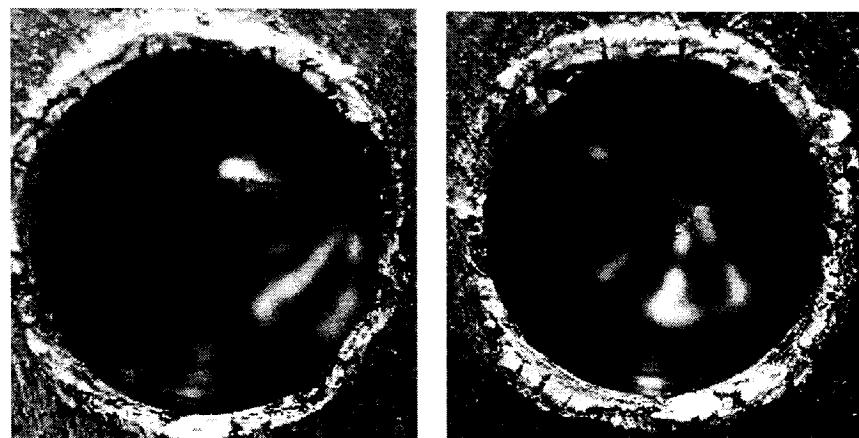
Les conclusions de ce test sont les suivantes :

- du point de vue pratique,
- du point de vue méthodologie de perçage, l'avance aux alentours de 0.2 mm/rev représente une solution à considérer pour les prochains tests;
- vu que les diamètres de trous sont plus petits que le diamètre nominal, une augmentation de la vitesse de rotation de l'outil s'impose.



(a) Trou no. 30

(b) Trou n. 40



(c) Trou no. 66

(d) Trou no. 70

Figure 4.35 – Changement de la géométrie pour le foret en carbure solide.

4.2.4.2 Foret à tête amovible

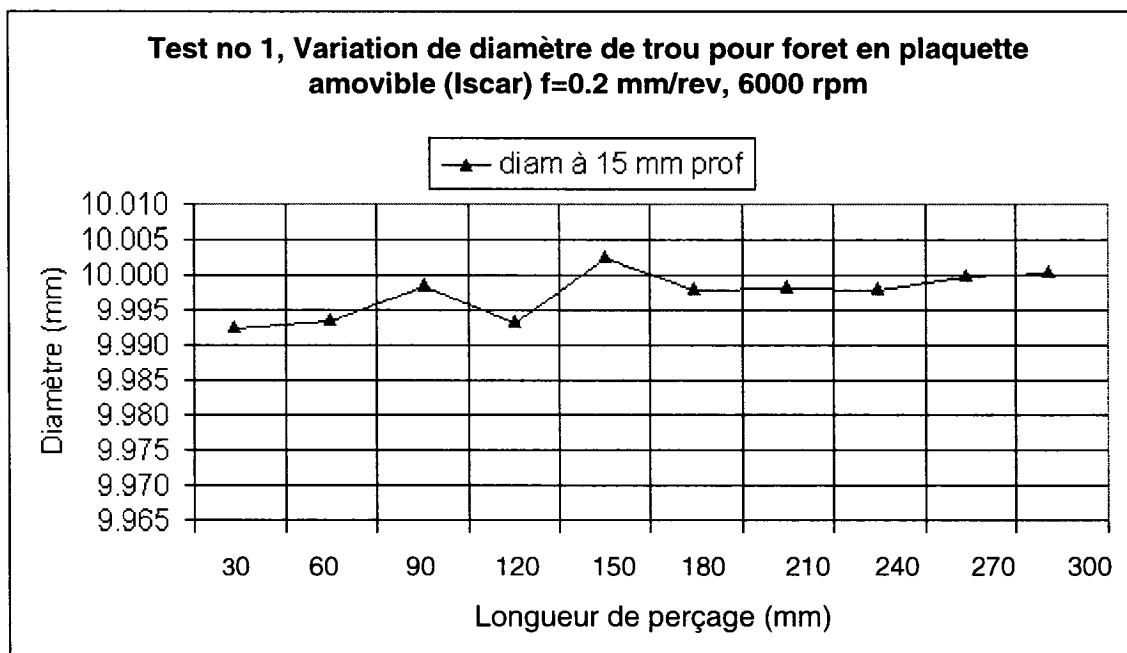


Figure 4.36 - Variation du diamètre par rapport à la longueur de perçage.

La figure 4.36 présente la relation entre l'erreur de circularité et la longueur de perçage pour perçage à 6000 rpm vitesse de rotation de l'outil et 0.2 mm/rev avance.

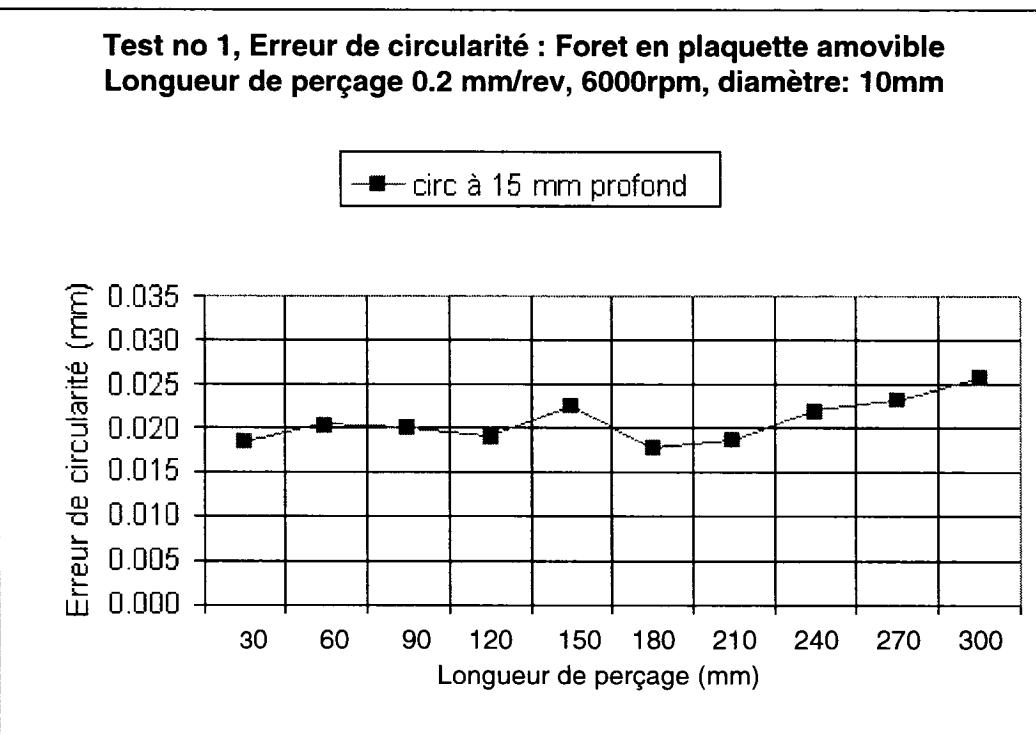


Figure 4.37 - Erreurs de circularité par rapport à la longueur de perçage.

L'analyse de la figure 4.37 montre que l'erreur de circularité par rapport à la longueur de perçage sur une profondeur de 15 mm est moins variable pour le foret à tête amovible. Ceci est complètement acceptable.

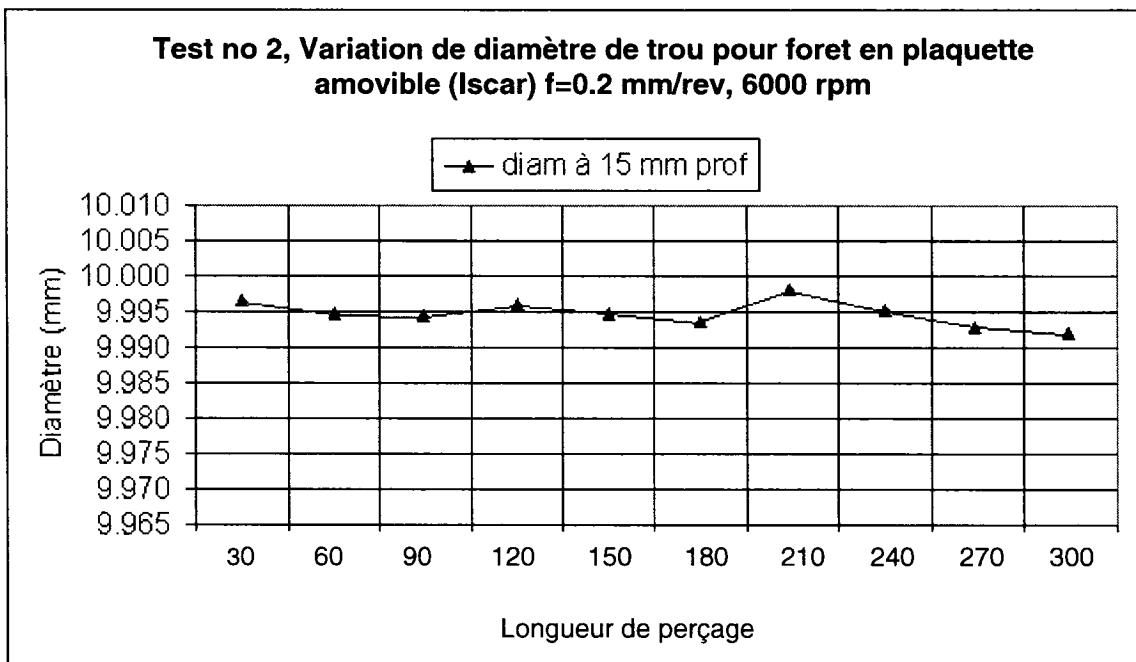


Figure 4.38 - Variation de diamètre en fonction de la longueur de perçage.

Les conclusions de ce test :

- du point de vue pratique, le perçage à la vitesse constante de 6000 rpm, pour les applications industrielles, l'avance n'influence visiblement pas la variation du diamètre;
- du point de vue méthodologique, les résultats obtenus pour l'erreur de circularité recommandent une valeur de l'avance aux alentours de 0.20 mm /rev.

Pour connaître l'influence de la longueur de perçage sur la variation du diamètre, les résultats des tests effectués sont présentés à la figure 4.39.

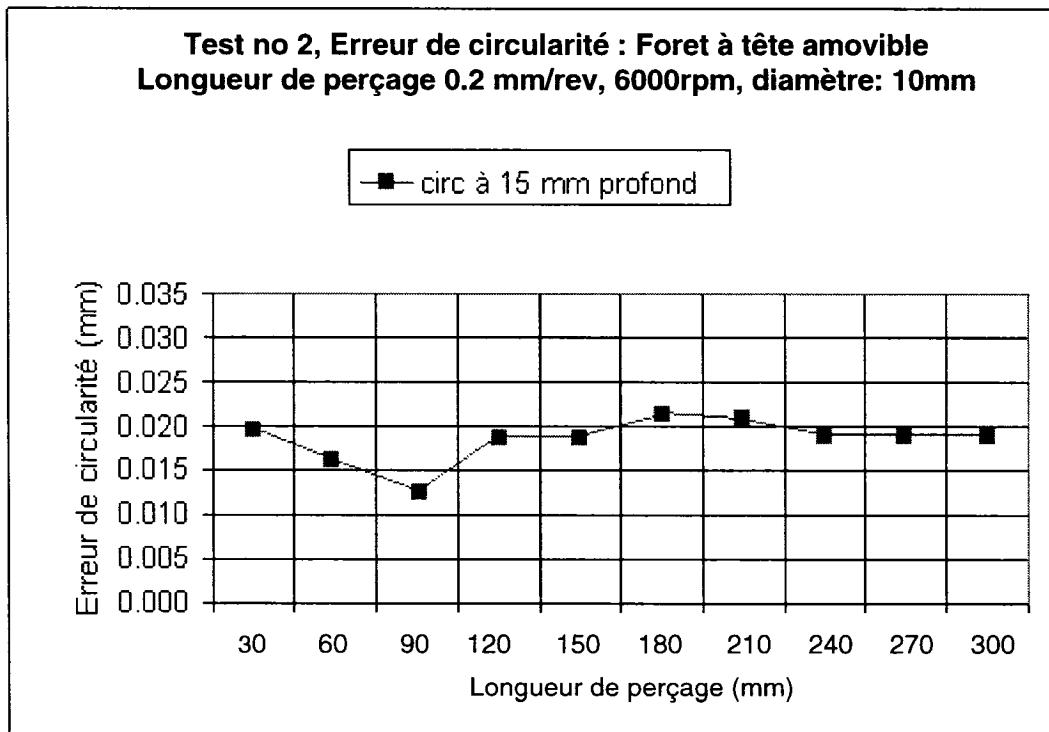


Figure 4.39 - Erreur de circularité par rapport à la longueur de perçage.

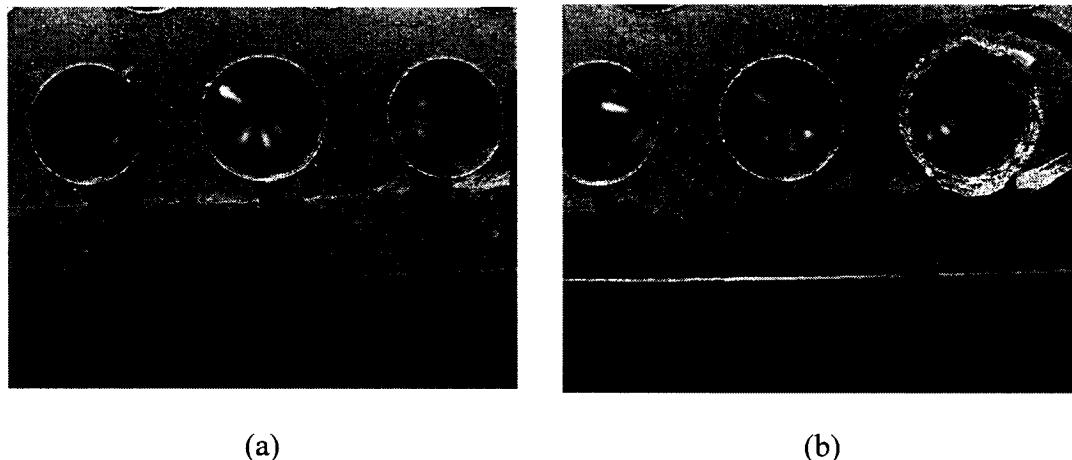


Figure 4.40 – Changement de la géométrie de trou pour le foret à tête amovible.

CHAPITRE 5 - COMPARAISON DE FORET EN CARBURE SOLIDE ET FORET À TÊTE AMOVIBLE SELON L'APPROCHE GQM

Afin de comparer les deux types de forets (en carbure solide et à tête amovible), nous avons précisé l'architecture de comparaison des deux outils (Guhring, Iscar) en choisissant une méthode quantitative de comparaison de la qualité qui est basée sur l'approche GQM (Goal Question Metric) introduite par BASILI (BASILI, 1992).

En appliquant cette approche *Goal Question Metric*, nous avons défini les étapes suivantes (voir la figure ci-dessous) :

1. préparation du plan de GQM pour mesurer la qualité des outils de perçage;
2. définition des questions de mesure et paramètre de GQM pour comparaison des outils, nous avons considéré :
 - qualité de trou;
 - prix de l'outil;
 - durée de vie de l'outil;
3. préparation des données et tests.

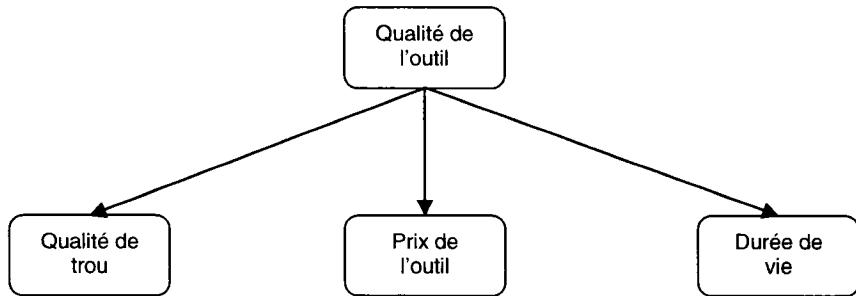


Figure 5.1 - Schématique de relation entre G et Q.

Dans le diagramme de relation entre G et Q, la qualité de l'outil est un objectif défini en fonction des trois paramètres: la durée de vie de l'outil, le prix de l'outil et la qualité de trou.

Nous pouvons dire :

$$Qo = f(Co, Po, Qt) \quad \Rightarrow \quad Qo = \alpha * Co + \beta * Po + \gamma * Qt \quad (5.1)$$

où :

Qo = qualité de l'outil;

Co = durée de vie de l'outil;

Po = prix de l'outil;

Qt = qualité de trou.

Dans cette formule, les valeurs des coefficients ***α***, ***β*** et ***γ*** peuvent être choisies différemment selon la stratégie de comparaison. Dans la partie discussion de ce

chapitre, je vais expliquer tous les paramètres mentionnés le remplaçant par les valeurs métriques.

Selon les indicateurs mesurables, la difficulté majeure est le calcul de paramètre de question Qt . En d'autres mots, nous n'avons pas eu les formules précises expérimentales qui déterminent la relation de Qt avec les métriques existantes. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé l'article (LAPORTE S. 2005) et on a ajouté le paramètre Qt par une autre question de mesure FM (force & moment).

Notre plan final de comparaison est la formule suivante :

$$Qo = \alpha * Co + \beta * Po + \gamma * FM * Qt \quad (5.2)$$

Pour calculer les valeurs Co , Po et Qt , nous avons besoin d'identifier plusieurs autres paramètres métriques.

Pour calculer la valeur de Co ou la durée de vie de l'outil, nous avons mesuré l'usure de l'outil. Pour calculer Qt ou qualité de trou, il faut mesurer la rugosité, la circularité et la cylindricité et la force.

Selon le plan final, notre comparaison est basée sur les éléments suivants :

1. l'usure;
2. la force;
3. la rugosité;
4. la circularité et la cylindricité.

Dans le chapitre 4, nous avons présenté les résultats des tests de perçage permettant d'obtenir les valeurs pour arriver aux éléments métriques pour les deux forets.

5.1 Comparaison d'usure

En comparant les tests obtenus dans le chapitre 4, pour les deux forêts, les remarques suivantes peuvent être retirées :

- En comparant les forets à tête amovible (ISCAR) avec les forets en carbure solide, le foret Iscar n'est pas approprié pour le perçage GrA-Ni 10S.4G parce qu'il casse en totalité après 450 mm de la longueur de perçage.
- Selon les résultats obtenus, le foret Guhring est plus durable parce que pour une longueur de perçage jusqu'à 1000 mm, l'usure en dépouille VB n'atteint pas la valeur de 0.9 mm.
- Les forets en carbure solide ont aussi l'avantage de permettre l'utilisation de la longueur de perçage plus élevée que celle permise pour le foret à tête amovible.
- L'usure de chaque point de l'arête principale est proportionnelle à la vitesse de coupe.
- L'usure de foret en carbure solide sur le graphique 5.2 présente trois phases différentes.
- La phase d'usure en rodage jusqu'à une longueur de perçage de 1000 mm.
- La phase d'usure normale se situe entre 1000–1700 mm de la longueur de perçage.
- À partir de 1700 mm de perçage, on a obtenu la phase d'usure accélérée.

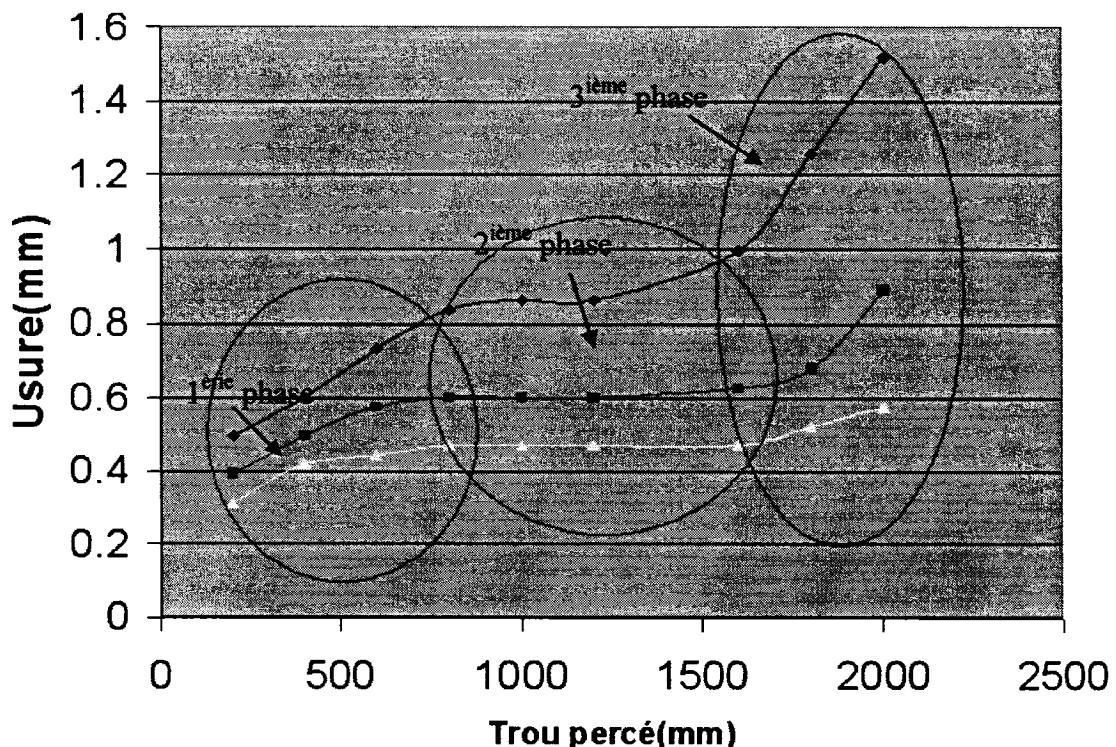


Figure 5.2 - Trois phases de courbes de l'usure pour foret en carbure solide.

En analysant les courbes d'usure (fig. 5.2) pour le foret en carbure solide, on peut conclure que l'usure est proportionnelle dans la phase rodage et dans la phase normale. Donc, une fois qu'on entre dans la troisième phase, l'usure de foret augmente de façon exponentielle pour atteindre la fin de la vie de celui-ci très rapidement. Par contre, pour le foret à tête amovible après 15 trous (équivalent de 450 mm) de perçage, on observe l'usure défaillante de l'outil. Pour le foret à tête amovible, on ne peut pas séparer les différentes phases de l'usure comme le foret en carbure solide.

5.2 Comparaison de force (Fz)

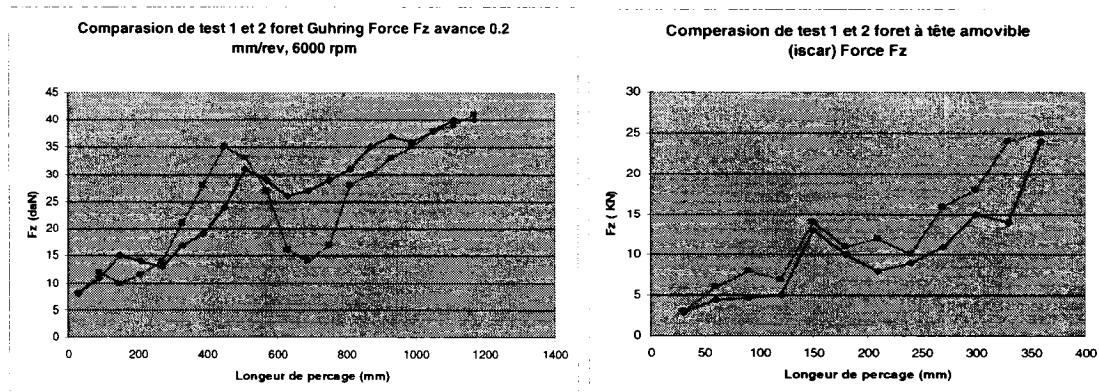


Figure 5.3 - Variation de la force pour deux forets Guhring et Iscar .

La variation de la force Fz par rapport à la longueur de perçage est présentée sur la figure 5.3. On peut observer que, pendant le perçage, la force Fz augmente et est proportionnelle à l'usure VB. Ceci montre une relation directe entre force et usure. En analysant les graphes, on peut observer la grande instabilité de la force Fz. Ceci est dû à l'accumulation du copeau bloquant la pénétration du foret dans le matériau. En ajoutant une force supplémentaire, causée par le frottement des copeaux sur les parois du canal, le signal de force est instable. L'entassement des copeaux au bout de l'outil tend, par contre, à produire une résistance statique à l'avancement de l'outil, augmentant l'effort de coupe. Le moment autour de l'axe Z est aussi affecté, surtout par le frottement des copeaux avec la surface usinée.

Il est intéressant de montrer qu'il y a une similitude dans un comportement du foret pendant des tests, les deux courbes ont quasiment la même forme ; c'est-à-dire qu'elles commencent d'abord par une augmentation pour former un maximum local avant 500 mm de longueur de perçage. Ensuite, il y a une stabilisation de la force Fz , suivie

encore d'une augmentation qui forme un autre maximum local à 1000 mm d'utilisation et il y a une diminution remarquable de force requise en Fz après ce point, pour finalement avoir une relation de proportionnalité directe de la force Fz et d'usure de l'outil. Cette répétitivité peut être attribuée à un procès d'accumulation des copeaux et de la formation d'un arrêt rapporté.

En plus, le mécanisme de défaillance pour les forets, surtout de petit diamètre, est associé au bourrage de l'outil par les copeaux entassés, les copeaux ne se détachent pas, et frottent sur les parois du trou, en accumulant la chaleur au lieu de l'évacuer, échauffant ainsi le foret.

5.3 Comparaison de la rugosité

Au début du perçage, la rugosité est proportionnelle à la longueur de perçage.

Par la suite, la qualité de trou à cause du phénomène égratignure ou l'usure par abrasion (two body wear) diminue, ce qui donne une surface de trou moins lisse. Mais les résultats ne sont pas stables parce que avec d'autres phénomènes dislocation l'usure par un grain détaché (three body wear) ne permet pas d'obtenir une qualité de surface constante, sauf si on peut avoir une évacuation de copeaux idéale, tels que les copeaux dégagés ne touchent pas beaucoup à la surface usinée.

De plus, le matériau composite contient des particules dures, les particules peuvent être coincées entre l'outil et la surface du trou et provoquer la dislocation qui peut être observée sur les graphes de la rugosité. Cette dislocation est facilement visible sur les profilographies de la surface de trou. Il est possible de trouver plusieurs sections de

rugosité différentes à cause des conditions locales (mode écrouissage, mode arrachement, égratignures, vibrations causées par une distribution particulière des copeaux). Il faut noter qu'une distribution semblable est présente dans la littérature.

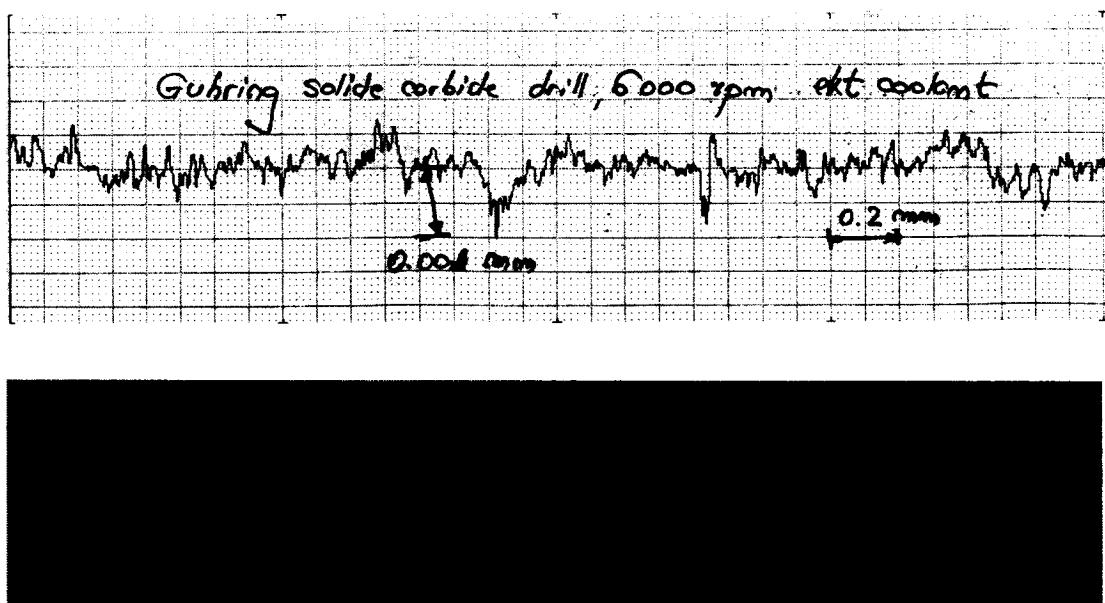
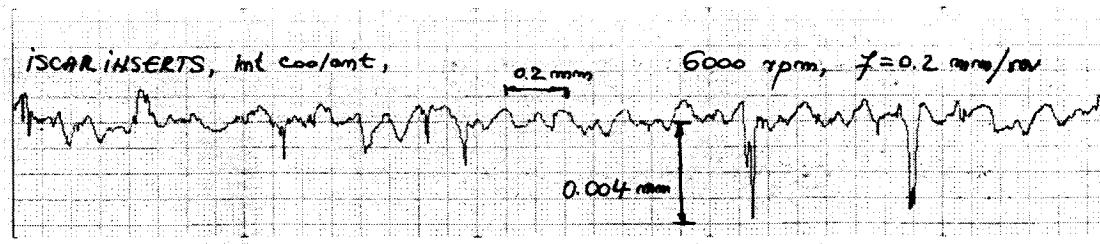


Figure 5.4 - Profilogramme de la surface pour guhring 6000 rpm, avance 0.2 .



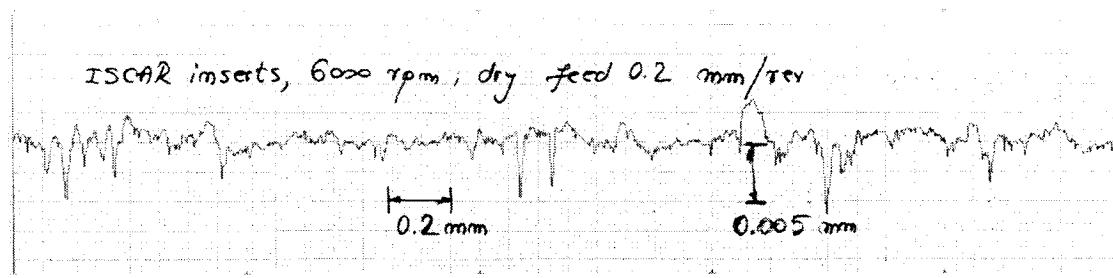


Figure 5.5 - Profilogramme de la surface, 6000 rpm, avance 0.2 mm/tr, Iscar .

5.4 Comparaison de circularité et cylindricité

À cause de la partie centrale du foret et dans l'imperfection d'affûtage, il est impossible d'obtenir par le perçage un trou parfaitement circulaire.

Pour chacun des forets en carbure solide et à la tête amovible, nous avons mesuré la circularité et la cylindricité. Les résultats obtenus dans la zone affectée par des copeaux accumulés, montre la pénétration du foret dans le matériau, avec un changement de la vibration, qui a un impact direct sur la circularité de trou. En ajoutant une force supplémentaire, causée par le frottement des copeaux sur les parois du canal, nous avons aussi un changement de cylindricité de trou.

La conclusion qui ressort de l'analyse comparative de la circularité et de la rugosité montre qu'en augmentant la longueur de perçage, le foret en carbure solide offre des résultats légèrement supérieurs que le foret à tête amovible.

5.5 Discussion

Après avoir trouvé les métriques, on peut appliquer la formule pour comparer deux outils dans la condition particulière.

$$Qo = \alpha * Co + \beta * Po + \gamma * Qt \quad (5.3)$$

Qo = qualité de l'outil;

Co = durée de vie de l'outil;

Po = prix de l'outil;

Qt = qualité de trou.

D'abord, il faut déterminer les coefficients d'importance α , β , γ pour chaque paramètre Co, Po, Qt. Le paramètre d'importance peut être différent dépendamment du domaine d'application. Par exemple, pour un fabricant qui effectue des perçages à grande série sur les machines à transfert, le facteur importance pour la durée de vie de l'outil peut être très dominante sur le facteur de prix.

Par contre, dans une PME où on fait le perçage des composites sporadiquement, le facteur de coût de l'outil peut être très dominant sur la durée de vie de l'outil.

Prenons par exemple l'outil Guhring comme référence. Dans ce cas, la durée de vie du foret Guhring Co=1 correspond avec la longueur de perçage 2200 mm.

Prix de l'outil Po=1 correspond au prix de 60 \$ qualité de trou Qt=1 (la circularité du foret Guhring est en moyenne 0.98, la cylindricité 0.96 et la rugosité 2)

Pour l'outil Iscar, on va avoir respectivement :

Co=0.25 parce que la longueur de perçage est 550 mm

Po= 0.5 pour un prix 30 \$ et

Qt=0.9 pour Iscar (la circularité 0.92, la cylindricité 0.90 et la rugosité 2)

Pour les mêmes coefficients d'importance $\alpha=10$, $\beta=5$ et $\gamma=4$

Pour l'outil Guhring :

$$Qog=10 *Co + (-5) * Po + 4*Qt$$

Pour Co ,Po,Qt =1

$$Qog= 10 -5 +4 =9$$

Pour l'outil Iscar, on a respectivement :

$$Qoi=10*0.25 (-5 * 0.5) + 4 *0.9=3.6$$

Alors pour l'outil Guhring, malgré le prix 2 fois plus cher que Iscar, la qualité est supérieure.

CONCLUSIONS

Ce mémoire présente les résultats de la comparaison des deux outils pour le perçage des composites à matrice d'aluminium : le foret en carbure solide (Guhring) et le foret à tête amovible (Iscar).

Pour trouver la relation entre le principe de la qualité et les paramètres utilisés dans notre expérience, nous avons appliqué l'approche GQM (Goal Question Metric) introduite par BASILI (BASILI, 1992).

Notre étude a été concentrée sur les aspects pratiques de perçage et le choix de la méthode GQM est basé sur ce point de vue. En appliquant cette méthode, nous serons capables de mesurer tous les paramètres importants dans un processus de perçage.

Dans cette approche, nous avons défini notre objectif primaire de comparaison de la qualité de deux outils, selon sa relation avec trois critères secondaires (considérées comme les questions de mesure) : la durée de vie de l'outil, le prix de l'outil et la qualité du trou.

Nous avons calculé la qualité d'outil avec des paramètres finaux métriques :

1. durée de vie : usure de l'outil et longueur de perçage;
2. prix de l'outil;

3. qualité de trou : circularité, cylindricité, rugosité.

Pour chacun des éléments mentionnés ci haut, nous avons mesuré les métriques dans le laboratoire (voir chapitre 4). Avec les résultats obtenus, en utilisant la formule, nous avons comparé les deux forets.

Les valeurs des coefficients α , β , γ pour chaque paramètre de perçage dépendent de l'importance de ces paramètres dans les conditions stratégiques de production, reliées à l'environnement économique, contextuel, etc. Les paramètres d'importance sont différents dépendamment du domaine d'application. Par exemple, pour un fabricant qui effectue des perçages à grande série ou pour une PME les facteurs importants sont différents.

L'aspect très important de la méthode GQM est sa flexibilité, c'est-à-dire avec le changement des éléments ou les ajouts dans les éléments de perçage, on n'a pas besoin de recommencer l'étude. Il suffit d'ajouter les nouveaux éléments dans la formule de la fonction.

En conclusion, dépendamment de trouver les types de l'industrie et la stratégie de la compagnie, on sera capable de trouver des valeurs des coefficients α , β , γ pour chaque paramètre de perçage.

La conclusion de notre comparaison des outils montre que l'application de la méthode de GQM est adéquate. D'après notre comparaison, les forets en carbure solide offrent globalement des résultats supérieurs aux forets à tête amovible. Mais il faut noter que dans notre étude, le choix des valeurs des coefficients α , β , γ pour chaque paramètre de perçage a été considéré dans le contexte des PME dans l'industrie automobile.

En plus, on peut conclure que :

- l'évacuation des copeaux est meilleure pour l'outil Guhring que pour l'outil Iscar;
- l'usure de l'outil Iscar est plus grande que l'outil Guhring;
- la force F_z est la fonction de l'usure de l'outil;
- la rugosité des trous est très variable.

En plus des paramètres de perçage étudiés dans ce travail, pour les travaux futurs, on peut ajouter les différents paramètres, comme la vitesse de perçage, la profondeur de trou, la flexibilité et la performance de perçage. Par exemple, nous avons étudié la profondeur de trou pour le foret Iscar qui est au maximum 3 fois le diamètre de foret, soit 30 mm. Donc, au lieu de la comparaison des deux outils sur la longueur de perçage, on peut effectuer une recherche sur la comparaison des profondeurs de trous.

Comme nous l'avons expliqué, la méthode de GQM peut être appliquée dans les différentes conditions. En mesurant chaque paramètre de perçage, on peut formuler

notre fonction basée sur les différents éléments. On peut aussi ajouter les conditions environnementales et contextuelles aux conditions financières.

BIBLIOGRAPHIE

3M, (2001), Aluminium Matrix Composite. Brochure de présentation.

3M, (2001), Continuous Fiber Aluminum Matrix Composite for High Speed Rotors. Brochure de présentation.

3M, (2001), Reinforced Aluminum Matrix Pushrods. Brochure de présentation.

Allied Machine & Engineering Corp, 2002, Catalogue d'outils de coupe. Dover, Ohio, USA.

Ames, W., Alpas A.T. (1993), "Sliding Wear of an Al-Si Alloy Reinforced with Silicon Carbide Particles and Graphite Flakes", Proceedings of the ASM 1993, Materials Congress, Materials Week 1993, Pittsburgh, Pennsylvania, October 17-21, p. 27-35, 1993.

Astakhov, V.P., "Metal Cutting Mechanics", CRC Press 1998.

Astakhov, V.P., (2004), "The assessment of cutting tool wear", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44(2004) p. 637-647.

Azzi, L., Ajersch,F, Stephenson, T.F.; (2000), "Rheological Characterisation of Semi-Solid GrA-Ni® Composite Alloy", 6th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites. Turin, Italy, Sept 27-29, 2000.

Bahaa Balout (2002), "Usinage à sec des Alliages Légers et des Composites", Mémoire thèse maîtrise, Université du Québec, École de technologie supérieure, 2002, Directeur de recherche : prof. dr. ing. Victor Songméné.

Balout, B., Songméné V., et Masounave, J. Drilling pf Metal MatrixComposites : Cutting Forces and Chip Formation, Light Metals and Composites, conf. De métallurgistes, COM 2002, Montréal, Québec, Canada, p.633-651.

Balout, B., Songméné V., et Masounave, J. Usinabilité des alliages demagnésium et d'aluminium Partie I : Force de coupe, Light Metals and Composites, Conf. De métallurgistes, COM 2002, Montréal, QC, p.223-242.

Balout, B., Songméné V., et Masounave, J., Usinabilité d'alliage légers et des composites lors du perçage à sec, École de technologie supérieure, 2002.

Balazinski, M., Kishawy, H.A., Kannan S.,(2005), Analytical Modeling of Tool Wear During Turning Particulate Reinforced Metal Matrix Composites, Dép.. de génie mécanique de l'École Polytechnique de Montréal et Université de New Brunswick.

Bannister, M., (2001), "Challenges for composites into the next millenium – a reinforcement perspective", *Composites*, Part A: Applied Sciences and Manufacturing, 2001, p.901-910.

Baptista M. A., Davim P.J., (1997), Wear of tooling material when turning and drilling aluminum matrix composites. Wear of materials 1997, 11th International Conference on Wear of Materials, April 20-23 1997, San Diego, California Guest Editors : D. Rigney and R.G. Bayer Elsevier.

Baptista M. A.,Davim P. J., (1995), "Drilling aluminum matrix composites", Proceedings of ICCM-10,p. 581-588. Whistler, B.C. Canada, August 1995, The tenth International Conference on Composite Materials, Vol III : Processing and Manufacturing.

Barnes, S., Pashby, I.R.; Mok, D.K.; (1996), "Effect of Workpiece Temperature on the Machinability of an Aluminum SiC MMC", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Transactions of the ASME, vol. 118, nr. 3, p. 422-427, Aug. 1996, ASME, New York, NY, USA.

Barnes, S., Pashby, I.R., Hashim, A.B.; (1999), "Effect of heat treatment on the drilling performance of aluminum/SiC MMC", *Applied Composite Materials*, vol. 6, nr. 2, p. 121-138, 1999, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.

Barnes, S., Pashby, I.R.; (1995), "Machining of Aluminum Based Metal Matrix Composites", *Applied Composite Materials*, vol 2, p.31-42, 1995.

Basili ,V.R. Caldira ,G .Rombach ,H .D. (1995) . Goal Question Metric Paradigm .In Encyclopedia of Software Engineering ,1 ,527-532 .New York :John Wiley & Sons.

Bell, J.A.E., Stephenson, T.F.;, (1992), "Nickel Coated Performs". European Patent, Ep0539011, 16 Sept 1992, INCO.

Bell, J.A.E., (1997) Stephenson, T.F., Warner, A.E.M., Songméné, V.; (1997), "Physical Properties of Graphitic Silicon Carbide Aluminum Metal Matrix Composites", SAE technical paper, n: 970788, SAE International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, Feb. 24-27, 1997.

Byrne, G., Dornfeld, D., Denkena, B.; (2003), "Advancing Cutting Technology", *Annals of the CIRP*, vol 52(2) 2003.

Blanpain, E. (1955), Théorie et pratique des outils de coupe, Edition Eyrolles, Paris 1955.

Blau P.J., deVore C.; (1991), "Machining in an ordered intermetallic alloy", *Wear of Materials*, ASME 1991, p. 547-554.

Byrne, G., Dornfeld, D. Denkena, B; "Advanced Cutting Technology", *Annals of the CIRP*, vol 52(2) 2003.

Burkes, J.M., Lesher, M.R.; (1993), "Advanced Tooling and Technology for Drilling Metal Matrix Composite Materials"

Proceedings of the ASM 1993 Materials Congress, Pittsburgh, Pennsylvania, p. 31-42, October 17-21, 1993 .

Bushman, B., Gupta, B.K.; (1991), *Handbook of Tribology*, P. 2.18 Abrasive wear, McGraw-Hill, 1991.

Chadwick, G.A., (1991), "Progress in metal matrix composites", *New Frontiers in Cast Metals Conf. UK*, Sept. 6, 1991, *Cast metals*, vol 4(3), 1991, p. 165-167.

Clarke D.R., (1995), "An introduction to the composite materials", Second Edition, Cambridge Solid State Science Series, Chap. 12 Applications.

Colding, B.N.' (2004), "A Predictive Relationship between Forces, Surface Finish and Tool-life", *Annals of the CIRP*, vol 53(1) 2004, p. 85-90.

Cook, M. W. (1998), "Machining MMC engineering components with polycrystalline diamond and diamond grinding", *Materials Science and Technology*, September - Octomber 1998, vol. 14, p. 892-895.

Cook, M. W. (1998) , "Diamond grinding and PCD machining of MMC engineering components" , *Powder Metallurgy*, 1998, Vol 41 (2) , p. 87-89.

Cronjaeger, L., Meister, D. (1992), "Machining of fibre and particle-reinforced aluminum", *Annals of the CIRP*, vol. 41 (1), 1992, p 63-66.

Cronjaeger, L.; Meister, D.; (1991), "Drilling of fibre and particle reinforced aluminum", PD-vol 37, p. 1985-1989, Composite Material Technology, ASME 1991.

Chandrasekaran, H., Johansson, J.O.; (1997), "Influence of processing conditions and reinforcement on the surface quality of finish machined aluminum alloy matrix composites"

Annals of the CIRP, vol 46(1), p. 493-496, 1997.

Chen,S., Suzuki, Y., Sakai, K.; (2000), "The effect of using small amount of lubrication oil and cold air cooling on the quality of manning surface of high silicon aluminum alloy", *5th International Conference on Progress of Machining Technology*, Beijing China 2000.

Cole G.S., Bin, F.; (1993), "Scuffing Resistance of Al-based MMCs as Bores in Aluminum Engine Blocks", Proceedings of the ASM 1993 Materials Congress, Materials Week '93, Pittsburgh, Pennsylvania, October 17-21, p. 13-20, 1993.

Cutting Tool Engineering, CTE Publications inc, collection 1995.

Davim, J.P., Study of drilling metal-matrix composites based on Taguchi technique, Department of Mechanical Eng. University of Aveiro, Materials Processing Technology, International Journal of Materials Processing Technology 132, 2003, p 250-254.

Davim, J.P., Baptista, A., Cutting force, tool wear and surface finish in drilling metal matrix composites, Department of Mechanical Eng. University of Aveiro and University of Porto, technical note V.215, N.2, 2001.

Davim, P.J., Conceicao, C.A.; (2001), "Optimal drilling of particulate metal matrix composites based on experimental and numerical procedures", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41, p. 21-31, 2001.

Davis, J.R., editor, Davis & Associates, (1994), Aluminum Matrix Composites, The Materials Information Society , ASM International.

Davim, J.P., Baptista, A., Drilling aluminum matrix, in the 10th International Conference on Composite Materials ICCM-10, Vancouver, Canada, 1995.

Davim, J.P., Baptista, A., Wear of tooling materials when turning and drilling aluminum matrix composites: in Wear Material's 97, San Diego, 1997.

Degischer, H.P., Prader, P., San, M.C. (2001), "Assessment of Metal Matrix Composites for Innovations - intermediate report of a European Thematic Network", *Composites*, Part A: Applied Science and Manufacturing vol 32 , 2001, p.1161-1166.

Dogan, C.P., Wawk, J.A.; (1997), "Influence of whisker reinforcement on the abrasive wear behavior of silicon nitride and alumina based composites", *Wear*, 203-204, p. 267-277, 1997.

Duca Z., (1967) Teoria sculelor achietoare (en langue roumanine), La théorie des outils de coupe. Maison d'édition "Editura Tehnica", 1967.

Duralcan, (1991), "Metal Matrix Composites, Machining Guidelines", 4 pages, Notes du catalogue du manufacturier.

Finn E.M., Srivastava K.A., (1996), "Machining of Advanced and Engineered Materials", dans Proceedings 13th Symposium on Engineering Applications of Mechanics Manufacturing Science and Engineering, McMaster University, Hamilton, Ontario, 7-9 May 1996 p. 616-623.

Gilmore, R., 9 (1993), Ultrasonic Machining of Ceramic- Matrix and Metal Matrix Composites, proof the ASM 1993 Materials Congress, Pittsburgh, Pennsylvania, Oct. 17-21, p.69-75.

Goni, J., Egizabal, P., Coletto, J., Leunda, I., Guridi, J.R.; (2003); "High performance automotive and railway components made from novel competitive aluminum composites", *Material Science and Technology*, vol 19, p. 931-934.

Gühring (2001), "The complete program, the complete know-how", c. d. outils de coupe. Albstadt, Germany.

Gühring (2002), "Precision Cutting Tools", 8-th Edition, Albstadt, Germany.

Gühring (2003), "High Performance HSS, HSCO, PM, Carbide Drills", Albstadt, Germany.

Gühring (2003), "10 Commandments of Dry High Speed Machining", c.d. préparé par Dr. Tibor Cselle, Sigmaringen-Laiz, Germany.

Hawk A., Jeffrey, A., David E.; (1995), "Abrasive wear behaviour of p/m intermetallic and intermetallic matrix composites", Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, vol. 3, 1995.

Hung, N.P.; Zhong, C.H.; (1996), "Cumulative tool wear in machining metal matrix composites Part I: Modelling", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 58(1), p 109-113, Mar 1, 1996, Elsevier Science Inc, New York, NY, USA.

Hung, N.P.; Loh, N.L., Xu, Z.M.; (1996), "Cumulative tool wear in machining metal matrix composites Part II: Machinability", *Journal of Materials Processing Technology*, vol 58(1), p 114-120, Mar 1, 1996, Elsevier Science Inc, New York, NY, USA.

Hung, N.P.; Yeo, S.H., Oon, B.E.; (1997), "Effect of cutting fluid on the machinability of metal matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 67, n 1-3, May, p 157-161, 1997, Elsevier Science S.A., Lausanne, Switzerland.

Hung, N.P., Boey, F.Y.C., Khor, K.A., Oh, C.A.; Lee, H.F., (1995), "Machinability of cast and powder-formed aluminum alloys reinforced with SiC particles", *Journal of Materials Processing Technology*, v48(1-4), p 291-297, 1995, Elsevier Science B.V., Amsterdam, Netherlands.

Introduction to Alloy Phase Diagrams Extract from Engineered Materials Handbook Vol. 4, Ceramic and Glasses, ASM International.

ISCAR (2002), Catalogue outils de coupe, édition 2002.

Iscar 2002, Guide d'utilisation des forets "Chamdrill";
http://www.iscar.com/ProductUpdate/PDF/MetricChamdrill_735_1.pdf

Jawaid, A., Barnes, S., Ghadimzadeh, S. R., (1992),
"Drilling of Particulate Aluminum Silicon Carbide Metal Matrix Composites",
Machining of Composite Materials, Proc. Symp., ASM Materials Week, Chicago , Illinois, 1-5 Nov. 1992, p. 35-47, published by ASM International®, 1992.

Jemielniak, K., Zawistowski, J., Kwiatokowski, L., Dzwajka, K.;, 2001, "Badania skrawalnosci stopu GrANi 10S.4G", Institut Technologii Maszyn Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Poland 2001 (en langue polonaise).

Jemielniak, K., Otman, O.; (1997), "Catastrophic Tool Failure Detection Based on Acoustic Emission Signal Analysis", *Annals of the CIRP*, vol 47(1) 1998.

Jemielniak, K. (1993); "Data Acquisition & Signal Processing in Manufacturing", École Polytechnique de Montréal, notes de cours (professeur invité).

Jemielniak, K. (1993): "Tool & Process Condition Monitoring", École Polytechnique de Montréal, notes de cours (professeur invité).

Jesus, E.R.B., Filho, E.S.J., Rossi, J.L. (2001), "Effect of Reinforcement on the Machining of Aluminum Matrix Composites Obtained by Powder Metallurgy", *Key Engineering Materials*, Vol 189-191 (2001), p. 535-541.

Kakino, Y., (1999), "High speed and high productive drilling by intelligent machine tools", *Laser Metrology and Machine Performance*, vol 4, 1999, p. 157-165.

Kaichun, R., Jun, N.; (1999), "Analyses of Drill Flute and Cutting Angles", *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 1999, vol 15, p. 546-553.

Kishawy, H.A., Kannan, S., Balazinski, M.; (2004), "An Energy Based Analytical Force Model for Orthogonal Cutting of Metal Matrix Composites", *Annals of the CIRP*, vol 53(1) 2004, p. 91-94.

Kistler Instrument Corporation, Suisse, (2002-2005), Documentation acquisition des données.

Kramer, B.M., (1987), "On Tool Materials for High Speed Machining", *Journal of Engineering for Industry, Trans. of ASME*, vol 109, p.87-91, May 1987.

Lacalle, L.N.L., Lamikiz, A., Sanchez, J.A., Cabanes, I. (2001), Cutting conditions and tool optimisation in the high speed milling of aluminum alloys, *Proc. Instn Mech. Engrs.*, vol. 215, part B, p. 1257-1269.

Lane C.T.,(1990), "Machining Characteristics of Particulate Reinforced Aluminum", Conf Proc of Fabrication of Particulates Reinforced Metal Composites ASM International, Montreal 1990, p. 195-201.

Lane, C. T. (1993), "Drilling and Tapping SiC Particle Reinforced Aluminum", Proceedings of the ASM 1993 Material Congress, Pittsburgh, Pennsylvania, Oct 17-21, p. 9-16, 1993.

Lane, C.; (1992), "The Effect of Different Reinforcements on PCD Tool Life for Aluminum Composites" Proceedings of the Machining of Composite Materials Symposium

ASM materials week, Chicago, Illinois, 1-5 nov 1992, p. 17-27.

Lane, C.T., (1992), "Machinability of Aluminum Composites As a Function of Matrix Alloy and Heat Treatment", in Machining of Composites Materials, Proc. symp, ASM Materials Week, Chicago , Illinois, 1-5 Nov, 1992, p. 3-15.

Laporte S., K'Nevez, J-Y, Cahuc, O., Darnis, P., 2004, An experimental study for drilling Operation using a 6-component dynamometer, Bath, UK, 2004.

Lazarescu, I., (1961) Calcul et construction des outils de coupe (en langue roumaine), Maison d'édition "Editura Tehnica", 1961.

Leep, H.R., Herde, D.L.; (1993), "Production Drilling Models for a Composite Material", Proceedings of the ASM 1993 Materials Congress, Pittsburgh, Pennsylvania, October 17-21, p. 131-135, 1993.

Lin, J.T., Bhattacharyya, D., Ferguson, W.G., (1998), "Chip formation in the machining of SiC-particle-reinforced aluminum-matrix composites", *Composites Science and Technology*, vol 58(2) p 285-291, Feb, 1998, Elsevier Sci Ltd, Exeter, England.

Liu, W. C., Chuang, Y.H., Chen, C.C.A.; (2000), "Hot machining of particulate SiC Aluminum Composite material", *5th International Conference on Progress of Machining Technology*, Beijing, China, 2000, p. 993-1000.

Margarit, L., Recherche expérimentale en perçage des composites à matrice d'aluminium renforcé de particules de céramique et de graphite revêtu de nickel, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Département de génie mécanique, Avril 2006.

Masounave, J., Brodusch, N. et Scheed, L., Le perçage des métaux : influence de l'âme, Matériaux & technique, 1999, p 29-37.

Masounave, J., Litwin, J., Hamelin, D.; (1994) "Prediction of Tool Life in Turning Matrix Composites", *Materials and Design*, Vol 15, Nov. 5, 1994, p. 287-293.

Mazoof J., Drill point geometry, [En ligne] :

www.newmantools.com/machines/drillpoint.html (Page consulté le:10 Décembre 2005).

Mellinger, J.C., Ozdoganlar, B.O., DeVor, R.E., Kapoor, S.G.; (2002), "Modeling Chip-Evacuation Forces and Prediction of Chip-Clogging in Drilling", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol 124, 2002, p. 605-614.

Metal Cutting Tool Handbook, (1989), Industrial Press, USA published for the United States Cutting Tool Institute.

Metha, M., Soni, A.H.; (1993), "Hole Quality, Drilling, Assessment and Integrity Issues in Graphite Fiber Reinforced Composites laminates: A Generalized Approach", Proceedings of the ASM 1993 Materials Congress, Pittsburgh, Pennsylvania, October 17-21, p. 139-152, 1993.

Misra, A., Finnie, L.; (1982), "A Review of the Abrasive Wear of Metals", *Transactions of ASME*, vol 104, p. 94-100, 1982.

Modern Machine Shop, Gardner Publications inc, collection 1995-2005.

Monaghan, J.; O'Reilly, P.; (1992), "Drilling of an Al/SiC metal-matrix composite", Journal of Materials Processing Technology, vol. 33(4) p. 469-480, Sept, 1992.

Monaghan, J., O'Reilly, P.,(1992), "Machinability of an aluminum alloy / silicon carbide metal matrix composite" *Processing of Advanced Materials*, vol 2, p. 37-46, 1992.

Morin, E., Masounava, J., Laufer (1995), Effects of Drill Wear on Cutting Forces in the Drilling of Metal Matrix Composites, Wear 184, Elsevier, p.11-16.

Narahari, P., Pai, B.C., Pillai, R.M.; (1999), "Some aspects of machining cast Al-SiCp composites with conventional high speed steel and tungsten carbide tools" , *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol 8(5), p. 538-542 1999, ASM International, Materials Park, OH, USA.

Neusen, KF., Rohatgi, PK., Vaidyanathan, C., Alberts, D., (1987), Abrasive Waterjet Cutting of Metal Matrix Composites Proc. Of the 4th US Water Jet conf., Berkely, California, Aug. 26-28, p 175-182.

Novak, A., Wiklund, H.; (1996) , "On-line Prediction of Tool Life", *Annals of the CIRP*, vol 45(1) , 1996, p. 93-96.

Orsborn L.M., Shook, G.R.; (1992), "Machining Experience with Discontinuously Reinforced Aluminum Hydraulic Components".

Prevot, B., Ip, S.W., Shridar, R., Toguri, J.M., (1996), Wettability of Nickel Coated Graphite by Aluminum, Dept. of Metallurgy & Materials Science, Work Term Report, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada, 1996.

Proceedings of the Machining of Composites Materials Symposium, ASM Materials Week, Chicago, Illinois, 1-5 nov, 1992, p. 57-61.

Ping, C.; (1992); "High Performance Machining of SiC Whisker Reinforced Aluminum Composite by Self Propelled Rotary Tools", *Annals of the CIRP*, vol 41/1/1992 p. 59-62.

Purohit, R., Sagar, R.; (2001), "Fabrication of a cam using metal matrix composites", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 17, (2001) p. 644-648.

Quigley, O., Monaghan, J., O'Reilly, P., (1994), "Factors Affecting the Machinability of an Al/SiC Metal-Matrix Composite", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 43, 1994, p. 21-36, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Netherland.

Ramachandra, A., Chandraskekara, K.; (2000) , Evaluation and comparison of universal machinability index of Al-Si-Gr and Al-Si-SiC machinability index of Al-Si-Gr and Al-Si-SiC composites, *Proceedings from Processing and Fabrication of Advanced Materials IX*, 9-12 Oct 2000, St.Louis, Missouri, ASM International , 2001, p. 239-249.

Ramrattan, S.N., Sitkins F.Z.; (1996), "Optimization of the casting and machining processes for a metal matrix composite" Proceedings 13th Symposium on Engineering Applications of Mechanics Manufacturing Science and Engineering, McMaster University, Hamilton, Ontario, 7-9 May 1996 p. 624-629.

Ramesh, K.C., Sagar, R., (1999), "Fabrication of metal matrix composite automotive parts", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1999, vol. 15, p. 114-118.

Rohatgi P.K., Narendranath C.S.; (1993), "Tribological Properties of Al-Si-Gr-SiC Hybrid Composite", Proceedings of the ASM 1993 Materials Congress, Materials Week '93, Pittsburgh, Pennsylvania, October 17-21, p. 21-25, 1993.

Rohatgi P.K., Bharadwaj, R. Narendranath, C.S.; (1993), "Influence of Initial Surface Finishes of Aluminum Alloy Graphite Composites on Tribological Properties", Proceedings of the ASM 1993 Materials Congress, Materials Week '93, Pittsburgh, Pennsylvania, October 17-21, p. 93-102, 1993.

Rohatgi P.K., Narendranath C.S.; (1993), "Friction and Wear of Al-Si-Gr Composite", Proceedings of the ASM 1993 Materials Congress, Materials Week '93, Pittsburgh, Pennsylvania, October 17-21, p. 87-91, 1993.

Rohatgi P.K., Ray S., Liu Y. Narendranath C.S.; (1993), "Tribological Properties of Composites Containing Hard and Soft Particles", Proceedings of the ASM 1993 Materials Congress, Materials Week '93, Pittsburgh, Pennsylvania, October 17-21, p. 1-11, 1993.

Russel, G.S., Harold, A., (1993), "A review of machining studies for castable and perform infiltrated reinforced aluminum metal matrix composites", *Proceedings of ASM 1993 Materials Congress*, Materials Week, '93, Pittsburgh, Pennsylvania, Published by ASM International®, Materials Park Ohio, USA, 1993.

Sandvik Cororant, (1994), Modern Metal Cutting- A Practical Handbook Sandvik, Sweden, 1994.

Sched, L., Nareon, D., Masounave, J.;(1996), "Perçage en phase pâteuse induite des métaux et composites métalliques", dans Les Applications Techniques de la mécanique, Proc. of Conf. CSME Forum SCGM 1996.

Mc Master University, Hamilton, Ontario Canada, 7-9 May 1996, p. 719-725.

Sheehan, B., (1993), Laser Drilling of Composite Materials, proc. of the ASM 1993 Materials congress, Pittsburgh, Pennsylvania, Oct, 17-21, p. 171-175.

Smith G. R., Feel H.; (1993), "A review of machining studies for castable and preform infiltrated reinforced aluminum metal matrix composites", Machining of composite materials II, Proceedings of ASM 1993 Materials Congress, Materials Week '93, October 17-21, 1993, Pittsburgh, Pennsylvania, Published by ASM International.

Smith, P., Coatings, (2002), *American Machinist*, Sept 2002, p. 58-60.

Songméné V., Yan, D.; (1997) "Machining of Aluminum Composites", preliminary report, Industrial Research & Development Institute, Midland, Ontario, Canada, 14 p.,1996.

Songméné, V., Stephenson, T.F., Warner, A.E.M. (1997), "Machinability of Graphitic Silicon Carbide Aluminum Metal Matrix Composite GrA-NiTM", Proc. of the 1997

ASME Int. Mech. Eng. Congress and Exposition, ASME International, Windham Anatole, Dallas, Texas, nov. 16-21, 1997, p. 193-200.

Songméné V., Balazinski M., (1999), "Machinability of Graphitic Metal Matrix Composites as a Function of Reinforced Particles", *Annals of the CIRP*, vol. 48(1), 1999, p.77-80.

Songméné, V.; (2000), "Usinage des Composites à Matrice d'Aluminium Renforcée des Particules de Céramique et de Graphite Revêtu de Nickel", Thèse, Université de Montréal, École Polytechnique. Directeur de recherche: Marek Balazinski, 2000.

Steffens, K., Wilhelm H; (2000); "Next Engine Generation: Materials, Surface Technology, Manufacturing Processes". MTU Aero Engins, Germany 2000.

Stucky, M. (1989), "Revue critique des renforts et de procédés d'élaboration des matériaux composites à matrice métallique", Fonderie Fondeur Aujourd'hui, Dec. 1989, p. 31-39.

Sturges, R.H., (1992), "Monitoring Milling Processes Through AE and Tool/Part Geometry", *Trans. of ASME*, vol 114, Feb 1992, p. 8-14.

Syn C.K., Leuser D.R., Sherby O.D.; (1992), "Processing and Mechanical Properties of Laminated Metal Composites of AL/Al-25 vol% SiC and Ultrahigh Carbon Steel/Brass", Proceedings of the First International Conference on Advanced Synthesis of Engineered Materials, San Francisco, California, 31 August- 2 September 1992.

Taguchi. G., Konichi, S., Taguchi Methods, Orthogonal Arrays and Linear Graphs, Tools for Quality Engineering, American Supplier Institute, 1987, p. 35-38.

Tarn, J.H., Tomizuka, M.; (1989), "On-line Monitoring of Tool and Cutting Conditions in Milling", *Trans. of ASME*, vol 111, Aug. 1989, p. 206-212.

Tanguy, J.C. (1988), "Guide du perçage au foret hélicoïdal", Centre Technique des Industries Mécaniques, CETIM, Senlis, France 1998.

Taya, M, et Arsenault, R. Metal Matrix composites, 1989, p. 1-9, Oxford.

Teti, R.; (2002) "Machining of Composites Materials", *Annals of the CIRP*, vol 51(2) 2002.

Tomac, N., Tonnessen, K., (1992), "Machinability of Particulate Aluminum Matrix Composites", *Annals of the CIRP*, vol. 41(1), 1992, p. 55-58.

Uehara, K., Takeshita, H., Sakurai, M., Minowa, K.; (2000), "Cutting behaviour of SiC particulate reinforced aluminum alloy", *Progress in Machining Technology*, Proceedings of the Fifth International Conference on Progress on Machining Technology, Beijing China, 2000, p. 70-75.

Weinert, K.; (1993), "Consideration of Tool Wear Mechanism when Machining Metal Matrix Composites (MMC)", Annals of the CIRP, vol 42(1), p. 95-98, 1993.

Weinert, K., Biermann, D., Meister, D. (1995), "Machining of Metal Matrix Composites - Tool Wear and Surface Integrity", Proceedings of ICCM-10, vol. 3, p. 589-596, August 1995, Whistler, B.C. Canada.

Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J.W., Wakabayashi, T.; (2004), "Dry Machining and Minimum Quantity Lubrification", *Annals of the CIRP*, vol 53 /2/2004.

Xu, J., Zuo, D., Yang, M. (1995), "Machining of Metal Matrix Composites", Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, vol. 12(2), p. 162-166, 1995.

Yuan, Z.J., Geng, L., Dong, S.; (1993) "Ultraprecision Machining of SiCw/Al Composites", *Annals of the CIRP*, vol 42/1/1993 p. 107-109.

Zorev, N.N.,(1966) "Metal Cutting Mechanics", M.C. Shaw, editor, Pergamon Press, New York.

Zweben, C., (1993), "Metal Matrix Composites an Overview", General Electric Company, Space System Division, 4, p. 1993.