

**Titre:** Étude expérimentale du perçage des composites à matrice  
Title: d'aluminium renforcée de particules de céramique et de graphite  
revêtu de nickel

**Auteur:** Laurentiu Margarit  
Author:

**Date:** 2006

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Margarit, L. (2006). Étude expérimentale du perçage des composites à matrice  
Citation: d'aluminium renforcée de particules de céramique et de graphite revêtu de nickel  
[Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.  
<https://publications.polymtl.ca/7724/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/7724/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:** Marek Balazinski, & Victor Songmené  
Advisors:

**Programme:** Non spécifié  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU PERÇAGE DES COMPOSITES À MATRICE  
D'ALUMINIUM RENFORCÉE DE PARTICULES DE CÉRAMIQUE ET DE  
GRAPHITE REVÊTU DE NICKEL

LAURENTIU MARGARIT  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

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

AVRIL 2006

©Laurentiu MARGARIT, 2006.



Library and  
Archives Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Published Heritage  
Branch

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file* *Votre référence*  
*ISBN: 978-0-494-17957-4*  
*Our file* *Notre référence*  
*ISBN: 978-0-494-17957-4*

#### NOTICE:

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

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

#### AVIS:

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

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

---

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

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

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

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

  
**Canada**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU PERÇAGE DES COMPOSITES À MATRICE  
D'ALUMINIUM RENFORCÉE DE PARTICULES DE CÉRAMIQUE ET DE  
GRAPHITE REVÊTU DE NICKEL

présenté par: MARGARIT Laurentiu

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

M. BARON Luc, Ph.D., président

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

M. SONGMENE Victor, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. TOUNSI Nejah, Ph.D., membre

## Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de recherche, le prof. dr. ing. Marek Balazinski, et mon codirecteur prof. dr. ing. Victor Songmene, pour le professionnalisme de leur encadrement, pour leur idées, leurs conseils et pour leur temps dédié au sujet d'usinage des matériaux composites. Leur enthousiasme pour la recherche en usinage et leur dévouement pour la fabrication mécanique restera un modèle de vie professionnelle pour moi.

J'exprime également ma reconnaissance pour le support financier accordé par le projet Auto 21.

Aussi j'exprime ma reconnaissance au prof. Krzysztof Jemielniak, de l'Université Technique de Varsovie en Pologne, pour son support concernant l'acquisition des données et ultérieurement pour le traitement des données.

Les techniciens du laboratoire d'usinage ainsi que le personnel administratif du département de génie mécanique sont priés d'accepter mes remerciements pour leur support de chaque jour.

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

## RÉSUMÉ

La dernière décennie a été caractérisée par la croissance accentuée de la compétition mondiale dans le domaine des automobiles et en même temps par l'apparition des nouvelles contraintes législatives, spécialement environnementales. Les constructeurs automobiles sont obligés d'investir dans le développement des nouveaux matériaux .

Parmi les matériaux d'avenir dans l'industrie de l'automobile, on retrouve les composites à matrice de métal (CMM) surtout à base d'aluminium renforcée de particules de céramique. Les particules de renfort qui améliorent la résistance à l'usure de ces nouveaux composites usent rapidement les outils de coupe. Ce mémoire porte sur recherches sur le perçage des composites graphitiques (GrA-Ni®) consistant en une matrice d'alliage d'aluminium renforcée avec des particules molles de graphite revêtu de nickel et des particules dures de  $Al_2O_3$  ou SiC. Il y a plus d'une dizaine d'années que ces matériaux ont été développés, mais leur utilisation à grande échelle reste réduite par manque de données d'usinage.

La recherche présentée en synthèse dans ce mémoire a pour objet le perçage des CMM afin de trouver l'influence des paramètres de coupe (vitesse d'avance et vitesse de rotation de l'outil) sur l'usure des outils et sur la qualité des surfaces obtenues. Des essais de perçage ont été conduit en utilisant des outils en carbure solide et des forets avec des plaquettes. Pour vérifier l'effet de l'augmentation de la qualité du trou, spécialement la circularité, des tests supplémentaires ont été effectués avec un foret à trois lèvres.

Les études de perçage ont montré que:

- les petites avances augmentent l'usure des outils;
- à partir de 8000 rpm l'usure augmente;
- les outils à plaquettes amovibles ne sont pas recommandés pour des trous plus profonds que 1.5 fois le diamètre de la plaquette.

- pour les trous plus profonds que 2 fois le diamètre du foret, le diamètre augmente vers le fond du trou (conicité inverse);
- à partir de 8000 rpm, la rugosité Ra (moyenne arithmétique) augmente pour les forets à plaquette amovible est reste constante pour les forets en carbure;

Le domaine de perçage garantissant une stabilité dimensionnelle maximale, une bonne qualité du trou et une usure acceptable de l'outil a été déterminé.

## ABSTRACT

The last ten years was characterized by the increasing of the worldwide competition in automotive industry. At the same time new restrictive laws, specially related to the environment where introduced.

The automotive builders must invest money to develop new materials.

The materials expected as future solutions in the automotive industry, include the metal matrix composites, specially based on aluminum and reinforced with ceramic particles. The reinforcement particles who increase the wear resistance for these new composites, wear very fast the cutting tools.

This master thesis present researches on the drilling of a composite material consisting of an aluminum alloy matrix reinforced with soft graphite particles coated with nickel and by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or SiC hard particles. There are more than ten years that this material was developed, but its use on the large scale was delayed due to the lack of machining data.

The main objective of this research work is to find the appropriate cutting parameters (feed and speed for the cutting tools) in order to reduce the tool wear and improve the surface quality. Drilling tests was conducted by using carbide tools and high speed steel tools.

To evaluate the increasing of the quality of the holes, specially the circularity, supplementary tests was running by using one drill with three cutting edges.

The research has shown that:

- the small feed increase the tool wear;
- above 8000 rpm the wear increase;



- indexable insert drills are not recommended for holes more deep than 1.5 times the insert diameter;
- for the hole more deep than 2 times the drill diameter, the hole diameter increase at the bottom of the hole;
- above 8000 rpm, the roughness Ra (average value) increase for removable insert drills and remain constant for solid carbide drills.

The drilling range giving one dimensional stability, one good hole quality and one acceptable wear of the tools was determined.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	IV
RÉSUMÉ .....	V
ABSTRACT .....	VII
TABLE DES MATIÈRES .....	IX
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES ANNEXES .....	XXII
LISTE DES SYMBOLES .....	XXIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XXIV
Introduction .....	1
Chapitre 1 Revue bibliographique	
1.1 Introduction dans le domaine des CMM.....	5
1.2 Composites à matrice de métal (CMM).....	6
1.2.1. Typologie des CMM .....	6
1.2.2 Propriétés des CMM .....	7
1.3. Applications des CMM .....	8
1.4 Composites graphitiques GrA-Ni®.....	21
1.4.1. Typologies des composites GrA-Ni® .....	22

1.4.2. Structure métallographique .....	22
1.4.3 Propriétés de GrA-Ni® .....	24
1.5 Usinabilité des CMM.....	25
1.6 Conclusions de la bibliographie.....	36

## Chapitre 2 Formulation du problème et méthodologie expérimentale

2.1 Formulation du problème .....	37
2.1.1. Importance et complexité du perçage.....	37
2.1.2. Formulation du problème et objectifs de recherche .....	37
2.2 Outils de perçage .....	38
2.2.1. Perçage. Eléments de référence. ....	38
2.2.1.1. Eléments constructifs du foret.....	38
2.2.1.2. Angles du foret .....	40
2.3 Modèles de forets existants sur le marché. ....	53
2.3.1. Forets hélicoïdaux classiques monoblocs.....	53
2.3.2. Forets avec le point soudé .....	54
2.3.3 Forets avec des plaquettes amovibles.....	54
2.3.4. Forets à lame (spade drills) .....	55
2.3.5. Outils de trépanage .....	56
2.3.6 Outils à tête "droite" amovible .....	58
2.3.7. Outils à tête vissable .....	58
2.3.8. Outils à point amovible .....	59
2.3.9. Outils de perçage avec évacuation par intérieur.....	60
2.3.10 Perçage par la méthode STS / BTA .....	60
2.3.11. Forets pour perçage profond .....	61
2.3.12 Forets à trois lèvres .....	62
2.4 Instrumentation .....	63
2.5 Choix des types d'outils pour les tests de perçage.....	70
2.6 Méthodologie expérimentale .....	74

Chapitre 3 Données expérimentales et interprétations des résultats	
Résultats expérimentaux.....	82
3.1. Outils de type lame (spade drill) .....	83
3.2 Perçage avec des forets en acier rapide produits par la compagnie Guhring avec revêtement Firex™ .....	91
3.3 Testes pour différentes vitesses de rotation de l'outil et différentes avances .....	100
3.4. Étude des dislocations .....	114
3.5 Étude de la rugosité par l'entremise du paramètre Ra .....	127
3.6 Étude de la rugosité par l'entremise du paramètre Rt .....	143
3.7 Forces et moments pour forets en carbure solide .....	153
3.8 Forces et moments pour forets à plaquette amovible .....	175
Conclusions .....	186
Bibliographie .....	188
Annexes .....	206

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Composantes pour l'industrie automobiles .....	10
Figure 1.2 : Pièces pour l'industrie automobiles.....	11
Figure 1.3 : Piston: pièce coulée et pièce usinée.....	11
Figure 1.4 : Disque de frein... ..	12
Figure 1.5 : Tiges pour les moteurs automobile .....	12
Figure 1.6 : "Callipers" en CMM versus fonte.....	13
Figure 1.7 : Disque de frein .....	13
Figure 1.8 : Chrysler - disque de frein .....	14
Figure 1.9 : Composante du système de freinage de Boeing 767.....	15
Figure 1.10: Corps d'actuateur en CMM.....	15
Figure 1.11: Utilisation des CMM dans la construction des moteurs d'avion.....	16
Figure 1.12: Composantes pour générateurs.....	16
Figure 1.13: Carcasse de transmission pour véhicule d'assaut.....	17
Figure 1.14: Applications des CMM dans la construction des véhicules militaires..	18
Figure 1.15 : Composante de bicyclette.....	19
Figure 1.16: Structure métallographique des alliages GrA-Ni®.....	22
Figure 1.17 : Exemple de profilogramme de surface .....	23
Figure 1.18: Profilogrammes de surface pour différentes méthodes d'usinage .....	23
Figure 1.19: Distribution des coûts en usinage.....	35
Figure 2.1: Types de forets .....	39
Figure 2.2: Éléments primaires du foret.....	39
Figure 2.3: Définition de l'angle au sommet $\delta$ .....	41
Figure 2.4: Angle de dépouille normale $\alpha_n$ .....	42
Figure 2.5: Définition de l'angle de dépouille latérale $\alpha_f$ .....	42
Figure 2.6: Contrôle de l'angle de dépouille nominale $\alpha_{f0}$ .....	43

Figure 2.7: Variation de l'angle $\gamma_f$ due à la forme de la goujure .....	43
Figure 2.8: Angles du foret.....	44
Figure 2.9: Formes de goujures .....	44
Figure 2.10: Formes d'affûtage du point des forets.....	46
Figure 2.11: Formation du copeau.....	46
Figure 2.12: Foret avec des bris de copeaux.....	47
Figure 2.13: Lame de perçage (spade drill) avec bris de copeaux.....	48
Figure 2.14: Deux concepts en formation des copeaux: mince et épais.....	48
Figure 2.15: Zone de cisaillement pour les composites Duralcan .....	49
Figure 2.16: Usure du foret.....	50
Figure 2.17: Usure des plaquettes. Recommandation ISCAR.....	50
Figure 2.18: Schéma de mesure pour l'usure $V_b$ .....	51
Figure 2.19: Foret classique monobloc en carbure.....	53
Figure 2.20 : Foret à point soudé (brasé).....	54
Figure 2.21: Foret avec des plaquettes amovibles.....	54
Figure 2.22: Forets à lame (spade drills).....	55
Figure 2.23: Outil de trépanage type Muskegon ®™.....	56
Figure 2.24: Outil de trépanage à cannelures hélicoïdales .....	56
Figure 2.25: Schéma d'outils de trépanage avec pilote central.....	57
Figure 2.26: Outils de trépanage guidage extérieur.....	57
Figure 2.27: Outils à tête amovible (tête droite).....	58
Figure 2.28 : Outils à tête vissable.....	59
Figure 2.29: Outils à pointe amovible.....	59
Figure 2.30: Outil avec évacuation des copeaux par intérieur.....	60
Figure 2.31 Outil de perçage par la méthode BTA .....	60
Figure 2.32: Vue de détails pour les outils BTA™ (Sandvik).....	61
Figure 2.33: Foret à perçage profond (gun drill).....	61
Figure 2.34: Détail de la partie active du foret à perçage profond (gun drill).....	62
Figure 2.35 Foret à trois lèvres.....	62

Figure 2.36: Plaque de montage pour la mesure des forces .....	63
Figure 2.37: Schéma de principe pour mesurer les forces et le moments conformément à la méthodologie Kistler.....	64
Figure 2.38: Concept de montage recommandé par Kistler.....	65
Figure 2.39: Table pour la mesure des forces et moments Kystler Type 9255B.....	65
Figure 2.40: Connexion table dynamométrique - amplificateur de charge.....	66
Figure 2.41: Formules de calcul pour forces et moments .....	66
Figure 2.42: Amplificateur.....	66
Figure 2.43: Boîte de connexions.....	67
Figure 2.44: Coupleur pour vibrations.....	67
Figure 2.45: Coupleur pour vibrations acoustiques.....	68
Figure 2.46: Appareil pour l'acquisition de données .....	68
Figure 2.47: Montage et signaux de vérification, vibration et émission acoustique. ....	69
Figure 2.48 Forets à lame amovible.....	70
Figure 2.49: Lame amovible pour les forets "AMEC" .....	71
Figure 2.50: Foret carbure solide .....	71
Figure 2.51: Recouvrements pour les outils de perçage .....	72
Figure 2.52: Plaquette Iscar.....	72
Figure 2.53: Port outil Iscar .....	73
Figure 2.54: Machine HU 40-T.....	74
Figure 2.55: Machine HU40-T Diagramme moment résistant - pouvoir .....	75
Figure 2.56: Montage des plaquettes amovibles.....	76
Figure 2.57: Force et pouvoir nécessaire au perçage.....	76
Figure 2.58: Montage de la pièce à percer sur la machine.....	77
Figure 3.1: Usure de plaquette "spade drill" en carbure, 4000 rpm, travail à sec avance 0.1 mm/rev , agrandissement 25x.....	84
Figure 3.2: Usure de plaquette "spade drill" en carbure, 4000 rpm, travail à sec, avance 0.1 mm/rev, détail agrandissement 50x .....	84
Figure 3.3: Foret en acier rapide, avance 0.1 mm/rev constant, rpm variable. Usure sur	

la face de dépouille .....	94
Figure 3.4: Usure sur la face de dépouille. Foret en acier rapide, avance 0.2 mm/rev constant, rpm variable. ....	99
Figure 3.5: Influence de la vitesse de rotation de l'outil sur la variation du diamètre, avance 0.1 mm/rev, rpm variable.....	92
Figure 3.6: Variation du diamètre de trou. Perçage avec outil en acier rapide, avance 0.2 mm/rev, rpm variable.....	96
Figure 3.7: Erreur de circularité. Perçage avec outil en acier rapide, avance 0.1 mm/rev, rpm variable.....	93
Figure 3.8: Erreur de circularité. Perçage avec outil en acier rapide, avance 0.2 mm/rev, rpm variable.....	97
Figure 3.9 Foret en carbure solide	
Figure 3.10: Variation du diamètre par rapport à l'avance pour 2500 rpm constante.	100
Figure 3.11: Erreur de circularité, 2500 rpm constante, avance variable.....	101
Figure 3.12: Variation du diamètre par rapport à l'avance, 4000 rpm constante .....	102
Figure 3.13: Erreur de circularité pour 4000 rpm constante et avance variable.....	103
Figure 3.14: Foret à plaquette amovible produit par Iscar.....	104
Figure 3.15: Variation du diamètre pour 2500 rpm constante et avance variable....	104
Figure 3.16: Erreur de circularité pour 2500 rpm constante et avance variable.....	105
Figure 3.17: Variation du diamètre pour 4000 rpm constante et avance variable....	106
Figure 3.18: Erreur de circularité pour 4000 rpm constante et avance variable.....	107
Figure 3.19: Variation de diamètre, avance 0.1 mm/rev constante, rpm variable...	108
Figure 3.20: Variation de la circularité, avance 0.1 mm/rev constante, rpm variable	109
Figure 3.21: Variation du diamètre, avance constante 0.2 mm/rev, rpm variable.....	110
Figure 3.22: Erreur de circularité, avance 0.2 mm/rev, rpm variable.....	111
Figure 3.23: Variation de diamètre, avance 0.3 mm/rev constante, rpm variable.....	112
Figure 3.24: Erreurs de circularité, avance 0.3 mm/rev constante, rpm variable.....	113
Figure 3.25: Foret Guhring, 4000 rpm, avance 0.2mm/rev.....	115



Figure 3.26: Foret Guhring, 6000 rpm, avance 0.2mm/rev .....	115
Figure 3.27: Foret Guhring, 8000 rpm, avance 0.2mm/rev .....	116
Figure 3.28: Foret Guhring, 10 000 rpm, avance 0.2mm/rev.....	116
Figure 3.29: Foret Guhring, 12000 rpm, avance 0.2mm/rev.....	117
Figure 3.30: Foret Iscar, 4000 rpm, avance 0.2mm/rev.....	118
Figure 3.31: Foret Iscar, 6000 rpm, avance 0.2mm/rev.....	119
Figure 3.32: Foret Iscar, 8000 rpm, avance 0.2mm/rev .....	119
Figure 3.33: Foret Iscar, 10000 rpm, avance 0.2mm/rev.....	120
Figure 3.34: Foret Iscar, 12000 rpm, avance 0.2mm/rev .....	120
Figure 3.35: Perçage 4000 rpm, avance 0.2 mm/rev, travaille à sec.....	121
Figure 3.36: Perçage 6000 rpm, avance 0.2 mm/rev, travaille à sec.....	122
Figure 3.37: Perçage 8000 rpm, avance 0.2 mm/rev, travaille à sec.....	122
Figure 3.38: Perçage 10000 rpm, avance 0.2 mm/rev, travaille à sec.....	123
Figure 3.39: Perçage 12000 rpm, avance 0.2 mm/rev, travaille à sec.....	123
Figure 3.40: Perçage 4000 rpm, avance 0.2 mm/rev avec liquide de coupe.....	124
Figure 3.41: Perçage 6000 rpm, avance 0.2 mm/rev avec liquide de coupe.....	124
Figure 3.42: Perçage 8000 rpm, avance 0.2 mm/rev avec liquide de coupe.....	125
Figure 3.43: Perçage 10000 rpm, avance 0.2 mm/rev avec liquide de coupe.....	125
Figure 3.44: Perçage à 12000 rpm, avance 0.2 mm/rev avec liquide de coupe.....	126
Figure 3.45: Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets en carbure solide à 2500 et 4000 rpm .....	129
Figure 3.46: Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets à plaquette à 2500 rpm .....	130
Figure 3.47: Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets à plaquette à 4000 rpm .....	131
Figure 3.48: Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets à plaquette à 8000 rpm.....	132
Figure 3.49: Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets à plaquette à 2500, 4000 et 8000 rpm.....	133

Figure 3.50: Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets à plaquette et forets en carbure solide, 2500 rpm avec liquide de coupe.....	134
Figure 3.51: Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets à plaquette et forets en carbure solide, 4000 rpm avec liquide de coupe.....	135
Figure 3.52: Variation de la rugosité Ra par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.1 mm/rev.....	136
Figure 3.53: Variation de la rugosité Ra par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.2 mm/rev.....	137
Figure 3.54: Variation de la rugosité Ra par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.3 mm/rev.....	138
Figure 3.55: Variation de la rugosité Ra par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.1, 0.2 et 0.3 mm/rev.....	139
Figure: 3.56: Étude comparative de la variation de Ra pour différentes conditions de coupe, avance 0.2 mm /rev .....	140
Figure 3.57: Synthèse de la variation de la rugosité pour avance constante 0.2 mm/rev.....	141
Figure 3.58: Variation de la rugosité Rt par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.1 mm/rev.....	143
Figure 3.59: Variation de la rugosité Rt par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.2 mm/rev.....	144
Figure 3.60: Variation de la rugosité Rt par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.2 mm/rev.....	145
Figure 3.61: Variation de la rugosité Rt par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.1, 0.2 et 0.3 mm/rev .....	146
Figure 3.62: Variation de la rugosité Rt par rapport à l'avance pour vitesse de rotation de l'outil constante 2500 rpm .....	147
Figure 3.63: Variation de la rugosité Rt par rapport à l'avance pour vitesse de rotation de l'outil constante 4000 rpm.....	148

Figure 3.64: Variation de la rugosité $R_t$ par rapport à l'avance pour vitesse de rotation de l'outil constante 4000 rpm.....	149
Figure 3.65: Variation de la rugosité $R_t$ par rapport à l'avance pour vitesse de rotation de l'outil constante 2500, 4000 et 8000 rpm .....	150
Figure 3.66: Variation de la rugosité $R_t$ par rapport à l'avance pour vitesse de rotation de l'outil constante 2500 et 4000 rpm, outils Guhring.....	151
Figure 3.67: Variation de la rugosité $R_t$ . Comparaison entre les outils en carbure solide et à plaquettes pour 2500 et 4000 rpm.....	152
Figure 3.68: Variation de la rugosité $R_t$ . Comparaison entre les outils en carbure solide et à plaquettes pour différentes conditions de coupe.....	153
Figure 3.69: Variation de la rugosité $R_t$ . Comparaison entre les outils en carbure solide et à plaquettes pour différentes conditions de coupe.....	154
Figure 3.70. Évolution des revêtements des outils de coupe .....	154
Figure 3.71. Allure globale de la force $F_z$ pour forets en carbure solide.....	155
Figure 3.72. Variation de la force $F_z$ , foret Guhring, premier test.. ..	156
Figure 3.73. Matériau collé sur le foret carbure solide .....	157
Figure 3.74. Variation de la force $F_z$ , foret Guhring, deuxième test. ....	158
Figure 3.75. Répétabilité des données pour la force $F_z$ , foret Guhring.....	159.
Figure 3.76. Variation de la force $F_z$ pour les premiers 5 trous du test numéro 1, foret Guhring en carbure solide. ....	160
Figure 3.77. Variation du moment $M_z$ pour les premiers 5 trous du test numéro 1, foret Guhring, carbure solide.....	161
Figure 3.78. Variation du moment $M_z$ par rapport à la longueur de perçage. Foret Guhring.....	162
Figure 3.79. Interdépendance $F_z - M_z$ pour perçage avec foret Guhring en carbure solide. ....	163
Figure 3.80. Usure $V_b$ versus force $F_z$ . Perçage avec foret en carbure solide .....	164
Figure 3.81. Usure $V_b$ versus Moment $M_z$ , perçage avec foret carbure solide. ....	165
Figure 3.82. Variation de l'usure $V_b$ par rapport à la longueur de perçage.....	166

Figure 3.83. Matériau collé sur le foret après 1800 mm de perçage. ....	167
Figure 3.84. Matériau collé sur le foret après 1950 mm de perçage.....	168
Figure 3.85. Matériau collé sur le foret après 2100 mm de perçage.....	169
Figure3.86. Matériau collé sur les goujures du foret après 1800 mm ou 45 trous ...	169
Figure 3.87. Matériau collé sur les goujures du foret après 2200 mm.....	170
Figure 3.88. Bavures pour les premiers 8 trous, foret carbure solide Guhring.....	170
Figure3.89. Formation des bavures par rapport à l'usure, foret carbure solide Guhring, avance 0.2 mm rev, 6000 rpm. ....	171
Figure 3.90. Bavure et usure après 270 mm de perçage. ....	172
Figure 3.91. Bavure et usure après 570 mm de perçage.....	172
Figure 3.92. Bavure et usure après 1680 mm de perçage. ....	173
Figure 3.93, Recommandation pour réduire les bavures en perçage.....	173
Figure 3.94. Répétabilité usure, foret Guhring, 6000 rpm, f=0.2 mm/rev. ....	174
Figure 3.95. L'allure globale des forces et moments pour outils Iscar ....	175
Figure 3.96. Force Fz. Outil à plaquette, f=0.2 mm/rev, 6000 rpm ....	177
Figure 3.97. Force Fz. Outil à plaquette, f=0.2 mm/rev, 6000 rpm ....	178
Figure 3.98. Moment Mz, Outil à plaquette, f=0.2 mm/rev, 6000 rpm ....	179
Figure 3.99. Force Fz, comparaison pour 6000 et 8000 rpm ....	180
Figure 3.100. Moment Mz, comparaison pour 6000 et 8000 rpm ....	181
Figure 3.101. Matériau collé de façon permanent sur la plaquette ....	182
Figure 3.102. Portoutil Iscar brisé. ....	182
Figure 3.103. Usure plaquette Iscar 6000 rpm, f 0.2 mm/rev ....	183
Figure 3.104. Usure plaquette Iscar 8000 rpm, f 0.2 mm/rev ....	184
Figure 3.105. Comparation usure plaquette Iscar 6000 et 8000 rpm. ....	184

Annexe 3.1-Figure 1: Usure de plaquette "spade drill" en carbure, 4000 rpm, travail à sec, avance 0.1 mm/rev , détail agrandissement 50x.....	215
Annexe 3.1-Figure 2: Usure de plaquette "spade drill" en carbure, 4000 rpm, travail avec liquide de coupe, avance 0.1 mm/rev, agrandissement 50x.....	216
Annexe 3.1-Figure 3: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 4000 rpm, avance 0.1 mm/rev, avec liquide de coupe, agrandissement 50x.....	216
Annexe 3.1-Figure 4: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 4000 rpm, avance 0.1 mm/rev, avec liquide de coupe, agrandissement 25x.....	217
Annexe 3.1-Figure 5: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 4000 rpm, avance 0.1 mm/rev, avec liquide de coupe, agrandissement 25x.....	217
Annexe 3.1-Figure 6: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, 50x.....	218
Annexe 3.1-Figure 7: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, agrandissement 25x.....	218
Annexe 3.1-Figure 8: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, agrandissement 50x.....	219
Annexe 3.1-Figure 9: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, agrandissement 25x.....	220
Annexe 3.1-Figure 10: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, agrandissement 50x.....	220
Annexe 3.1-Figure 11: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, agrandissement 25x.....	221
Annexe 3.1-Figure 12: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, agrandissement 50x.....	221
Annexe 3.1-Figure 13: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, agrandissement 25x.....	222

Annexe 3.2. Figure 1: Usure arête de coupe. Foret en acier rapide, avance 0.1 mm/rev constante, rpm variable. ....	223
Annexe 3.2. Figure 2 : Détail usure du coin. Foret en acier rapide, avance 0.1 mm/rev constante, rpm variable. ....	224
Annexe 3.2. Figure 3: Usure arête de coupe. Foret en acier rapide, avance 0.2 mm/rev constante, rpm variable.....	225
Annexe 3.2. Figure 4 : Détail usure du coin. Foret en acier rapide, avance 0.2 mm/rev constante, rpm variable. ....	225
Annexe 3.3 Figure 1: Variation de la rugosité Ra par rapport à la vitesse de rotation de l'outil pour forets en acier rapide. ....	226
Annexe 3.4 Foret Guhring. Force Fz, Moment Mz .....	227
Annexe 3.5 Figure 1: Formation des bavures pour avance constant et rpm variable.	231
Annexe 3.5 Figure 2: Vue de détail pour rpm entre 4500 et 7000. ....	232
Annexe 3.5 Figure 3: Vue de détail pour rpm entre 9000 et 12000. ....	233
Annexe 3.5 Figure 4: Vue de détail pour rpm entre 11500 et 12000. ....	233
Annexe 3.5 Figure 5: Comparaison des bavures pour travail à sec et avec du liquide de coupe, foret Guhring, avance constant 0.2 mm/rev, rpm variable. ....	234
Annexe 3.5 Figure 6: Comparaison des bavures foret Guhring.....	235
Annexe 3.5 Figure 7: Comparaison des bavures foret Guhring. Agrandissement pour 8000, 10000 et 12000 rpm .....	235
Annexe 3.5 Figure 8: Bavures foret Guhring. Détail pour 6000 - 12000 rpm .....	236

**LISTE DES ANNEXES**

Annexe 1.1: Préoccupations FIAT dans le domaine des composites.....	204
Annexe 1.2: Utilisation des CMM dans la construction des moteurs d'avion.....	205
Annexe 2.1: Éléments du foret, terminologie en langue anglaise.....	207
Annexe 2.2: Différentes formes d'affutage.....	208
Annexe 2.3: Profilogramme d'une goujure du foret .....	209
Annexe 2.4: Machine HU40-T. Spécification du constructeur Mitsui Seiki.....	210
Annexe 2.5: Système de guidage pour les forets à perçage profond (gun drill).....	211
Annexe 2.6: Choix des forces et des moments à l'aide d'une abaque .....	212
Annexe 3.1: Détails concernant l'usure des forets type lamme.....	213
Annexe 3.2 : Détails concernant l'usure des forets en acier rapide.....	221
Annexe 3.3: Variation de la rugosité par rapport à l'avance, foret acier rapide .....	224
Annexe 3.4: Foret Guhring. Force Fz, Moment Mz .....	226
Annexe 3.4: Formation des bavures .....	230

**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)
$l$	profondeur de trou (mm)
$D$	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)
$\alpha_f$	dépouille latérale (degré)
$\alpha_n$	dépouille normale (degré)
$\alpha_{f0}$	dépouille nominale (degré)
$\delta$	angle de pointe ou angle au sommet (degré)
$\gamma_f$	angle de coupe latérale (degré)
$\gamma_n$	angle de coupe normale (degré)
MMC	Metal Matrix Composite , acronyme en langue anglaise
CMM	Composites à Matrice Metalique, acronyme en langue française
RPM	Révolution par minute, acronyme anglais pour la vitesse de rotation de l'outil



**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1.1. : Propriétés de GrA-Ni 10S.4G .....	24
--	----

## INTRODUCTION

L'objectif de la recherche a été l'investigation de l'influence des paramètres de coupe sur l'usure des outils et la qualité des pièces dans le processus de perçage des composites à matrice de métal. Ce mémoire est la synthèse des tests faits pour différents outils de coupe et différents paramètres de travail sur l'usure des outils et la qualité des surfaces.

Les tests ont été faits sur des échantillons de matériaux composites développés par la compagnie INCO (brevetées en 1993: Rohatgi et al. , Brevet européen EP0567287A2, 1993). C'est un matériau composite à matrice de métal (CMM) consistant en une matrice d'aluminium renforcée avec des particules de SiC et des particules de graphite revêtues de nickel. Les matériaux de cette famille sont connus sous le nom de GrA-Ni® (graphite et nickel). L'acronyme commercial de nature anglophone est MMC (Metal Matrix Composites). Cet acronyme est le plus répandu dans la bibliographie consultée. Dorénavant, afin d'alléger le texte, le mot "composites" sera utilisé ainsi que l'acronyme CMM.

Le fraisage des composites a été étudié par Songmene [PhD]. Également, il a aussi effectué des travaux concernant le perçage en utilisant des forets en acier rapide.

Son expérience accumulée dans l'usinage des composites par enlèvement des copeaux a servi comme point de départ et base de discussions dans l'élaboration de la méthodologie de travail. Les informations concernant la métallurgie des composites GrA-Ni® présentées dans sa thèse de doctorat resteront pour longtemps une référence incontournable.

Deux séries de tests ont été effectuées pour des forets en carbure solide et des forets avec des plaquettes amovibles.

Les GrA-Ni® (Songmene, V., 2000)

L'industrie automobile et avionique sont intéressées par les applications de composites de type GrA-Ni®, prioritairement aux autres types de matériaux composites vu leur supériorité en comportement tribologique donné par l'ajout de graphite. Leur conductivité thermique et diffusion thermique sont des propriétés qui font de ces matériaux des remplaçants de la fonte grise traditionnelle utilisée pour la fabrication des composants automobiles comme les disques de frein et les chemises de piston. L'utilisation des CMM dans la construction des blocs-moteurs pour l'industrie avionique est connue comme application sans avoir des données exhaustives, vu la nature confidentielle de ce type d'affaires.

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 recherche en usinage des composites (Lane 1990 et 1992) et ultérieurement confirmées par des études approfondies (Songmene 2002). L'usinage des CMM est comparé avec l'usinage d'une meule abrasive. Vu que les outils de coupe s'usent très vite et que leur prix est élevé, jusqu'à date ont été faits des tests de perçage sur des situations particulières. L'originalité de ce mémoire réside dans l'envergure d'étude l'influence de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance sur l'usure des outils et sur la qualité des surfaces obtenues.

Le grand nombre de tests faits qui donne la possibilité de formuler des conclusions générales.

Les contraintes environnementales ainsi que les maladies dermatologiques provoquées par les liquides de coupe tendent à imposer l'usinage à sec. Également le prix croissant des liquides de coupe dans le coût total d'usinage poussent à changer la stratégie en

usinage pour adopter l'usinage à sec. Les données récentes, oct-nov 2005, estiment globalement le coût du liquide de refroidissement / lubrification au niveau de 16 % du coût total de fabrication [Cutting Tools Engineering, , Vol 57 (10), p. 23, 2005]. Spécifiquement pour l'industrie automobile, Lacalle (2001) estime le coût du liquide de coupe entre 7-17 %.

Les restrictions législatives concernant le stockage, la manipulation et le recyclage des liquides de coupe obligent les entreprises manufacturières à changer leur stratégie pour l'usinage à sec ou dans la mesure du possible en utilisant le minimum nécessaire de liquide (l'acronyme est connu dans la bibliographie spécialisé comme MLR: minimum liquid requirement).

Les objectifs des essais de perçage sont:

- l'étude de l'influence de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance sur l'usure des outils, sur la force axiale  $F_z$  et le moment résistant à la broche  $M_z$ ;
- l'étude de l'influence de la vitesse 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);
- l'étude de l'influence du liquide de refroidissement sur la qualité des surfaces.

La présent travail est structuré comme suit:

- Le chapitre 1, Revue bibliographique, présente un aperçu global des composites à matrice métallique et revise l'ensemble des travaux de recherche pour l'usinage par l'enlèvement de copeaux, spécialement regardant le domaine du perçage. Dans ce chapitre est aussi présentée la problématique des outils de coupe

susceptibles de percer les CMM. Les différents types d'outils de perçage en justifiant le choix des forets retenus pour les tests, seront analysés.

- Le chapitre 2, Formulation du problème et méthodologie expérimentale présente les détails reliés au projet de perçage des composites ainsi que les montages expérimentaux.
- Le chapitre 3, Résultats et analyses présente les résultats des recherches effectuées ainsi que les commentaires qui se dégagent de l'analyse des données obtenues.

## CHAPITRE 1

### REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

#### 1.1 Introduction dans le domaine des CMM (composites à matrice métallique)

Le premier chapitre du mémoire fait la synthèse des ressources bibliographiques consultées pour connaître les résultats à jour et les tendances dans le perçage des composites 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, les matériaux composites à matrice métallique ont évolué rapidement vu le développement des procédés métallurgiques d'obtention. Les bénéficiaires traditionnels de ce type de matériaux 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 des particules 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).

L'industrie automobile est intéressée à utiliser les CMM dans la construction des disques de freins et des chemises de piston principalement. D'autres développements ont été faits pour la construction des arbres de transmission, des pistons et des cames. Le développement dédié à l'industrie automobile vise le remplacement de la fonte grise, un matériau plus lourd et avec une faible conductivité thermique. Des exemples de pièces en CMM seront présentés dans les paragraphes suivants.

## **1.2 Composites à matrice de métal (CMM)**

Le concept des composites à matrice de métal (CMM) a une valeur générique et, dans la pratique industrielle, il est utilisé dans un large domaine de produits métallurgiques composés d'une matrice métallique ductile renforcée d'un constituant dur qui est généralement de la céramique. Les premiers usagers ont été les domaines de l'aérospatial depuis 1970 et, avec un retardement d'une dizaine d'années, le domaine automobile.

### **1.2.1 Typologie des CMM**

Conformément aux informations trouvées dans (Stucky 1989), les CMM à base de particules font partie du groupe des composites à matrice métallique à renfort discontinu. La grandeur des particules de renfort (sphériques ou polyédriques) peut varier de 0.0005 jusqu'à 0.1 mm. Les CMM sont obtenus en mélangeant les particules de carbure de silicium ou d'alumine au métal liquide (voir la figure 1.17 à la page 22).

Selon la grandeur des particules de renfort traditionnelle, on retient la classification faite par Masounave (Masounave et al. 1994 ):

- des particules larges, ayant plus de 0.1 mm de diamètre, avec une grande résistance à l'usure mais très difficiles à usiner;

- des particules ayant moins de 0.05 mm de diamètre, avec de bonnes propriétés tribologiques et plus faciles à usiner.

Selon la demande du marché par rapport aux applications souhaitées, il reste à faire des recherches comparatives pour des matériaux ayant de "petites" et de "larges" particules.

Du point de vue de la nature des particules de renfort, 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.

### **1.2.2. 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;



- 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;
- une résistance à l'usure près de l'acier;
- un coefficient d'expansion thermique près de l'acier inoxydable ou du béryllium;
- une capacité élevée d'amortissement;
- une bonne conductibilité électrique.

### **1.3 Applications des CMM**

Les premières sources bibliographiques parlant des applications industrielles des CMM datent de la fin des années '80 et du début des années '90 ( Stucky, M. 1989, Smith G. R., 1993).

Par rapport au mandat de cette recherche, on met l'accent sur les applications du domaine automobile: composantes de transmission, bielles, disques de frein, chemises des cylindres et cames. Les CMM sont recherchées par l'industrie automobile pour leur grande rigidité, leur poids léger, leur grande résistance à l'usure et leurs propriétés thermiques. La réduction du poids en utilisant de nouveaux matériaux a donné des résultats remarquables dans une période de temps inférieure à 12 années. La compagnie Bosch affirme que de 1989 à 2001, le poids du système ABS pour les automobiles a été réduit de 6.2 kg à 1.8 kg.

Pour les pistons destinés aux moteurs Diesel, Clarke (1995), retient 4 caractéristiques principales: résistance à l'usure, haute stabilité thermique, résistance aux températures supérieures et bonne conductivité thermique. L'ajout de nickel dans les composites pour l'industrie automobile est signalé depuis le début des années '80. Depuis 1983, Toyota a travaillé sur le développement des composites métalliques et a obtenu une réduction de poids de 5 à 10%. Les débuts des années '90 ont apporté des progrès dans la résistance à

la fatigue thermique. Les sources bibliographiques utilisent amplement les travaux de Rohatgi pour des explications métallurgiques.

Le domaine de l'aéronautique / aérospatial est intéressé pour leur faible coefficient de dilatation thermique des CMM. La propriété des CMM d'amortir les ondes sonores fait d'eux des matériaux d'intérêt dans l'industrie d'armement (coques et hélices des torpilles et des sous-marins). Dans la construction des hélicoptères, les composites sont utilisés depuis plus d'une dizaine d'années (Clarke 1995, par la gracieuseté de Westland Helicopters).

Le domaine d'emballage (en incluant les supports pour les montages électroniques) regardent les CMM pour leur:

- faible coefficient de dilatation thermique;
- bonne conductivité thermique afin d'aider à la dissipation de chaleur;
- poids léger pour transport / manipulation;
- grande rigidité en assurant des déformations réduites.

Pour l'industrie des loisirs et articles tout usage, Duralcan et Aerospace Metal Composites (Clarke 1995, en se basant sur des travaux publiés en 1994 et 1995) 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).

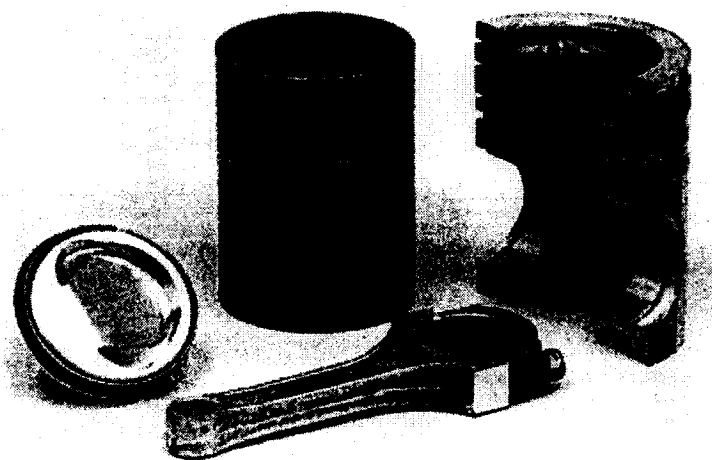
Pour souligner l'importance industrielle des CMM sur le marché, retenons quelques exemples présentés par le AIMMC Consortium [5] :

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

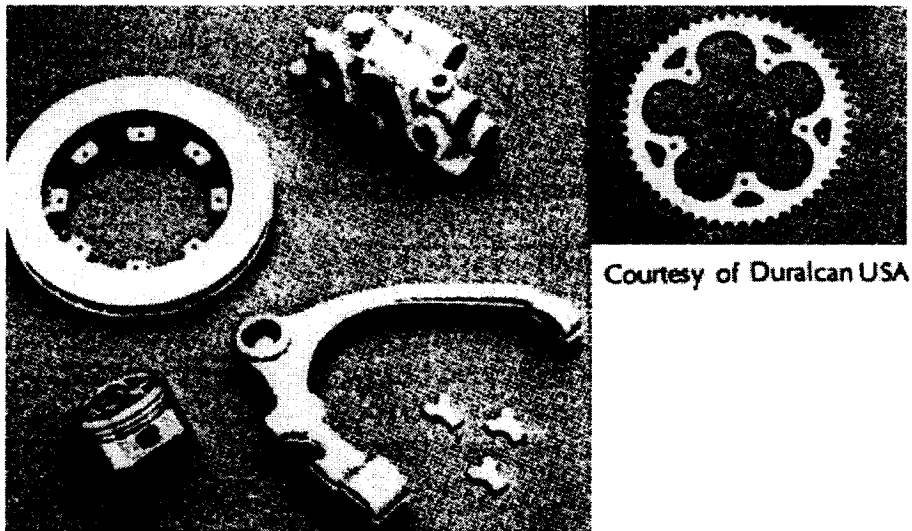
Dans l'annexe 1.1 est présentée une image en provenance du constructeur d'automobile FIAT pour souligner le rôle des CMM dans les préoccupations des manufacturiers.

Pour la fabrication des cames (Purohit 2000), les CMM sont des matériaux d'avenir en sachant que dans la région de contact entre la came et le taquet se développe une haute pression de contact. Due à l'excentricité de la came, des contraintes d'amplitude variables sont développées en produisant bruit, vibration et une sollicitation cyclique de l'arbre à cames et de son système de soutenance. Même si les procédés de fonderie essaient de produire des pièces proches des dimensions finales, le fraisage de profilage et ultérieurement une opération de finition de type rectification abrasive sont nécessaires pour obtenir la forme de la came et une rugosité réduite. Ramesh (1999) présente la fabrication des valves en CMM pour l'industrie de l'automobile.

Concernant la construction des blocs-moteurs pour les automobiles, Cole (Ford Motor Company, 1993) fait un survol du sujet. Les applications des CMM dans la construction des blocs-moteurs pour les avions sont présentées seulement comme information globale. Les applications les plus connues sont dans le domaine de la construction automobile. Dans la bibliographie, plusieurs ressources font des remarques concernant les travaux faits par la compagnie Ford pour les chemises de piston et les disques de frein. D'autres exemples d'application des CMM sont présentés dans Davis (1993).



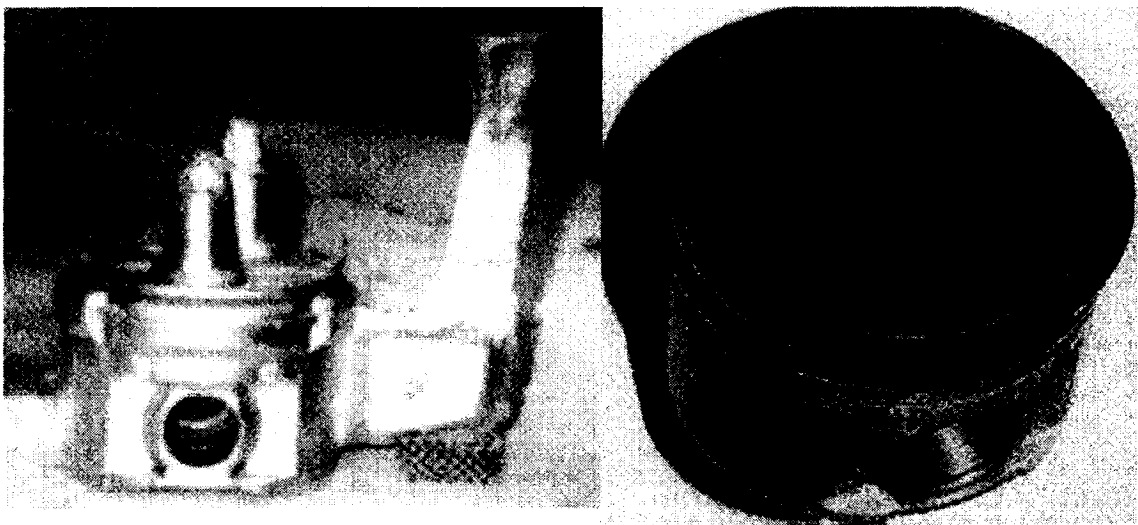
**Figure 1.1: Composantes pour l'industrie automobile. (Source: Davis 1994)**



Courtesy of Duralcan USA

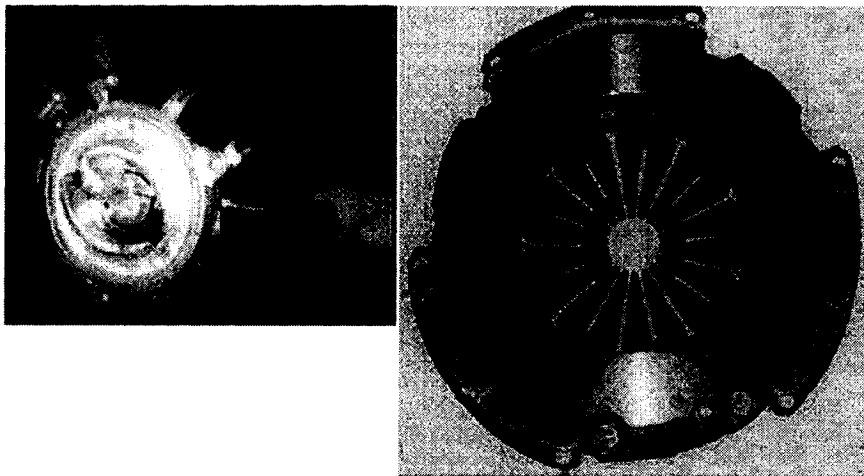
**Figure 1.2: Pièces pour l'industrie automobile. (Source: Davis 1994 et Duralcan)**

Des recherches ont été effectuées pour obtenir des CMM avec des propriétés supérieures (renforcement local) dans les zones de haute sollicitation (tête du piston).



**Figure 1.3: Piston: pièce coulée et pièce usinée. (Source: Goni, 2003)**

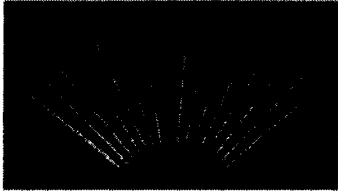
Pour les systèmes de freinage, les recherches présentées dans Goni [42] sont orientées de façon à augmenter la résistance à l'usure et à améliorer les propriétés thermiques.



**Figure 1.4: Disque de frein. (Source: Goni, 2003)**

La même source bibliographique (Goni, 2003) fait savoir que des recherches ont été effectuées pour utiliser les CMM dans la construction des systèmes de freinage des locomotives.

**3 PUSHRODS**

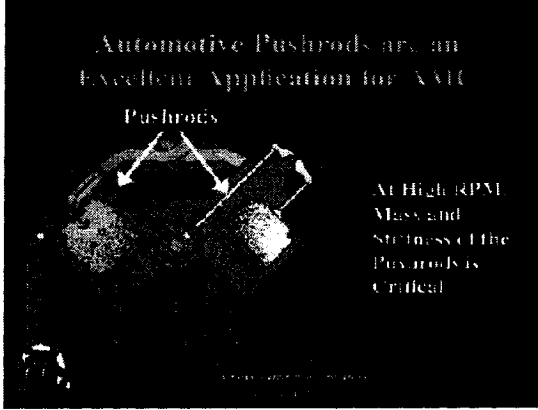


**Reinforced Aluminum Matrix Pushrods**

**Weight** For the same size and length, 3M Pushrods are 50% lighter than a steel push rod.

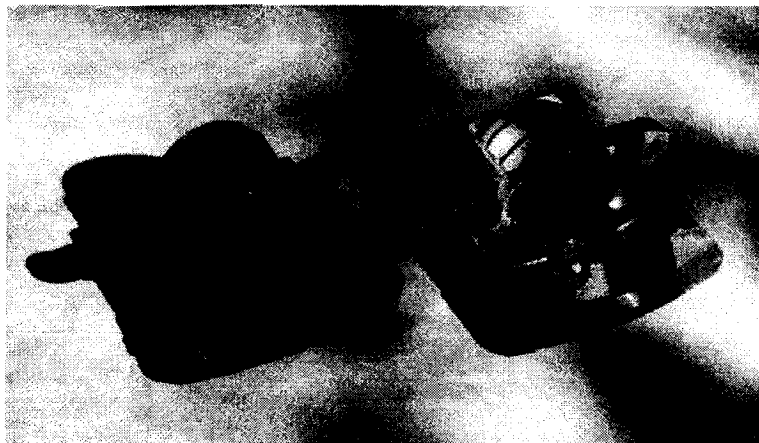
**Stiffness** 3M Pushrods are 17% stiffer than steel.

Automotive Pushrods are an Excellent Application for XMC



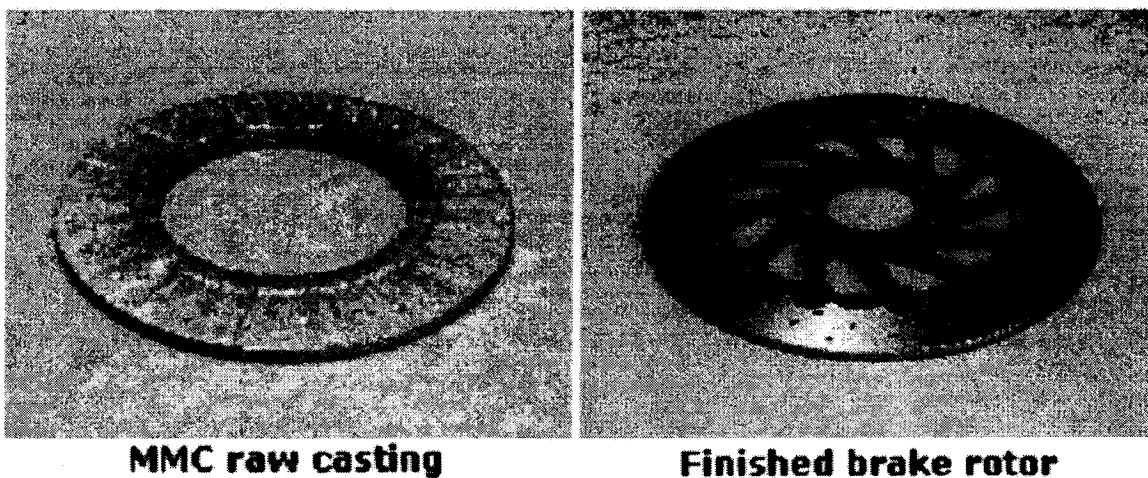
At High RPM Mass and Stiffness of the Pushrods is Critical

**Figure 1.5: Tiges pour les moteurs d'automobile (pièces individuelles et assemblage). (Source : 3M)**



**Figure 1.6: "Callipers" en CMM versus fonte. (Source: 3M)**

La compagnie 3M offre des composantes pour le système de freinage en CMM (callipers) pour remplacer les produits traditionnels en fonte. L'avantage majeur présenté par la compagnie 3M est l'amortissement des vibrations. De plus, le poids est réduit presque de moitié.



**Figure 1.7: Disque de frein. (Source: AIMMC Consortium)**

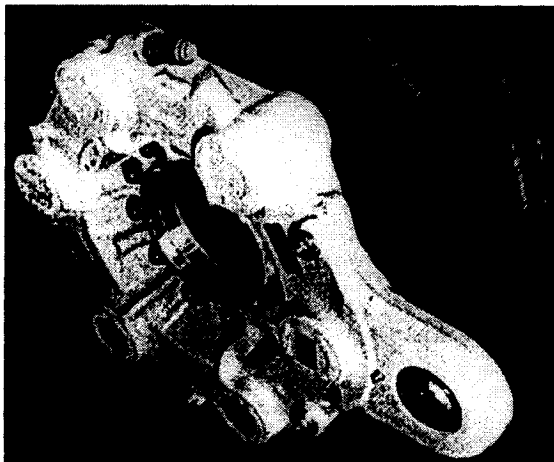


*Aluminum MMC castings are being commercial used for high performance automotive brakes.*

**Figure 1.8: Chrysler - disque de frein. (Source: AIMMC Consortium)**

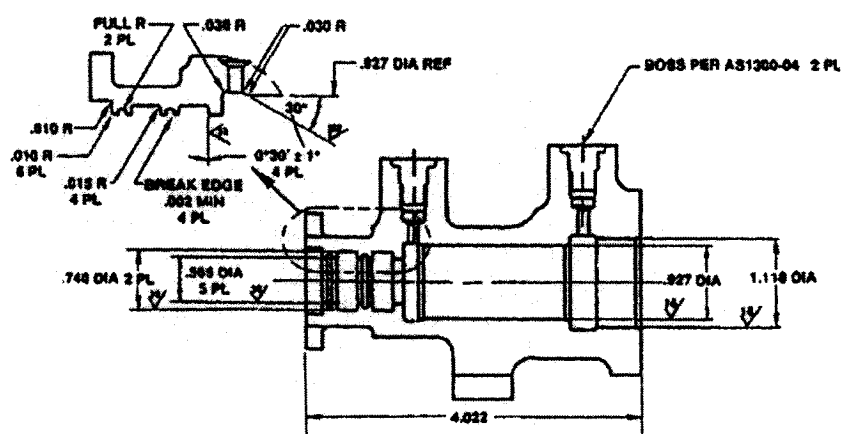
La construction aéronautique utilise les CMM pour les systèmes de freinage (parmi d'autres). Durant l'atterrissage d'urgence ou l'annulation de l'opération de décollage, une très grande quantité d'énergie est absorbée par les systèmes de freinage. La construction typique est basée sur de multiples disques en mouvement de rotation ou stationnaires. Les disques doivent avoir une très bonne résistance au choc thermique et une très bonne capacité de dissipation thermique. Clark (1995) informe que les compagnies Boeing et Airbus utilisent des CMM dans leurs montages. Smith (1993) présente l'utilisation des CMM développés par la compagnie Lanixide pour les applications des Martin Marietta. Les tests d'usure ont été faits par Martin Marietta. L'utilisation des CMM dans les domaines militaires est seulement présentée comme information globale. Smiths (1993) dans la bibliographie de son travail mentionne un document de la part de DoD (Département de la Défense des États-Unis) daté de 1989. Afin de montrer le rôle des recherches en usinage des composites, une pièce composante du système de freinage du Boeing 767 sera présentée.

Même si la technique de fonderie tente d'offrir des produits coulés près de leur forme finale, reste encore l'usinage par enlèvement des copeaux à faire.



**Figure 1.9: Composante du système de freinage du Boeing 767. (Source: CLARKE D.R., 1995)**

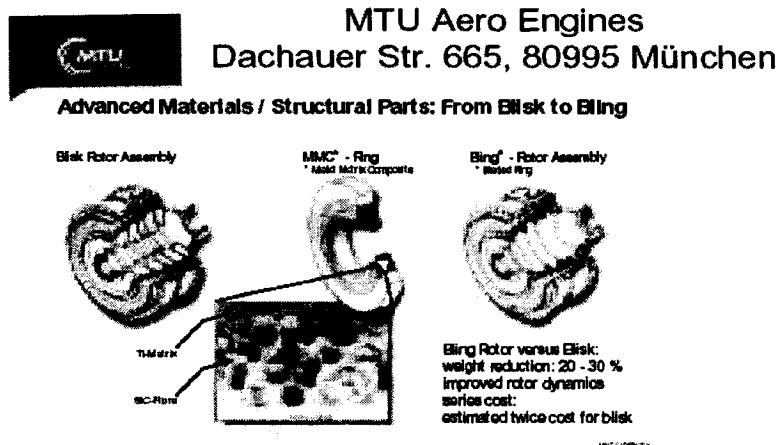
Les CMM sont utilisés aussi pour les composantes hydrauliques destinées au domaine aéronautique (Orsborn) 1993. La propriété spécifique soulignée est la résistance à la fatigue donnée par des chocs hydrauliques. Les tolérances hautement serrées des composantes hydrauliques font de l'usinage presque la seule modalité d'obtention de la forme finale. Afin de souligner le rôle d'usinage dans la production des composantes hydrauliques, un corps d'un "actuateur" sera présenté à la figure 1.10.



**Figure 1.10: Corps d'un actuateur en CMM. (Source: Osborn 1992)**



La construction des moteurs d'avion utilise des CMM pour les "blade rings" (voir l'annexe 1.2 pour des détails spécifiques).



**Figure 1.11: Utilisation des CMM dans la construction des moteurs d'avion. (Source: AIMMC Consortium)**

Afin de permettre aux moteurs / générateurs de tourner à une vitesse de rotation plus grande, l'amortissement des vibrations a un rôle majeur.



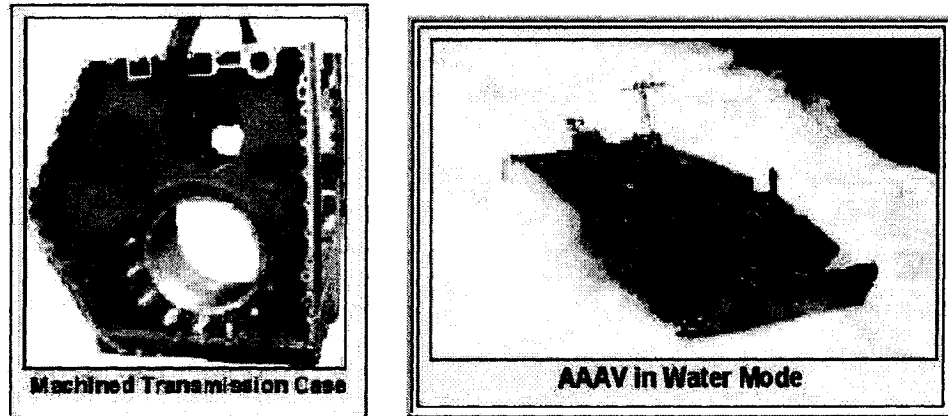
**Figure 1.12: Composantes pour générateurs. (Source: 3M)**

Dans le domaine militaire, la construction des véhicules d'assaut est intéressé pour augmenter les performances en réduisant le poids de la machine.



A Design Study in Metal Matrix Composite Castings - AAV Transmission Case

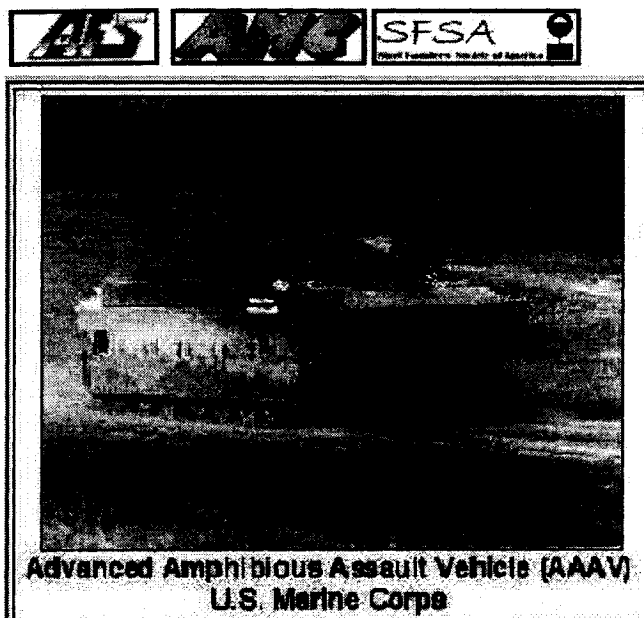
## Transmission Case - Application



**Figure 1.13: Carcasse de transmission pour véhicule d'assaut. (Source: AIMMC Consortium)**

Dans la construction de tancs, la réduction de poids des chenilles en utilisant dans le même temps un matériau plus résistant à l'abrasion représente un domaine d'applications pour les CMM.

Title Page --Aluminum MMC

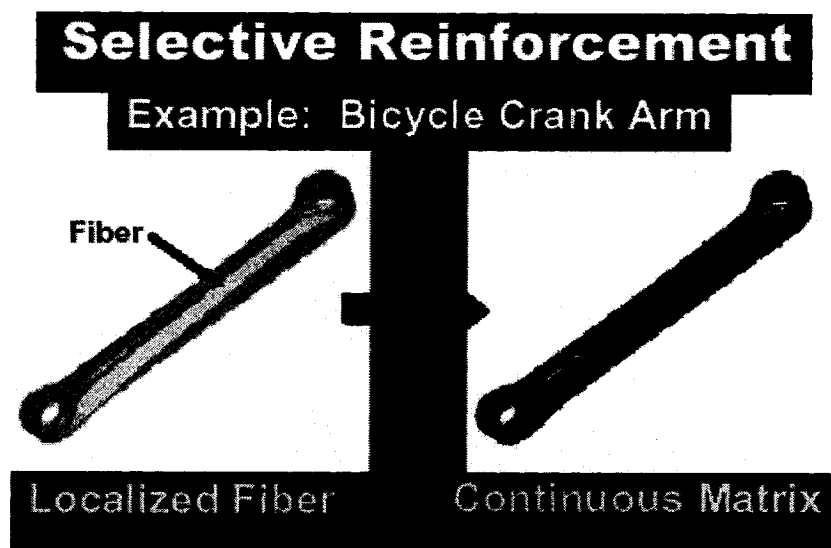


**Figure 1.14: Applications des CMM dans la construction des véhicules militaires.**  
(Source: AlMMC Consortium)

La construction des composants militaires de haute technologie représente un domaine d'applications des CMM et un marché à explorer pour les producteurs de composites.

La production des articles tout usage en grande quantité est considérée comme un segment de marché très prometteur.

Pour la construction des bicyclettes, la compagnie 3M propose des bielles en CMM.



**Figure 1.15 : Composante de bicyclette. (Source: AIMMC Consortium)**

Pour l'avenir, tous les domaines sont visés, à partir des objets tout usage jusqu'à la technologie militaire. À partir des lunettes de soleil et des montres jusqu'aux chenilles de tank, les CMM sont considérés comme des solutions réalistes.

La recherche pour développer et appliquer les CMM est faite par l'industrie à son compte ou par les agences gouvernementales qui font la coordination des travaux universitaires développés conjointement avec l'industrie. Degischer (2001) fait une présentation des organisations et programmes pour l'étude des CMM en Europe et aux États-Unis. La conclusion générale qui se dégage est que les producteurs de CMM regardent prioritairement deux domaines :

- la "production en petites séries" ( très chère ): militaire, aérospatial;
- la "grande production" : automobiles, articles tout usage.

Dans les dix dernières années, l'industrie d'emballage ainsi que l'industrie des objets tout usage s'intéressent de plus en plus à ce groupe de matériaux. Pour les emballages et les carcasses destinées à l'industrie électronique, les CMM ont l'avantage du poids léger et des propriétés thermiques supérieures. Les premières sources bibliographiques citées par Clark (1995) retournent jusqu'à 1987. Vu le progrès continu de la métallurgie / fonderie

à partir de 1991, on peut parler des "emballages" (carcasses) à parois minces (donc un autre domaine d'intérêt pour l'usinage: fraisage à grande vitesse des carcasses en CMM pour l'industrie électronique).

Le domaine de la construction des turbines demande les composites contenant des SiC / graphite pour leur résistance au choc thermique et pour leur bonne résistance à l'oxydation. La source bibliographique mentionnée par Clark (1995) remonte jusqu'à 1993. Dans le même domaine des turbines, la compagnie 3M offre des composantes en CMM. Les CMM sont non ferreux et n'ont pas d'interférence avec les systèmes de soutènements magnétiques. Ces composites sont dans leur grande majorité à matrice d'aluminium renforcée avec des particules de carbure de silicium (SiC), de carbure de bore ( $B_4C$ ) ou d'alumine ( $Al_2O_3$ ).

Immédiatement après le développement métallurgique des CMM, les technologues en fabrication ont été confrontés avec les difficultés en usinage, spécialement l'usure des outils. Les premières recommandations pour l'usinage des CMM datent de 1991, (Duralcan). En plus de l'usinage, vient s'ajouter les difficultés de contrôle non destructif par ultrasons ou par liquides pénétrantes (Steffens et al. MTU Aero Engines 2000).

Les difficultés en usinage ont été signalées par les travaux des pionniers du domaine (Lane 1992, Tomac 1992, Weinert 1993). 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). Les notions liées au perçage des CMM seront présentées dans le deuxième chapitre.

Une courte 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.

#### **1.4 Composites graphitiques GrA-Ni® (Songmene 2000)**

Le concept GrA-Ni® représente une famille de composites à matrice d'aluminium renforcée avec des particules de céramique (SiC ou Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et des particules de graphite revêtu de nickel.

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 matériaux ont des masses volumiques différentes (2.25 g/cm<sup>3</sup> pour le graphite et aux alentours de 2.7 g/cm<sup>3</sup> 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 Songmene (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 Prevot et al. (1996). Une synthèse professionnelle concernant les propriétés physiques des CMM est présentée dans Bell et al. (1997) avec la participation du docteur Songmene, codirecteur de la présente recherche.

### 1.4.1. Typologies des composites GrA-Ni®

Les particules des SiC utilisées comme renfort ont un ordre de grandeur de 14  $\mu\text{m}$ .

Les particules de graphite ont une grandeur de 80  $\mu\text{m}$  et sont revêtues de nickel ayant une épaisseur de 5 - 10  $\mu\text{m}$ . Le graphite (Gr) qui est revêtu de 50% de nickel par poids.

Les principales variétés de GrA-Ni® sont:

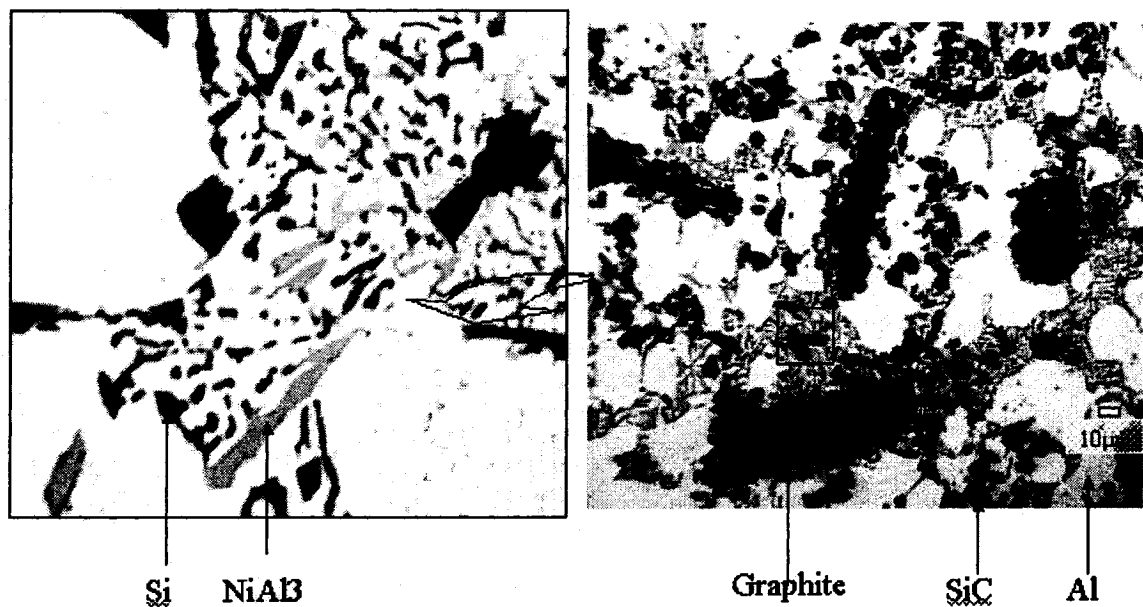
GrA-Ni 10S.4G constitué de 10 vol % SiC et 4 vol % Ni-Gr;

GrA-Ni 5A.4G constitué de 5 vol %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et 4 vol % Ni-Gr;

GrA-Ni 6S.2.5G constitué de 6 vol % SiC et 2.5 vol % Ni-Gr.

### 1.4.2. Structure métallographique

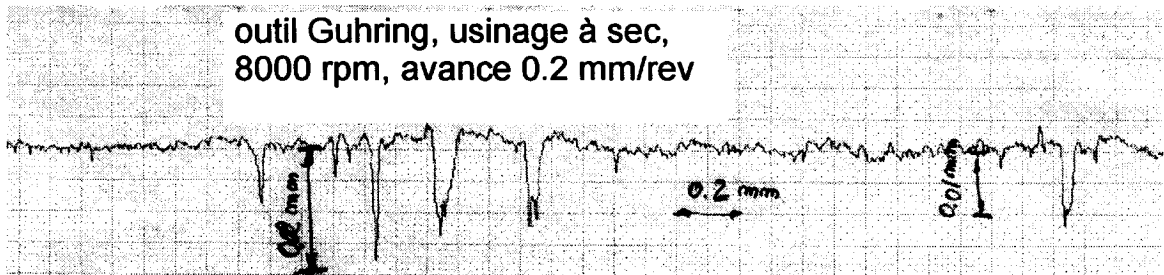
La structure métallographique des alliages GrA-Ni® selon Azzi (2000). La composition de base d'un alliage GrA-Ni 10S.4G inclut: Al 72.4%, Si soluble 7.2%, Si Insoluble 7.66%, Mg 0.48%, C 6.36%.



**Figure 1.16: Structure métallographique des alliages GrA-Ni® .**

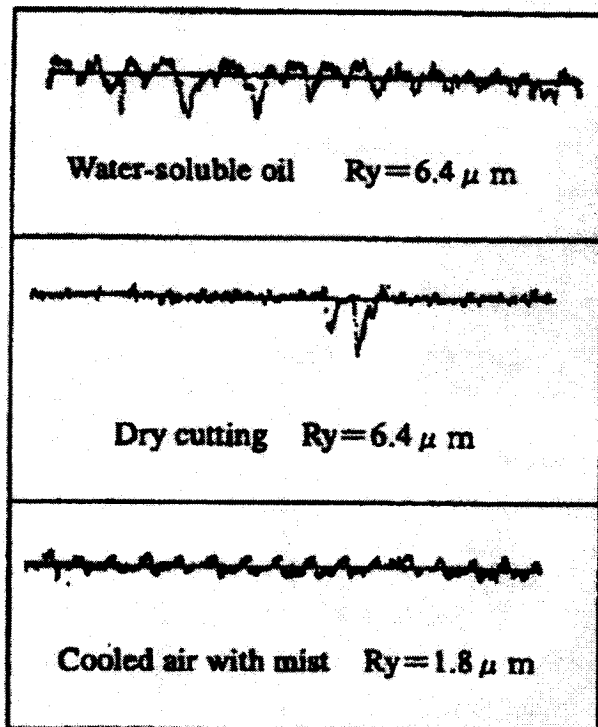
**Source : Azzi L., Ajersch F., Stephenson T.F. (2000)**

Les delogements des granules de Si sera visible dans les profilogrammes de surface (discutée en détail ultérieurement, voir chapitre 3, série de tests no 4).



**Figure 1.17: Exemple de profilogramme de surface.**

Dans les profilogrammes de surface présentés par les chercheurs japonais Chen (2000), la dislocation des particules dures est aussi visible.



**Figure 1.18: Profilogrammes de rugosité pour différentes méthodes d'usinage.**  
(Source: Chen, 2000)



L'objectif de la présente thèse est la recherche en perçage à sec, mais du point de vue scientifique se pose la question: l'usinage à sec favorise-t-il ou non la dislocation des particules dures ? Des résultats détaillés seront présentés dans le chapitre 3.

### 1.4.3 Propriétés de GrA-Ni®

Les travaux de début dans le domaine (Rohatgi, Bell, Stevenson) recensés dans Songmeme (2000) affirment que les GrA-Ni® ont les avantages des particules de deux types: dures et molles. Dépendant de la quantité de SiC, la résistance et la dureté vont augmenter en même temps que la présence du graphite réduit le coefficient de frottement.

La réduction du coefficient de frottement du GrA-Ni®, dû à la dispersion du graphite dans ce composite, fait de ces matériaux un point d'attraction pour les chemises de piston.

Les principales propriétés des GrA-Ni 10S.4G sont présentées dans le tableau 1.1.

**Tableau 1.1: Propriétés de GrA-Ni 10S.4G comparativement aux alliages d'aluminium et fonte grise**

Propriétés	GrA-Ni 10S.4G	A356	Al-9%Si 20 vol% SiC	Fonte grise
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2.75	2.685	2.77	6.9 - 7.35
Dureté (HRB)	39	55	77	75-150
Contrainte la rupture (MPa)	270	250-260	320	100-450
Élongation (%)	1	5	0.4	0.1-0.3
Dilatation thermique entre 30-100 °C	20.6	25.8	23	12
Conductivité thermique à 25°C (W/mK)	138.4	150.6	184.9	~50
Capacité calorifique à 25 °C (J/gK)	0.858	0.963	0.837	0.38

Source : Bell et al. 1997

Les composites avec des particules de SiC ont une meilleure résistance à l'usure que les alliages ayant un seul type de particules et respectivement une meilleure résistance à l'usure que les alliages d'aluminium.

Le taux d'usure des GrA-Ni® décroît avec la quantité de particules de SiC.

L'augmentation de la quantité de graphite réduit le coefficient de frottement.

La résistance supérieure à l'usure des GrA-Ni® est donnée par :

- les particules de renfort  $Al_2O_3$  ou SiC qui améliorent la dureté;
- le précipité intermétallique d'aluminide de nickel  $Al_3Ni$  qui se forme à l'interface de l'aluminium et du nickel;
- le graphite qui agit comme un lubrifiant solide.

## 1.5 Usinabilité des CMM

Vu la nature abrasive du CMM sur les outils de coupe, l'usinage a représenté un "cas-tête" depuis l'apparition de ces matériaux. Davis (1993) donne des références bibliographiques datant de 1985 regardant les problèmes de fabrication. Lane (1992), un des pionniers principaux dans le domaine des CMM, a aussi fait le point sur la complexité de la machinabilité.

À partir du début des années '90, la bibliographie présente des résultats des tests d'usinage par enlèvement des copeaux (perçage, fraisage, tournage, sciage, taraudage) ainsi que d'autres procédés de fabrication: découpe laser, ultrason, jet d'eau, électroérosion, procédés dits modifiés (perçage en phase pâteuse où le matériel est chauffé). Barnes (1996) a constaté que le chauffage de la pièce (CMM Alcan 18 vol % SiC) soumise au tournage n'a pas réduit visiblement l'usure des outils.

Vu la nature du projet confié par Auto 21 (perçages des composites), les ressources bibliographiques liées au perçage seront analysées. Les travaux consacrés aux autres procédés d'usinage par enlèvement des copeaux tels que tournage et fraisage ont été

consultés afin d'approfondir les questions spécifiques de fabrication des CMM et de comprendre les tendances générales en usinage des nouveaux matériaux.

Parmi les premières ressources traitant les paramètres d'usinage, Duralcan (1991) a publié des recommandations pour le machinage des composites.

L'usinabilité est un concept général qui caractérise la faculté d'un matériau de se laisser taillé par un outil de coupe. 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 (vitesse d'avance, vitesse de rotation, conditions de refroidissement / lubrification);
- puissance nécessaire pour la broche et pour le déplacement des chariots, tables rotatives (par rapport à la configuration de la machine);
- efforts de coupe;
- état de surface et erreurs de forme et de position obtenues suite à l'usinage;
- géométrie des copeaux.

À notre connaissance, les références bibliographiques publiées avant 1996 ne traitent pas les GrA-Ni®. Il faut remarquer que la grande majorité des articles dédiés à l'usinage des CMM traite les composites particuliers sans graphite. La conclusion globale de ces travaux est que les CMM à base de particules de SiC sont difficiles à usiner et la durée de vie des outils est courte, ayant un ordre de grandeur aux alentours de cinq minutes.

Depuis le début des années '90, l'idée que les lois et les modèles mathématiques d'usinage, élaborées pour les matériaux traditionnels ne s'appliquent pas aux CMM est acceptée. Pour chaque groupe de matériaux, il est nécessaire d'approfondir des tests afin de comprendre le comportement en usinage.

Les GrA-Ni® contiennent du nickel, du graphite et des précipités intermétalliques en plus des particules de céramique et que toutes les composantes sont coupées à la fois.

Vu que le taux de solidification est différent d'un point à l'autre, les CMM ont une distribution pratiquement non contrôlable des particules de renfort. Comme résultat, l'usure de l'outil, la qualité de la surface, les forces et moments de coupe ont des variations "locales" (seront visibles dans le prochain graphique présentant la rugosité, la force axiale de coupe  $F_z$  ainsi que le moment de torsion  $M_z$ ).

Vu la grande variété des CMM (forme, taille et densité des renforts, matrices), chaque type de CMM peut avoir ses caractéristiques de coupe propres et nécessite des tests préliminaires avant de commencer la production en grandes quantités.

La liste bibliographique laisse voir qu'à travers le monde, dans les centres universitaires, se déroulent des tests d'usinage des CMM. L'industrie telle quelle ou conjointement avec les agences gouvernementales a des centres de recherche pour les composites métalliques mais ils ne publient pas beaucoup de détails. Plus des résultats expérimentaux publient les chercheurs universitaires, en sachant qu'ils sont intéressés de faire connaître leur travail scientifique. Les compagnies publient des informations génériques pour "être sur le marché" sans dévoiler leurs résultats (leur objectif est la vente).

Parmi la grande variété des ressources bibliographiques, celles de: Baptista (1997), Barnes (1999), Brukes (1993), Chadwick (1991), Jawaid (1992), Lane (1990), Weiner (2004) à côté de Balazinski (1999), Songmene (2000), Jemielniak (2001) ont représenté des références à suivre.

Concernant le travail de perçage, Lane (1993) a souligné que le processus de perçage est plus difficile à maîtriser par rapport au tournage, vu la forme complexe du point du foret. Aucune ressource bibliographique n'a fait de remarques comparatives entre les différentes formes des forets. Davis (1993) présente sommairement des principes globaux pour l'usinage des CMM sans fournir de données numériques pour les paramètres de coupe.

Caichun (1999) présente une synthèse pour la géométrie classique des forets sans faire de recommandations spécifiques mais le modèle mathématique généralisé peut servir dans des recherches pour élaborer des algorithmes d'affûtage pour les machines à commande numérique en 5 axes.

En étudiant l'usinabilité des composites à matrice métallique de type GrA-Ni®, Songmene 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 Songmene 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 (Songmene 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 expériences faites dans le cadre de ce mémoire ont démontré que pour des vitesses plus grandes que 250 m/min, l'usure augmente (pour les types d'outils utilisés). Les détails seront discutés ultérieurement dans les chapitres deux et trois.

L'usinabilité des CMM en fonction du traitement thermique du matériau a été examinée par Barnes (1999). Les composites vieilliss ont donné une usure d'outils (forets) presque double par rapport aux matériaux d'origine. L'auteur (Barnes) a arrêté ses tests à une usure de l'outil de 0.35 mm, usure évaluée dans le "coin" de l'outil. L'usure de l'outil est à croissance linéaire, la droite moyenne (la courbe de tendance) ayant un angle entre 16

et 24 degrés. Pour l'usure en dépouille  $V_b$ , les auteurs ont arrêté les tests à une valeur de 1 mm. Les courbes de tendance (les droites) sur la zone stable d'usure ont un angle de 13-18 degrés. L'usure "de coin" est plus accentuée que l'usure de dépouille. Comme critère pour exprimer l'usinabilité, les auteurs ont dressé le graphique de dépendance de la hauteur de bavures par rapport au nombre de trous percés. Le critère reste un point de vue académique, dans l'activité industrielle étant presque impossible de mesurer les bavures après chaque trou par des moyennes mécaniques ou optiques et utiliser les données comme indicateur en temps réel pour le changement d'outil. Une autre remarque d'utilité industrielle faite par les auteurs est qu'après un certain nombre de trous, les variations de diamètre augmentent rapidement. Des recherches ultérieures devront être faites pour analyser au microscope les trous obtenus, pièces sectionnées, afin d'étudier le rôle de l'usure de l'outil sur la dislocation des particules. Concernant le revêtement des outils, les auteurs font le point sur la faible résistance de TiN, presque effacée après le premier trou.

Les expériences faites par Leep (1993) ainsi que ses ressources bibliographiques parlent seulement d'une influence possible de l'angle et de la forme du point du foret mais des études comparatives n'ont pas été faites. Conclusion à retenir, pour la sélection des outils: les forets avec des cannelures d'évacuation droites ont cassé après quelques trous et les tests ont été abandonnés.

En faisant la synthèse des résultats de recherche de Lane (1993), affilié à Duralcan, un des pionniers du domaine, il faut retenir ses remarques:

- pour des petites vitesses de coupe 50 m/ min et une avance de 0.1 mm / rev, l'usure est très rapide;
- pour des vitesses de coupe entre 50 et 150 m/ min. et une avance de 0.25 mm / rev et, l'usure est plus petite et la durée de vie de l'outil est plus longue que pour la vitesse de 50 m/min et l'avance de 0.1 mm /rev. L'auteur a arrêté ses travaux

faits avec des forets de 6.35 mm pour une valeur de l'usure de dépouille de 0.25 mm.

Le travail de Lane (1993) est retenu également pour les informations données pour les valeurs de la force axiale et pour le moment résistant à la broche. Pour évaluer l'efficacité de l'usinage du point de vue financier, l'auteur a essayé de calculer le prix pour une unité de longueur de trou percé. Pour les tests de laboratoire, le coût en perçage par unité de longueur de trou semble être plus réduit pour les outils au diamant. Des recherches comparatives sur le prix pour des milliers de trous percés avec des outils en carbure et des outils au diamant n'ont pas été trouvées jusqu'à date. Aucune analyse de prix pour un cas réel (industriel) n'a été trouvée dans la bibliographie.

Metha (1993) a recommandé que pour chaque type de CMM, il est nécessaire de faire des tests d'usinage. Vu que le processus d'interaction entre l'outil et la structure complexe du CMM est caractérisé par une multitude de facteurs, les résultats sont différents d'une situation à l'autre. Pour des raisons industrielles, des normes et des limites d'acceptabilité des pièces usinées devront être établies.

Les recherches faites par Cronjager (1991) à l'Université de Dortmund en Allemagne, présentent l'apparition de l'arrête rapportée ainsi que la situation limite quand le matériau va remplir complètement les canaux hélicoïdaux du foret. Un point important à retenir de ces recherches est que le foret avec refroidissement par intérieur de la broche de la machine a donné une usure de l'outil plus grande que l'usinage à sec. Le liquide de refroidissement ayant une grande pression tient la poussière abrasive dans la zone de coupe. Pour clarifier les notions reliées au domaine du perçage, le travail de Cronjager présente clairement le paramètre d'usure nommé  $V_b$ .

Les travaux publiés par Baptista (1995) font la remarque que l'utilisation du liquide de refroidissement ne réduit pas la force de coupe mais réduit le moment, vu ses propriétés lubrifiantes.

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. Nos tests 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 matériel 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'aspiration des particules abrasives.

Concernant la grande diversité des forets disponibles sur le marché, on retient les conclusions de Burkes (1993): les formes du point du foret spécialement affûté (custom shapes) ne justifient pas le coût élevé. Parmi les formes dites classiques, le "point divisé" (split point) ainsi que la forme classique d'affûtage à 118 degrés ont donné des résultats proches. L'auteur recommande d'utiliser des forets autocentrants.

Les tests faits par Hung (1996) sur des composites fabriquées par Alcan ont démontré que les avances plus petites que 0.1 mm/ rev accélèrent l'usure de l'outil.

Les conclusions de Jawaid (1992) ont été que les "coins" du foret s'usent directement proportionnellement avec la vitesse de coupe. Une fois usées, elles ne coupent plus et le matériel se déforme localement en générant des bavures.



Concernant l'usure des forets, Monaghan (1992), en se basant sur les prescriptions ISO, recommande l'exploitation de l'outil jusqu'à une usure  $V_b$  de 0.3 mm.

Les conclusions de Barnes (1995) sont que dans le perçage avec des outils en carbure, l'usure sera plus réduite en augmentant la valeur de l'avance mais va augmenter aussi avec la vitesse de coupe. Les formes des points du foret n'ont pas une influence directe sur les performances du perçage (conformément aux informations bibliographiques disponibles).

Les références consultées ne présentent pas de tests faits avec des avances supérieures à 0.2 mm/rev. La grande majorité des chercheurs ont augmenté l'avance jusqu'à 0.2 mm/rev.

Concernant la formation des copeaux, Lin (1998) a fait des tests de tournage pour les composites Duralcan® (A359/SiC/20p). L'observation majeure est que la coupe avec des plaquettes sans brise de copeaux est préférée afin d'obtenir des copeaux plus longs. L'originalité de ce travail est la mise en route d'un montage expérimental permettant de "geler" la coupe ou d'arrêter instantanément la coupe. Un dispositif expérimental avec explosif a été conçu pour retirer instantanément l'outil de coupe du matériel.

Afin d'éclairer l'influence du liquide de coupe ou la combinaison minimum liquide et air refroidi versus coupe à sec, Chen (2000) présente les profilogrammes de surfaces pour tournage extérieur des alliages en aluminium avec haute teneur en silicium (fig 1.19).

Globalement, la rugosité est meilleure pour l'usinage à sec. Dans le chapitre trois, des profilogrammes de l'état de la surface pour perçage à sec et avec du liquide seront présentés.

Les recherches universitaires (Liu, 2000) concernant l'usinage par tournage à chaud des composites d'aluminium avec SiC chauffé à 200° C, présentent l'idée que la rugosité est plus grande que dans l'usinage à température régulière (8-10  $\mu\text{m}$  versus 4-5  $\mu\text{m}$ ). Les auteurs affirment que la durée de vie de l'outil a été plus longue dans l'usinage à

chaud que dans l'usinage à température régulière. Pour des pièces à parois minces, le chauffage en vue d'usinage peut apporter des déformations locales. Aussi, du point de vue métallurgique, le chauffage peut provoquer des modifications de structure. Le sujet reste ouvert pour des recherches spécifiques (géométries particulières, compositions chimiques particulières). À retenir que l'usinage par enlèvement des copeaux des pièces chauffées est connue industriellement pour les aciers, depuis les années '50, mais n'a pas trouvé beaucoup d'adeptes dans la grande production.

L'idée qui se dégage des travaux de Jesus (2000) est que dans l'usinage avec des petites vitesses de coupe, jusqu'à 50 m/min, la vitesse de coupe n'a pas une influence directe sur la durée de vie de l'outil. Les tests ont été faits pour tournage des alliages AlSiC 5, 10 et 15%. L'usure  $V_b$  acceptée a été imposée à 0.6 mm.

Le résultat des expériences faites par Uehara et al. (2000) sur le composite Duralcan™ 20% vol SiC conclut que les forces de coupe représentent 33% de la valeur de force de coupe pour la fonte. Un autre aspect à retenir est la présence d'une couche adhérente sur les outils de coupe (tournage et fraisage). Même en utilisant un liquide de coupe ou en augmentant la vitesse de coupe jusqu'à 800 m/min, la couche adhérente a été là. À retenir que les auteurs (Uehara et al) ont utilisé des outils pour tournage faits au nitrure cubique de bore et diamant polycristalline.

Une approche orientée sur l'élaboration d'un modèle mathématique global pour caractériser l'usinabilité des composites Al-Si-Gr et Al-Si-SiC a été trouvée dans Ramachandra (2000). Le concept de "Universal Machinability Index" (un modèle mathématique en incluant la totalité des facteurs d'influence en usinage) reste un idéal pour les chercheurs mais pour l'instant beaucoup de recherches expérimentales devront être faites pour collecter des informations reliées à la coupe des CMM.

L'approche à retenir dans la modélisation mathématique d'usinage par enlèvement des copeaux des CMM est celui de Songmene et Balazinski (1999), basée sur des années d'expérience en usinage des CMM.

Vu que le prix du liquide de coupe représente 16% du coût total de fabrication (et pose aussi des questions environnementales et dermatologiques), l'idée est de s'orienter vers l'usinage à sec. Le changement d'outils représente 25% du coût total de fabrication, donc l'idée avec des outils ayant des plaquettes amovibles reste une solution à tester en détail.

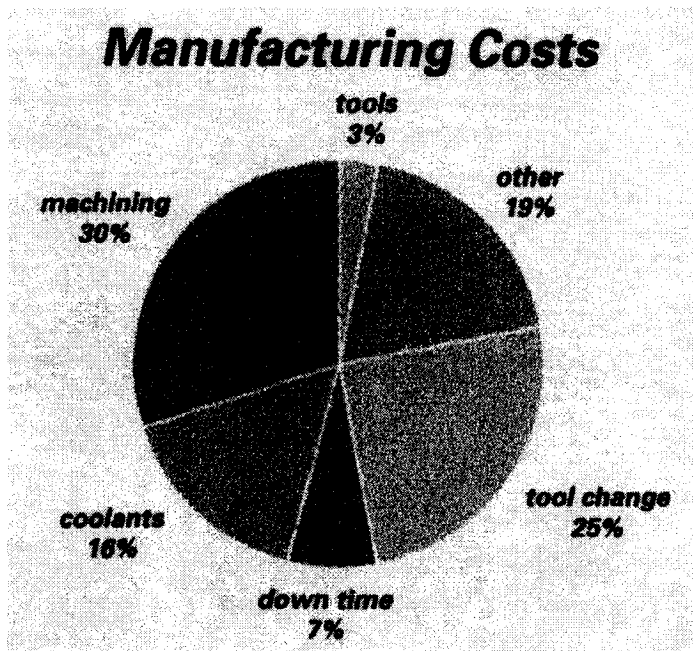


Figure 1.19 Distribution des coûts en usinage (Source: Cutting Tools Engineering oct. 2005).

## 1.6 Conclusions bibliographiques

L'usure des outils est le paramètre le plus important dans la technologie d'usinage des composites, vu leur prix très élevé.

Les travaux de tribologie concernant les mécanismes d'usure et spécialement l'adhésion du matériel à couper sur l'outil sont seulement informatifs sans être en mesure de faire des recommandations pour l'activité industrielle à grande échelle.

Il ressort de la revue de littérature présentée dans ce chapitre les points suivants:

- l'usinage de GrA-Ni® par enlèvement des copeaux a été amplement traité par Songmene pour le fraisage seulement, ses travaux en perçage représentent la référence de départ ;
- l'usinabilité des CMM impose des recherches cas par cas; la modélisation mathématique classique en usinage n'est pas toujours applicable pour CMM;
- jusqu'à date, il n'existe pas un modèle mathématique global pour l'usinage des composites GrA-Ni®;
- la documentation bibliographique ne fournit pas de recommandations concernant le choix des outils en particulier vu leurs performances observées durant les tests;
- l'usinabilité des CMM à base de particules varie selon la nature, la taille et la quantité des renforts;
- l'influence du revêtement des outils n'est pas soutenue dans la bibliographie par des études comparatives;
- l'idée générale est que le liquide de coupe favorise la formation d'une pâte abrasive qui use très vite les outils;
- 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 issues 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 plaquette amovible en tournage est beaucoup plus réduite que le prix d'un foret, et de plus une plaquette à plusieurs coins pour travailler).

## **CHAPITRE 2**

### **FORMULATION DU PROBLÈME ET MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE**

Le chapitre deux est structuré de la façon suivante: formulation du problème, outils de coupe, instrumentation et méthodologie expérimentale.

#### **2.1 Formulation du problème**

##### **2.1.1. Importance et complexité du perçage**

Plus de 75% des pièces dans l'industrie automobile ou aérospatial ont des trous. Plus de 50% du temps d'usinage pour les blocs-moteurs, têtes des cylindres ou la carcasse de transmission est dédié au perçage (Kakino, 1999).

Durant l'usinage par tournage ou par fraisage, l'outil est placé "à l'extérieur" de la matière comparativement au perçage où le travail est fait "à l'intérieur" du matériau et les copeaux restent dans la zone de coupe et participent plus "agressivement" aux processus d'usure de l'outil.

Le prix d'une plaquette en carbure pour tournage est de 20 - 25 \$ (ayant minimum 3 coins disponibles, par rapport au perçage où une plaquette à géométrie complexe coûte aux alentours de 100 \$ (généralement impossible d'être réaffûtée).

Les plaquettes "droites" pour les outils de type "lame" ou "spade drill" sont réaffutables mais les plaquettes à profil complexe (voir Iscar, Seco) sont pratiquement non réaffutables.

Le prix d'un porte-outil pour perçage à l'aide des forets à plaquettes amovibles est plus que le double que celui d'un porte-outil de tournage extérieur.

Le prix des outils de finition des trous par enlèvement des copeaux (connus génériquement sous le nom de "barres d'alésage") est situé dans le domaine des "milliers de dollars" dépendant de la complexité de l'outil.

Le contrôle de la précision géométrique des surfaces intérieures est plus complexe et plus dispendieux que celui des surfaces extérieures.

La géométrie des forets est plus complexe que la géométrie des plaquettes de tournage ou fraisage.

### **2.1.2. Formulation du problème et objectifs 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, on se propose dans le présent mémoire une étude comparative entre les outils en carbure solide et les outils à plaquette amovible.

La recherche du perçage des composites CMM à comme objectifs:

- 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.
- d'étudier l'influence de la vitesse de rotation et de l'avance de l'outil sur la variation du diamètre de trou, la circularité de trou et l'état de surface des trous;
- de choisir une zone "acceptable" du point de vue qualité de trou pour la vitesse de rotation de l'outil et l'avance afin de continuer les tests;
- de 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;

## 2.2 Outils de perçage

### 2.2.1. Perçage, éléments de référence

Les éléments de référence concernant le perçage seront présentés: les détails géométriques du foret, les types de forets et les notions concernant le recouvrement des forets.

#### 2.2.1.1. Éléments constructifs du foret

Sur le marché, il y a une très grande variété de forets et le technologiste de fabrication devrait choisir parmi les multiples options. Finalement, il faut résoudre le dilemme: "choisir quoi et pourquoi". Dans la figure 2.1 sont présentés quelques types de forets afin de constater la diversité de la forme des canaux hélicoïdaux pour l'évacuation des copeaux. Chaque type de foret peut avoir une grande diversité de formes d'affûtages du point (voir figure 2.10 et annexe 2.2). En acceptant la documentation produite par les constructeurs d'outils et destinée au grand public, le choix des forets reste une question d'expérience avec des coûts "d'apprentissage et perfectionnement" très élevés. La bibliographie examinée dans le premier chapitre n'est pas en mesure de faire des recommandations de choix pour un type ou autre de foret dans le cas de perçage des CMM.

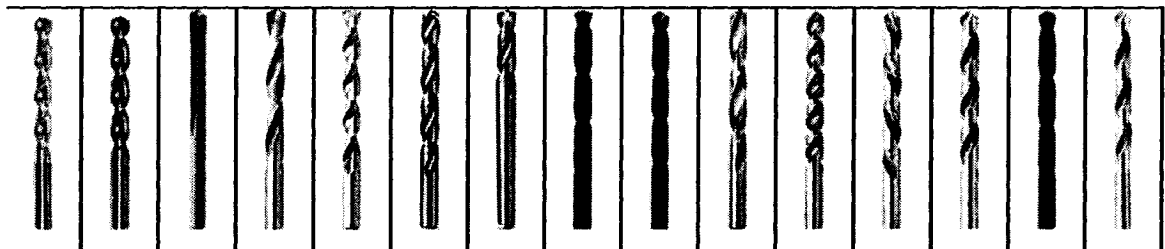
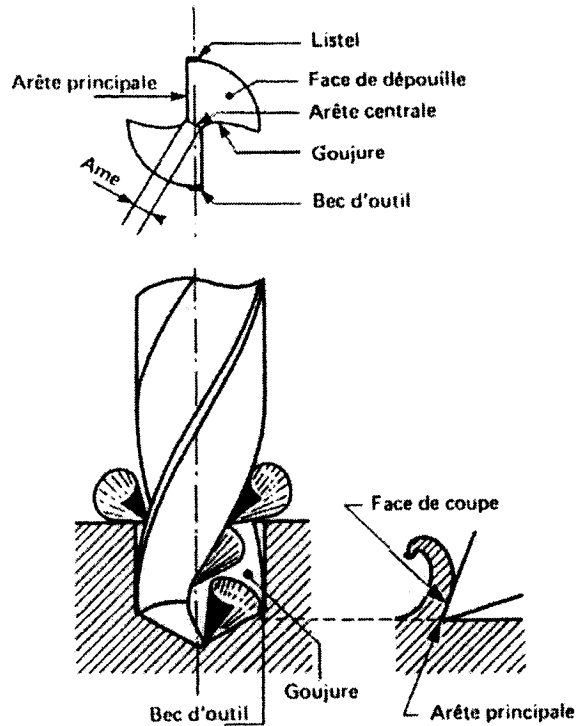


Figure 2.1: Types de forets. (Source: catalogue Guhring 2002)



Les éléments principaux d'un foret sont: l'arête principale, listel, face de dépouille, arête centrale, goujure, bec d'outil, ame, face de coupe. La représentation graphique de ces éléments est présentée à la figure 2.2.



**Figure 2.2: Éléments primaires du foret. (Source: Tanguy, J.C. ,1988)**

Dans l'annexe 2.1 sont présentés les éléments constructifs du foret, en langue anglaise, vu que la grande majorité des références bibliographiques sont en anglais, pour pouvoir faire la liaison entre la terminologie et les explications données par les différents auteurs.

Les angles du foret sont exprimés dans le système de référence constructif ou "angles outils en main". Les angles d'un foret de construction classique afin d'alléger la présentation seront présentés. La bibliographie analysée dans le chapitre 1 ne donne pas

de recommandations sur des géométries spécifiques afin d'obtenir de meilleurs résultats en perçage des composites de type CMM.

Les goujures ont des formes différentes, d'un constructeur à l'autre, d'un procédé de fabrication à l'autre (par fraisage, par forgeage) ou pour des applications spécifiques dépendamment du matériel à percer et de la profondeur du trou.

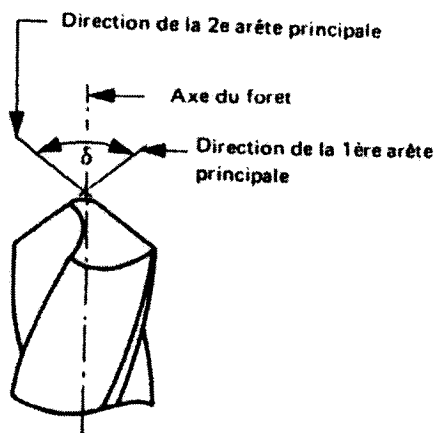
#### **2.2.1.2. Angles du foret**

Dans le système constructif de l'outil (ou angles outils en main), les éléments principaux sont:

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

L'angle au sommet ou l'angle du point traditionnellement a 118 degrés. Les outils produits durant les dix dernières années ont la tendance d'augmenter l'angle de point jusqu'à 140 degrés, d'offrir de nouvelles géométries du point et de plus la structure du foret est conçue pour perçage sans trou de centrage. La diversité croissante des formes des points des forets s'explique par l'augmentation de l'utilisation des machines à commande numérique en 5 axes pour l'affûtage des forets. L'angle du point est traditionnellement recommandé par rapport au matériau à percer.

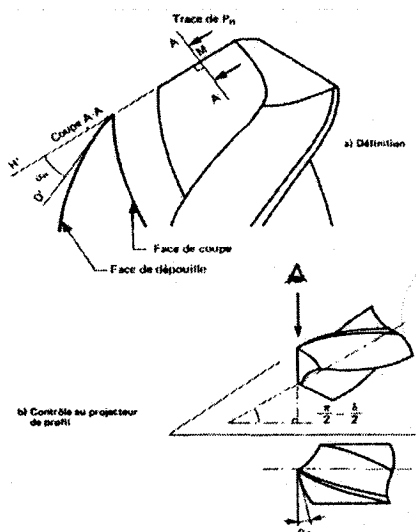
L'angle au sommet est l'angle compris entre les projections des arêtes de coupe sur un plan parallèle à celles-ci et contenant l'axe de l'outil (figure 2.3).



**Figure 2.3: Définition de l'angle au sommet  $\delta$ . (Source Tanguy, J.C. ,1988)**

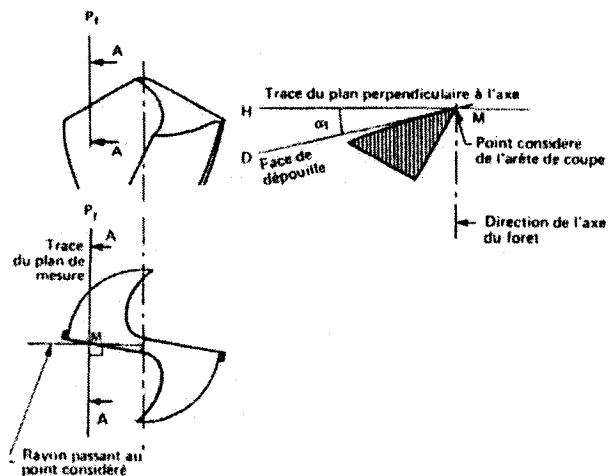
L'angle de dépouille normale  $\alpha_n$  est mesuré au point considéré de l'arête de coupe dans le plan  $P_n$  perpendiculaire à l'arête de coupe, c'est l'angle du dièdre formé par le plan tangent à la face de dépouille et le plan tangent au cône usiné par la pointe du foret.

L'angle  $\alpha_n$  sert généralement au réglage des affûteuses de forets ainsi qu'au contrôle de la géométrie par le projecteur de profil en positionnant l'arête du foret perpendiculairement au plan de projection.



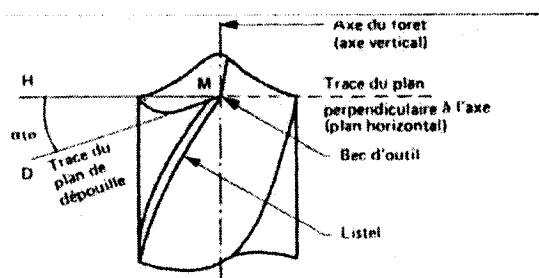
**Figure 2.4: Angle de dépouille normale  $\alpha_n$ . (Source Tanguy, J.C. ,1988)**

L'angle de dépouille latérale  $\alpha_f$  est mesuré au point considéré de l'arête de coupe dans le plan  $P_f$  perpendiculaire au rayon joignant ce point à l'axe de l'outil, c'est l'angle compris entre la trace MD du plan de dépouille et la trace MH du plan perpendiculaire à l'axe de l'outil. L'angle  $\alpha_f$  permet de contrôler la dépouille de l'outil.



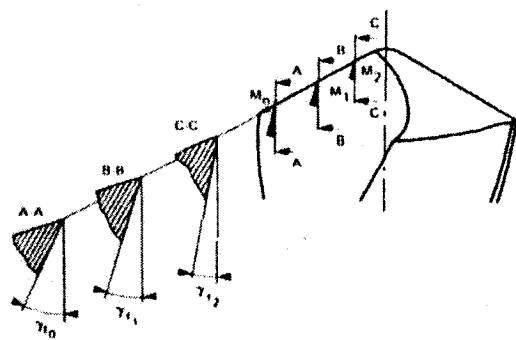
**Figure 2.5: Définition de l'angle de dépouille  $\alpha_f$ . (Source Tanguy, J.C. 1988)**

Pour contrôler la dépouille du foret, l'angle  $\alpha_f$  sera mesuré au point du foret et sera noté  $\alpha_{f0}$ , et sera nommé "dépouille nominale du foret". Dans les prescriptions des producteurs des outils de perçage, des recommandations pour cet angle par rapport aux matériaux à travailler sont données.

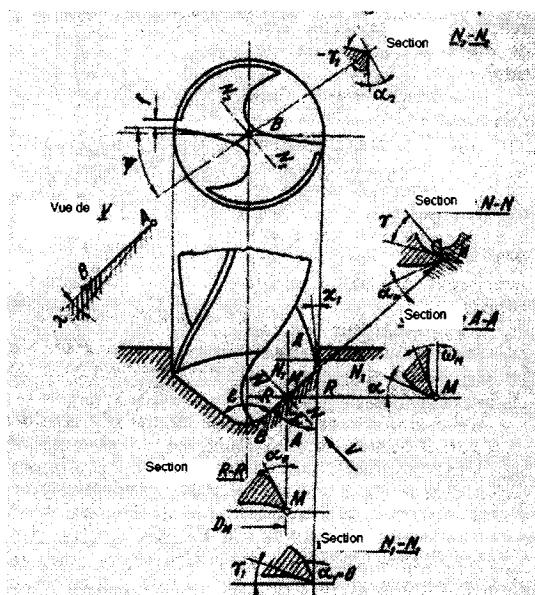


**Figure 2.6: Contrôle de l'angle de dépouille nominale  $\alpha_{f0}$ . (Source Tanguy, J.C., 1988)**

L'angle latéral de coupe  $\gamma_f$  est mesuré dans le même plan que  $\alpha_f$ . L'angle  $\gamma_f$  est 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.

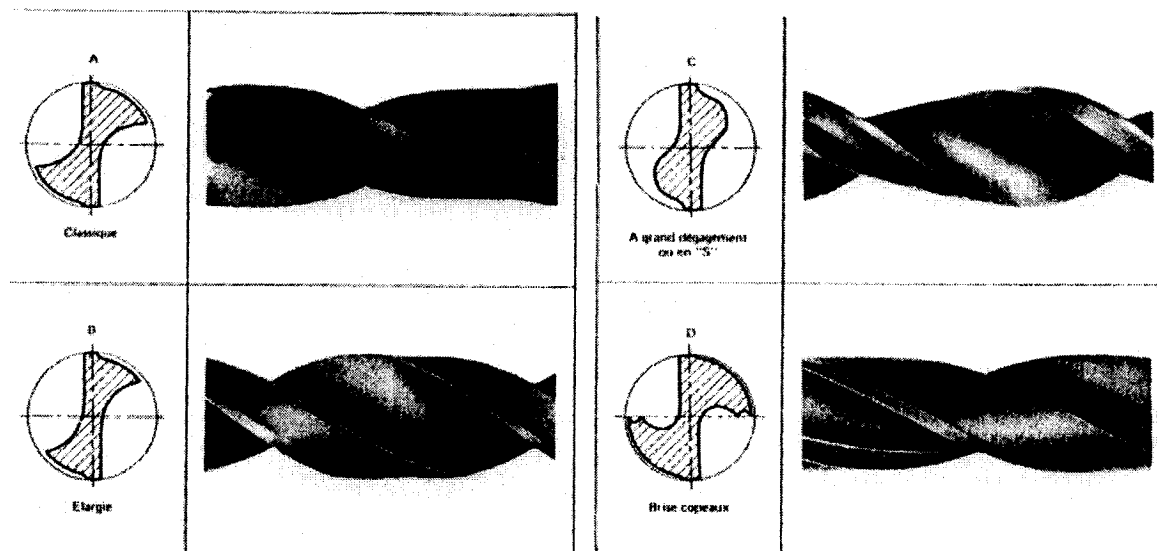


**Figure 2.7: Variation de l'angle  $\gamma_f$  due à la forme de la goujure. (Source Tanguy, J.C. , 1988)**



**Figure 2.8: Angles du foret. (Source: Lazarescu 1961)**

Afin de visualiser différentes formes de goujures, quelques géométries sont présentées à la figure 2.9. Des recommandations concernant le choix de la goujure pour un travail à faire, la documentation du producteur des outils, représentent le guide de base.



**Figure 2.9: Formes de goujures. (Source Tanguy, J.C. , 1988)**

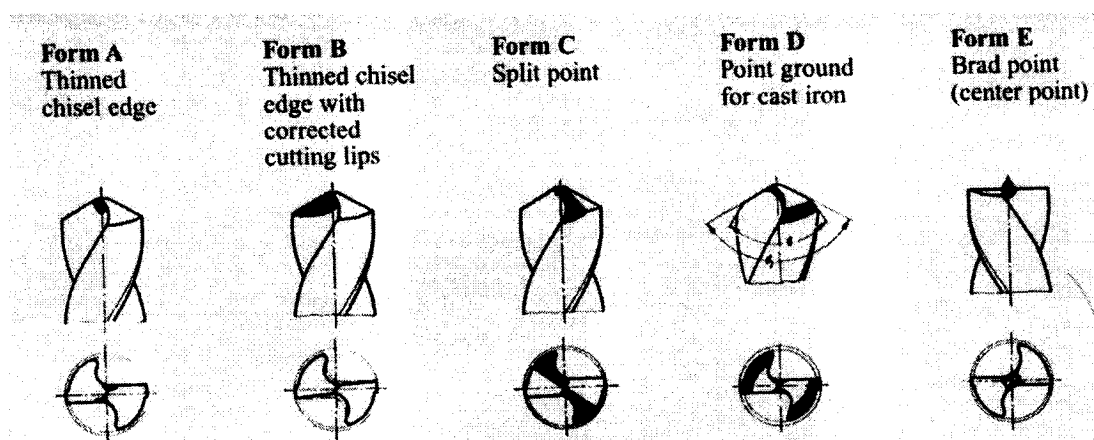
Le calcul de la forme des goujures obtenues par fraisage est présenté dans Lazarescu [71] . Dans l'annexe 2.3 est présenté un profilogramme d'une goujure.

Dans le processus de coupe, les angles du foret sont connus sous le nom des angles "outils en travail". Ces angles tiennent compte des paramètres physiques de la coupe, en particulier de la trajectoire du point considéré de l'arête de coupe. Pour définir les angles du foret en mode "outil en travail" seront définies :

- la direction de la vitesse de coupe;
- la direction de la vitesse d'avance.

Des développements théoriques sur la modélisation des outils de coupe sont disponibles dans Duca Z. De nos jours, vu la croissance des performances des systèmes d'acquisitions des données en usinage, des recherches comparatives sur les influences des différents paramètres de la géométrie de l'outil et des paramètres du régime de coupe sur la stabilité en perçage seront possibles.

L'affûtage des outils peut donner différentes formes de bec. Chaque fabricant des outils de coupe présente ses géométries en faisant des recommandations pour différents matériaux et souvent on recommande des valeurs pour les paramètres de coupe. L'expérience des producteurs d'outils de coupe dans l'usinage des matériaux classiques est généralement acceptée par les usagers industriels. Par contre, pour les nouveaux matériaux, spécialement les composites, des recherches spécifiques restent à faire.



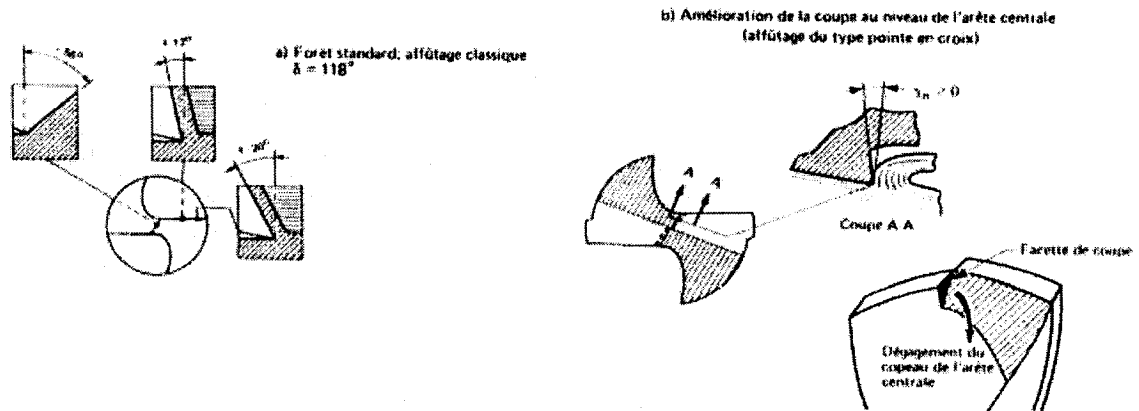
**Figure 2.10: Formes d'affûtage du point des forets. (Source: Union Butterfield)**

Dans l'annexe 2.2 sont présentés d'autres types d'affûtage.

Formation des copeaux.

La formation du copeau est un processus complexe mais bien connu pour les matériaux classiques. Pour les CMM, l'étude de la formation des copeaux est en phase de début.

Les éléments de référence dans la formation du copeau sont présentés à la figure 2.11.



**Figure 2.11: Formation du copeau . (Source Tanguy, J.C. , 1988)**

Deux zones de coupe sont distinguées:

- celle de l'arête centrale;
- celle des arêtes principales.

Sur l'arête centrale, l'angle de coupe est négatif et le matériel est repoussé. La déformation importante du métal qui en résulte augmente la température de coupe et la force de pénétration. La limitation de l'avance sur un foret provient essentiellement des difficultés de pénétration de la fibre centrale du foret.

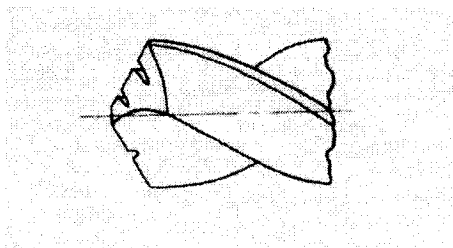
Sur les arêtes principales, l'angle de coupe est positif; il diminue à partir des becs de l'outil vers l'âme. La rotation du foret autour de son axe et l'enroulement du copeau dans la goujure conduisent à la formation d'un copeau conique dont la longueur et le diamètre d'enroulement peuvent être dépendants des paramètres suivants:

- avance: l'augmentation de l'avance réduit le diamètre ou la longueur de copeau;
- angle de pointe: la diminution de l'angle de pointe peut réduire le diamètre d'enroulement et augmente la longueur du copeau;

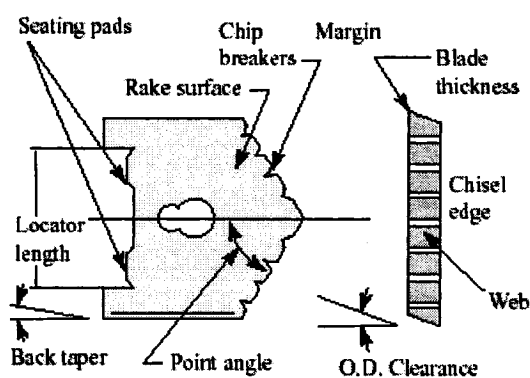


- géométrie de la goujure et angle d'hélice.

Afin de prévenir la formation excessive de "poussière" abrasive qui reste dans le trou, les outils avec des bris de copeaux devront être évités.

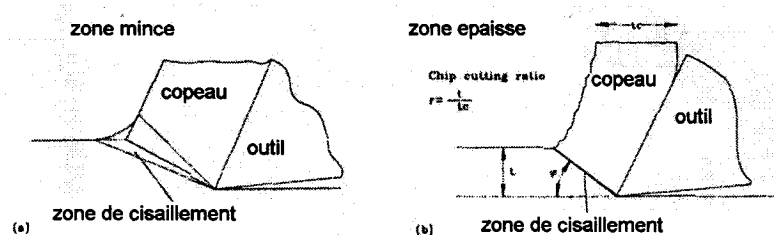


**Figure 2.12: Foret avec des bris de copeaux.**



**Figure 2.13: Lame de perçage (spade drill) avec bris de copeaux. (Source AMEC)**

Principalement, la formation de copeaux est acceptée comme un processus de cisaillement avec une déformation plastique dans la zone de cisaillement (Lin 1998). Les deux approches dans l'étude théorique de la formation des copeaux (zone mince et zone épaisse, voir figure 2.14) sont caractérisées par l'auteur (Lin 1998) comme contradictoires.



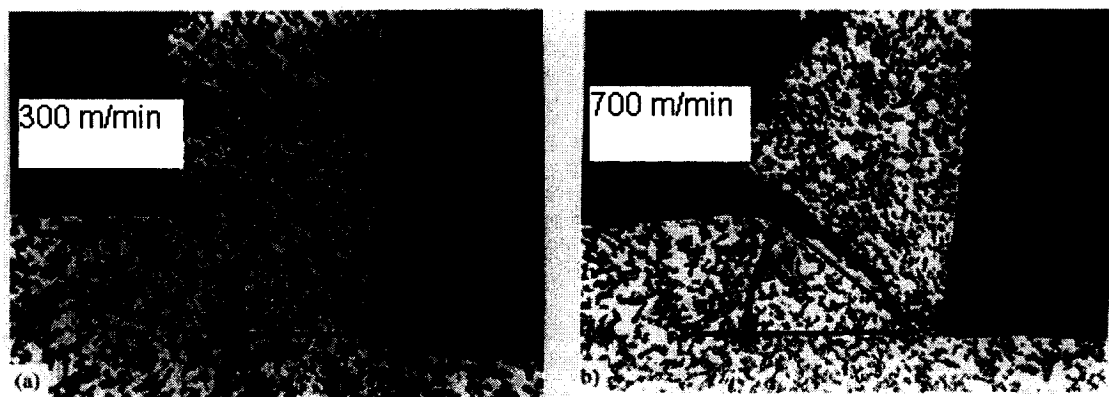
**Figure 2.14: Deux concepts en formation des copeaux: zone mince et zone épaisse (Source: Lin 1998).**

Les références bibliographiques traditionnelles, telles que Jawahir (1993) et Komanduri (1981), travaillent avec des modèles théoriques sans être soutenus par des recherches expérimentales extensives.

La conclusion finale de Lin (1998) est d'étudier cas par cas la formation des copeaux avec ses influences sur l'usure d'outils et la qualité des surfaces. Le processus de formation des copeaux est influencé par les propriétés de matériaux: ductilité, conductivité thermique et spécialement par la microstructure.

Suite aux expérimentations faites, les auteurs (Lin et al) recommandent comme direction d'approche dans l'étude de formation de copeaux pour les CMM Duralcan™ le concept de "saw-toothed chips" ou copeaux en dents de scie. La présence des particules de SiC va réduire la ductilité et la formation des copeaux sera un phénomène "semi-continu".

L'observation expérimentale est que l'angle de cisaillement a l'air d'être dépendant de la vitesse de coupe, des expériences supplémentaires s'imposent (voir figure 2.15 pour saisir la différence de morphologie pour la coupe en tournage à 300 m/min et 700 m/min).



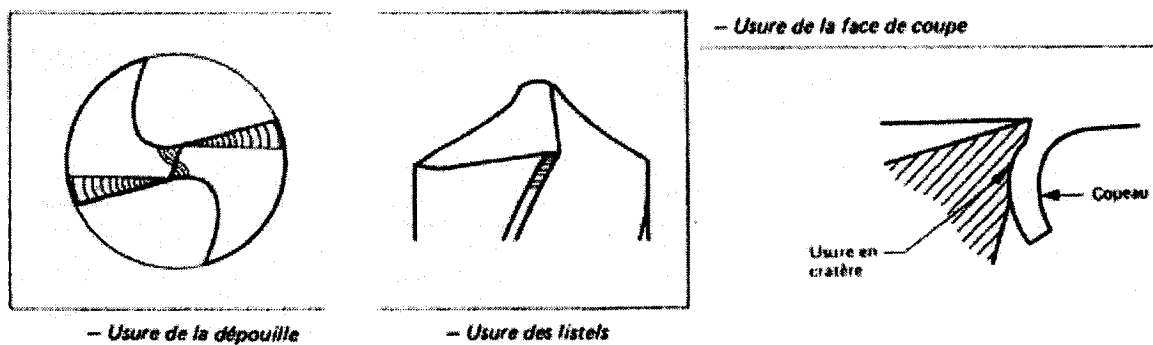
**Figure 2.15: Zone de cisaillement pour les composites Duralcan™.**

### Usure des forets

Les éléments caractéristiques concernant l'usure des forets sont:

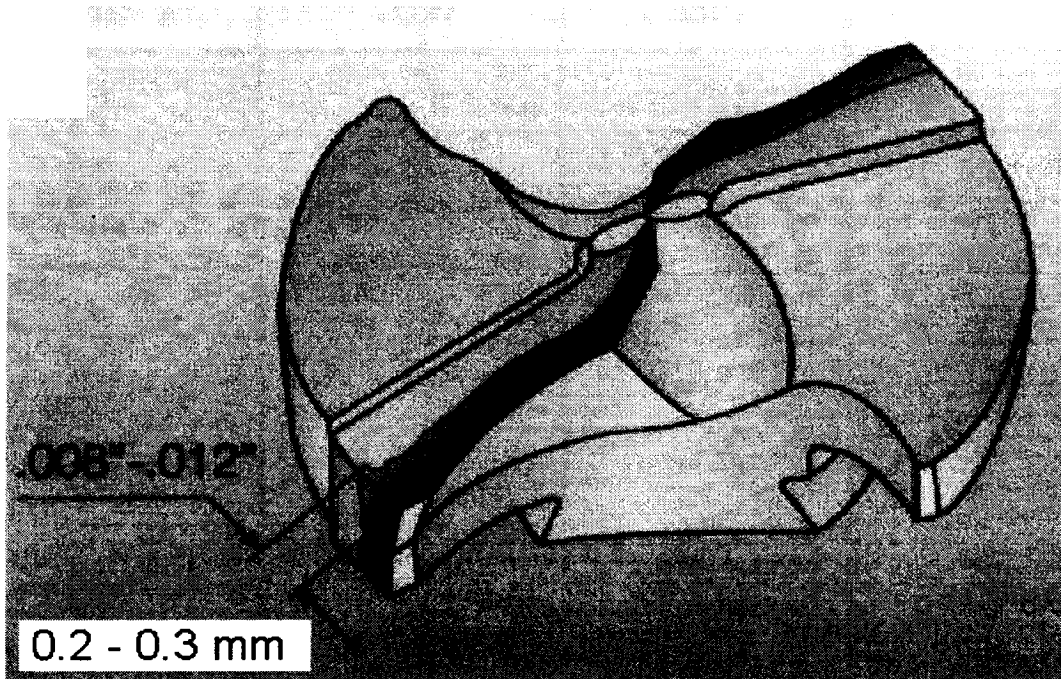
- usure de la dépouille;
- usure des listels;
- usure de la face de coupe.

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



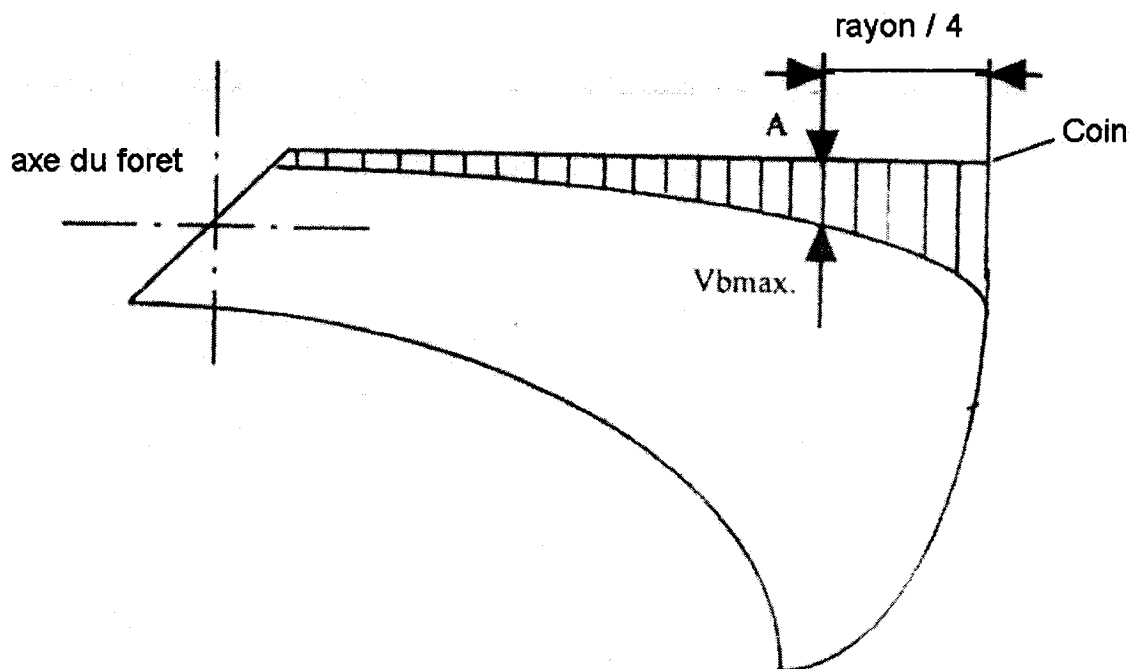
**Figure 2.16: Usure du foret. (Source Tanguy, J.C. , 1988)**

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



**Figure 2.17: Usure des plaquettes (Source: catalogue 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  $V_b = 0.3$  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  $V_{bn} = 1$ .



**Figure 2.18: Schéma de mesure pour l'usure  $V_b$  (source : Davim 2001).**

La limitation de ce modèle mathématique (ci haut présenté) 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 matériel enlevé ou à la durée de temps que l'outil a travaillé. La mise en question du modèle classique d'usure est faite par Astakhov (2003) : "..... it should be recognised that something else, besides the stress on the flank contact face, causes tool wear, and this "something" has not been as yet reported in previous papers on metal cutting".

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 machiner et de plus quand le machinage 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 degrés 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'impulsions aperiodique" 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 matériel de l'outil dans les copeaux et sur la surface de la pièce usinée. Les photos des plaquettes de type lame sont des exemples .

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 matériel 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 matériaux. 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".

### **2.3 Modèles des forets existants sur le marché**

Aperçu des modèles existants sur le marché afin de choisir les modèles appropriés pour rouler les tests de perçage.

Choisir l'outil de coupe est une tâche parmi les plus complexes en fabrication (Astakhov 2003) vu la multitude de possibilités existantes.

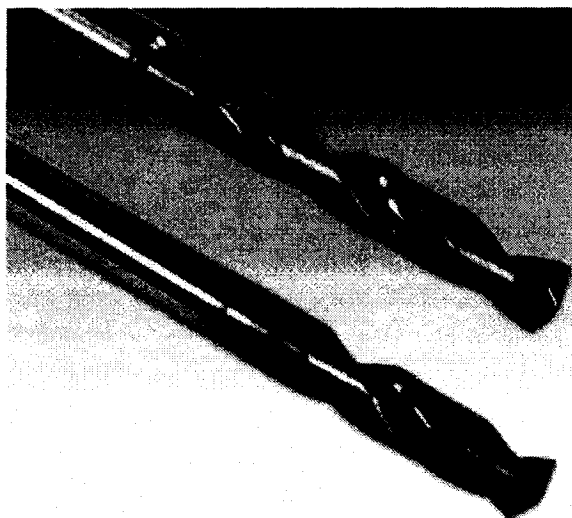
Pour le perçage, les outils de coupe disponibles sur le marché sont groupés comme suit d'après leur forme géométrique.

### **2.3.1. Forets hélicoïdaux classiques monoblocs**

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

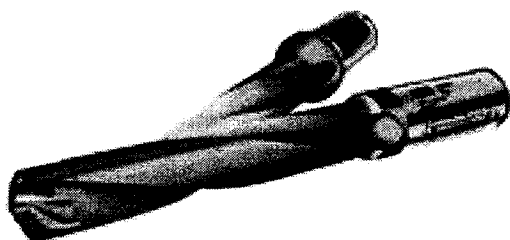


**Figure 2.19: Foret classique monobloc en carbure.**

### **2.3.2. Forets avec point soudé**

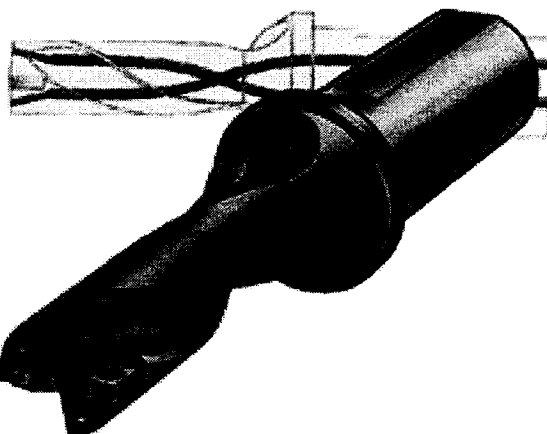
Les références bibliographiques de Cronjager (1992) et Monaghan (1992) font la remarque que les résultats obtenus avec ce type d'outils sont inférieurs aux outils monoblocs, connus par l'entremise de la gamme "Delta" de la compagnie Sandvik. Ces

modèles sont recommandés pour le travail qui ne casse pas les lèvres (perçage continu), vu que la plaquette est pratiquement non remplaçable, donc théoriquement acceptable pour le perçage des composites.



**Figure 2.20 : Foret à point soudé (brasé) .**

### **2.3.3 Forets avec plaquettes amovibles**



**Figure 2.21: Foret avec plaquettes amovibles .**

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".



### 2.3.4. Forets à lame (spade drills)

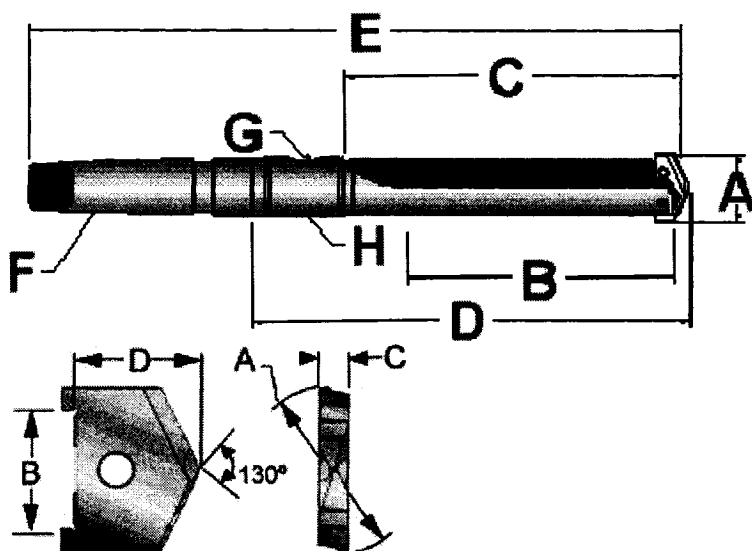
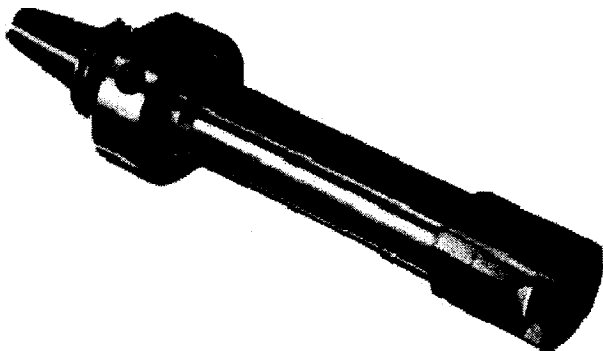


Figure 2.22: Forets à lame.

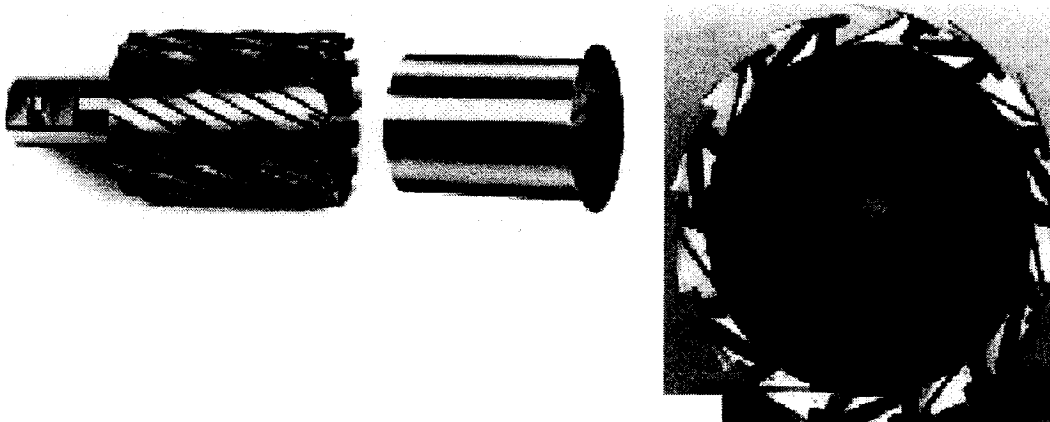
Les forets à lame ont l'avantage que l'affûtage est très facile à effectuer par les sous-traitants locaux pour un prix réduit. Des références bibliographiques citées antérieurement ont mentionné que les forets monoblocs avec des canaux d'évacuation droits n'ont pas donné de bons résultats. Reste à voir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

### 2.3.5. Outils de trépanage

Les outils de trépanage sont conçus pour la découpe circulaire du matériel, un noyau de matériel restera en place et devrait être enlevé ultérieurement. Ils ont l'avantage que le volume de matériel transformé en copeaux est plus petit par rapport au volume de matériel restant. L'évacuation des copeaux est plus difficile que pour le perçage régulier. Le procédé est utilisé pour les trous qui débouchent.

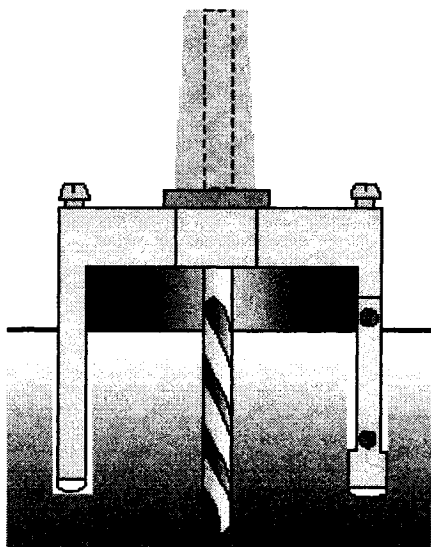


**Figure 2.23: Outil de trépanage type Muskegon ®™.**

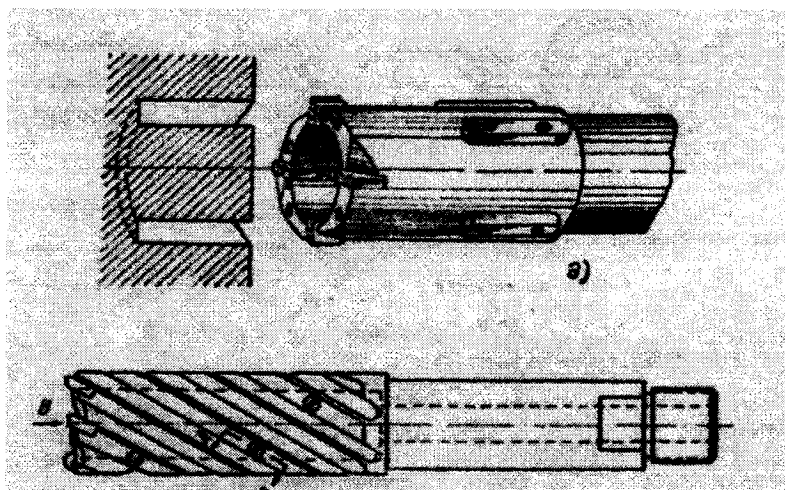


**Figure 2.24: Outils de trépanage à cannelures hélicoïdales.**

Afin de guider l'outil, les forets de trépanage peuvent être munis d'un foret central, nommé pilote, ou avec guidage par l'extérieur dans le montage de perçage.



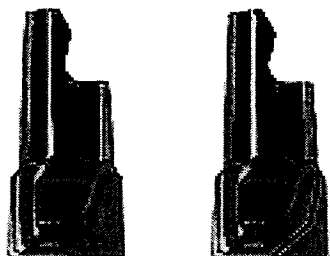
**Figure 2.25: Schéma d'outils de trépanage avec pilote central.**



**Figure 2.26: Outils de trépanage guidage extérieur.**

### 2.3.6. Outils à tête "droite" amovible

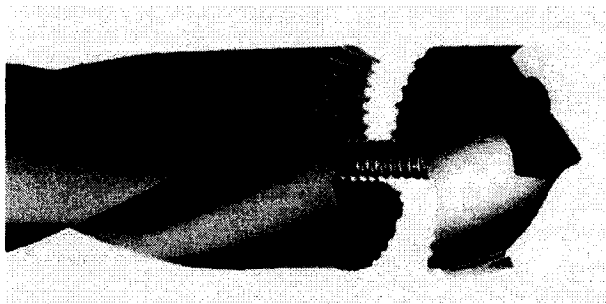
En effet sont des outils de fraisage en plongée mais sont utilisés dans la pratique courante pour les trous courts à fond plat. Évacuation difficile de copeaux pour une profondeur de coupe plus grande que la hauteur de la partie active et le risque de toucher le porte-outil. Les plus connus sont les produits Minimaster®<sup>TM</sup> de la compagnie Seco, mais plusieurs producteurs offrent des outils similaires. Leur grand avantage est le réaffûtage très facile.



**Figure 2.27 Outils à tête amovible (tête droite).**

### 2.3.7. Outils à tête vissable

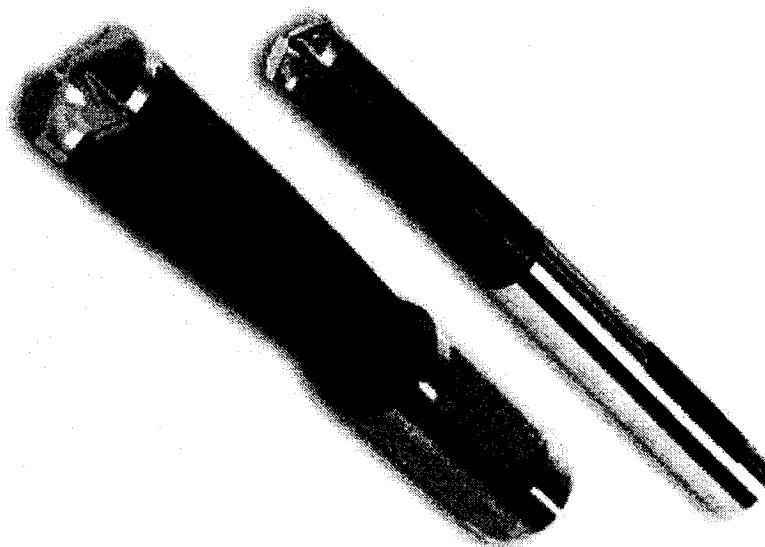
Ils sont connus par l'entremise de la gamme Crownlock®<sup>TM</sup> de la compagnie Seco et sont présentés comme des outils ayant une bonne rigidité vu la méthode de contact entre le corps du porte-outil et la plaquette. Ce type d'outil reste une alternative pour les outils Iscar afin de rouler ultérieurement des tests comparatifs.



**Figure 2.28 : Outils à tête vissable.**

### **2.3.8. Outils à pointe amovible**

Ils ont eu une très grande acceptabilité par le milieu manufacturier. Les solutions constructives offrent différents angles de l'hélice. Les outils ayant des cannelures droites n'ont pas donné de résultats acceptables (Leep, 1993). Les porte-outils sont disponibles en forme cylindrique ou fraisée (Weldon shank).



**Figure 2.29: Outils à pointe amovible. (Source: Iscar)**

### 2.3.9. Outils de perçage avec évacuation par intérieur

Ce type d'outils est conçu pour les trous profonds où le contact entre les copeaux et le trou devrait être éliminé.



Figure 2.30: Outil avec évacuation des copeaux par intérieur.

### 2.3.10 Perçage par la méthode STS / BTA

Le procédé est connu par l'entremise des solutions offertes par la compagnie Sandvik. Cette méthode s'applique pour les trous profonds où l'évacuation des copeaux est difficile par d'autres procédés. La méthode BTA est caractérisée par l'introduction de liquide de coupe sous pression pour faire évacuer les copeaux.

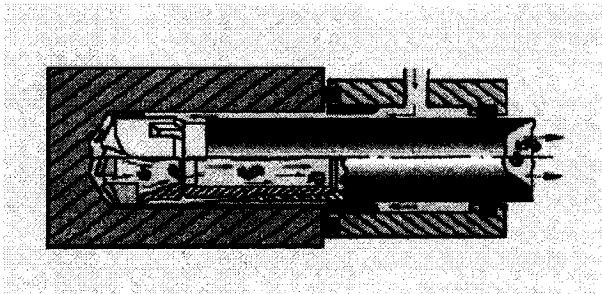
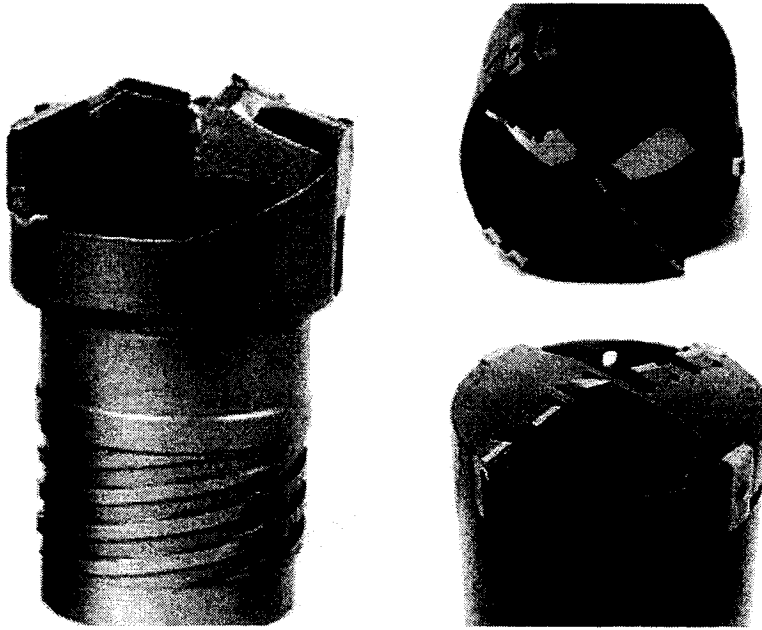


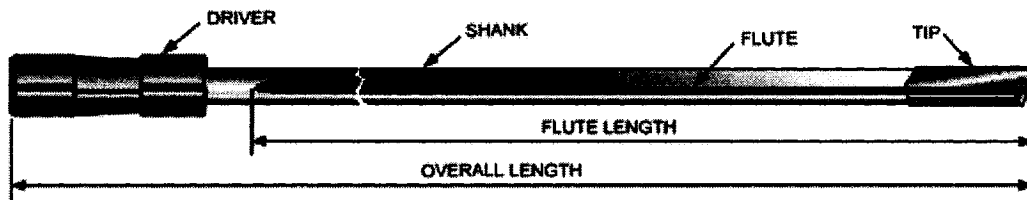
Figure 2.31 Outil de perçage par la méthode BTA™ (Sandvik).



**Figure 2.32: Vue de détail pour les outils BTA™ (Sandvik).**

### 2.3.11. Forets pour perçage profond

Ils sont connus sous le nom de "gun drill" d'après leur première utilisation dans la construction d'armement. Leur supériorité est donnée par la petite déviation de l'axe de trous en perçage profond. Dans l'industrie automobile, ils sont utilisés dans l'usinage des blocs-moteurs. Dans l'annexe 2.5 est présenté un système de guidage pour les forets à perçage profond (gun drill).



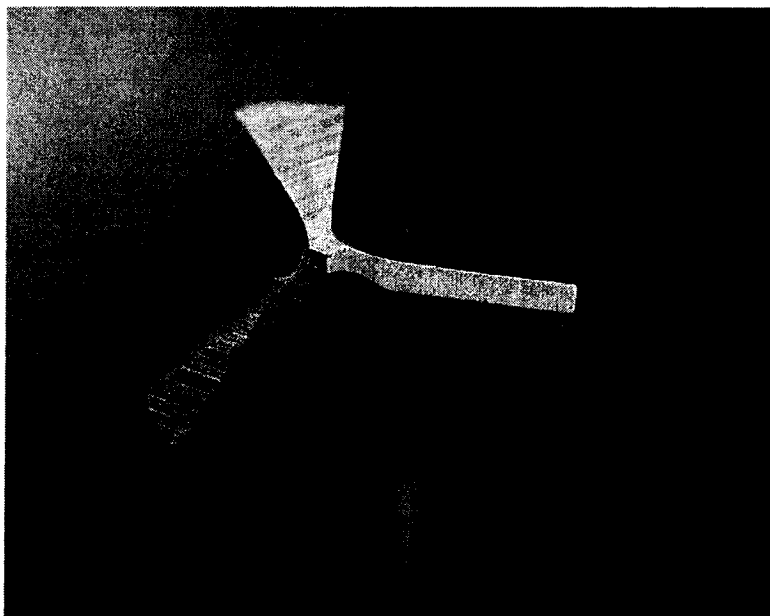
**Figure 2.33: Foret à perçage profond (gun drill). (Source: catalogue Guhring)**



**Figure 2.34: Détail de la partie active du foret à perçage profond (gun drill).**

### **2.3.12. Forets à trois lèvres**

L'avantage des forets à trois lèvres est la supériorité des trous (circularité et variation du diamètre), aussi que la productivité accrue. Plus qu'il y a des lèvres, plus la vitesse d'avance sera élevée.



**Figure 2.35 Foret à trois lèvres. (Source: Guhring)**

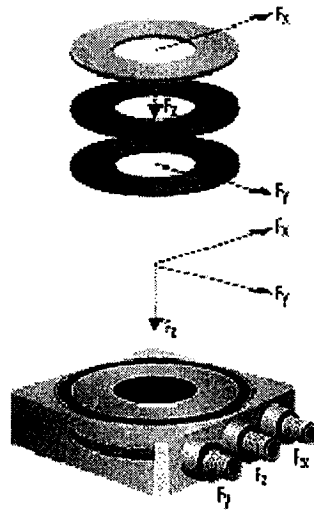


## 2.4 Instrumentation

Les forces et les moments ont été mesurés avec des appareils produits par la compagnie Kistler. Pour l'émission acoustique et pour la vibration, la technologie utilisée pour l'acquisition des données a été celle de National Instruments.

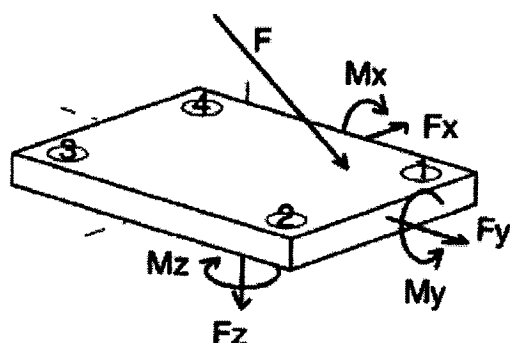
Pour le traitement des données, l'application informatique utilisée a été celle du prof. Jemielniak. Également la mise en route des montages de mesures est basée sur le support direct du prof. Jemielniak.

### Mesure des forces à l'aide de la méthode à quartz



**Figure 2.36: Plaque Kistler de montage pour la mesure des forces.**

Le schéma de principe pour visualiser les forces et le moment recommandé par Kistler est présenté à la figure 2.37.

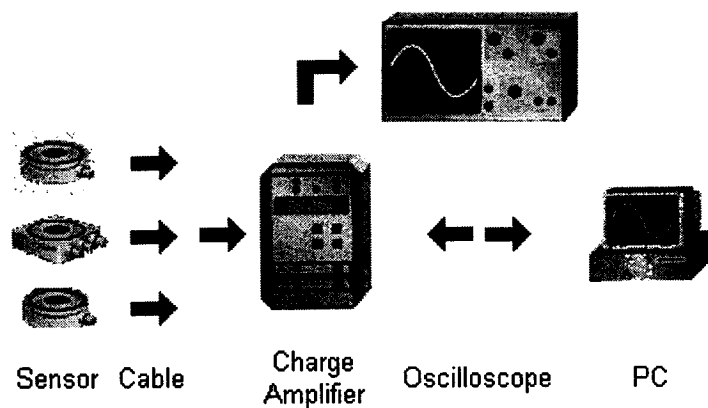


**Figure 2.37: Schéma de principe pour mesurer les forces et le moment conformément à la méthodologie Kistler.**

### Principe piézoélectrique

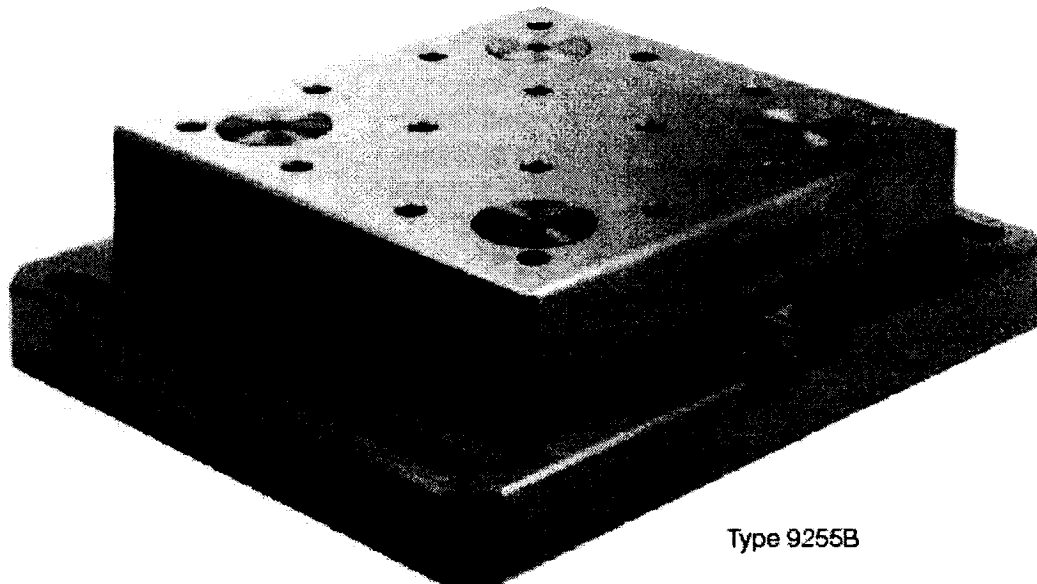
Le quartz est un matériel piézoélectrique capable de générer des charges électriques soumises à des forces mécaniques. Le système à quartz peut mesurer des forces petites et est très "sensitive".

Les capteurs sont calibrés par le producteur et sont prêts à utiliser. La connexion entre capteurs et amplificateur de charge est faite avec des câbles Kistler choisis conformément aux prescriptions du producteur.



**Figure 2.38: Concept du montage recommandé par Kistler.**

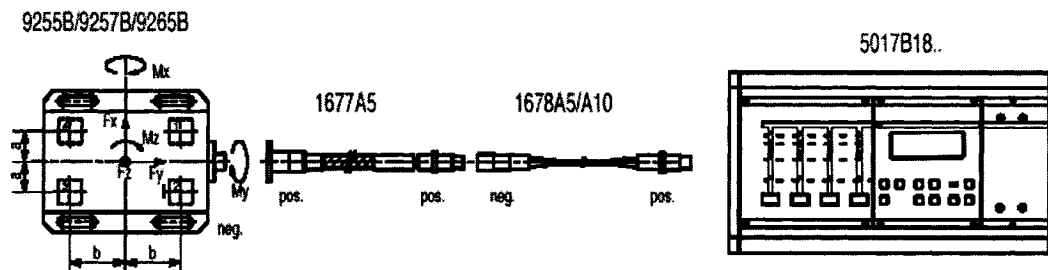
Le modèle de la table utilisée est de type 9255B. La table dynamométrique, conformément à la documentation de Kistler (9255-datasheet), se compose de quatre capteurs de force à trois composantes montées sous précontrainte relevée entre une plaque de base et une plaque supérieure. Les capteurs de forces comprennent chacun trois paires de plaquettes en cristal de quartz: l'une est sensible à la pression selon l'axe z alors que les deux autres sont sensibles au cisaillement selon l'axe x et respectivement y. La sortie des quatre capteurs de force incorporés est branchée à l'intérieur du dynamomètre de façon à rendre possible des mesures de force et moments à plusieurs composantes. Les huit signaux [Fx(1+2), Fx(3+4), Fy(1+4), Fy(2+3), Fz1, Fz2, Fz3, Fz4] sont disponibles sur la prise femelle à bride et à 9 pôles. Les quatre capteurs sont montés avec isolation par rapport à la masse. Ainsi, les problèmes de circuits de retour par la terre sont largement éliminés. Les câbles recommandés par le fournisseur sont de type 1677A5 (aussi de marque Kistler).



Type 9255B

**Figure 2.39: Table pour la mesure des forces et moments Kystler Type 9255B.**

La connexion entre la table et la machine est faite conformément aux prescriptions du fournisseur Kistler.



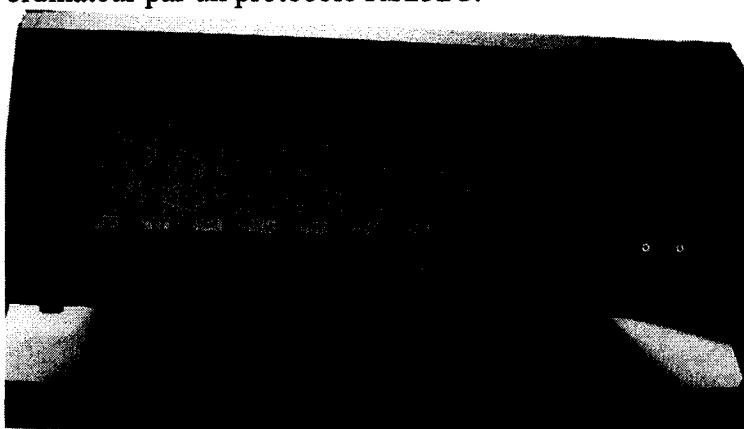
**Figure 2.40: Connexion table dynamométrique - amplificateur de charge Kistler.**

Pour le traitement des données, l'application informatique (Jemielniak 2005) utilise les formules imposées par Kistler.

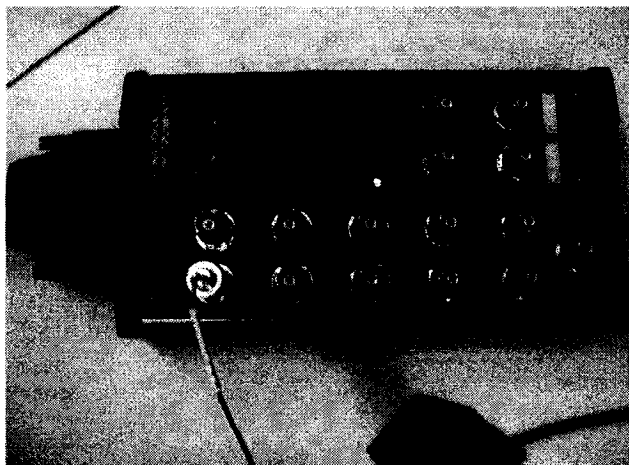
$$\begin{aligned}
 F_x &= F_{x1+2} + F_{x3+4} \\
 F_y &= F_{y1+4} + F_{y2+3} \\
 F_z &= F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4} \\
 M_x &= b \cdot (F_{z1} + F_{z2} - F_{z3} - F_{z4}) \\
 M_y &= a \cdot (-F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} - F_{z4}) \\
 M_z &= b \cdot (-F_{x1+2} + F_{x3+4}) + a \cdot (F_{y1+4} - F_{y2+3})
 \end{aligned}$$

**Figure 2.41: Formules de calcul pour forces et moments (source Kistler feuille de renseignement 9255b\_supplement).**

L'amplificateur utilisé est de type (modèle) 5017, multicanaux connectables à un ordinateur par un protocole RS232C.



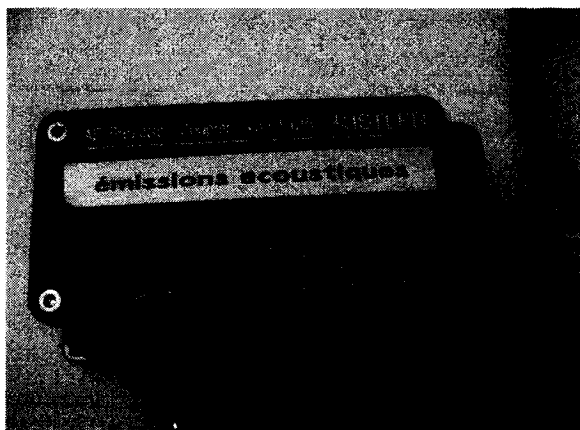
**Figure 2.42: Amplificateur .**



**Figure 2.43: Boîte de connexions.**



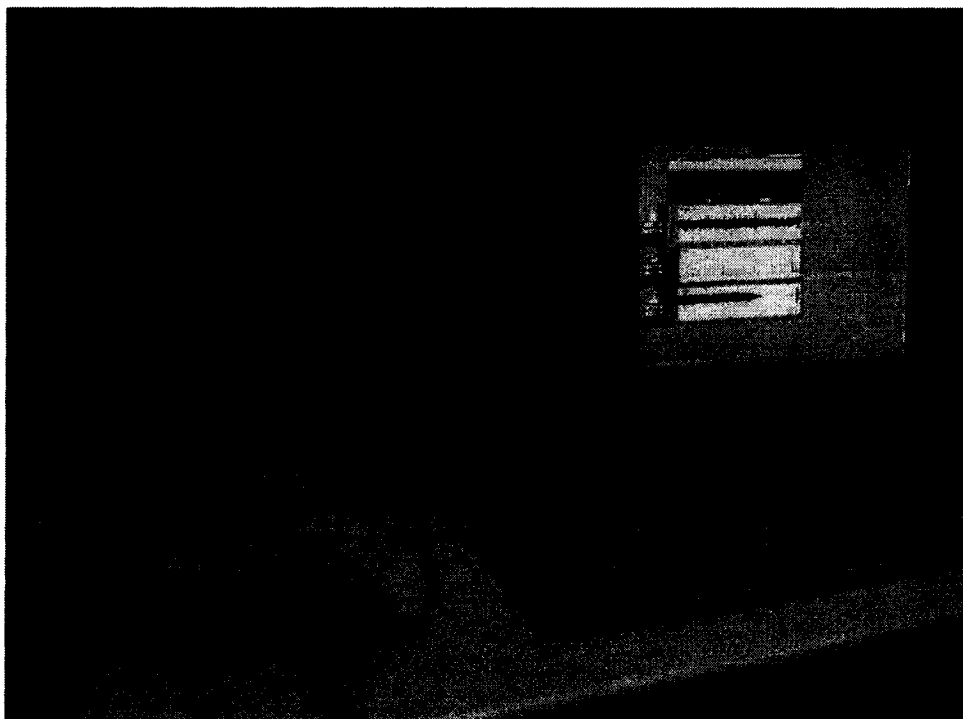
**Figure 2.44: Coupleur Kistler pour vibrations.**



**Figure 2.45: Coupleur Kistler pour vibrations acoustiques.**



**Figure 2.46: Appareil pour l'acquisition de données.**



**Figure 2.47: Montage et signaux de vérification pour vibration et émission acoustique.**

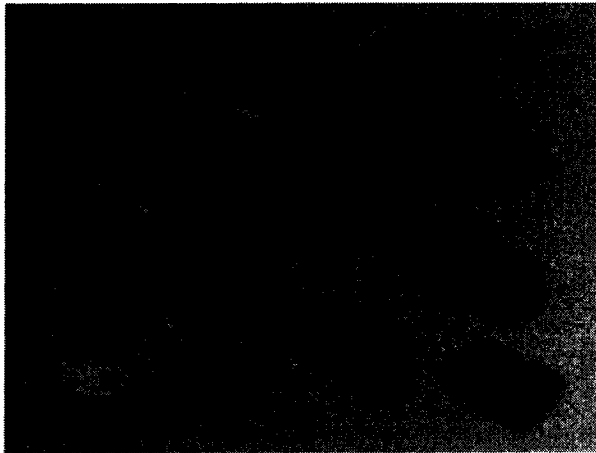
## 2.5 Choix des types d'outils pour les tests de perçage

Les outils / producteurs suivants ont été choisis:

Outils à lame (spade drill) produits par la compagnie Allied Machine & Engineering Corp, connue sous l'acronyme AMEC.

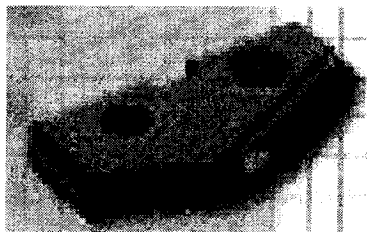
Le critère de sélection: leur avantage est la facilité d'affûtage vu leur géométrie relativement simple. L'usure enregistrée a été trop grande et trop rapide pour continuer les tests quantitatifs afin de le proposer à l'industrie automobile.

Les forets (lames) en acier rapide ont été de type Super Cobalt (CPM-T15) et les lames en carbure ont été de type (grade) C2, recommandé pour les alliages non ferreux, pour les fontes, pour les applications où résistance à l'usure est demandée. Pour les forets type lame en acier rapide, les tests préliminaires ont été faits à une vitesse de rotation de l'outil de 2240 rev/min et une avance de 0.1 mm/rev (conformément aux recommandations du producteur). Le même outil a été testé à 4000 rpm avec la même avance de 0.1 mm/rev. Dans le chapitre trois seront présentées des images d'usure pour perçage à sec et avec du liquide de coupe.



**Figure 2.48: Forets à lame amovible. (Source: AMEC)**





**Figure 2.49: Lame amovible pour les forets "AMEC".**

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



**Figure 2.50: Foret carbure solide.**

Le foret est de type auto centrant ayant un angle au point de 140 degrés avec une géométrie "renforcée" (plus épais au milieu). 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. Il peut travailler des alliages ayant un haut contenu en silicium (+10%). Il accepte une avance jusqu'à 0.4 mm/rev et une vitesse de coupe jusqu'à 260 m/min.

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

Les caractéristiques du revêtement type "Firex" sont présentées à la figure 2.51.

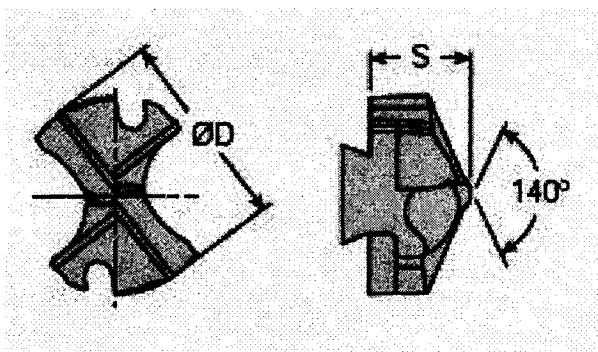
HIGH PERFORMANCE COATINGS	TiN - S-coat Titanium Nitride	TiAlN - A-coat	TiCN - C-coat Titanium Carbonitride	FIREX - F-coat
Coating Color	Gold	Black Violet	Gray Violet	Red Violet
Coating Process	PVD Physical Vapor Deposition	PVD Physical Vapor Deposition	PVD Physical Vapor Deposition	PVD Physical Vapor Deposition
Coating Temperature	800 F 500C	900 F 480C	900 F 480C	900 F 480C
Layer Structure	Mono	Mono plus Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> layer	Multi	Multi
Thickness (in)	1.5-3.0	1.5-3.0	4.0-7.0	3.0-6.0
Microhardness (HV)	2000	2000	3000	3000
Friction Coefficient (μ)	0.40	0.35	0.25	0.25
Thermal Conductivity (W/mK)	0.87	0.55	0.16	0.65
Maximum Operating Temperature	1100 F 600C	1400 F 800C	900 F 500C	1400 F 800C
Primary Applications	All	Drilling, turning, milling & grinding steel & titanium	Drilling, turning, milling, grinding & finishing steels	All
Workpiece Materials	Stainless	Steel, titanium, aluminum	Steel, steel, & titanium alloys	Stainless
Key Characteristics / Benefits	High wear resistance	High wear resistance	High wear resistance	High wear resistance

**Figure 2.51: Revêtements pour les outils de perçage (source: Guhring).**

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

La plaquette choisies est de type (nuance / grade) IC908 avec un équivalent ISO : K20-K30, le code du produit d'après la nomenclature Iscar DCM 100-030-16A-3D. 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 2.52: Plaquette Iscar.**



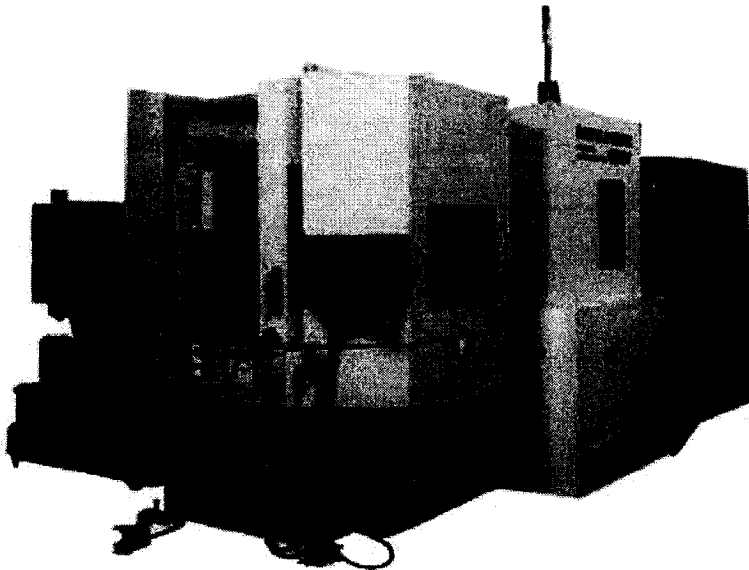
**Figure 2.53: Porte-outil Iscar.**

- Afin de constater si les qualités de trous obtenus avec des forets à 3 lèvres s'appliquent aussi au CMM , des tests avec un foret 3 lèvres produit par Guhring ont été faits (voir figure 2.35).

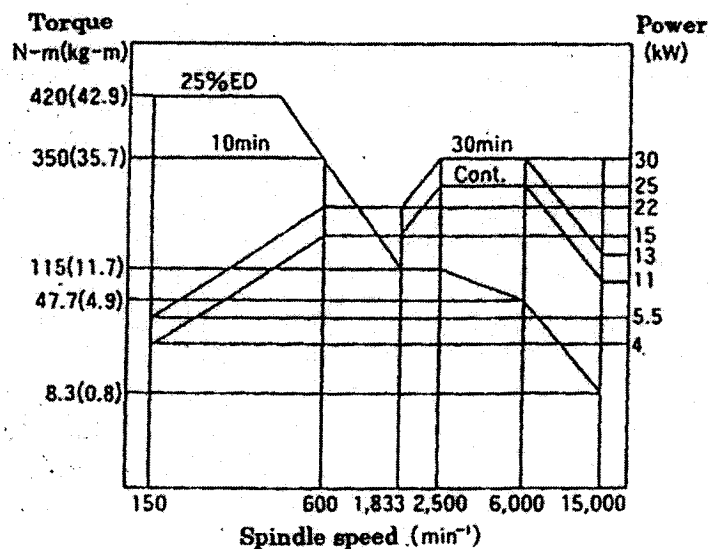
Pour évaluer le progrès fait par les producteurs d'outils en acier rapide (en effet la métallurgie des aciers rapide) ainsi que les revêtements pour les outils tout usage, des tests avec des outils monoblocs en acier rapide, aussi produits par Guhring, connus sous le nom de "jobber drill", ont été faits.

## 2.6 Méthodologie expérimentale

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 d'usinage. 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-40. 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. Les données publiées par le constructeur de la machine sont présentées dans l'annexe 2.4 .



**Figure 2.54: Machine HU 40-T Mitsui Seiki.**



**Figure 2.55: Machine HU40-T. Diagramme de moment résistant - puissance.**  
(Source Mitsui Seiki).

Vérification de la sollicitation de la machine: du point de vue méthodologique, avant de commencer l'usinage, il faut s'assurer que la machine peut développer la force axiale nécessaire au perçage et que le moment résistant est plus petit que le moment maximum admis par la machine. La force  $F_z$  et le moment  $M_z$  sont déterminés analytiquement ou par voie graphique en utilisant les abaques fournies par les constructeurs.

Les plaquettes amovibles pour les outils faits par Iscar seront positionnées sur le corps (porte-outil) en respectant la méthodologie imposée par le constructeur: nettoyage, ajout d'huile, positionnement et serrage. Formellement, la compagnie Iscar fournit les valeurs pour le moment de serrage de l'insert. Aucun montage expérimental ou accessoire de montage / serrage de la plaquette pour respecter le moment n'est fourni.

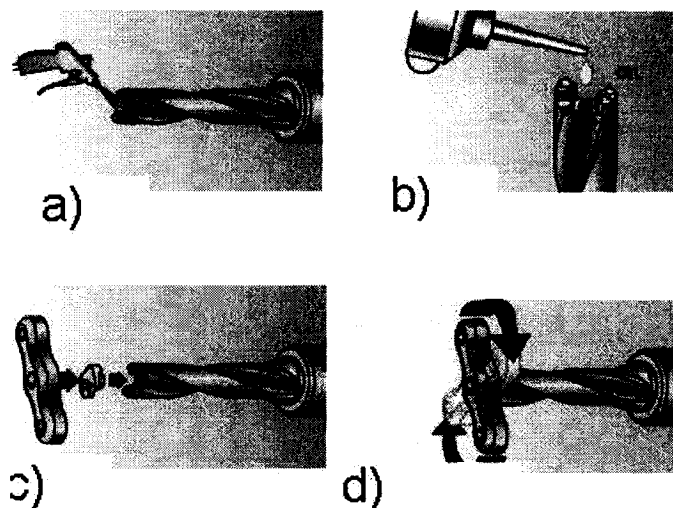


Figure 2.56: Montage des plaquettes amovibles Iscar.

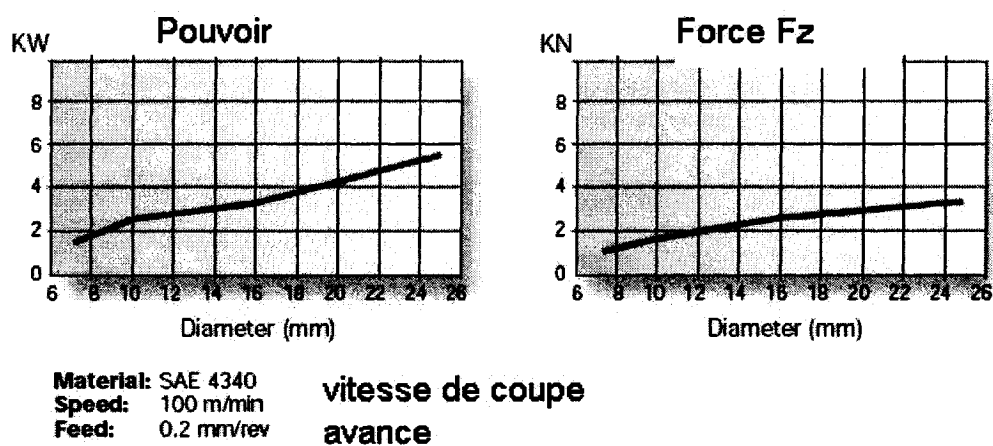
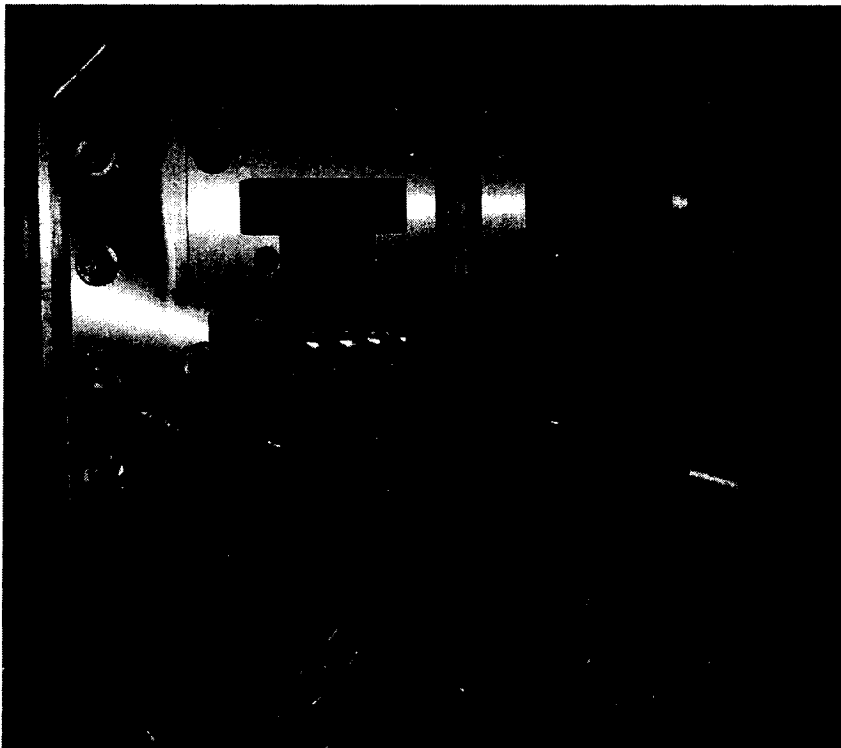


Figure 2.57: Force et puissance nécessaire au perçage (source: Iscar, catalogue d'outils).

**La séquence des tests :**

- tests de perçage avec des outils à lame, analyse des premiers résultats d'usure;
- tests de perçage pour vitesse de rotation de l'outil constante et avance variable;
- tests de perçage pour avance constante et vitesse de rotation de l'outil variable;
- analyse de dislocations;
- délimiter les valeurs de travail (avance et vitesse de rotation pour continuer les tests), le choix d'avance de 0.2 mm/ rev à 6000 rpm;
- tests d'usure d'outils, mesure des forces et moments ainsi que les vibrations et l'émission acoustique pour 6000 rpm et avance 0.2 mm/rev.



**Figure 2.58: Montage de la pièce à percer sur la machine.**

Avant de commencer les tests, il faut avoir une idée à quoi on s'attend comme ordre de grandeur pour les forces et les moments en perçage.

Estimation préliminaire pour les forces et les moments du perçage: afin de s'assurer que les paramètres de réglage pour le montage de mesure de forces et moments sont dans le bon ordre de grandeur, des investigations bibliographiques ont été faites.

En utilisant la méthodologie de calcul présentée par les livres de référence de SME (publiées en 1988), Lane (1993), recommande:

$$\tau = K f^{0.8} d^{1.8} A$$

$$T = 2Kf^{0.8}d^{0.8}B + Kd^2E$$

où:

$\tau$  = moment (pouce - lbf)

T = force axiale (lb)

K = constante de matériel

f = vitesse d'avance (pouce / rev)

d = diamètre du foret (pouce)

A, B, E, constantes reliées à la géométrie du foret

et après la conversion finale en système métrique, on obtient

pour une avance de 0.05 mm / rev le moment de 0.49 Nm et la force axiale de 25 N

pour une avance de 0.25 mm / rev le moment de 1.79 Nm et la force axiale de 76 N

Cronjager (1991) estime que les forces de coupes pour les CMM ont l'ordre de grandeur de un quart jusqu'à un tiers de ceux nécessaire pour le perçage d'aciers. Ses travaux



publiés en 1992 (Annals of the CIRP) présentent pour une vitesse de coupe de 75 m/min et une avance de 0.05 mm /rot une force axiale de 17 - 27 daN.

Davim (2001) a évalué le moment à 1.1-1.4 Nm pour des vitesses de coupe de 50 m/min et une avance de 0.15 mm/rev. Pour une vitesse de coupe de 40 m/min et une avance de 0.15 mm/rev, le moment est de l'ordre de grandeur de 0.6-1 NM. La Force Fz pour les mêmes valeurs 40 m/min vitesse de coupe et une avance de 0.15 mm / rev, a été trouvée ayant des valeurs entre 50 et 70 daN.

Le puissance nécessaire dans le perçage est présenté dans Machining Cutting Tool Handbook (1989). Pour une avance de 0.2 mm/ rev avec un foret de 10 mm de diamètre, le puissance nécessaire est de 0.07 - 0.08 (horse power) pour les fontes, 0,22 pour les aciers d'outils et de 0.21 pour l'acier inoxydable 303.

La force axiale en perçage pour acier d'outils pour un foret ayant le diamètre de 10 mm est estimée à 375 daN et pour les fontes l'estimation est de 135 daN.

La bibliographie classique française (Blanpain, 1955) estime la force axiale aux alentours de 150 daN pour les fontes. Le moment est estimé aux alentours de 3 Nm pour un acier avec une résistance à la rupture de 40-70 daN/mm<sup>2</sup>. Dans l'annexe 2.6 est présentée l'abaque pour l'estimation de la force axiale et du moment nécessaire.

Tanguy (1988) recommande pour le calcul de la force et du moment, les relations suivantes:

$$F \text{ (daN)} = K_f \text{ (daN/mm}^2\text{)} * f \text{ (mm/tr)} * d \text{ (mm)}$$

$$M \text{ (daNm)} = K_m \text{ (daN/mm}_2\text{)} * f \text{ (mm/tr)} * d^2 \text{ (mm)}$$

Les coefficients  $K_f$  et  $K_m$  pour les alliages en aluminium sont égaux à 0.2 (Tanguy 1988).

Pour les fontes, la valeur de la force de pénétration est de 70 daN et le moment est de 0.5 daNm en utilisant les valeurs de ses coefficients  $K_f$  et  $K_m$ . Les valeurs sont très proches de celles suggérées par Lane.

Kakino (1999), pour les tests de perçage en aluminium et fonte, a trouvé pour la force  $F_z$  des valeurs à partir de 25 jusqu'à 100 daN et pour le moment  $M_z$  des valeurs à partir de 0.2 jusqu'à 0.5 daNm. Pour ses expériences, l'auteur (Kakino) a travaillé avec des forets en carbure sans dépasser une avance de 0.2 mm/rev.

Des tests de perçage avec des avances de 0.1, 0.2 et 0.3 mm/rev à 6000 et 8000 rpm avec des outils en carbure pleine et des outils avec des plaquettes amovibles ont été faits.

## CHAPITRE 3

### RÉSULTATS ET ANALYSES

Vu la quantité réduite d'informations bibliographiques reliées au perçage des matériaux composites de type GrANi™, des tests préliminaires ont été effectués avec différents matériaux d'outils (acier rapide et carbure), ainsi que différentes géométries. Après ces tests préliminaires, les outils en acier rapide et les outils de type lame (spade drill) ont été éliminés. Le perçage avec liquide de coupe pour les outils en carbure (plaquettes et carbure solide) a également été éliminé. Les résultats obtenus pour le perçage avec du liquide de coupe (rugosité et précision de trou) ne justifient pas la continuation des tests vu l'usure accélérée des outils ainsi que les problèmes environnementaux.

Les tests ont été effectués sur les machines suivantes:

- forets de type lame (spade drill): Matsuura, à l'École Polytechnique;
- forets en acier rapide: Matsuura, à l'École Polytechnique;
- forets en carbure (plaquettes et carbure solide) : Mori Seiki (dans le laboratoire de l'École de Technologie Supérieure, vu que cette machine permette le refroidissement par l'intérieur de la broche ainsi que des vitesses de rotation plus élevées que la machine Matsuura);
- forets en carbure (plaquettes et carbure solide) : Mitsui Seiki HU40-T, à l'École Polytechnique (dans le nouveau laboratoire d'usinage).

La procédure expérimentale est présentée au chapitre 2 (montage sur la machine, instrumentation).

La synthèse des résultats est présentée dans la section 3.8.

Les tests préliminaires ont été effectués avec les types suivants de forets:

#### 1) Tests préliminaires

- Forets à plaquette amovible en acier rapide et en carbure de type lame ou "spade drills" produits par la compagnie AMEC (voire figure 2.48)
- Forets en acier rapide produits par la compagnie Guhring type 549 (Guhring source Book - High Performance Cutting Tools,)
- Forets en carbure solide produits par la compagnie Guhring type DK460 UF Guhring source Book - High Performance Cutting Tools, (voire figure 3.9)
- Forets à plaquette amovible produits par la compagnie Iscar, plaquette nuance IC908 (K20-K30) (voir figure 2.52 et 2.53)

Pour les forets à plaquette amovible de type lame, les tests suivants ont été effectués:

- plaquette en acier rapide, avance  $f=0.1$  mm/rev,  $n=2240$  rpm, travaille avec huile noire;
- plaquette en carbure, avance  $f=0.1$  mm/rev,  $n=4000$  rpm travaille à sec et avec du liquide de coupe.

Longueur de coupe (perçage) est fixée à 100 mm ( 5 trous x 20 mm).

Pour les forets en acier rapide, des tests de perçage à sec, avance constante 0.1 et 0.2 mm/rev et vitesse de rotation de l'outil de 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 3500 et 4000 rpm ont été effectués (figures 3.5, 3.66, 3.7, 3.8 ainsi que l'annexe 3.1).

## 2) Tests pour déterminer la zone de stabilité en usinage

L'objectif de ces tests préliminaires a été de trouver une zone représentative (rugosité minimale, variation minimale du diamètre de trou, erreurs de circularité minimales pour les trous obtenus).

Pour les forets en carbure solide et les forets à plaquette amovible, des tests préliminaires ont été effectués avec les avances  $f=0.1, 0.2$  et  $0.3$  mm/rev pour des vitesses de rotation de l'outil à partir de 500 rpm jusqu'à 12000 rpm. Le perçage a été effectué à sec ou avec du liquide de coupe. Les résultats sont présentés individuellement pour quelques tests et globalement sur le même graphique pour différentes avances et différentes vitesses de rotation de l'outil afin d'avoir une image globale sur l'interdépendance des différents paramètres.

## 3) Tests pour déterminer l'usure des outils, pour mesurer les forces de coupe et les moments.

Des tests avec les outils en carbure solide et les outils à plaquette Iscar pour 6000 et 8000 rpm pour avances de  $f=0.1, 0.2$  et  $0.3$  mm/rev ont été effectués pour étudier la variation de la force d'avance axiale (thrust), le moment à la broche, les vibrations et l'émission acoustique. Afin de vérifier la répétabilité des résultats, les tests ont été répétés deux fois pour les outils en carbure et trois fois pour les outils à plaquette vu que le corps d'outil de Iscar a cassé..

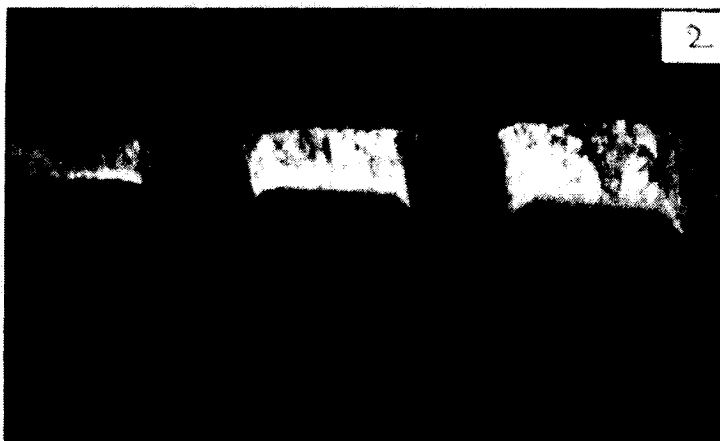
### 3.1 Tests préliminaires

#### 3.1.1. Série de tests no 1 : Outils de type lame (spade drill)

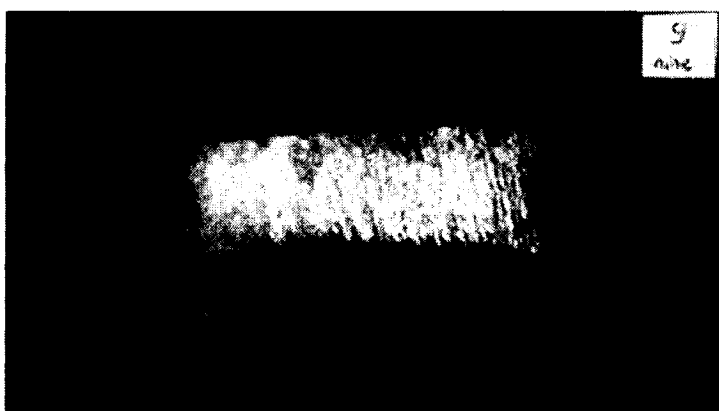
Ce type de foret a été testé vu son prix bas pour les plaquettes et sa grande facilité d'être réaffûté. Les outils de type lame ont été produits par la compagnie AMEC et sont connus commercialement sous le nom de "spade drill".

Dans les figures 3.1 et 3.2 sont présentés les détails concernant l'usure de ce type d'outils. Même si leur prix est bas et leur raffûtage facile, ces outils n'ont pas été retenus comme une solution recommandée à la grande industrie de constructions d'automobiles. L'usure observée après 100 mm de perçage (voir les images suivantes) est trop grande. Même si les plaquettes ont un prix relativement bas, le temps de changement des plaquettes influence lourdement le prix de fabrication.

Les figures 3.1 et 3.2 présentent l'usure des outils après 100 mm de travail (5 trous à 20 mm). Vu la forme spécifique de la géométrie de la plaquette (voir le chapitre 2, types des outils pour perçage), l'usure définie par le paramètre  $V_b$  n'est pas applicable. Les tests ont été arrêtés après 5 trous ou une longueur (profondeur) totale de coupe de 100 mm, vu "la désintégration" de l'arête de coupe sur la partie extérieure de la plaquette ainsi que l'usure abrasive sur la face de dépouille. Les photos de l'outil sont présentées dans le chapitre 2 sur les figures 2.13, 2.47 et 2.48. Dans l'annexe 3.1 sont présentées les images des plaquettes de type lame avec l'information reliée aux conditions de coupe (rpm, avance, liquide de coupe ou non) agrandissements de l'image de l'usure sont présentés dans l'annexe 3.1 pour perçage à sec et avec liquide de coupe à 4000 rpm et avance 0.1 mm/rev.



**Figure 3.1: Usure de plaquette "spade drill" en carbure, 4000 rpm, travail à sec avance 0.1 mm/rev , agrandissement 25x (désintégration) .**



**Figure 3.2: Usure de plaquette "spade drill" en carbure, 4000 rpm, travail avec liquide de coupe, avance 0.1 mm/rev, agrandissement 50x (abrasion).**

Sur la figure 3.2 est visible l'effet du liquide de coupe: les particules très fines des copeaux forment avec le liquide de coupe une pâte abrasive avec un effet d'usure accéléré. Pratiquement , la plaquette est "effacée", donc il s'agit d'un autre mécanisme d'usure.

### 3.2 Série de tests no 2:

#### **Perçage avec des forets en acier rapide (Guhring) , type 549 (jobber drill) avec recouvrement Firex™**

Tous les tests ont été effectués avec des forets de diamètre de 10 mm. C'est pourquoi sur les graphiques suivants, le diamètre de foret ne sera pas mentionné.

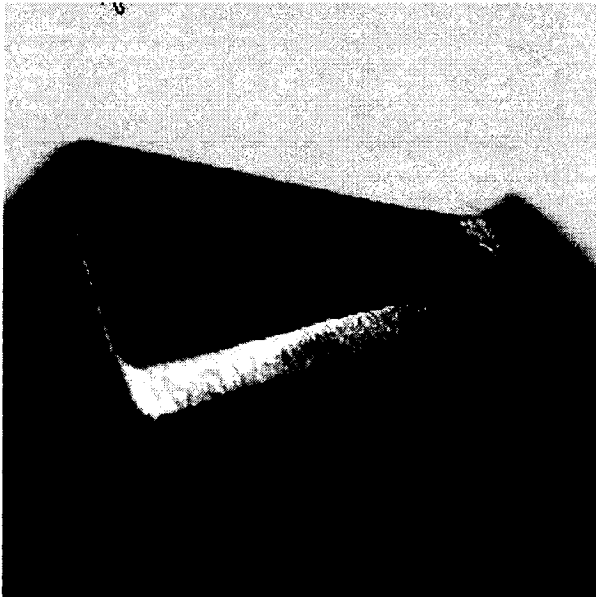
Pour observer le comportement des outils en acier rapide, des forets de type 549 (jobber drill) produits par la compagnie Guhring ont été utilisés. Les tests analysent la variation du diamètre du trou et l'erreur de circularité des trous obtenus en fonction de la vitesse de rotation de l'outil. Les tests ont été faits dans le laboratoire de l'École Polytechnique de Montréal sur la machine Matsura. Pour mieux comparer la nature de l'usure, les photos pour le perçage avec avance de 0.1 mm/rev et 0.2 mm/rev seront présentées successivement. La longueur totale de coupe a été de 160 mm. Le premier test a été fait pour une avance constante de  $f=0.1$  mm/rev et la vitesse de rotation de l'outil croissante de 500 jusqu'à 4000 rpm. Les tests ont été effectués à sec.

La profondeur de perçage a été de 20 mm pour chaque trou.



**Figure 3.3: Usure du foret en acier rapide, avance 0.1 mm/rev constant, rpm variable. Usure sur la face de dépouille .  $V_b = 0.8$  mm. (desintegration)**





**Figure 3.4: Usure du foret en acier rapide, avance 0.2 mm/rev constant, rpm variable. Usure sur la face de dépouille .  $V_b = 0.65$  mm.**

On peut voir sur les photos le même type d'usure que sur les plaquettes spade drill en acier rapide (desintegration, voir fig 3.3 et fig 3.1).

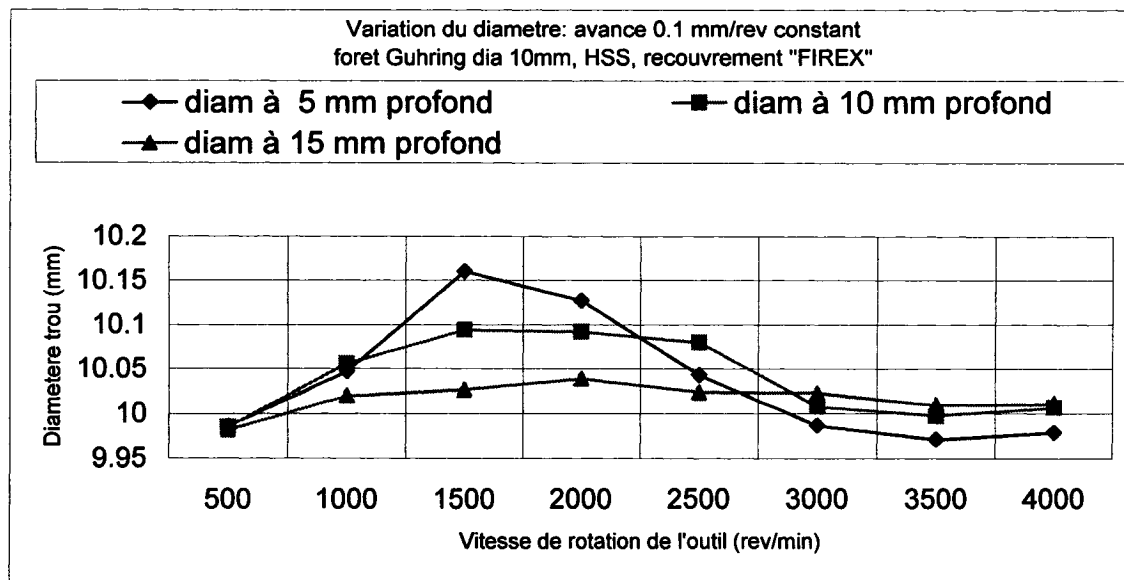
La forme de l'usure, nommée dans le langage de production "désintégration", est reliée au type de matériaux (acier rapide) ayant la même "allure" pour deux types totalement différents de forets.

Le recouvrement appliqué sur les aciers rapides est enlevé après le premier trou. L'usure du coin "arrondi" est due à la vitesse trop grande de perçage à l'extrémité de l'outil.

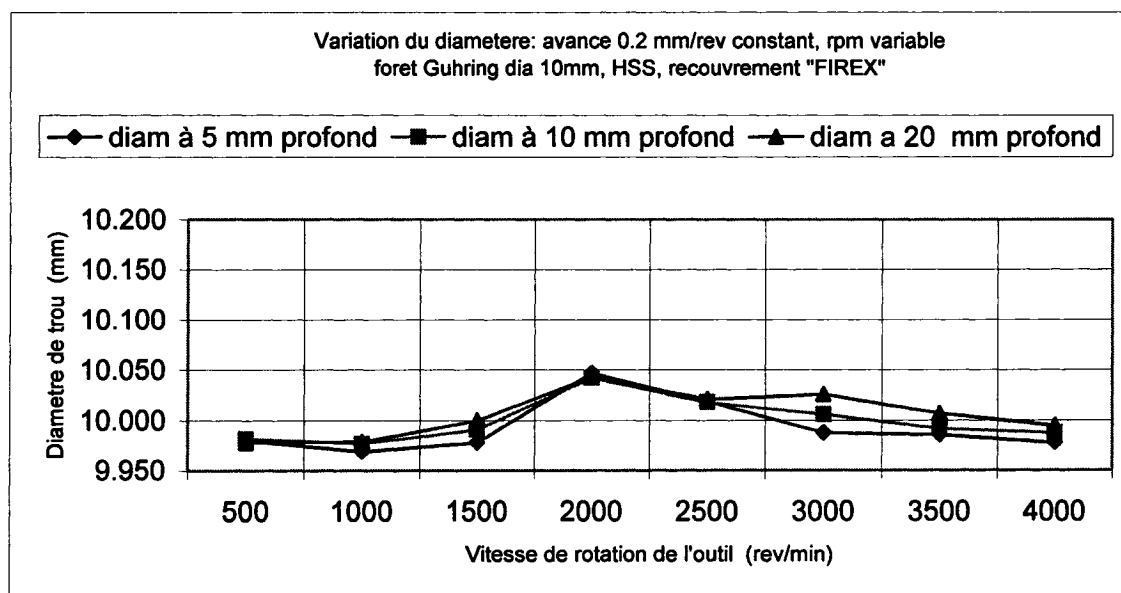
Une autre observation à retenir pour l'ensemble des phénomènes reliés au perçage de CMM est que l'avance de 0.1 mm/rev provoque l'usure plus rapide de l'outil que l'avance de 0.2 mm/rev (les autres conditions de coupe restent identiques).

Afin d'étudier l'influence de l'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil sur la qualité des trous, les graphiques de variation de diamètre et de circularité ont été tracés.

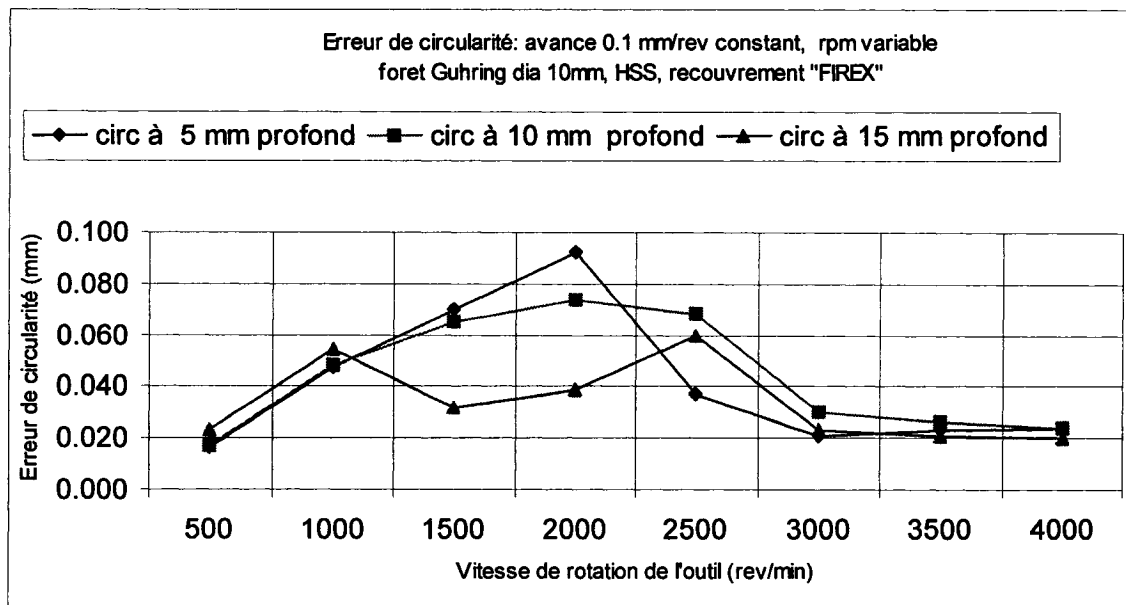
Les figures 3.5-3.8 montrent les graphiques en fonction de la vitesse de coupe. Nouveau outil à chaque trou a été utilisé.



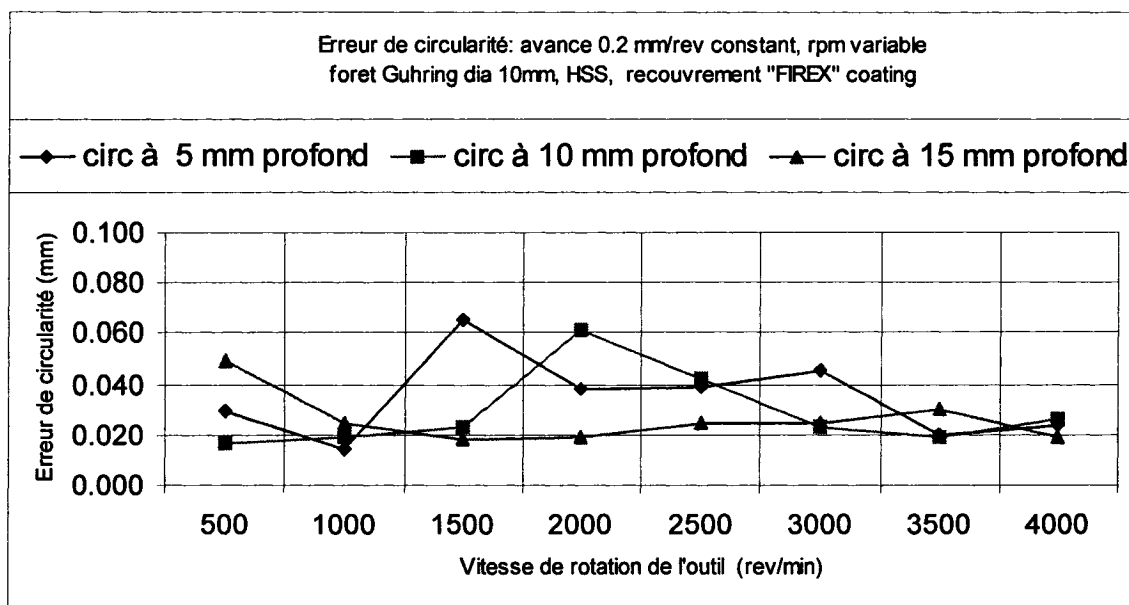
**Figure 3.5: Influence de la vitesse de rotation de l'outil sur la variation du diamètre, avance 0.1 mm/rev.**



**Figure 3.6: Influence de la vitesse de rotation de l'outil sur la variation du diamètre, avance 0.2 mm/rev.**



**Figure 3.7: Erreur de circularité. Perçage avec outil en acier rapide, avance 0.1 mm/rev, rpm variable.**



**Figure 3.8: Erreur de circularité. Perçage avec outil en acier rapide, avance 0.2 mm/rev, rpm variable.**

L'analyse des graphiques de variation du diamètre pour le perçage avec une avance de 0.1 et 0.2 mm/rev et vitesse de rotation de l'outil croissante de 500 rpm à 4000 rpm montre clairement que l'avance de 0.1 mm/rev n'est pas recommandable pour le perçage des CMM. Les erreurs de diamètre pour l'avance de 0.1 mm/rev sont plus grandes que pour l'avance de 0.2 mm/rev. Le diamètre a été mesuré avec un appareil de mesure en coordonnées de type Mytutoio.

Observations et conclusions partielles. Les 3 conclusions reliées au perçage avec des forets hélicoïdaux en acier rapide sont:

- l'avance influence "visiblement" l'usure, pour une avance de 0.1 mm/rev, l'usure est plus grande (la valeur du paramètre Vb) ainsi que plus "agressive";
- l'avance influence la précision de diamètre des trous, des erreurs plus grandes ont été obtenues pour une avance de 0.1 mm/rev comparativement à 0.2 mm/rev;
- le domaine compris entre 3000 et 4000 rpm offre des résultats de même ordre de grandeur pour la variation du diamètre et pour la circularité, donc peut être considéré comme une zone non sensitive pour la variation de l'avance.

En faisant la comparaison de l'usure des forets de type lame (spade drill) et des forets hélicoïdaux, on remarque la même tendance de "désintégration" de l'arête des outils donc on peut conclure que l'usure est dépendante du type de matériaux de l'outil (acier rapide).

### 3.3.3 Série de tests no 3. Influence de la vitesse de rotation et des avances sur le diamètre et la circularité des trous pour les forets en carbure solide

**Outil utilisé: foret en carbure solide produit par la compagnie Guhring**



**Figure 3.9: Foret en carbure solide.**

Le foret est de type autocentrant ayant un angle au point de 140 degrés avec une géométrie "renforcée". Dans le catalogue du 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 dernière génération avec granulations de 0.5 micron. Il peut travailler des alliages ayant un haut contenu en silicium (+10%). Il accepte une avance jusqu'à 0.4 mm/rev et une vitesse de coupe jusqu'à 260 m/min.

Les données trouvées dans la bibliographie ne couvrent pas un grand domaine d'avances et de vitesses de rotation. Pour connaître l'influence des paramètres de coupe sur la qualité de trou, une série de tests a été effectuée.

Afin de comprendre l'influence de l'avance et de la vitesse de rotation sur le diamètre de trou, des tests dans les conditions suivantes ont été effectuées:

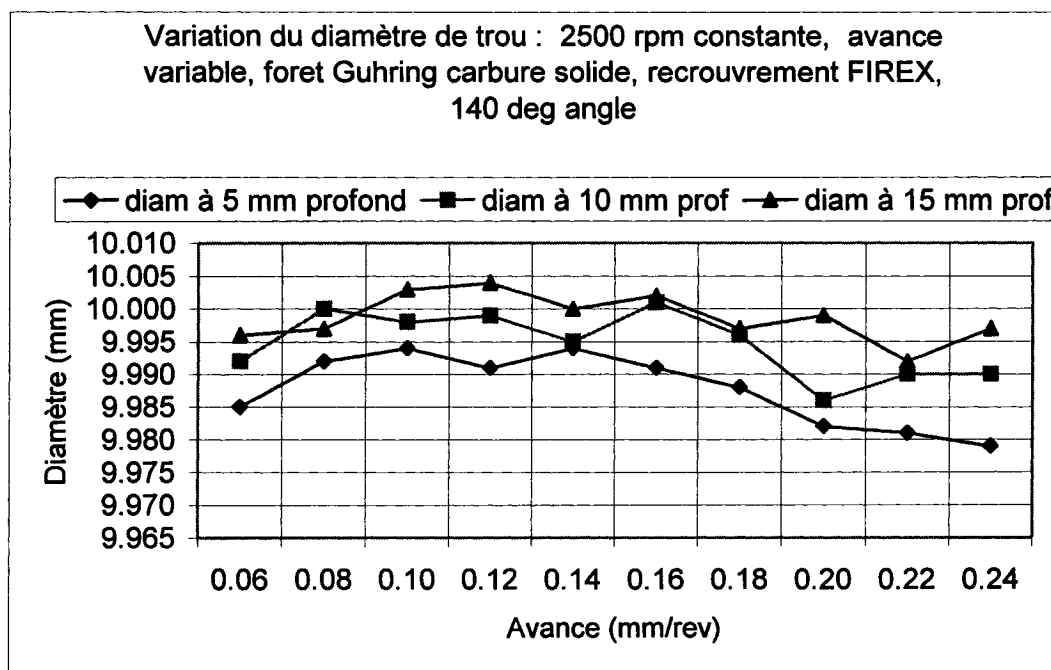
- vitesse de rotation de l'outil constante et avance variable;
- avance constante, vitesse de rotation de l'outil variable.

Pour évaluer la variation du diamètre et la variation de la circularité, un appareil de mesures en coordonnées de type Mitutoyo a été utilisé.

Ces tests préliminaires ont fourni les informations concernant la meilleure plage de vitesses et d'avances pour les tests d'usure des outils. Pendant ces tests, des mesures de

force de perçage, vibration et émission acoustique ont été effectuées. Afin de visualiser l'influence des paramètres de coupe, chaque test est présenté individuellement.

Le premier test a été effectué sur la machine Matsura avec une vitesse de rotation de l'outil de 2500 rpm en augmentant l'avance de 0.06 mm/rev jusqu'à 0.24 mm/rev avec un incrément de 0.02 mm/rev. À partir de 0.16 mm / rev, le diamètre du trou est plus petit que la valeur nominale, donc il faut augmenter la vitesse de rotation de l'outil, conformément aux recommandations de "troubleshooting" (résoudre les problèmes) des constructeurs des outils de coupe. Du point de vue pratique, la variation du diamètre est plus petite que 0.02 mm, ayant pratiquement le même ordre de grandeur que la tolérance du diamètre du foret. Donc, pour des applications industrielles, le perçage donnant des variations du diamètre de 0.01-0.02 mm est totalement acceptable (pour obtenir des diamètres de précision supérieure, les alésoirs, les barres d'alésage et les outils de calibrage (burnishing rolls) sont utilisés.



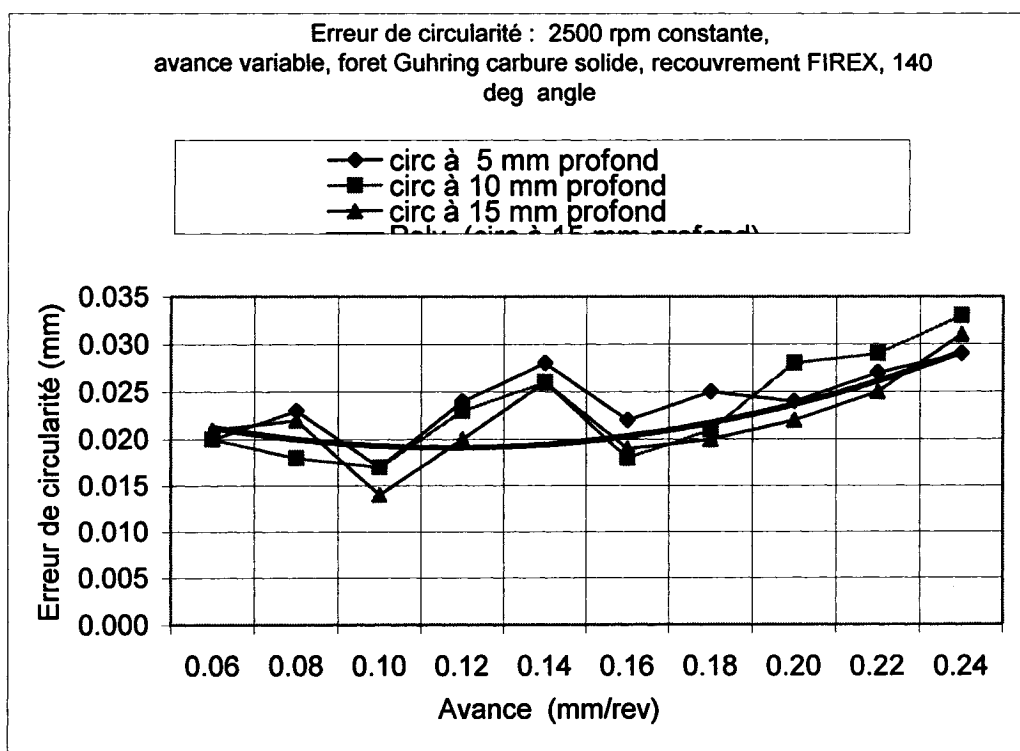
**Figure 3.10: Variation du diamètre en fonction de l'avance pour 2500 rpm constante**

La conclusion de ce test:

- pour 2500 rpm, l'avance n'est pas un facteur d'influence majeure du point de vue variation du diamètre;
- vu que les trous sont plus petits que le diamètre nominal, il faut augmenter la vitesse de rotation conformément aux prescriptions classiques du domaine, mais pour les CMM le concept ne s'applique pas .

Le diamètre des trous plus petite que le diamètre du foret s'explique par le "retour élastique" du matériau.

Pour évaluer l'influence de l'avance sur la circularité du trou, pour une vitesse de rotation de l'outil constante de 2500 rpm, le diagramme de dépendance est présenté à la figure 3.11.



**Figure 3.11: Erreur de circularité, 2500 rpm constante, avance variable.**

Du point de vue technologique, pour perçage à foret, une erreur de circularité moins de 0.02 mm est totalement acceptable. Donc, pour perçage à 2500 rpm constant, l'avance n'est pas un facteur d'influence majeure sur la précision des trous.

La conclusion de ce test:

La conclusion qui ressort de l'analyse du graphique de variation de la circularité par rapport à l'avance est qu'à partir de 0.2 mm/rev, la tendance de l'augmentation du diamètre est croissante, donc une limitation de l'avance s'impose (une première indication de regarder le comportement en perçage aux alentours de 0.2 mm/rev).

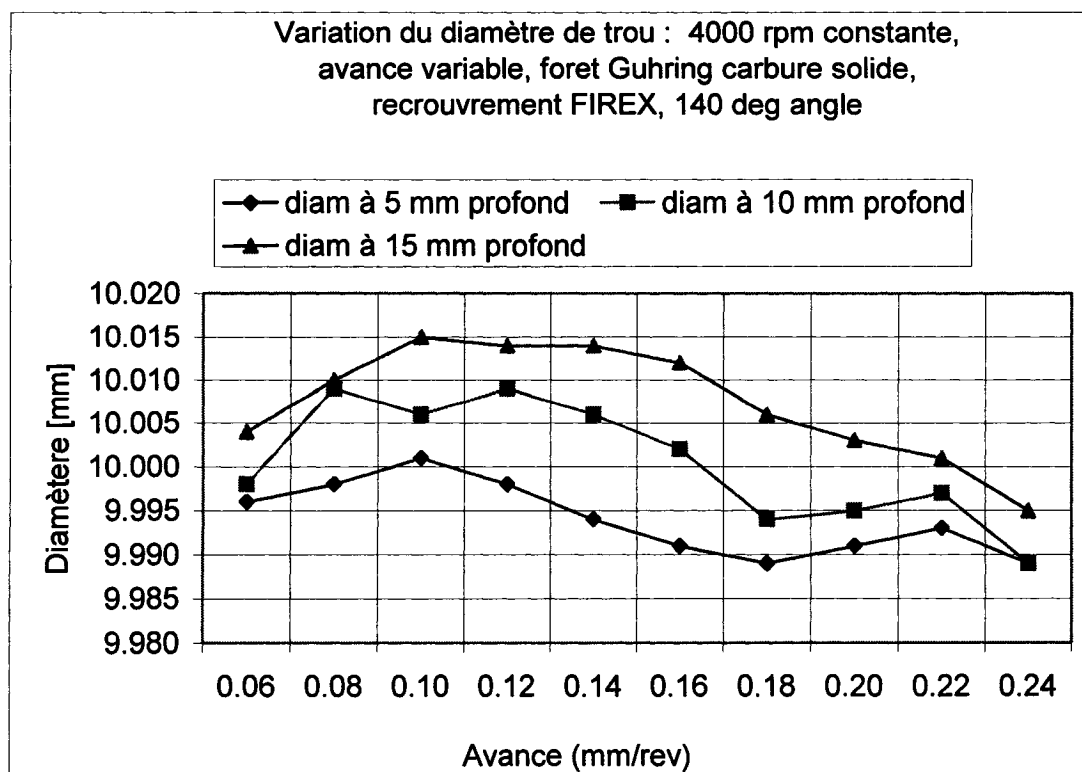
Le deuxième test a été effectué avec une vitesse de rotation de l'outil à 4000 rpm et une avance croissante de 0.06 mm/rev jusqu'à 0.24 mm/rev.

L'observation concernant ces conditions de coupe: pour 4000 rpm, la variation du diamètre de trou se trouve dans un écart de 0.025 mm, totalement acceptable pour perçage à foret hélicoïdal.

Pour une avance de 0.20 - 0.22 mm/rev, la valeur du diamètre s'approche du diamètre nominal.

Du point de vue méthodologie du perçage, une augmentation de la vitesse de rotation de l'outil s'impose et une avance de 0.2 mm/rev sera retenue.

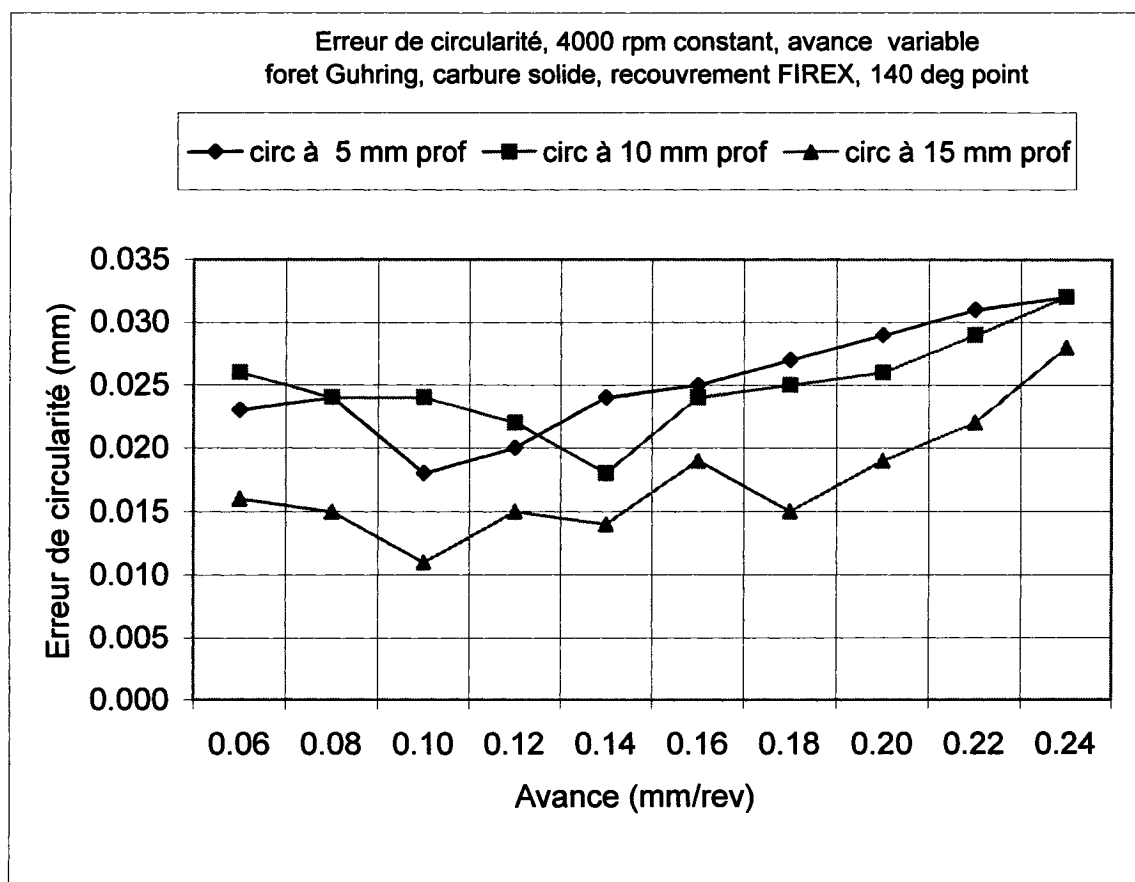




**Figure 3.12: Variation du diamètre par rapport à l'avance, 4000 rpm constante.**

Pour une vitesse de rotation de l'outil de 4000 rpm, l'augmentation de l'avance augmente l'erreur de circularité. Donc une restriction d'avance s'impose.

Du point de vue pratique, l'erreur de circularité se trouve dans une plage de 0.025 mm, totalement acceptable pour les applications industrielles.



**Figure 3.13: Erreur de circularité pour 4000 rpm constante et avance variable.**

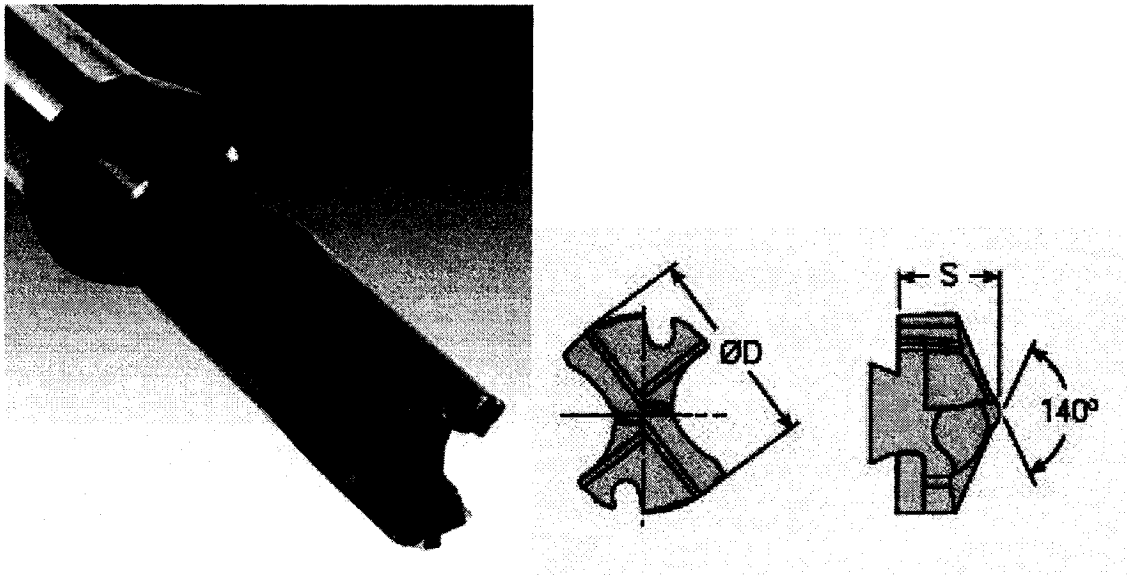
Les conclusions de ce test sont les suivantes:

- du point de vue pratique, le perçage à la vitesse constante de 4000 rpm n'est pas influencé visiblement par la variation de l'avance;
- 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.

Une comparaison entre les graphiques de l'erreur de circularité montre que l'erreur de circularité est dépendante de l'avance. À partir de 0.18 mm / rev, la tendance croissante de l'augmentation de l'erreur de circularité est similaire pour 2500 rpm et pour 4000 rpm (même les valeurs numériques sont proches). Donc, l'erreur de circularité est dépendante de l'avance et non de la vitesse de rotation de l'outil (pour cette gamme de valeurs).

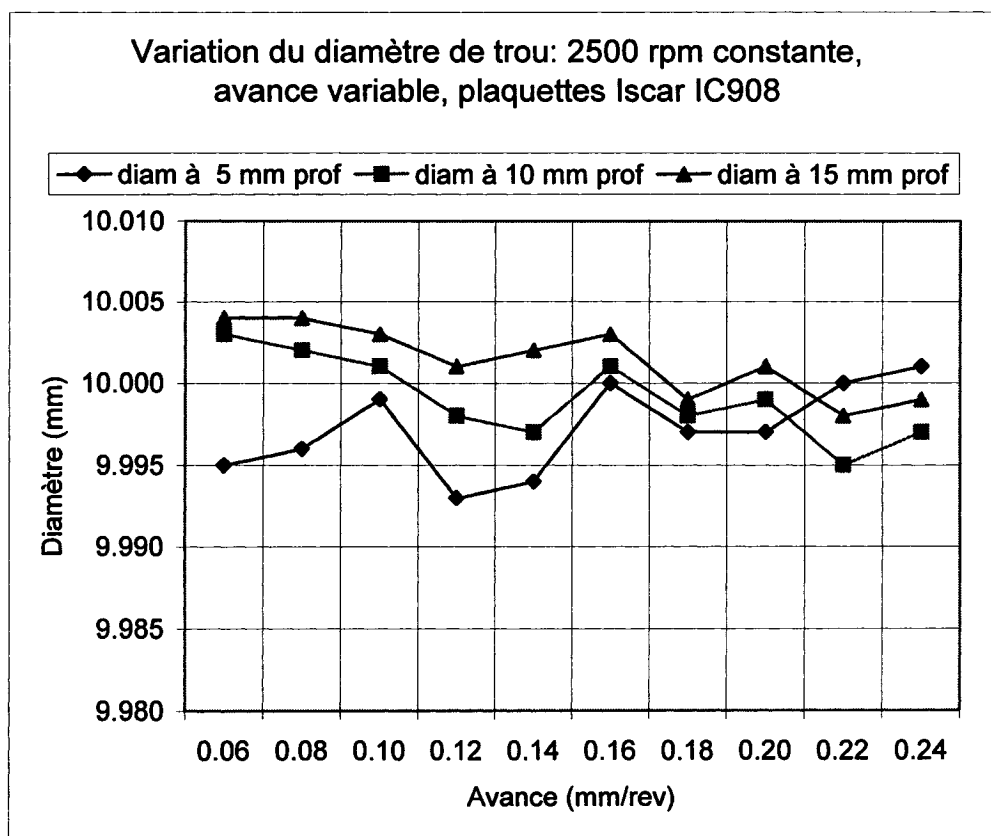
Le troisième test: outil Iscar à plaquette amovible. 2500 rpm constant et avance variable de 0.06 mm/rev à 0.24 mm/rev

Outil utilisé: foret à plaquette amovible produit par la compagnie Iscar



**Figure 3.14: Foret à plaquette amovible produit par la compagnie Iscar.**

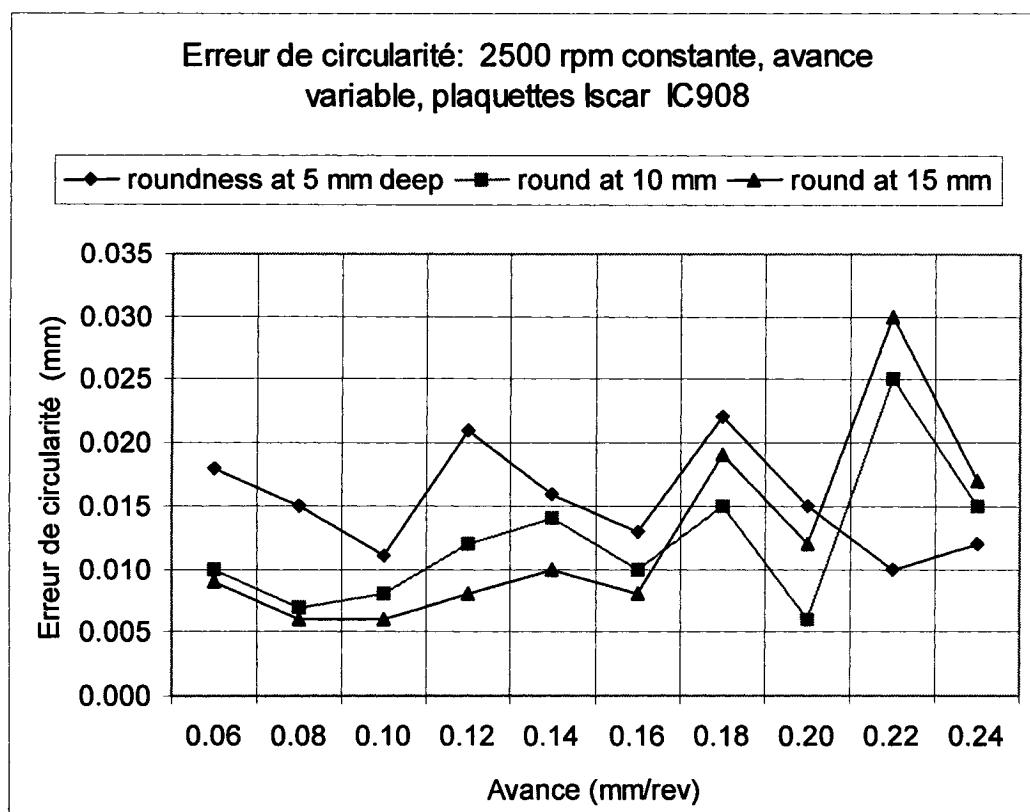
Le nuance (grade) des plaquettes choisies est IC908 avec un équivalent ISO : K20-K30. Le type de revêtement est TiAlN par la méthode PVD (physical vapor deposition). Le producteur recommande ce type de plaquette pour leur résistance à l'usure. Le grade IC908 élimine les arêtes rapportées et de plus présente une bonne résistance à la déformation thermique (conformément aux présentations faites par le producteur).



**Figure 3.15: Variation du diamètre pour 2500 rpm constante et avance variable.**

Pour une vitesse de rotation de l'outil de 2500 rpm et pour une avance variable à partir de 0.06 mm/rev jusqu'à 0.24 mm/rev, la variation du diamètre est présentée à la figure 3.15. À remarquer que pour une avance de 0.2 mm/rev, le diamètre obtenu est très proche du diamètre nominal.

La variation de la circularité de trou pour perçage avec des plaquettes Iscar pour une vitesse de rotation de l'outil de 2500 rpm et une avance variable est présentée à la figure 3.16.



**Figure 3.16: Erreur de circularité pour 2500 rpm constante et avance variable.**

Pour une avance de 0.2 mm /rev, l'erreur de circularité a une valeur "réduite" par rapport aux valeurs obtenues pour une avance plus grande que 0.2 mm/rev.

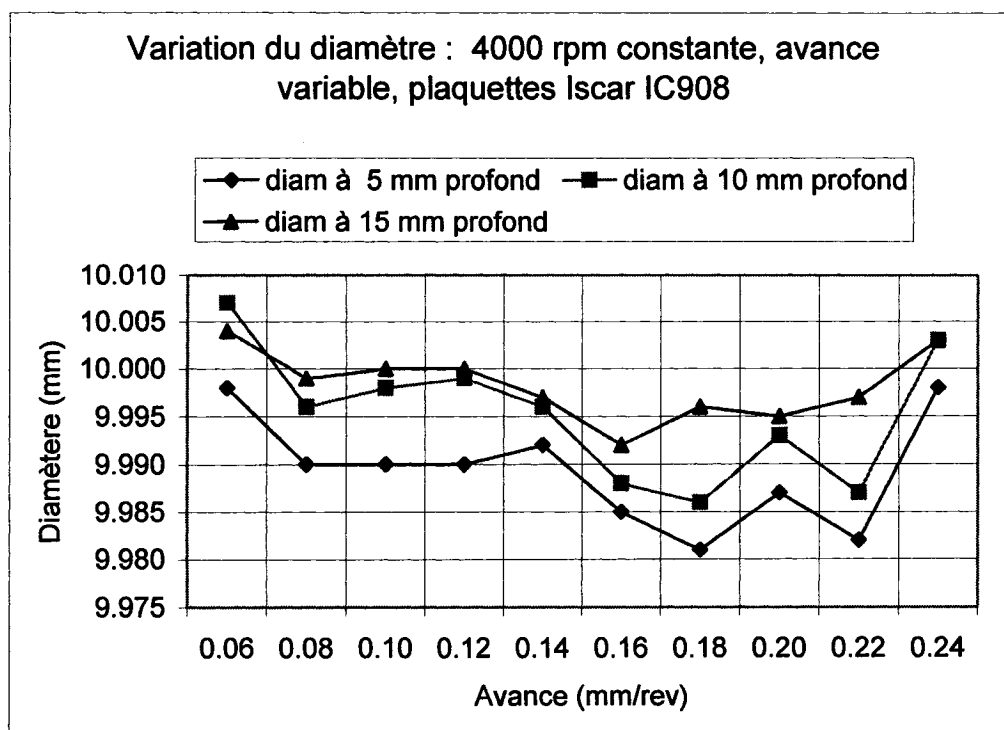
Conclusion de ce test:

- du point de vue pratique, la variation du diamètre et l'erreur de circularité se trouvent dans un écart de 0.02 (jusqu'à 0.03) mm, totalement acceptable pour des applications industrielles;

- du point de vue méthodologique, pour les prochains tests, l'avance aux alentours de 0.2 mm/rev représente un domaine à retenir.

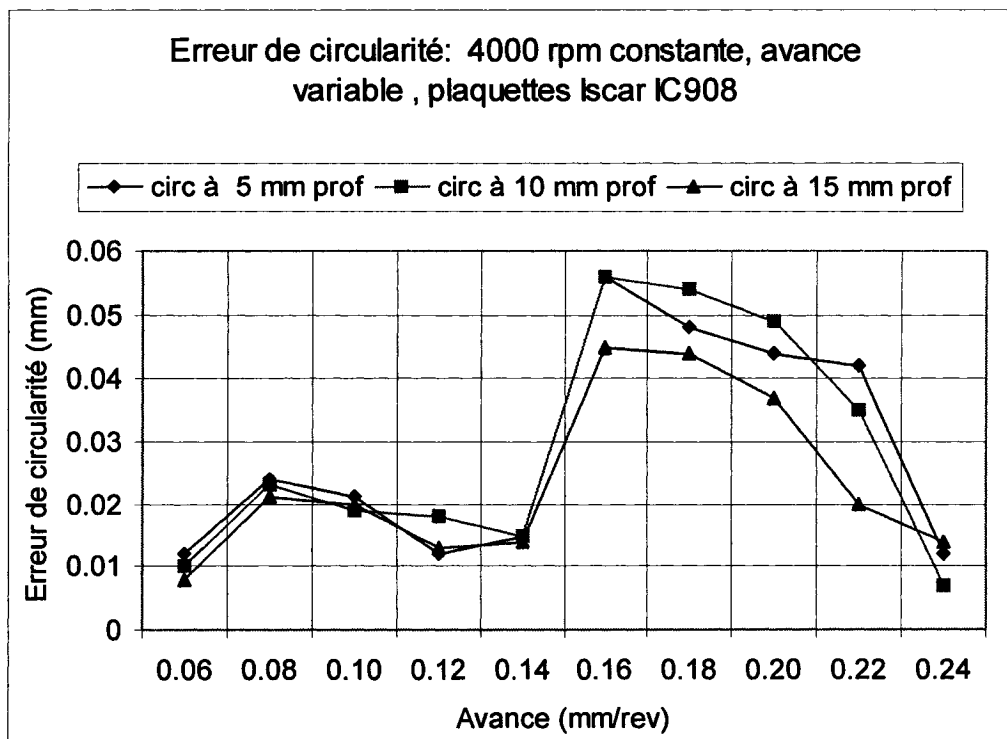
Le quatrième test: outil Iscar à plaquette amovible. 4000 rpm constant et avance variable.

En augmentant la vitesse de rotation de l'outil à 4000 rpm pour une avance variable de 0.06 mm/rev jusqu'à 0.24 mm/rev , le perçage avec des plaquettes ISCAR montre que le diamètre a une tendance croissante pour l'avance plus grande que 0.22 mm /rev.



**Figure 3.17: Variation du diamètre pour 4000 rpm constant et avance variable.**

La figure 3.17 présente la relation entre l'erreur de circularité et l'avance pour perçage à 4000 rpm constante et avance variable.



**Figure 3.18: Erreurs de circularité pour 4000 rpm constante et avance variable.**

L'analyse de la figure 3.18 montre que l'avance devrait être au moins 0.2 mm/rev. Les valeurs de l'avance plus petites que 0.14 mm/rev montrent une erreur de circularité très réduite, donc sont des valeurs à retenir pour les opérations de finition. Pour dégrossissage, le perçage avec des avances plus petites que 0.2 mm/ rev use rapidement les outils (conformément aux résultats des tests faits pour le présent mémoire).

Les conclusions de ce test:

- du point de vue pratique, le perçage à la vitesse constante de 4000 rpm, pour les applications industrielles, l'avance n'influence visiblement 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 - 0.24 mm /rev.

Regroupement des observations pour le perçage à 2500 et 4000 rpm constante et avance variable:

Le perçage avec des forets en carbure solide et avec des forets à plaquette amovible à 2500 et 4000 rpm constante et avance variable n'est pas influencé du point de vue industriel par la variation de l'avance. Les variations du diamètre et de circularité se retrouvent dans un écart approximatif de 0.03 mm, totalement acceptable pour le perçage industriel.

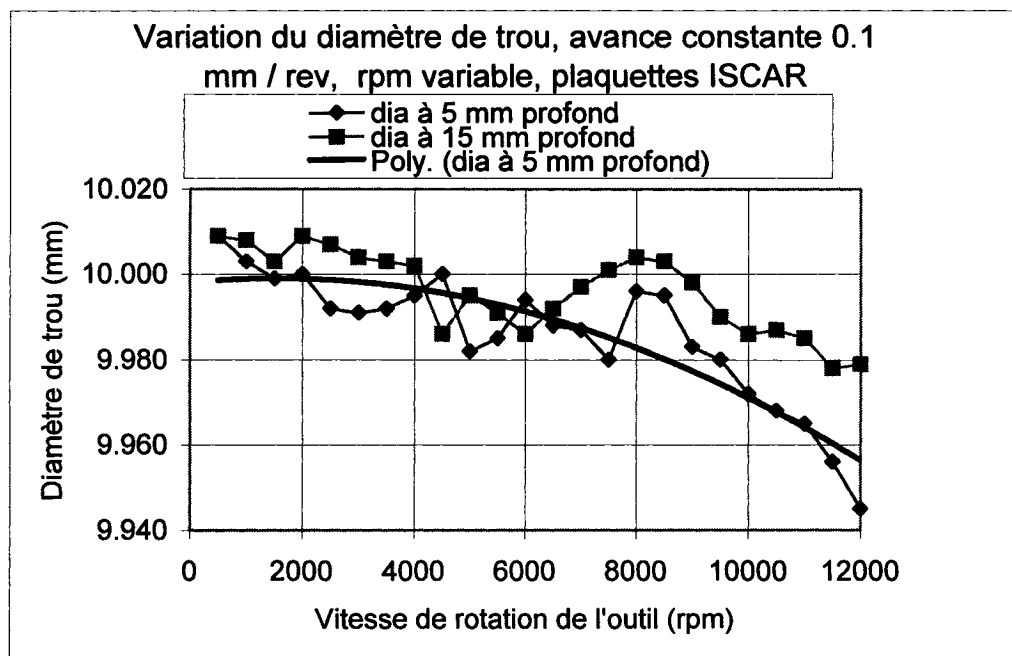
Du point de vue "détails méthodologiques de perçage", une augmentation de la vitesse de rotation de l'outil s'impose, vu les diamètres plus petits que la valeur nominale ainsi qu'une limitation de l'avance à 0.2 mm/rev.

Afin d'alléger le contenu du présent mémoire, des résultats obtenus pour différentes conditions de coupe seront présentés où s'imposent des remarques à faire. Puis seront présentés les résultats comparatifs des tests de perçage pour les outils en carbure solide et les outils avec des plaquettes amovibles.

Test no 5. Perçage avec avance constante de 0.1 mm/rev et vitesse de rotation de l'outil croissante jusqu'à 12 000 rpm. Le test s'est déroulé dans le laboratoire de l'École de Technologie Supérieure sur une machine Mori Seiki.

Pour une avance de 0.1 mm /rev et une vitesse de rotation de l'outil jusqu'à 12000 rpm, la variation du diamètre en perçage avec des plaquettes amovibles sera présentée à la figure 3.19.





**Figure 3.19: Variation de diamètre, avance 0.1 mm/rev constante, rpm variable.**

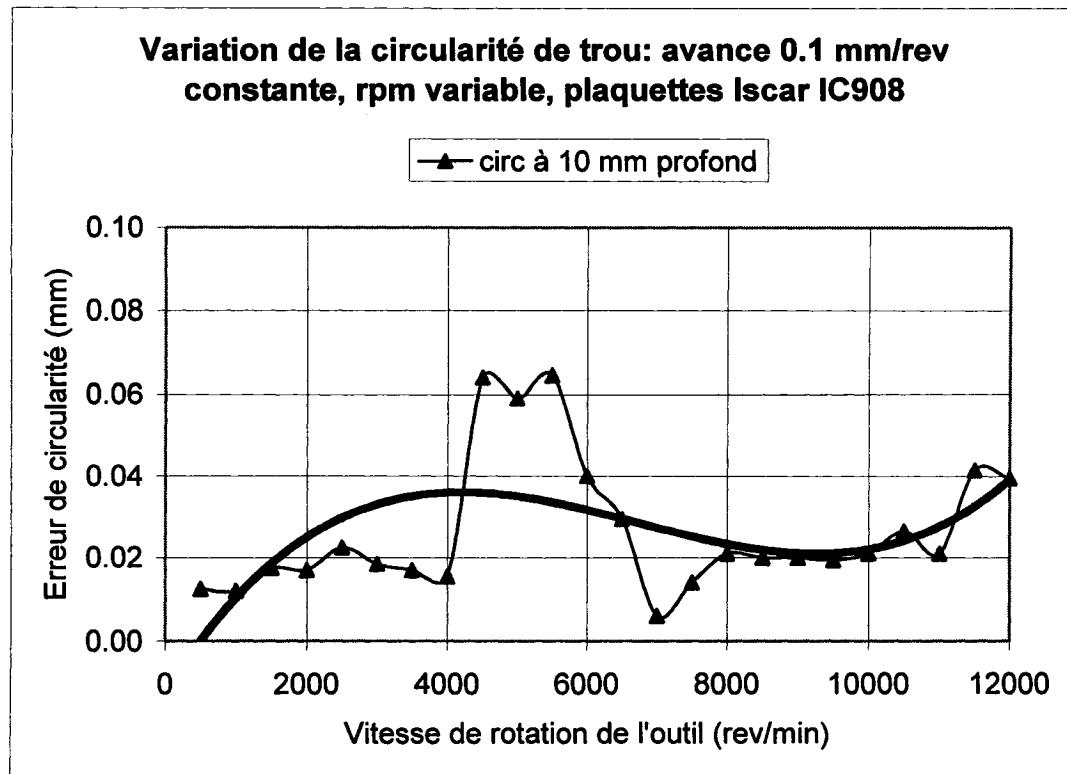
Pour une avance de 0.1 mm / rev constante et pour une vitesse de rotation de l'outil variable, pour 8000 rpm, le diamètre obtenu est proche de la valeur nominale. Pour des vitesses de rotation de l'outil plus grandes que 8000 rpm, le diamètre est plus petit que le diamètre nominal (10 mm).

Les observations sur ce test:

- du point de vue pratique, une variation du diamètre de 0.04 mm peut être considérée comme une restriction technologique;
- du point de vue méthodologique, jusqu'à 9000 rpm, l'avance n'influence visiblement pas la variation du diamètre (voir les figures 3.19, 3.21, 3.23).

L'influence de la vitesse de rotation de l'outil sur l'erreur de circularité, en perçage avec des plaquettes Iscar, pour une avance constante, est présentée à la figure 3.33.

Pour alléger la présentation, seulement la courbe de variation pour la valeur moyenne de la profondeur (à 10 mm) est présentée. La courbe de tendance a été ajoutée pour mieux visualiser la variation de l'erreur de circularité.



**Figure 3.20: Variation de la circularité, avance 0.1 mm/rev constante, rpm variable.**

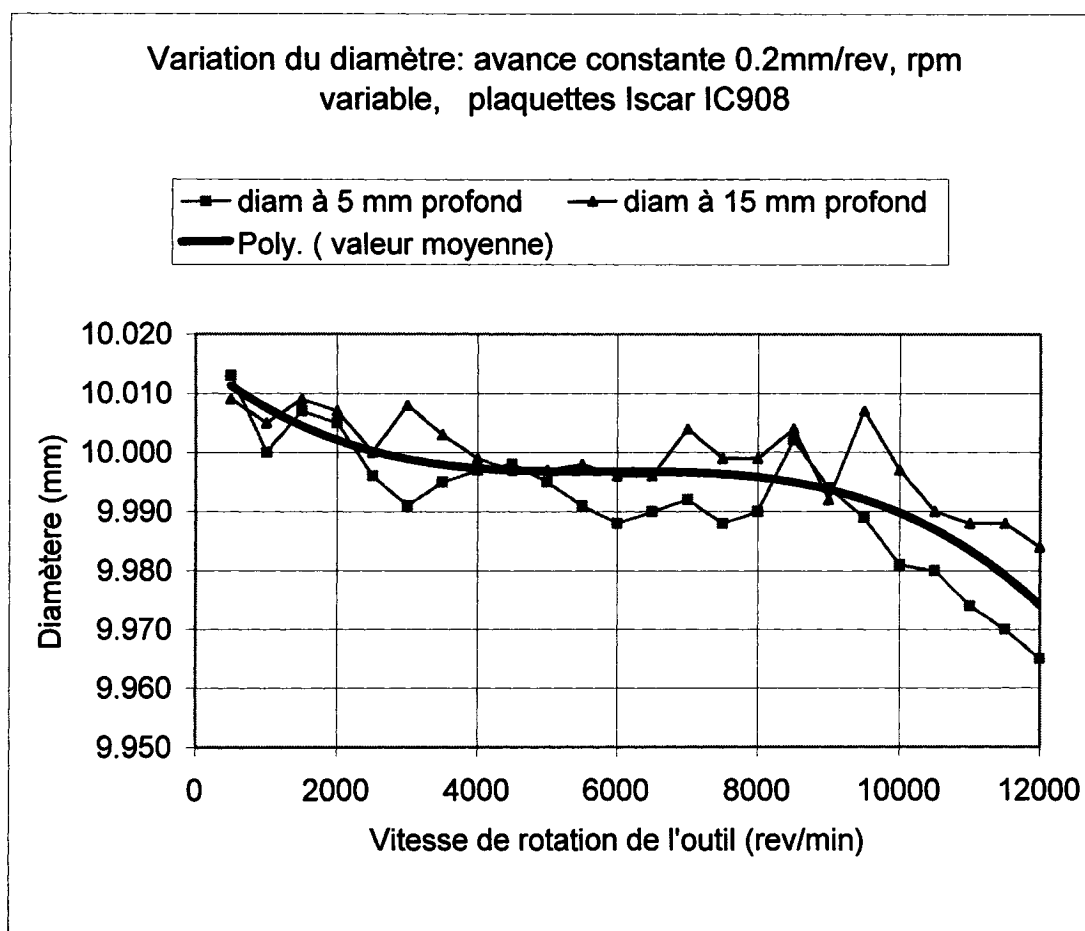
La courbe de tendance est déterminée avec le logiciel Excell, en choisissant le modèle qui offre la valeur  $R^2$  la plus grande (Songmene 2000).

La conclusion du test no 5:

La plage aux alentours de 8000 rpm offre des résultats acceptables, donc sera retenue pour les prochains tests.

Test no 6. Perçage avec avance constante de 0.2 mm/rev et vitesse de rotation de l'outil croissante jusqu'à 12 000 rpm. Le test s'est déroulé dans le laboratoire de l'École de Technologie Supérieure sur une machine Mori Seiki.

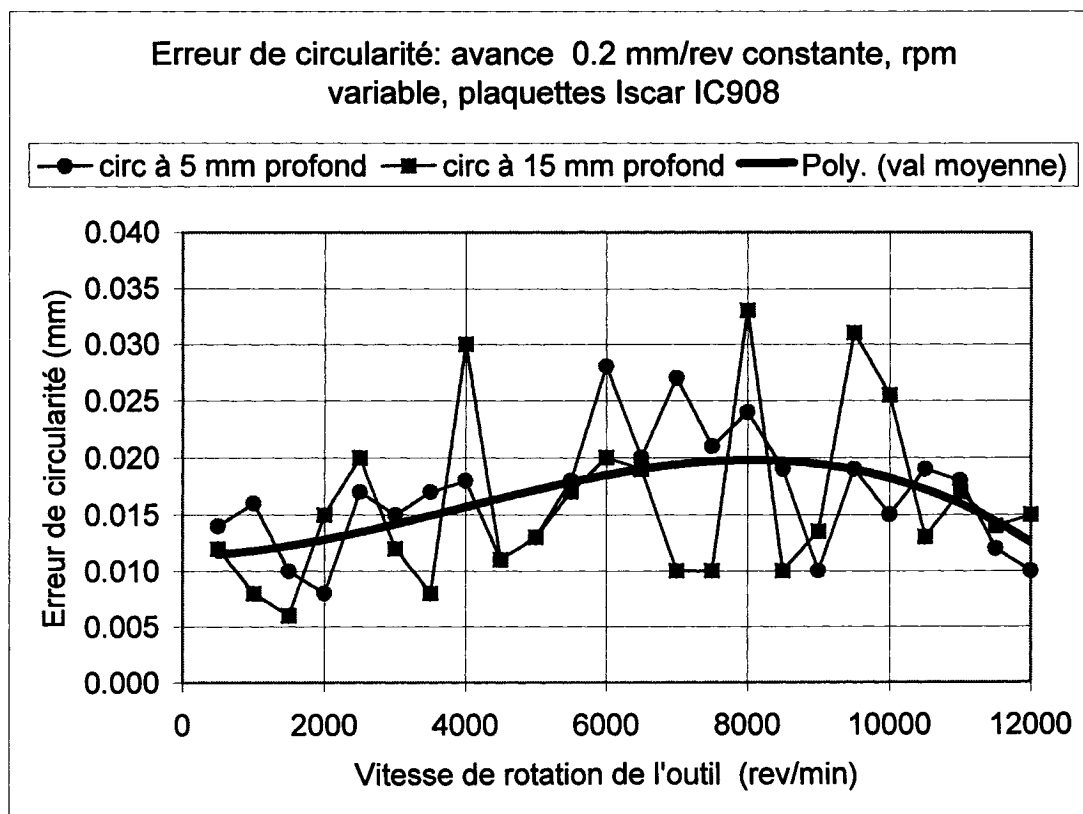
Pour connaître l'influence de la vitesse de rotation sur la variation du diamètre pour une avance constante de 0.2 mm/rev, les résultats des tests effectués sont présentés à la figure 3.21.



**Figure 3.21: Variation du diamètre, avance constante 0.2 mm/rev, rpm variable.**

Les résultats présentés à la figure 3.21 montrent une valeur moyenne du diamètre de trou près de la valeur nominale de 10 mm, aux alentours de 6000 rpm. Pour des valeurs plus grandes que 8000 rpm, pour une avance de 0.2 mm/rev, le diamètre obtenu est plus petit que le diamètre nominal de 10 mm, vu l'influence de la température dans la zone de coupe suivi du "retour" du matériau .

L'influence de la vitesse de rotation de l'outil sur la circularité du trou pour une avance constante de 0.2 mm/rev est présentée à la figure 3.22.



**Figure 3.22: Erreur de circularité, avance 0.2 mm/rev, rpm variable.**

Sur le graphique présenté à la figure 3.22 a été ajoutée la courbe de tendance pour mieux visualiser la tendance de la valeur moyenne.

Remarque sur le test de perçage avec une avance constante de 0.2 mm /rev et rpm variable:

- du point de vue pratique, la vitesse de rotation n'influence pas la variation du diamètre jusqu'à 10 000 rpm;
- concernant la variation de l'erreur de circularité sur tout le domaine des tests jusqu'à 12 000 rpm , l'avance n'est pas un facteur d'influence majeur.

Test no 7. Perçage avec avance constante de 0.3 mm/rev et vitesse de rotation de l'outil croissante jusqu'à 12 000 rpm. Le test s'est déroulé dans le laboratoire de l'École de Technologie Supérieure sur une machine Mori Seiki.

Des tests supplémentaires ont été faits pour les plaquettes ISCAR pour une avance de 0.3 mm/rev et une vitesse de rotation de l'outil croissante à partir de 4500 rpm jusqu'à 12000 rpm. Les résultats des tests pour l'étude de la variation du diamètre sont présentés à la figure 3.23.

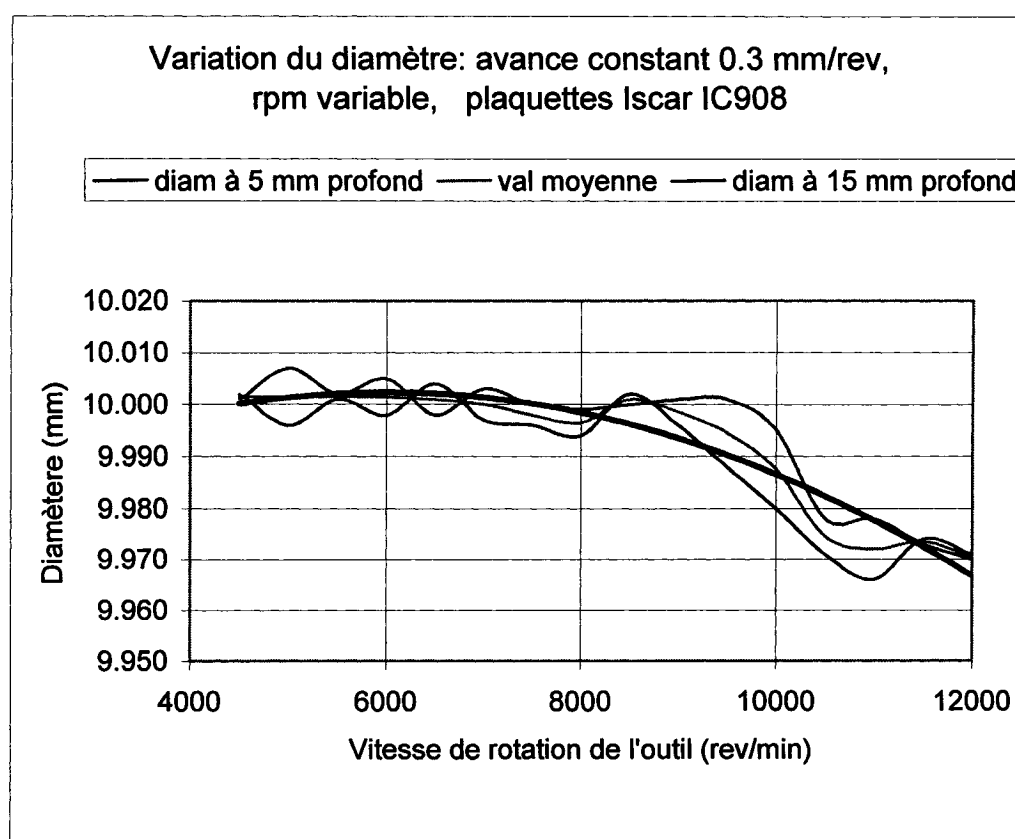


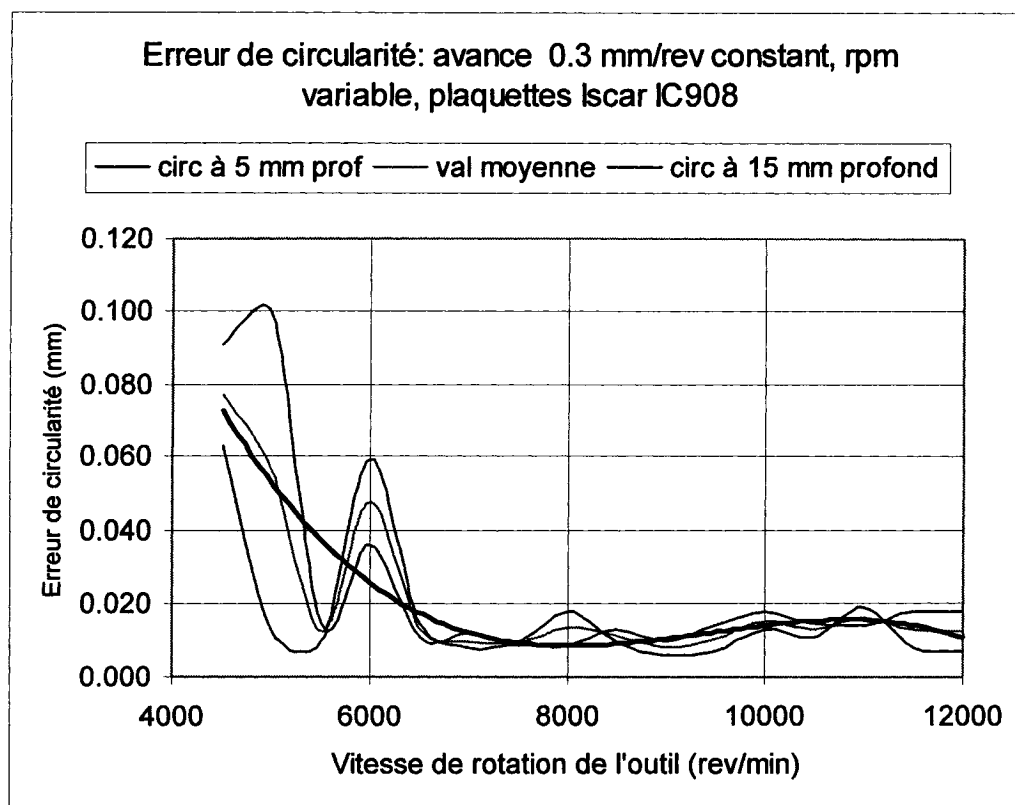
Figure 3.23: Variation de diamètre, avance 0.3 mm/rev constante, rpm variable.

Les observations sur le test no 7:

- du point de vue pratique (industriel) jusqu'à 1000 rpm, la vitesse de rotation n'influence pas la variation du diamètre;
- du point de vue méthodologique, à partir de 8000 rpm, on constate une tendance de réduction du diamètre.

L'étude comparative de la variation du diamètre pour les trois avances 0.1, 0.2 et 0.3 mm montre qu'à partir de 8000 rpm jusqu'à 12000 rpm, le diamètre est plus petit que la valeur nominale de 10 mm.

Les erreurs de circularité des trous pour perçage avec une avance constante de 0.3 mm/rev, avec des plaquettes Iscar, et une vitesse de rotation de l'outil croissante à partir de 4500 rpm jusqu'à 12000 rpm, sont présentées à la figure 3.24.



**Figure 3.24: Erreurs de circularité, avance 0.3 mm/rev constante, rpm variable.**

Les données présentées à la figure 3.24 indiquent une "réduction" de l'erreur de circularité à partir de 7000 rpm. La conclusion des observations présentées ci-haut est que dans le domaine situé entre 6000 et 8000 rpm et pour une avance située entre 0.20 et 0.22 mm /rev, les résultats sont les meilleurs et pour ce domaine seront continués les tests afin d'étudier l'usure de l'outil et d'enregistrer la variation de la force de coupe  $F_z$  ainsi que l'émission acoustique et le moment résistant à la broche.

Dans le chapitre "conclusions" seront présentés des graphiques comparatifs pour différentes conditions de coupe afin de faciliter la visualisation globale des résultats.

### **3.4. Série de tests no 4: Influence de la vitesse de rotation des outils et du liquide de coupe dans l'apparition des dislocations**

L'objectif de cette série de tests est d'établir l'influence de la vitesse de rotation de l'outil et l'utilisation du liquide de coupe sur la dislocation des particules. Des tests ont été effectués pour les deux types d'outils: foret en carbure solide et foret avec plaquette amovible, diamètre de 10 mm. La présentation de ces outils de coupe a été faite dans le chapitre 2.

Les tests ont été effectués dans le laboratoire de l'École de Technologie Supérieure à Montréal sur la machine Mori Seiki.

Des tests pour une vitesse de coupe croissante à partir de 125 m/min jusqu'à 377 m/min (ou à partir de 4000 rpm jusqu'à 12000 rpm) ont été effectués. Les tests ont été faits pour une avance constante de 0.2 mm/rev.

Synthèse des tests effectués:

- Foret en carbure solide, avance 0.2 mm/rev, test à 4000, 6000, 8000, 10000, 12000 rpm, une série de tests pour travail à sec et une série de tests pour travail avec liquide de coupe.
- Foret à plaquette, avance 0.2 mm/rev, test à 4000, 6000, 8000, 10000, 12000 rpm, une série de tests pour travail à sec et une série de tests pour travail avec liquide de coupe.

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 le matériel s'enregistre une zone



d'une très faible instabilité). Les profilogrammes ont été tracés avec un appareil Mitutoyo SurfTest SJ-301.

- Après les tests préliminaires d'évaluation de l'ordre de grandeur de la rugosité, la longueur de référence de l'évaluation (cutoff) de 0.2 mm a été établie. L'appareil de mesure de rugosité va enregistrer sur une longueur de 3 fois la longueur de référence.
- Sur la même image, les résultats du perçage à sec et du perçage avec liquide de coupe pour faciliter l'interprétation des résultats, sont présentés.
- Pour avoir des résultats sans l'influence de l'usure de l'outil, les forets ont été changés après chaque trois (4000, 6000, 8000 rpm) , respectivement 2 trous (10000 et 12000 rpm).

La bibliographie étudiée et synthétisée dans le premier chapitre ne présente pas d'études comparatives sur une plage large de paramètres de travail concernant l'influence des paramètres de coupe sur les dislocations. Les prélèvements de l'état du profil ont été faits en plusieurs endroits pour chaque trou afin de trouver des endroits avec des dislocations.

Donc, le travail fait dans le présent mémoire, pour couvrir un domaine large des vitesses de coupe et de comparer deux outils différents en travaillant à sec et avec du liquide de coupe, représente un des points d'originalité.

Pour visualiser l'influence des différents paramètres sur la nature des dislocations, des profilogrammes comparatifs sont présentés. Sur les images présentées, des annotations en langue anglaise seront visibles parce qu'une partie des résultats a été fournie à Auto 21 pour sa soutenance financière du projet.

Dans les figures suivantes sont présentés les résultats pour foret en carbure solide : perçage à sec et avec du liquide de coupe.

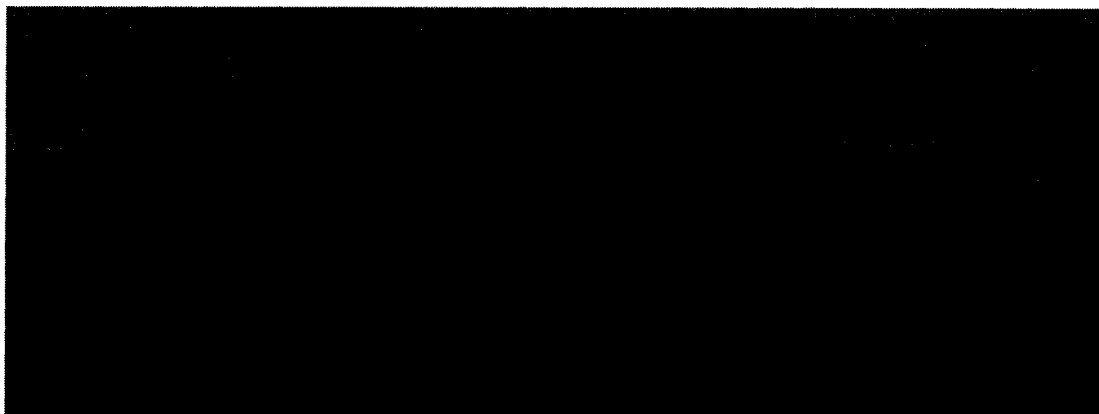


Figure 3.25: Profilogramme de la surface, 4000 rpm, avance 0.2mm/rev , foret carbure solide.

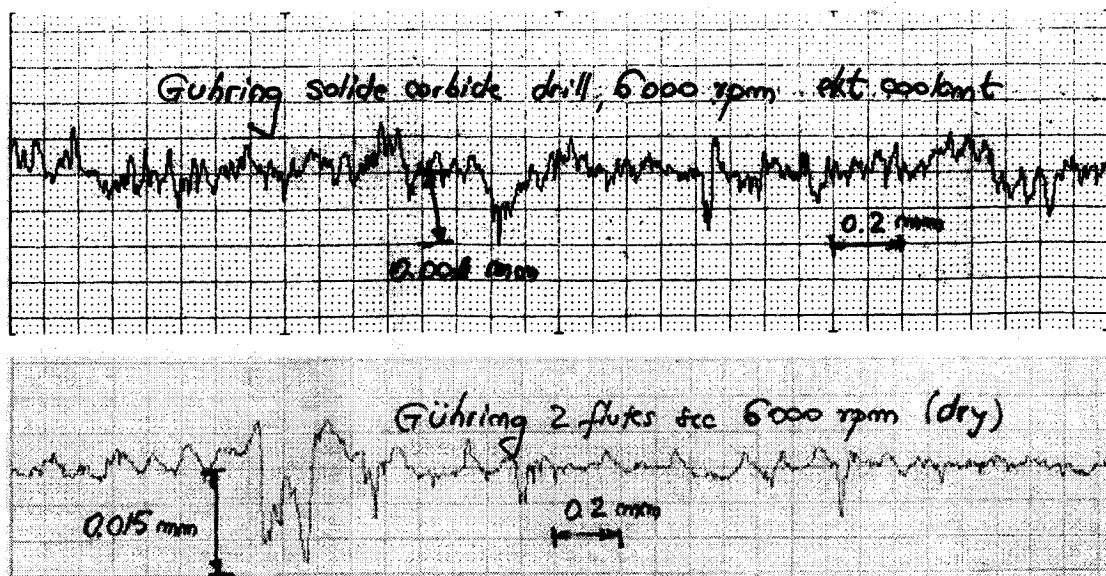


Figure 3.26: Profilogramme de la surface, 6000 rpm, avance 0.2mm/rev, foret carbure solide.

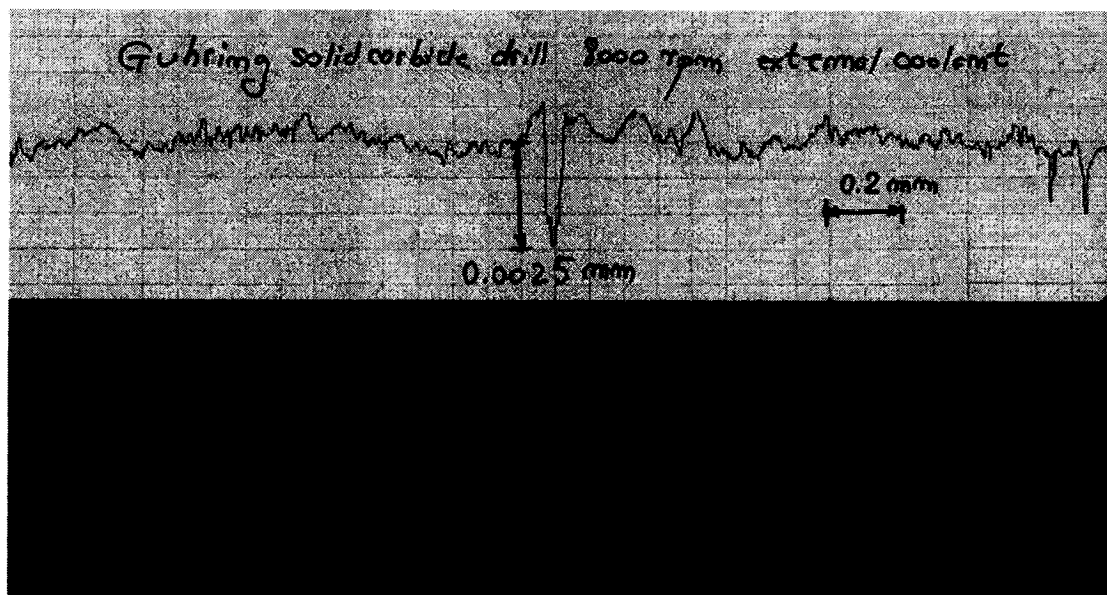


Figure 3.40: Profilogramme de la surface, 8000 rpm, avance 0.2mm/rev, foret carbure solide.

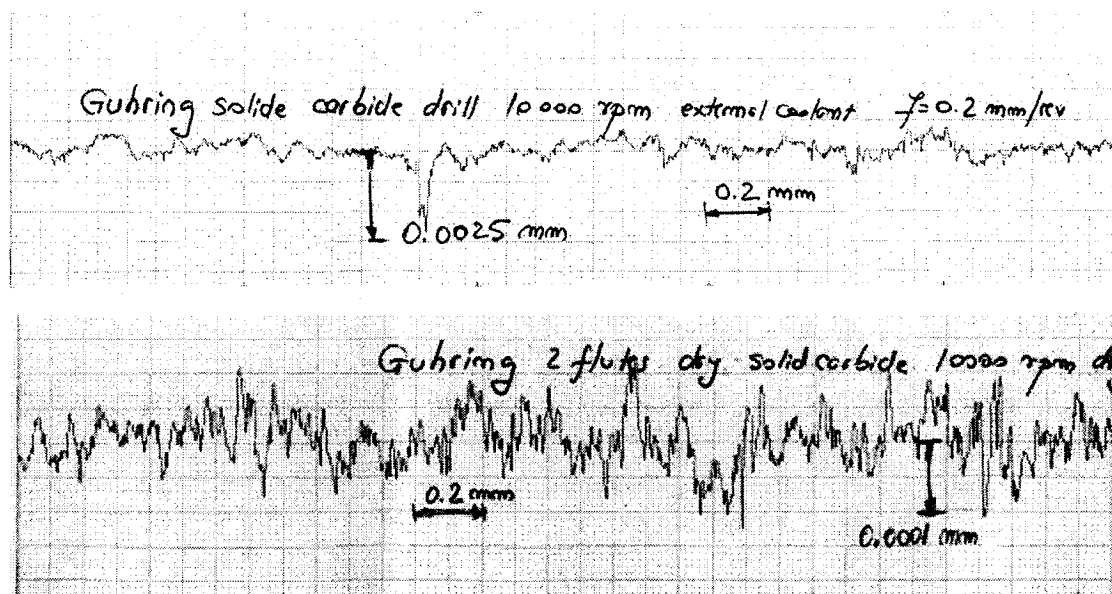
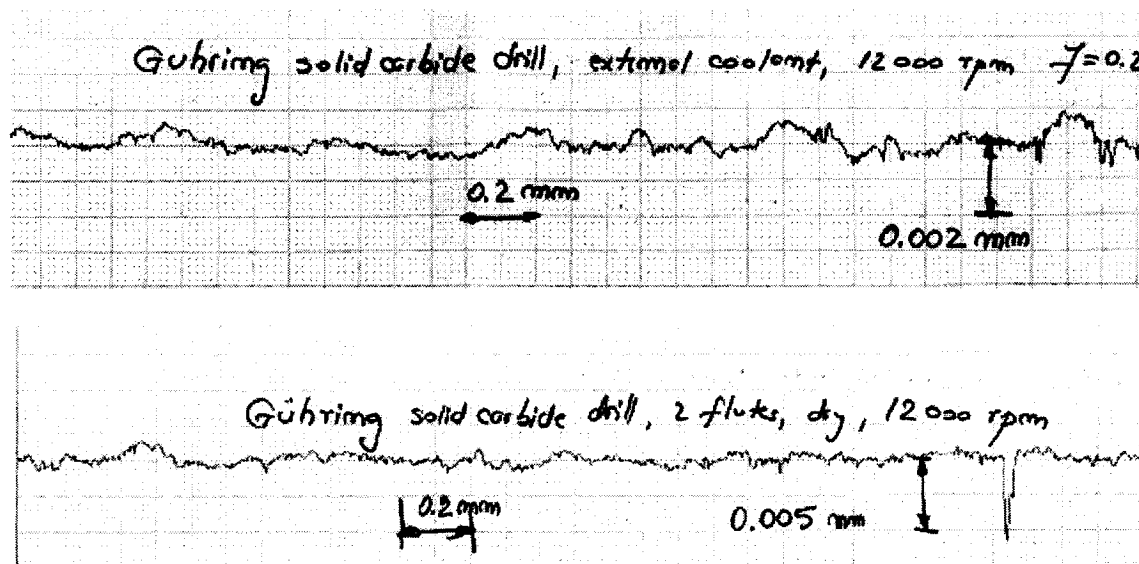


Figure 3.41: Profilogramme de la surface, 10000 rpm, avance 0.2mm/rev, foret carbure solide.



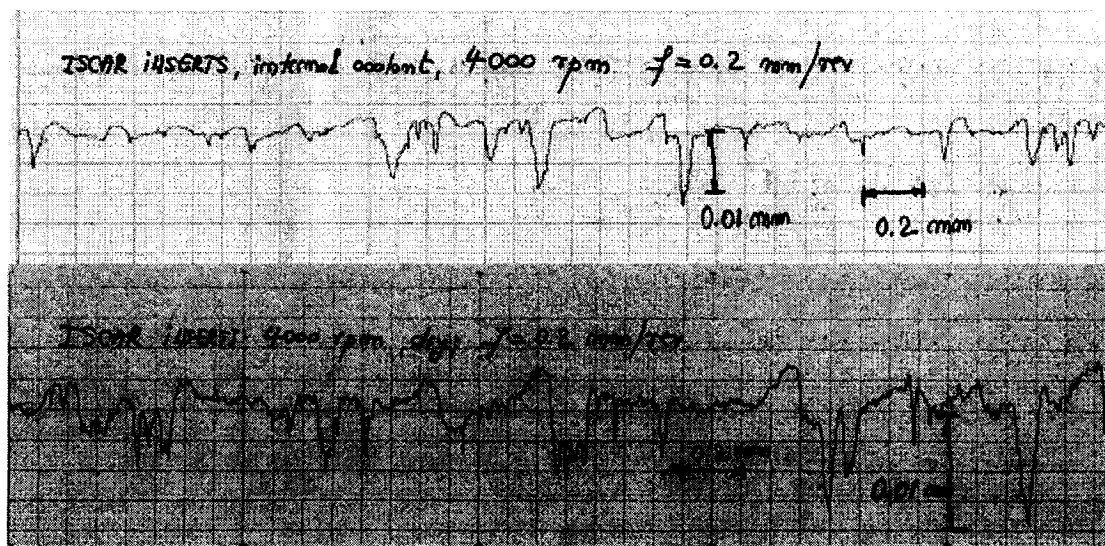
**Figure 3.42:** Profilogramme de la surface, 12000 rpm, avance 0.2mm/rev, foret carbure solide.

Remarques sur la série des tests avec foret en carbure solide:

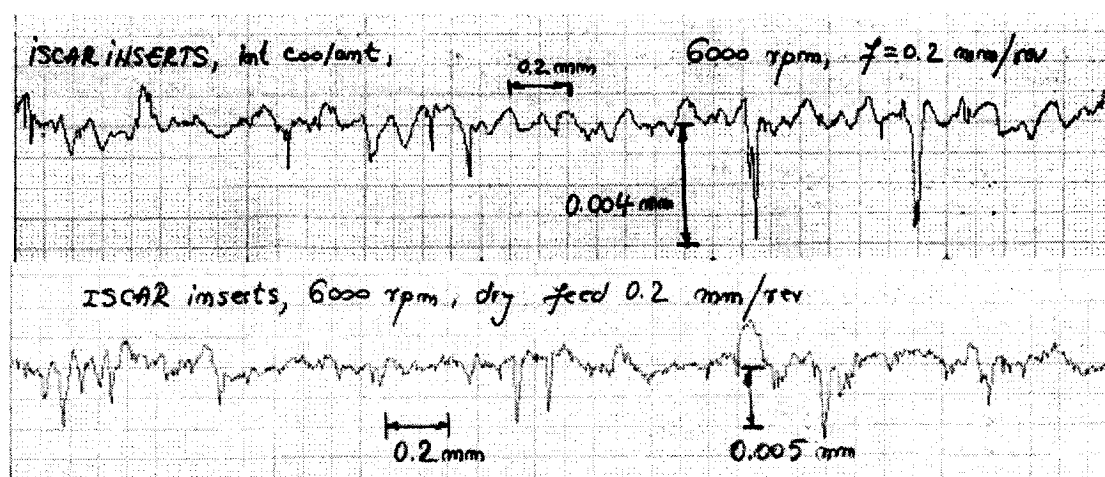
En analysant les profilogrammes présentés ci-haut, on peut conclure que la variation croissante de la vitesse de coupe (pour une avance constante) et la présence ou l'absence du liquide de coupe n'est pas un paramètre restrictif dans le choix de la vitesse de coupe. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la qualité de la surface augmente du point de vue uniformité des aspérités. Le travail à sec présente une légère supériorité sur l'état de la surface par rapport au travail avec du liquide de coupe.

Dans les figures suivantes sont présentés les tests effectués avec des forets ayant des plaquettes amovibles, produites par la compagnie Iscar.

Les tests ont été effectués avec une vitesse de coupe entre 125 m/min ou 4000 rpm et 376 m/min ou 12000 rpm. Le diamètre du foret pour toutes les expérimentations a été de 10 mm.



**Figure 3.43: Profilogramme de la surface, 4000 rpm, avance 0.2mm/rev, foret à plaquette amovible.**



**Figure 3.44: Profilogramme de la surface, 6000 rpm, avance 0.2mm/rev, foret à plaquette amovible.**

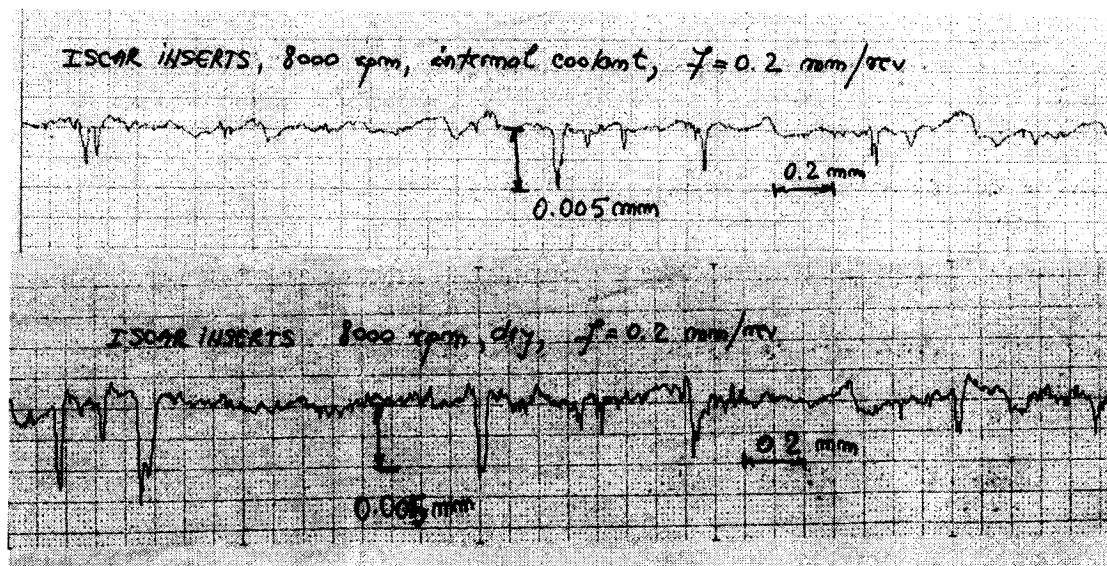


Figure 3.45: Profilogramme de la surface, 8000 rpm, avance 0.2mm/rev, foret à plaquette amovible.

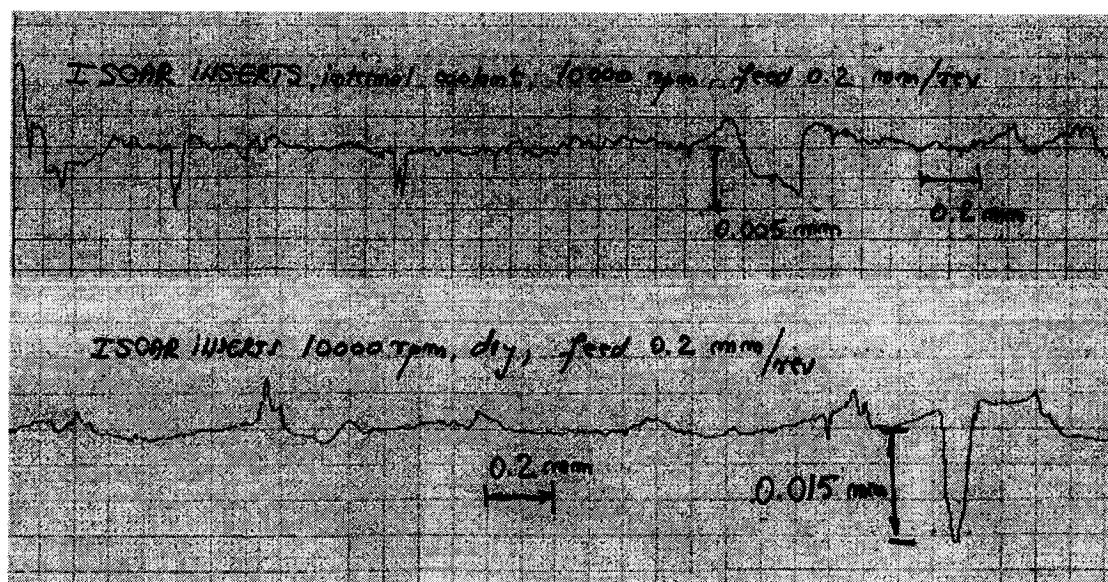
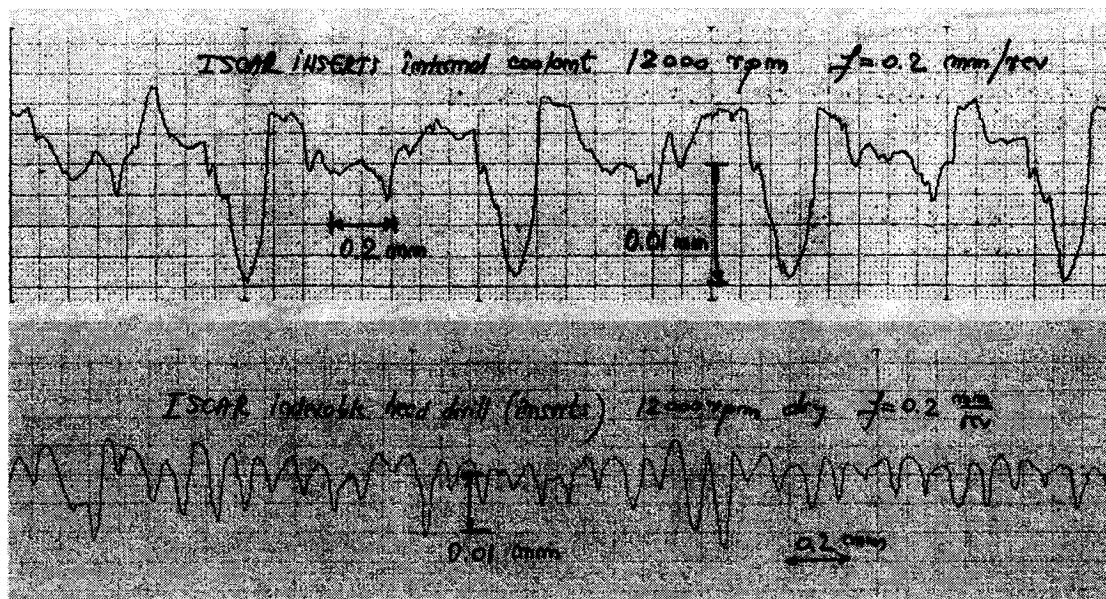


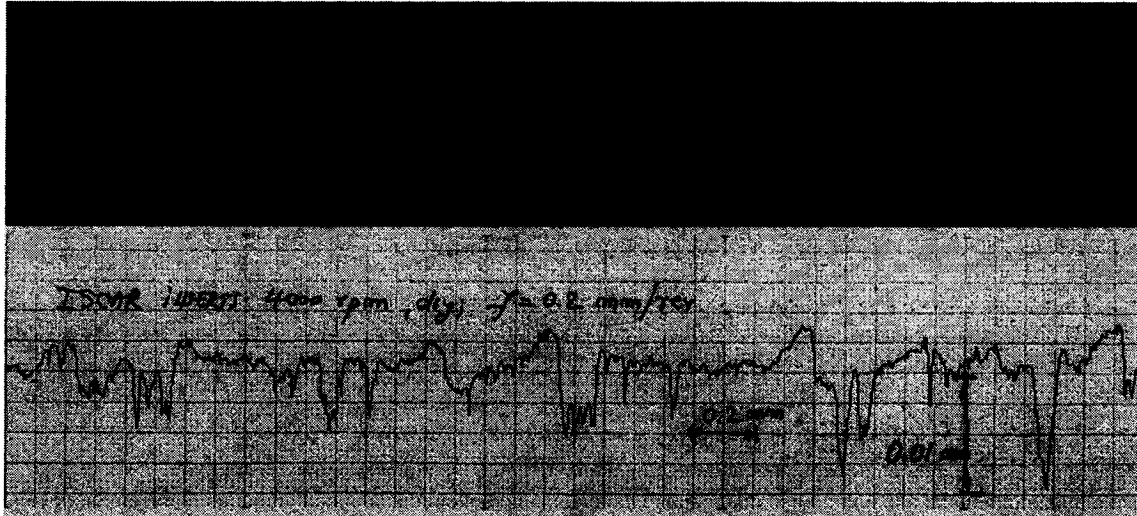
Figure 3.46: Profilogramme de la surface, 10000 rpm, avance 0.2mm/rev, foret à plaquette amovible.



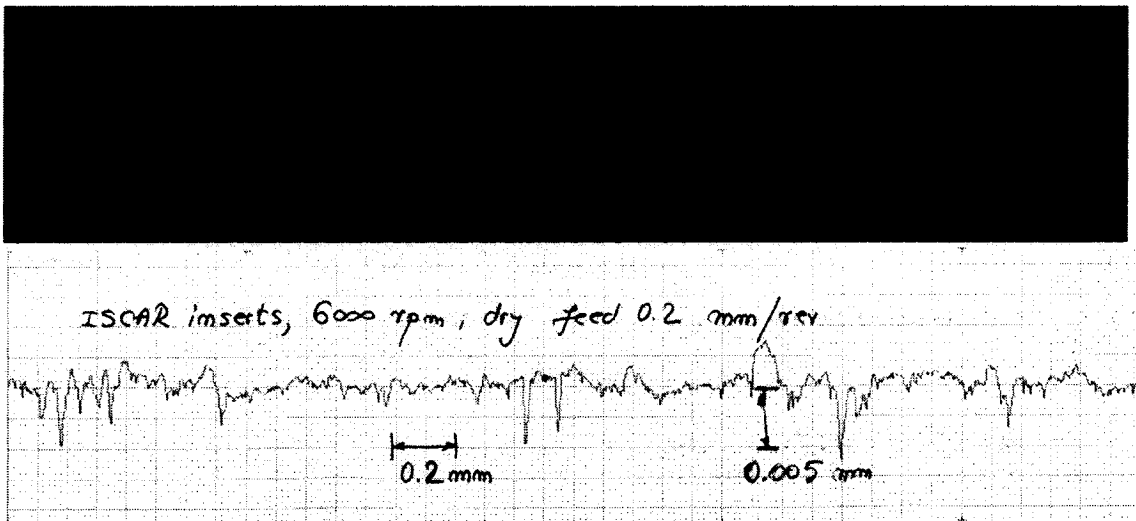
**Figure 3.47: Profilogramme de la surface, 12000 rpm, avance 0.2mm/rev, foret à plaquette amovible.**

L'analyse de profilogrammes montre qu'entre la vitesse de rotation de l'outil de 4000 et 10000 rpm des variations significatives pour les dislocations ne sont pas enregistrées. Pour la vitesse de rotation de l'outil de 12000 rpm, la coupe a été instable. Du point de vue dislocations des particules, pour les forets à plaquettes amovibles, le travail à sec ou avec du liquide de coupe n'est pas un critère restrictif.

Pour comparer les résultats obtenus pour la même vitesse de coupe et la même avance, les profilogrammes de surfaces pour travail à sec seront présentés comparativement.



**Figure 3.48:** Profilogramme de la surface, 4000 rpm, avance 0.2 mm/rev, travaille à sec.



**Figure 3.49:** Profilogramme de la surface, 6000 rpm, avance 0.2 mm/rev, travaille à sec.



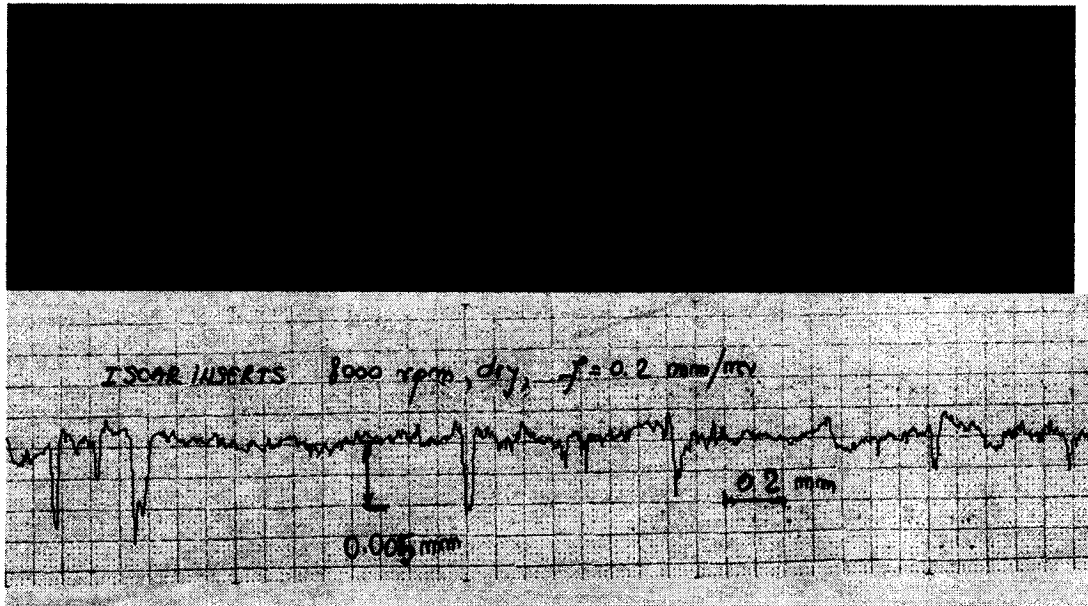


Figure 3.50: Profilogramme de la surface, 8000 rpm, avance 0.2 mm/rev, travaille à sec.

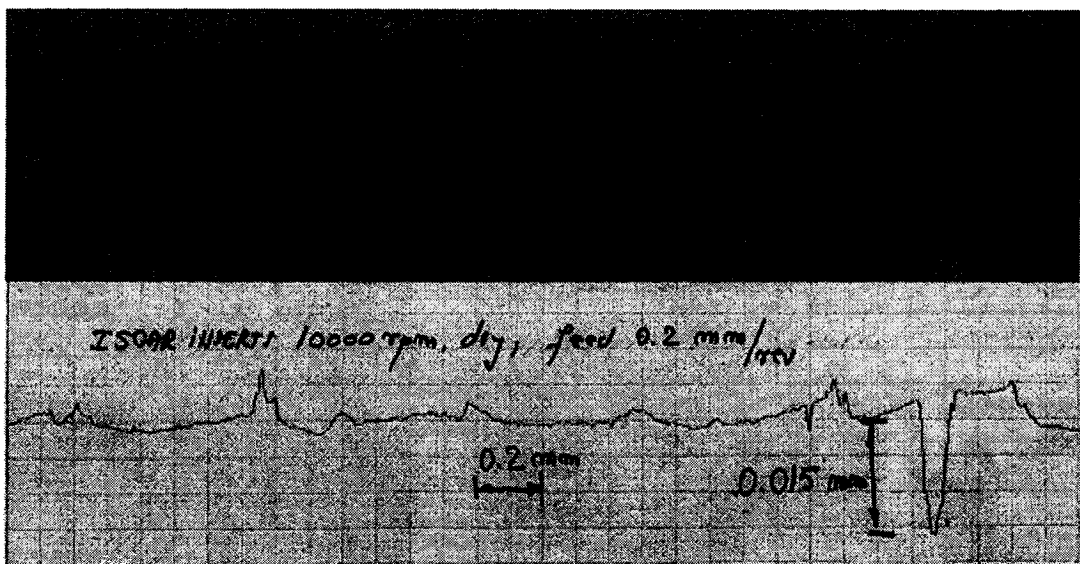
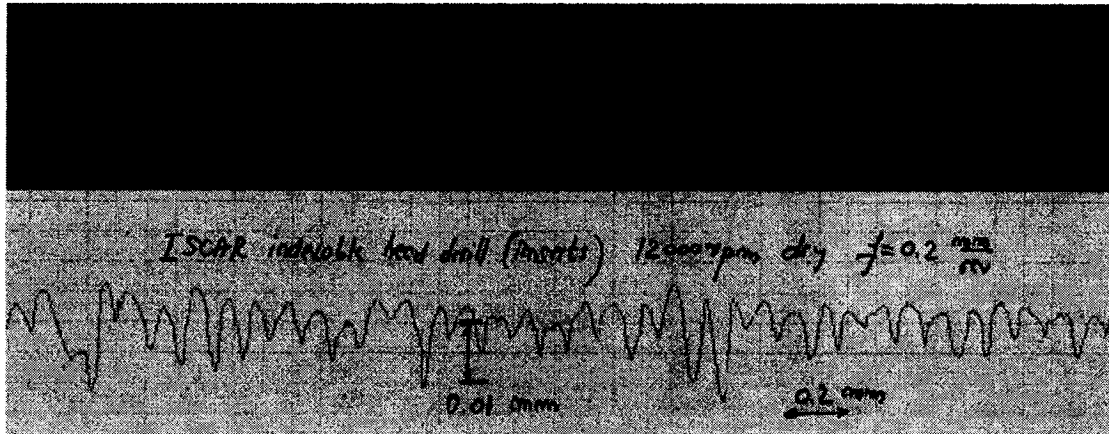


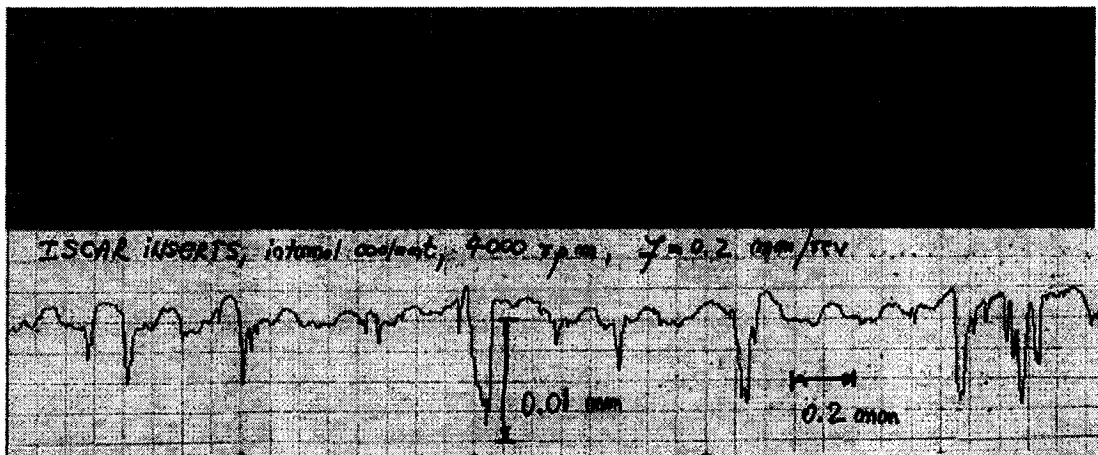
Figure 3.51: Profilogramme de la surface, 10000 rpm, avance 0.2 mm/rev, travaille à sec.



**Figure 3.52: Profilogramme de la surface, 12000 rpm, avance 0.2 mm/rev, travail à sec.**

En analysant les profilogrammes comparatifs entre l'outil en carbure plein et l'outil à plaquette amovible, on conclut qu'en augmentant la vitesse de coupe, l'outil en carbure solide offre un meilleur état de surface.

Pour comparer entre les résultats obtenus pour la même vitesse de coupe et la même avance, les profilogrammes de surfaces pour travail avec liquide de coupe seront présentés comparativement.



**Figure 3.53: Perçage 4000 rpm, avance 0.2 mm/rev avec liquide de coupe.**

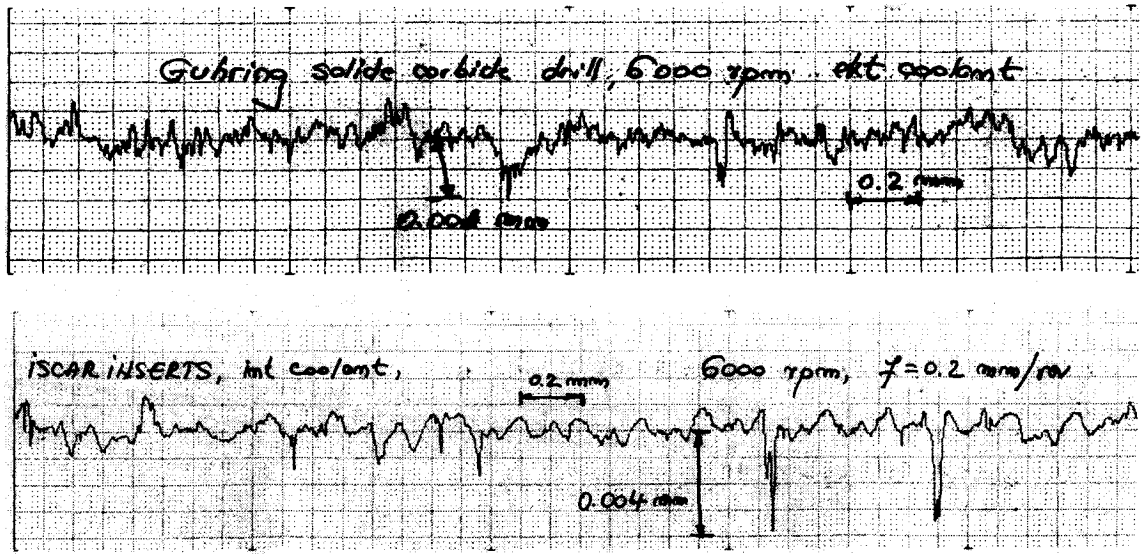


Figure 3.54: Perçage 6000 rpm, avance 0.2 mm/rev avec liquide de coupe.

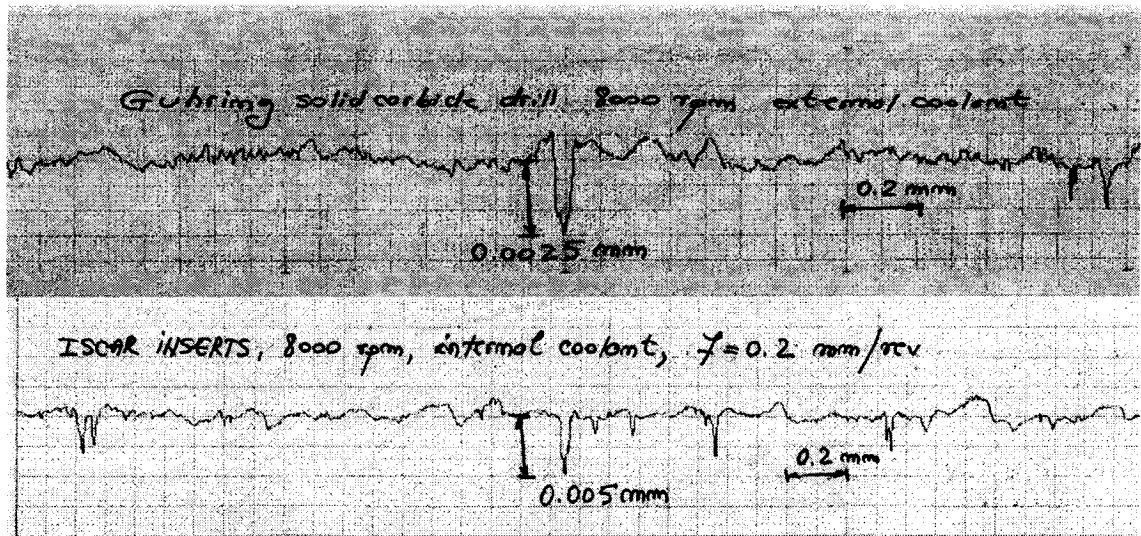


Figure 3.55: Perçage 8000 rpm, avance 0.2 mm/rev avec liquide de coupe.

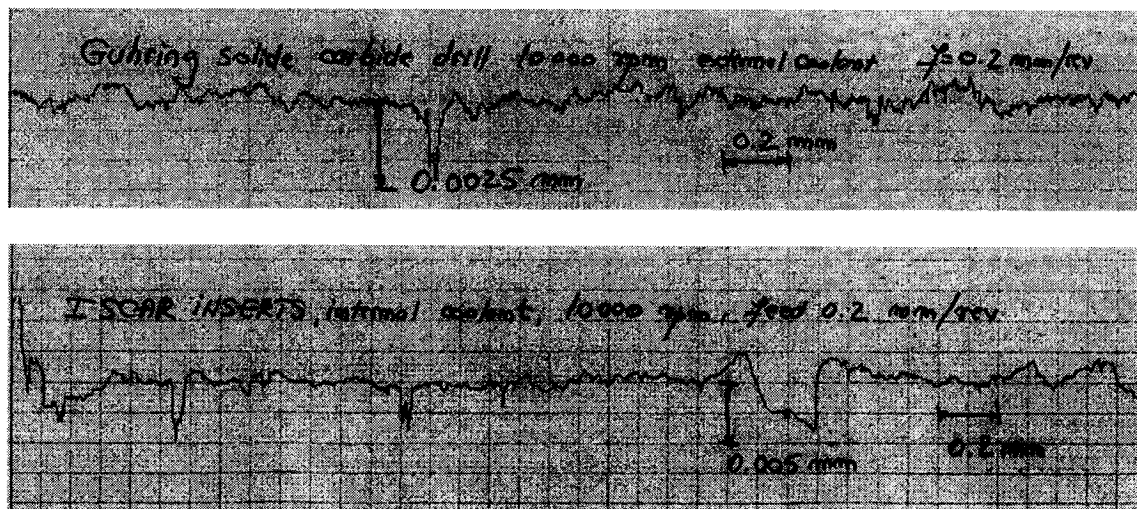


Figure 3.56: Perçage 10000 rpm, avance 0.2 mm/rev avec liquide de coupe.

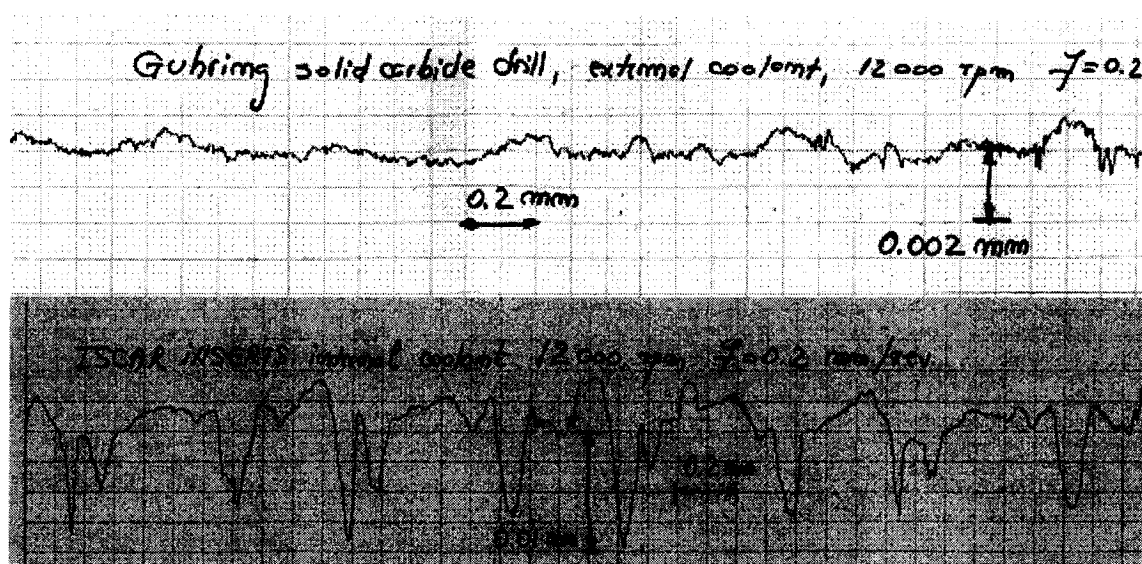


Figure 3.57: Perçage à 12000 rpm, avance 0.2 mm/rev avec liquide de coupe.

La conclusion qui ressort de l'analyse comparative du perçage avec du liquide de coupe est qu'en augmentant la vitesse de rotation de l'outil, le foret en carbure solide offre des résultats légèrement supérieurs que le foret à plaquette amovible.

Conclusion globale de cette série de tests:

- 1) l'augmentation de la vitesse de coupe permet de diminuer la rugosité;
- 2) les forets en carbure solide permettent d'obtenir une meilleure rugosité comparativement aux forets à plaquette amovible.
- 3) les traces de délogement des particules de renfort lors du perçage est visible sur les profilogrammes. La taille des trous laissés varie entre 5 et 25 microns. La taille de ces trous semble indépendante du type d'usinage (à sec ou avec du liquide). Cependant on se rappelle que l'utilisation des fluides de coupe a une influence négative sur l'usure des outils.

### 3.5 Étude de la rugosité par l'entremise du paramètre Ra

Les paramètres de rugosité Ra (moyenne arithmétique de 5 max et 5 min) et Rt (l'écart entre le point de max et le point de min du profil) sont réglementés par le standard ISO 4287.

Objectif: connaître l'influence de l'avance, de la vitesse de rotation de l'outil, de la méthode de travail (à sec ou avec du liquide) et la géométrie de l'outil sur la variation de la rugosité Ra.

Méthode de travail: maintenir constant un paramètre (exemple l'avance) et faire varier un autre paramètre (exemple la vitesse de rotation de l'outil).

Présentation des résultats: d'abord quelques graphiques "individuels" (exemple 2500 rpm constante et avance variable pour foret à plaquettes) et puis sur le même graphique plusieurs courbes de variation afin de réduire le nombre de graphiques individuels.

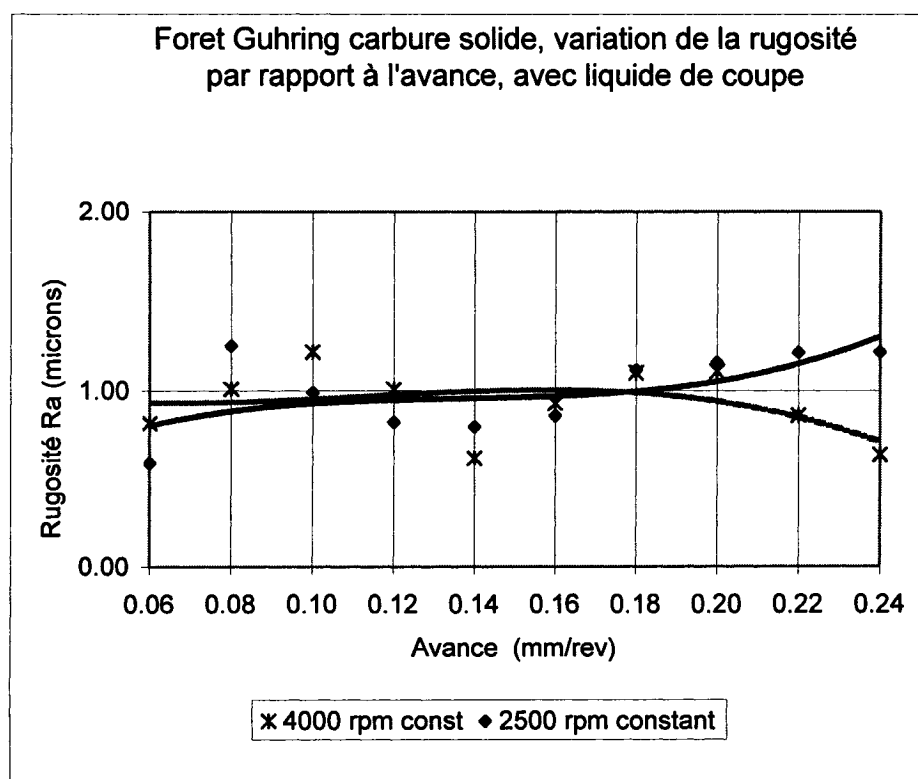
Liste des expériences:

- Foret en carbure solide: rpm constante (2500 et 4000 rpm) avance variable, avec liquide de coupe
- Foret à plaquette amovible: rpm constante (2500 et 4000 rpm) avance variable, avec liquide de coupe
- Foret à plaquette amovible: 8000 rpm constante, avance variable, avec liquide de coupe
- Foret à plaquette amovible: avance constante 0.1 mm/rev, rpm variable, avec liquide de coupe

- Foret à plaquette amovible: avance constante 0.2 mm/rev , rpm variable, avec liquide de coupe
- Foret à plaquette amovible: avance constante 0.3 mm/rev , rpm variable, avec liquide de coupe
- Foret en carbure solide, avance constante 0.2 mm/rev rpm variable, a sec et avec du liquide

Test supplémentaire : foret à 3 lèvres en carbure solide.

Pour les forets Guhring en carbure solide, pour une avance variable à partir de 0.06 mm/rev jusqu'à 0.24 mm/rev et une vitesse de rotation de l'outil de 2500 et de 4000 rpm, la variation de la rugosité Ra est présentée à la figure 3.45.



**Figure 3.45: Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets en carbure solide à 2500 et 4000 rpm.**

Vu que les résultats (les valeurs numériques) sont très proches, pour alléger la présentation sur le graphique, seulement les lignes de tendance sont présentées.

À remarquer que jusqu'à 0.2 mm/rev, les valeurs de la rugosité Ra sont très proches. Pour 4000 rpm, en augmentant l'avance, la rugosité a tendance à décroître. Les tests préliminaires faits pour l'avance de 0.3 mm/rev ont montré que l'usure des forets est très rapide. L'élément à retenir de ce graphique est que la valeur de l'avance de 0.2 mm/rev peut être considérée non dépendante (fortement) de la vitesse de rotation de l'outil.

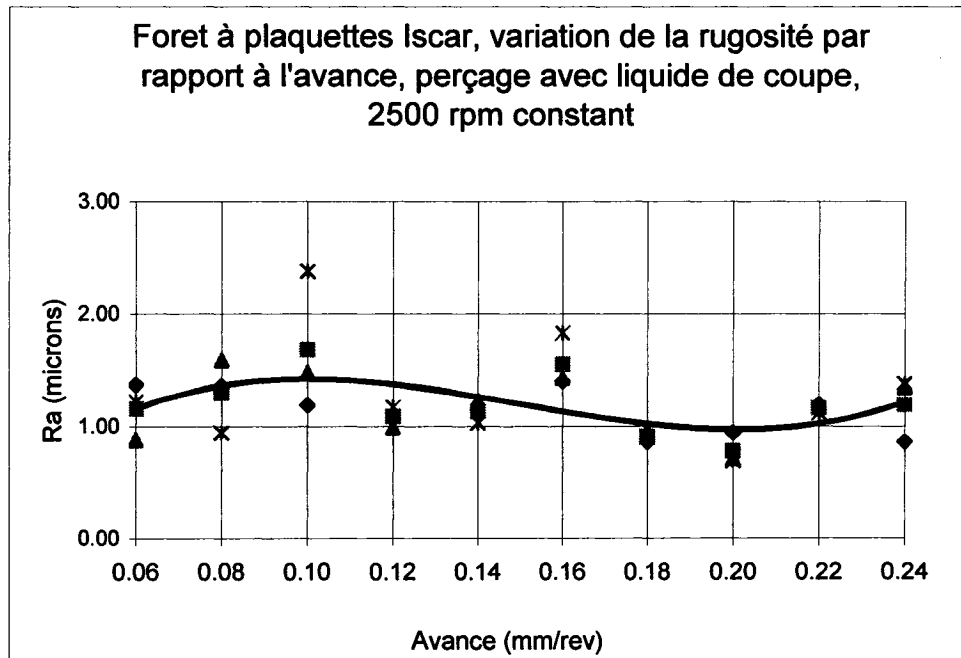
Dans les trois prochains graphiques, les courbes de la variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour une vitesse de rotation de l'outil constante de 2500, 4000 et 8000 rpm seront présentées. Chaque graphique contient plusieurs séries de résultats et une courbe de tendance. Ultérieurement, dans un graphique, les trois courbes seront présentées afin de visualiser l'influence de la rugosité par rapport à la vitesse de rotation de l'outil.

Pour les forets à plaquettes amovibles produites par Iscar, la variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour une vitesse de rotation de l'outil constante de 2500 rpm est présentée à la figure 3.60.

Test no 3: Foret à plaquettes 2500 rpm constante, avance variable

Sur le graphique, figure 3.46, trois séries de données (seulement les points) et la courbe de tendance de la valeur moyenne de ces données sont présentées.

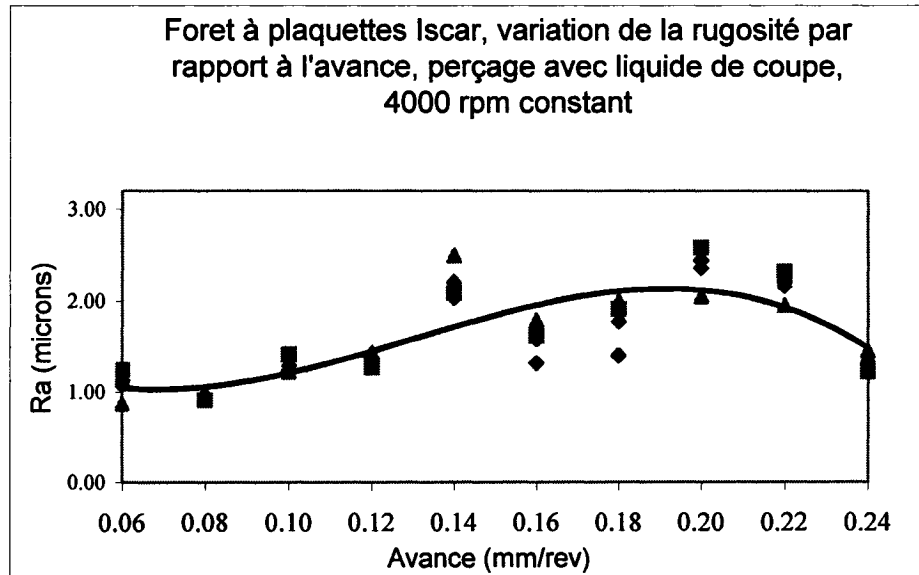




**Figure 3.46: Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets à plaquette à 2500 rpm.**

La remarque est qu'à partir de 0.2 mm/rev, la rugosité Ra a une tendance de croissance. Pour les forets à plaquettes amovibles produites par Iscar, la variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour une vitesse de rotation de l'outil constante de 4000 rpm est présentée à la figure 3.47.

Test no 4: Foret à plaquettes 4000 rpm constante, avance variable

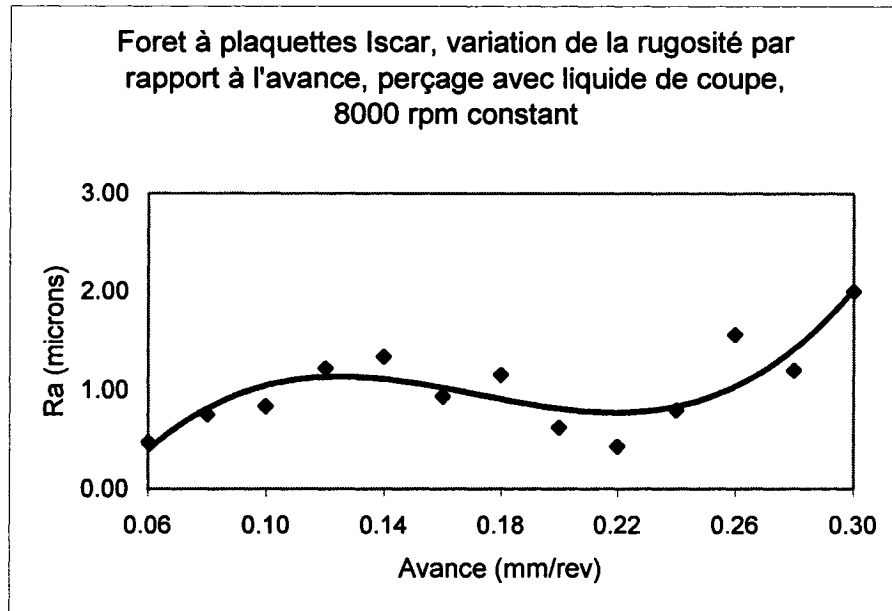


**Figure 3.47: Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets à plaquette à 4000 rpm.**

L'analyse des données présentée pour la variation de la rugosité pour avance variable et vitesse de rotation de l'outil constante 4000 rpm montre qu'à partir de 0.2 mm/rev, la rugosité a une tendance décroissante.

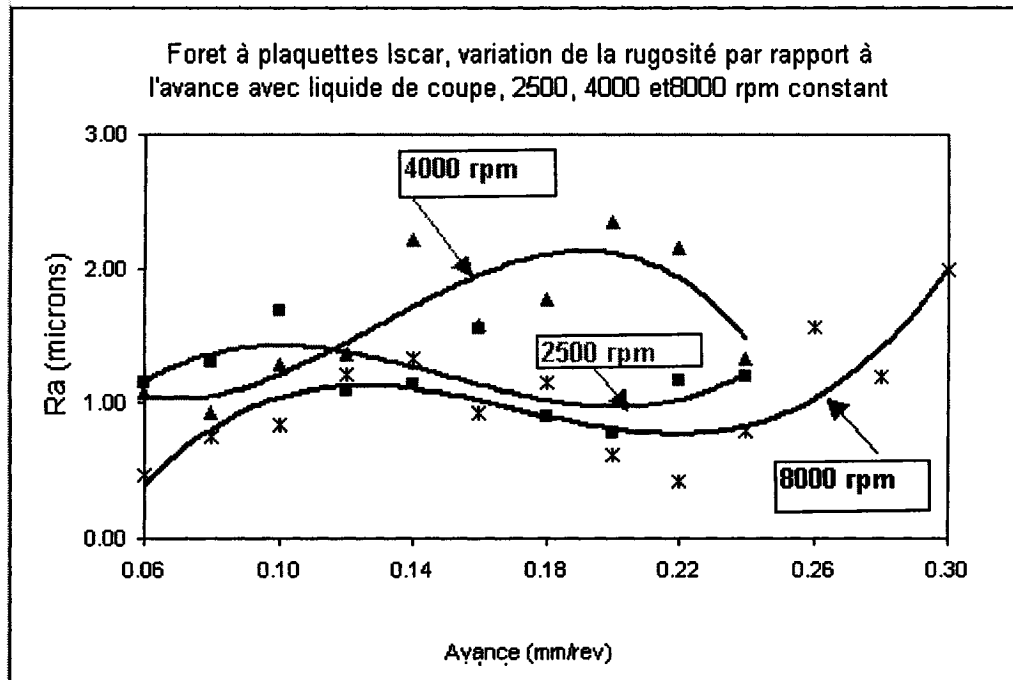
Pour les forets à plaquettes amovibles produites par Iscar, la variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour une vitesse de rotation de l'outil constante de 4000 rpm est présentée à la figure 3.48.

Test no 5: Foret à plaquettes 8000 rpm constante, avance variable



**Figure 3.48: Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets à plaquette à 8000 rpm.**

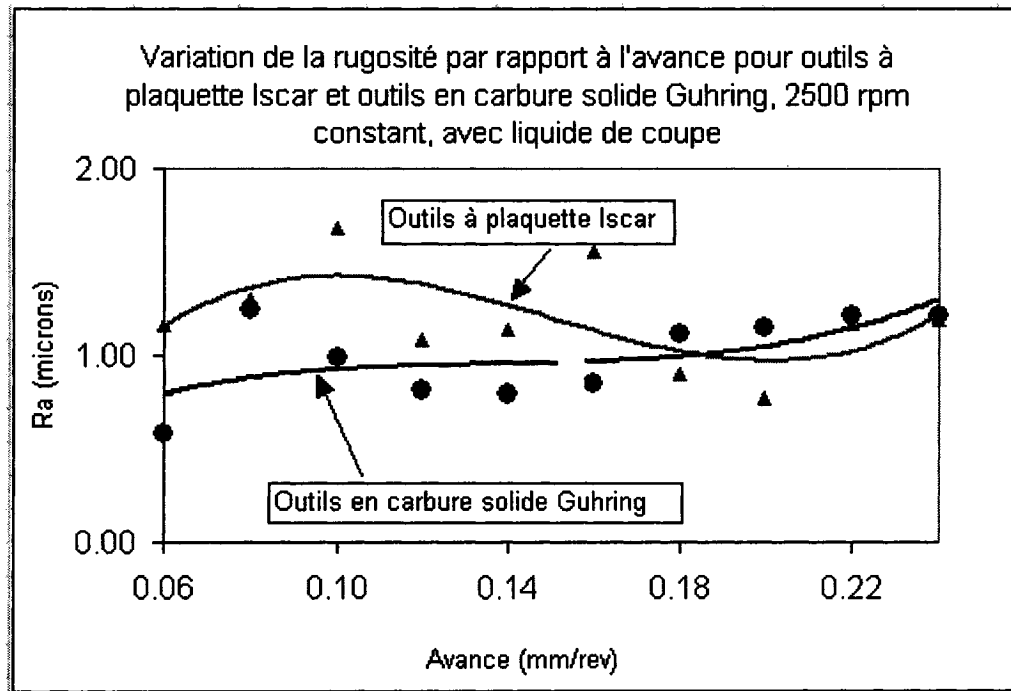
Dans la figure suivante, l'influence de l'avance sur la rugosité Ra pour des vitesses de rotation de l'outil de 2500, 4000 et 8000 rpm (les trois courbes précédentes sont présentées sur le même graphique pour faciliter l'interprétation des données) sera présentée.



**Figure 3.49: Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets à plaquette à 2500, 4000 et 8000 rpm.**

L'analyse des trois courbes de dépendance de la rugosité Ra par rapport à la variation de l'avance montre que pour les vitesses de rotation de l'outil de 4000 et 8000 rpm, l'avance devrait être plus grande que 0.2 mm/rev jusqu'à 0.24 mm/rev.

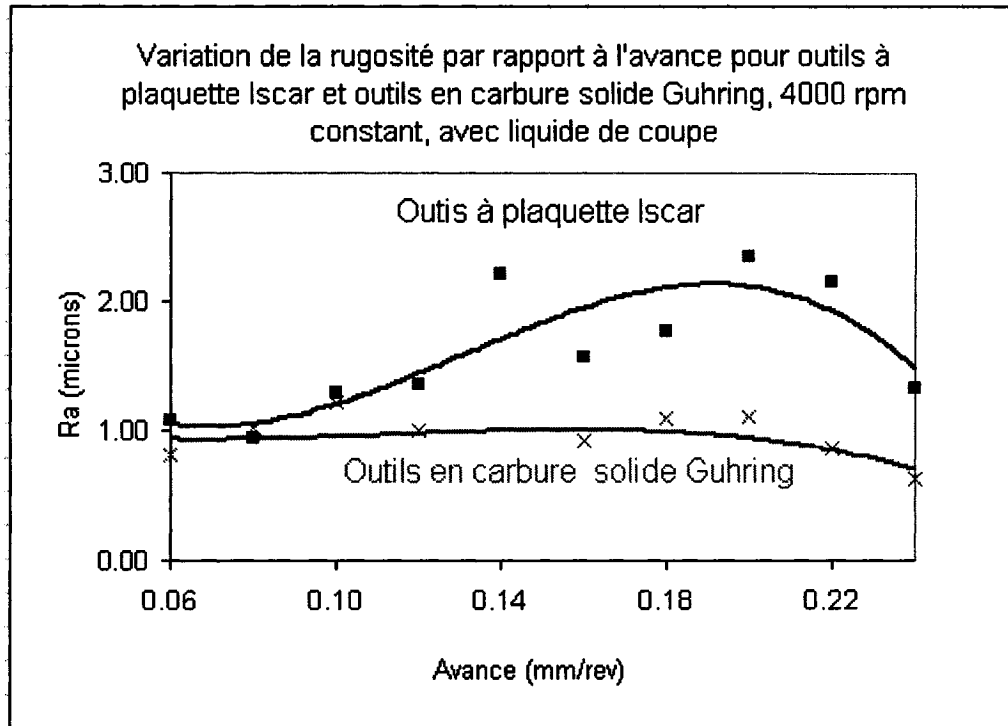
Dans la figure 3.50 est présentée comparativement l'influence de l'avance sur la rugosité Ra pour les outils en carbure solide et les outils à plaquettes. Les tests ont été faits à une vitesse de rotation de l'outil de 2500 rpm et l'avance a été variable à partir de 0.06 jusqu'à 0.22 mm/rev, avec liquide de coupe.



**Figure 3.50:** Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets à plaquette et forets en carbure solide, 2500 rpm avec liquide de coupe.

Pour les avances aux alentours de 0.2 mm/rev, les différences entre les valeurs de la rugosité Ra pour les outils en carbure solide et les outils à plaquettes sont minimales. À remarquer la tendance de croissance de la rugosité Ra pour les avances plus grandes que 0.2 mm/ rev.

Dans la figure 3.51 est présentée comparativement l'influence de l'avance sur la rugosité Ra pour les outils en carbure solide et les outils à plaquettes. Les tests ont été faits à une vitesse de rotation de l'outil de 4000 rpm et l'avance a été variable à partir de 0.06 jusqu'à 0.22 mm/rev, avec liquide de coupe.

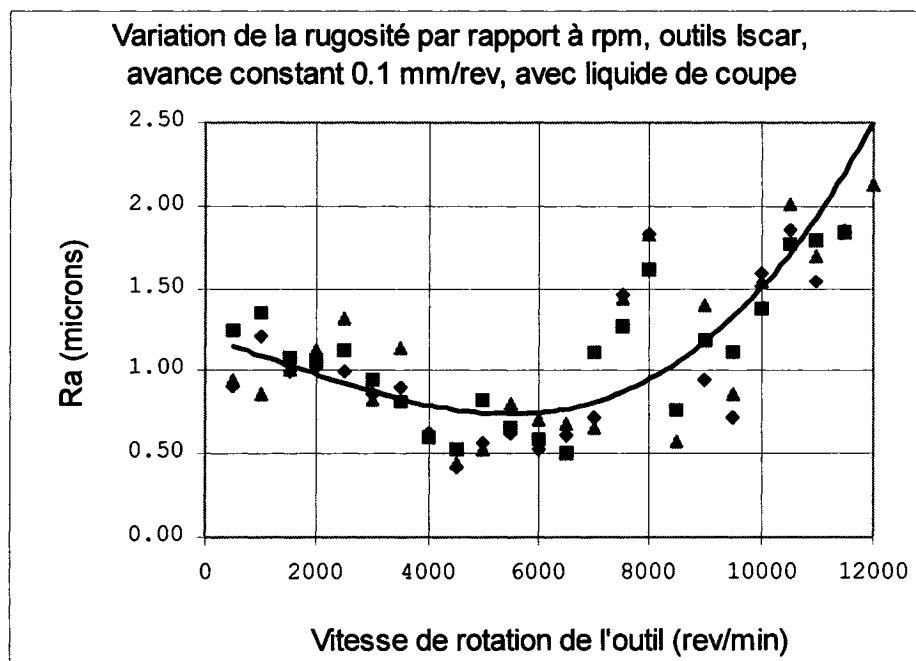


**Figure 3.51: Variation de la rugosité Ra par rapport à l'avance pour forets à plaquette et forets en carbure solide, 4000 rpm avec liquide de coupe.**

À remarquer que pour 4000 rpm, pour toute la gamme d'avances, les outils en carbure solide donnent des résultats supérieurs comparativement aux outils à plaquettes amovibles.

Pour comprendre l'influence de la vitesse de rotation des outils sur la rugosité Ra, les graphiques de variation pour des avances constantes de 0,1, 0,2 et 0,3 mm/rev ont été tracés.

La variation de la rugosité par rapport à la vitesse de coupe pour une avance constante de 0,1 mm/rev, travail avec liquide de coupe, est présentée à la figure 3.52.

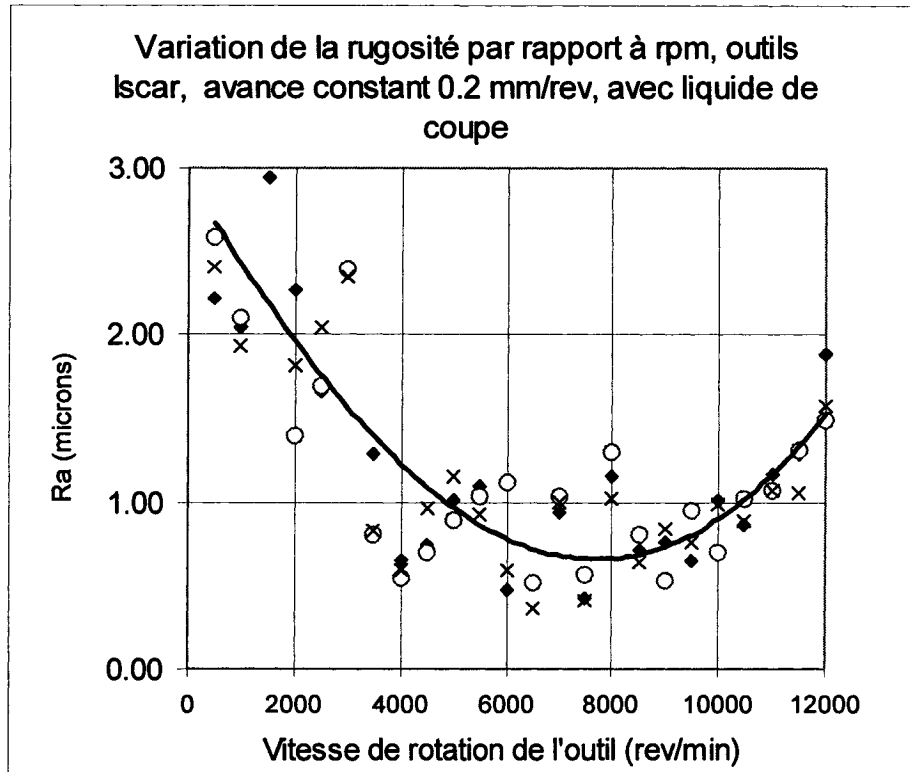


**Figure 3.52: Variation de la rugosité Ra par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.1 mm/rev.**

Sur le graphique, les points correspondant à 3 séries de données et la courbe caractéristique de la moyenne de ces 3 séries sont présentés.

À remarquer qu'aux alentours de 6000 rpm, la rugosité obtenue est la meilleure.

Les expériences ont été continuées avec les forets à plaquette, pour une avance de 0.2 mm/rev et la vitesse de rotation de l'outil variable.



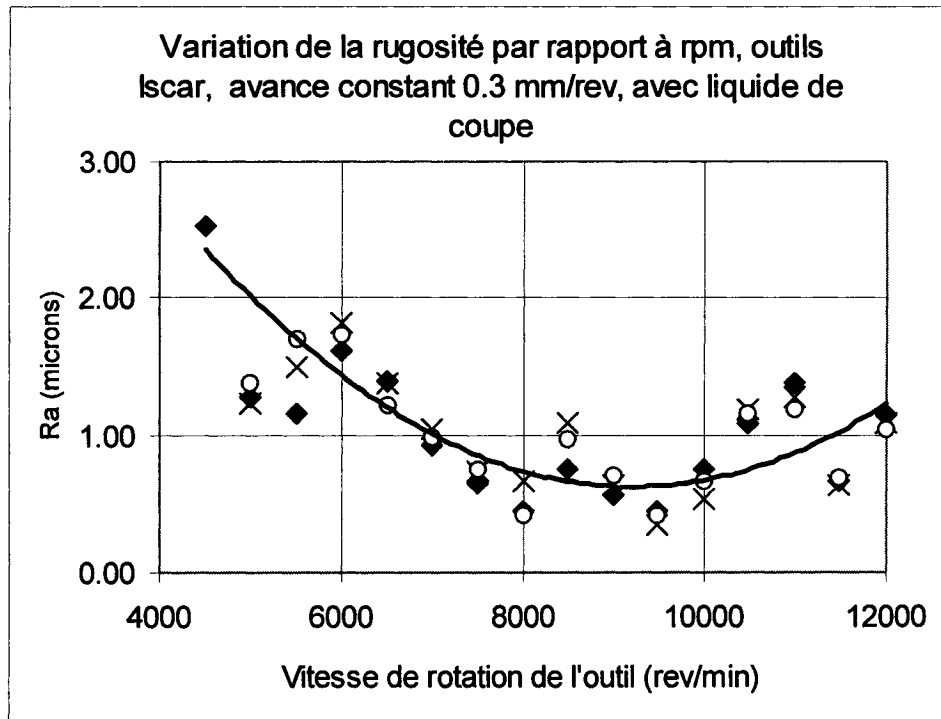
**Figure 3.53: Variation de la rugosité Ra par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaque avec liquide de coupe, avance 0.2 mm/rev.**

Sur le graphique, les points correspondant à 3 séries de données et la courbe caractéristique de la moyenne de ces 3 séries sont présentées.

À remarquer qu'aux alentours de 8000 rpm, la rugosité obtenue est la meilleure.

En augmentant l'avance à 0.3 mm/rev, une courbe avec une allure similaire à celle obtenue pour l'avance de 0.1 et 0.2 mm/rev sera obtenue. Les résultats concernant la variation de la rugosité Ra obtenus pour une avance de 0.3 mm rev constante et une vitesse de rotation de l'outil sont présentés à la figure 3.54.

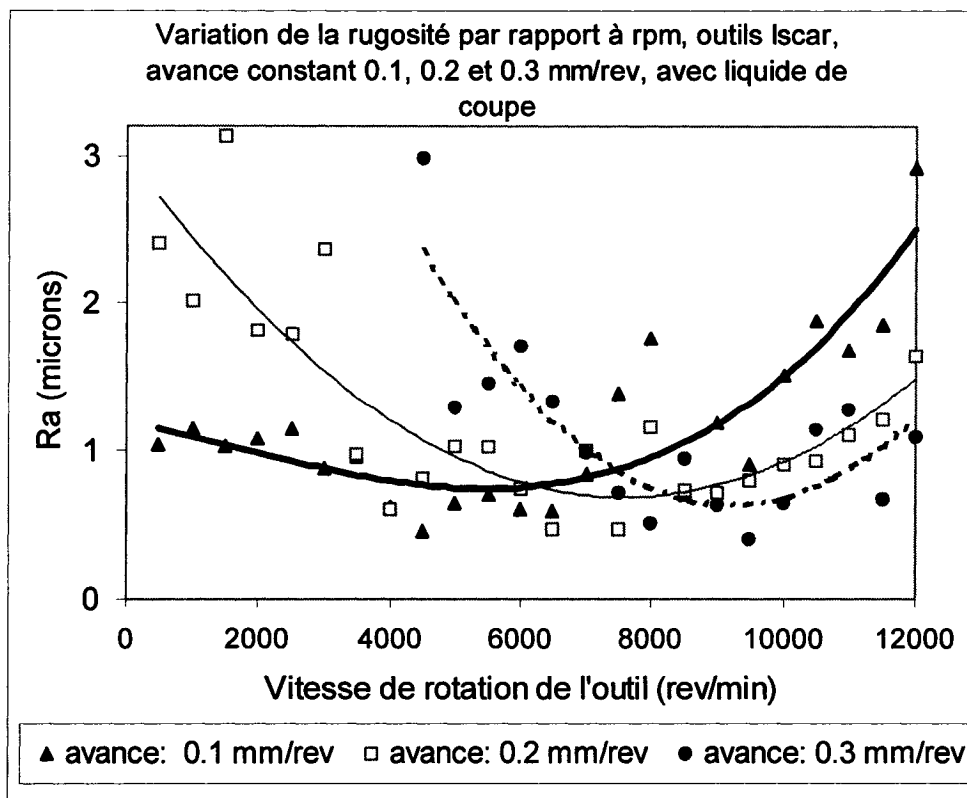




**Figure 3.54: Variation de la rugosité Ra par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.3 mm/rev.**

L'analyse des données présentées à la figure montre que la rugosité est minimale dans le domaine de rpm de 8000 à 10 000 rpm. Pour des vitesses de rotation de l'outil plus grandes que 6000 rpm, les valeurs de la rugosité Ra sont très proches, les différences étant de l'ordre des dixièmes de microns.

Pour avoir une image d'ensemble concernant l'influence de l'avance (0.1, 0.2 et 0.3 mm/rev) sur la rugosité Ra, les trois courbes discutées auparavant seront présentées dans la figure 3.55. En ayant les 3 courbes sur la même image, il sera possible de déterminer la zone de rugosité minimale.

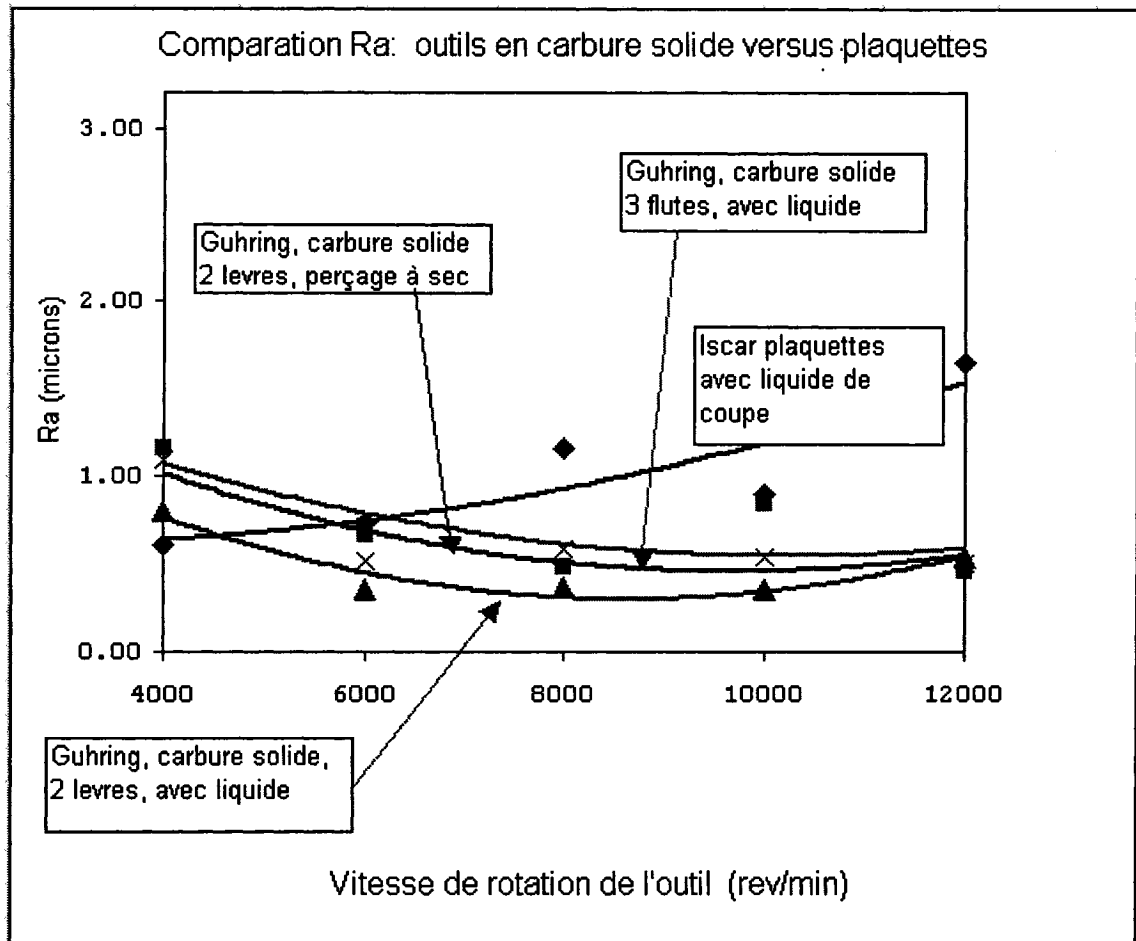


**Figure 3.55: Variation de la rugosité Ra par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.1, 0.2 et 0.3 mm/rev.**

Pour une avance de 0.1 mm/rev, la courbe est présentée comme ligne épaisse, pour une avance de 0.2 mm/rec comme ligne mince et pour une avance de 0.3 mm/rev comme ligne pointillée.

La zone des vitesses de rotation de l'outil à retenir est comprise dans le domaine 6000 - 8000 rev/min.

L'étude de l'influence des conditions de coupe (avance, vitesse de rotation de l'outil et la présence ou l'absence du liquide de coupe) sera présentée comparativement pour les outils en carbure solide et pour les outils à plaquette. Les résultats obtenues avec un foret à trois lèvres en carbure solide produit par Guhring seront aussi présentés.

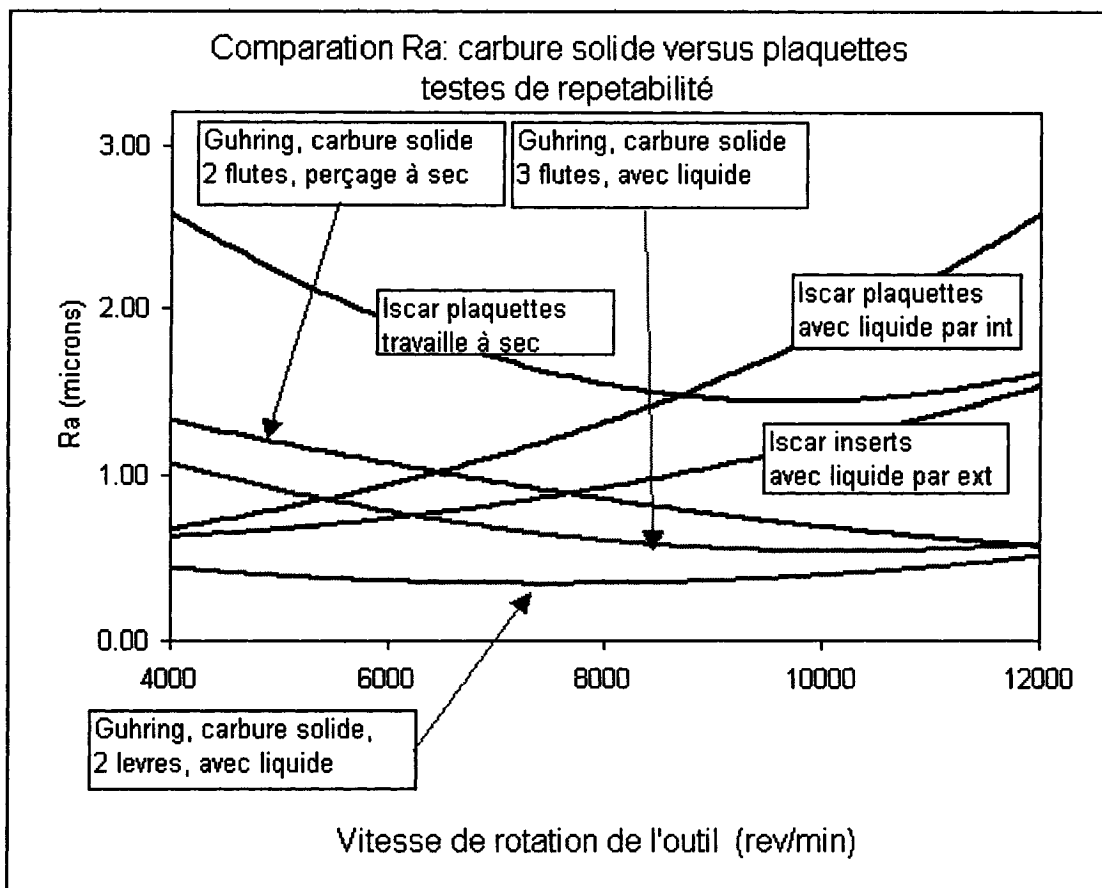


**Figure: 3.56: Étude comparative de la variation de Ra pour différentes conditions de coupe, avance 0.2 mm /rev.**

L'analyse des données présentées à la figure 3.56 montre une différence visible entre les résultats obtenus avec des outils en carbure solide et des outils à plaquettes. Les outils en carbure solide offrent de meilleurs résultats à partir de 6000 rpm en haut (les valeurs de la rugosité Ra plus petites). Les outils à plaquettes offrent des résultats inférieurs par rapport aux outils en carbure solide que la pâte abrasive s'accumule dans la zone d'assemblage de la plaquette avec le corps de l'outil et laisse des traces sur la surface de trou.

Pour être capable de faire une recommandation industrielle, les tests ont été repris 3 fois pour les outils en carbure solide et 3 fois pour les outils à plaquettes amovible afin de vérifier la répétabilité des résultats.

La synthèse des données pour le perçage avec une avance constante de 0.1 mm/rev et différentes conditions de coupe (rpm variable, outils en carbure solide ou avec des plaquettes, ainsi que des résultats supplémentaires pour un foret à 3 levres en carbure solide) sont présentées à la figure 3.57.



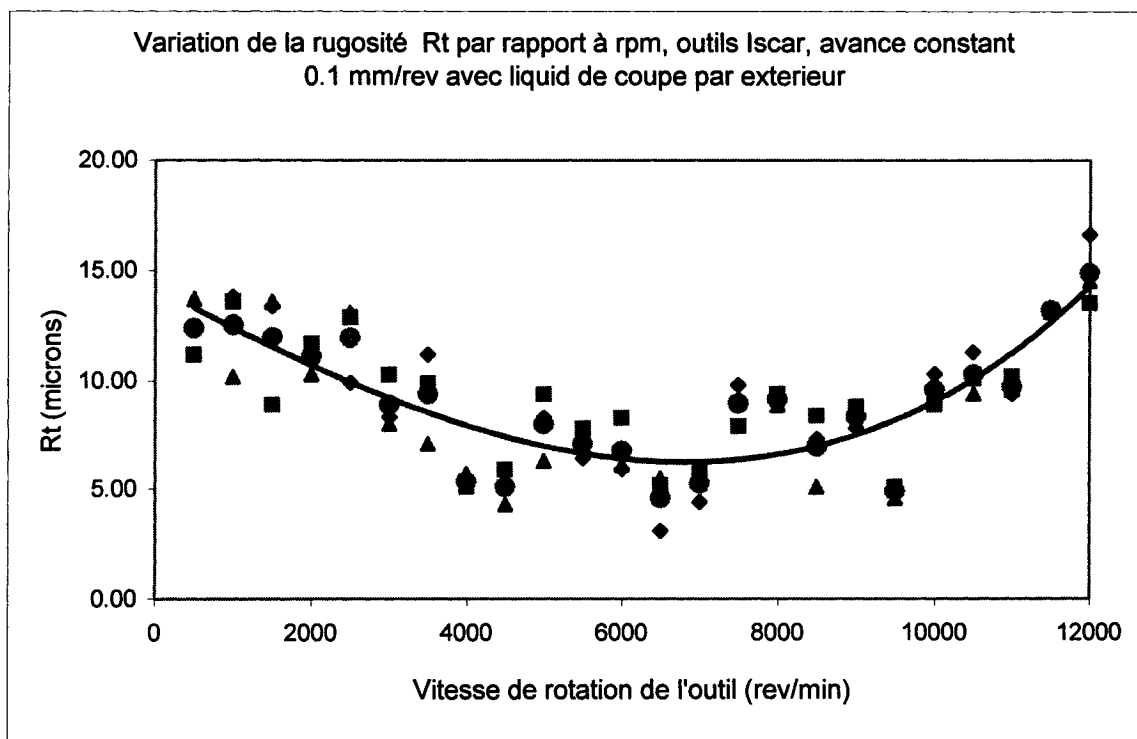
**Figure 3.57: Synthèse de la variation de la rugosité pour une avance constante de 0.2 mm/rev.**

À remarquer que le percage avec du liquide de coupe par l'intérieur de la broche de la machine-outil, pour les outils à plaquettes donne une rugosité plus grande que le percage avec liquide de coupe appliqué par l'extérieur. Les particules dures sont maintenues dans la zone de coupe et égratignent la surface. Pour les outils en carbure solide, la courbe de variation de Ra présente la même allure, les différences numériques étant minimales. Vu que l'usure des outils pour le travail avec liquide de coupe est plus grande que l'usure des outils pour le travail à sec, pour une rugosité ayant pratiquement le même ordre de grandeur, la méthode de travail à sec sera retenue.

### 3.6 Étude de la rugosité par l'entremise du paramètre Rt

Pour connaître l'influence des différents paramètres sur la rugosité des surfaces en perçage des CMM, les graphiques de variation, présentés dans les figures suivantes, ont été tracés. Pour faciliter la compréhension de l'influence des différents paramètres, les forets en carbure solide et les forets avec des plaquettes amovibles seront successivement présentés.

Dans les trois prochaines figures est présentée la variation de la rugosité Rt pour les outils à plaquettes produites par Iscar pour avance 0.1, 0.2 et 0.3 mm/rev pour des vitesses de rotation de l'outil à partir de 500 rpm jusqu'à 12000 rpm.

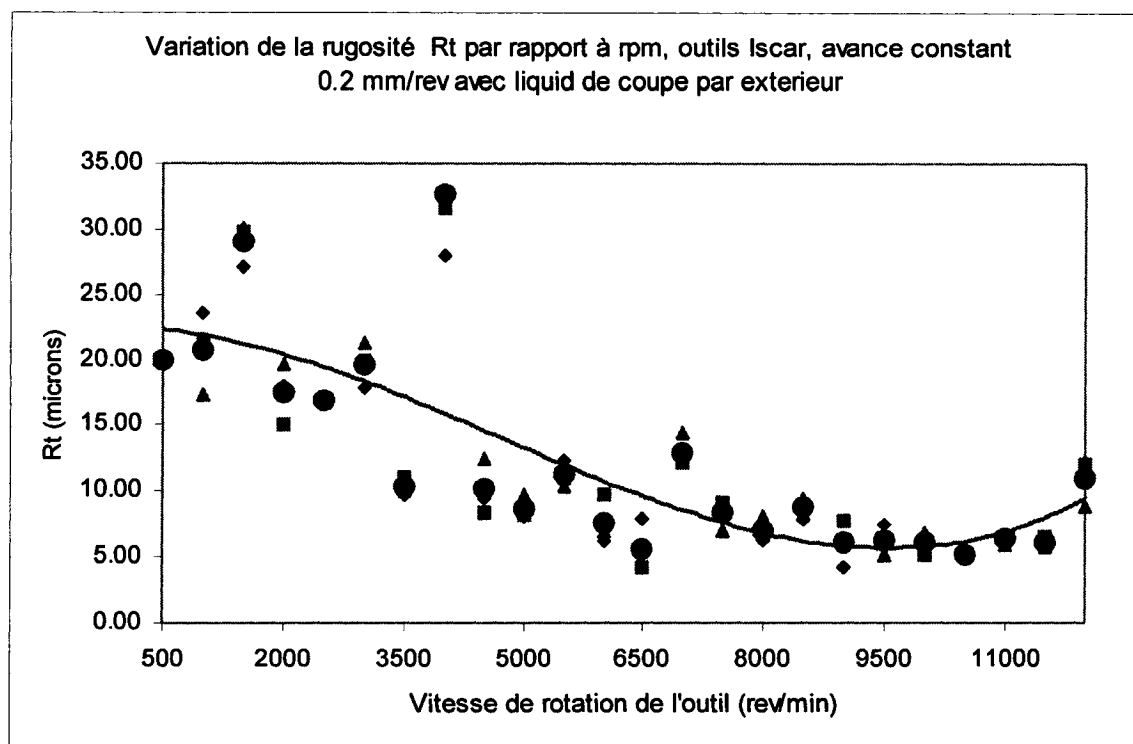


**Figure 3.58: Variation de la rugosité Rt par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.1 mm/rev.**

Dans la figure 3.58 sont présentées 3 séries de données et leur moyenne. La courbe tracée représente la courbe de tendance de la valeur moyenne.

Pour une avance de 0.1 mm/rev, la rugosité  $R_t$  minimale est dans la zone 6000 - 8000 rpm.

Les tests ont été continués pour une avance de 0.2 mm/rev dans les mêmes conditions: vitesse de rotation de l'outil à partir de 500 rpm jusqu'à 12000 rpm, avec liquide de coupe appliqué par l'extérieur.



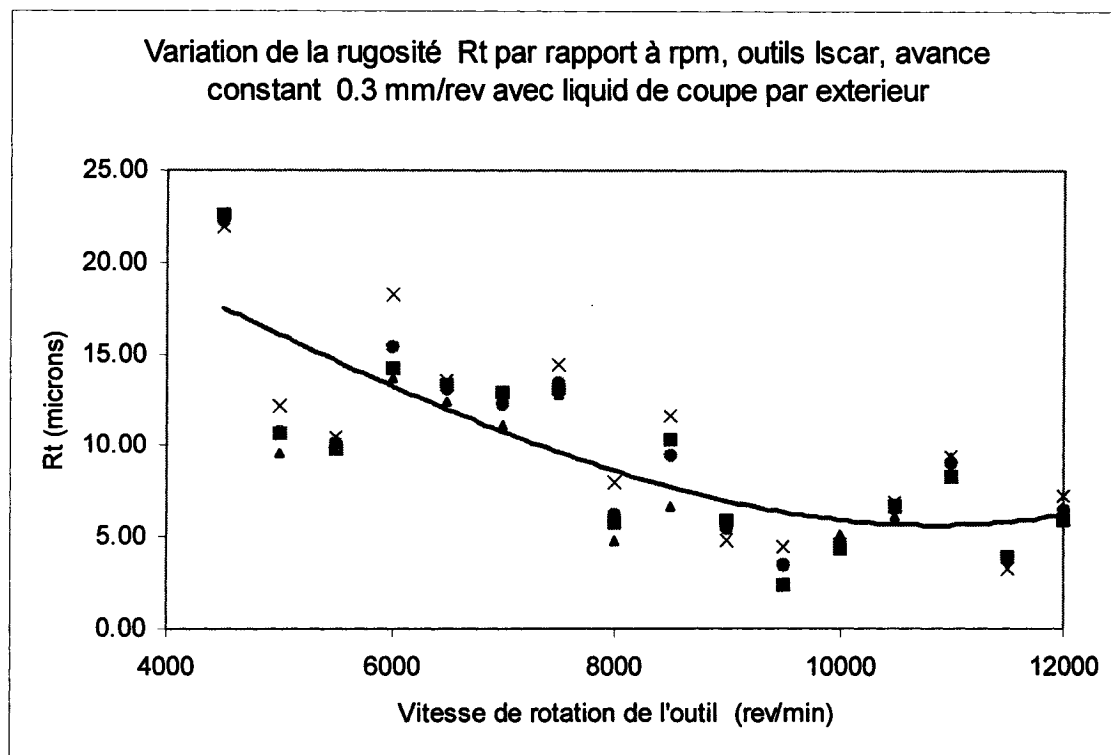
**Figure 3.59: Variation de la rugosité  $R_t$  par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.2 mm/rev.**

Dans la figure 3.59 sont présentées 3 séries de données et leur moyenne. La courbe tracée représente la courbe de tendance de la valeur moyenne.

Pour une avance de 0.2 mm/rev, on observe une tendance décroissante de la rugosité  $R_t$  jusqu'à 9500 rpm. À partir de 9500 rpm, la rugosité  $R_t$  a une tendance croissante.

Pour avoir une image plus étendue concernant l'influence de l'avance sur la rugosité  $R_t$ , les tests ont été continués pour une avance de 0.3 mm/rev.

La variation de la rugosité  $R_t$  par rapport à l'avance, pour une avance de 0.3 mm/rev, est présentée à la figure 3.60.



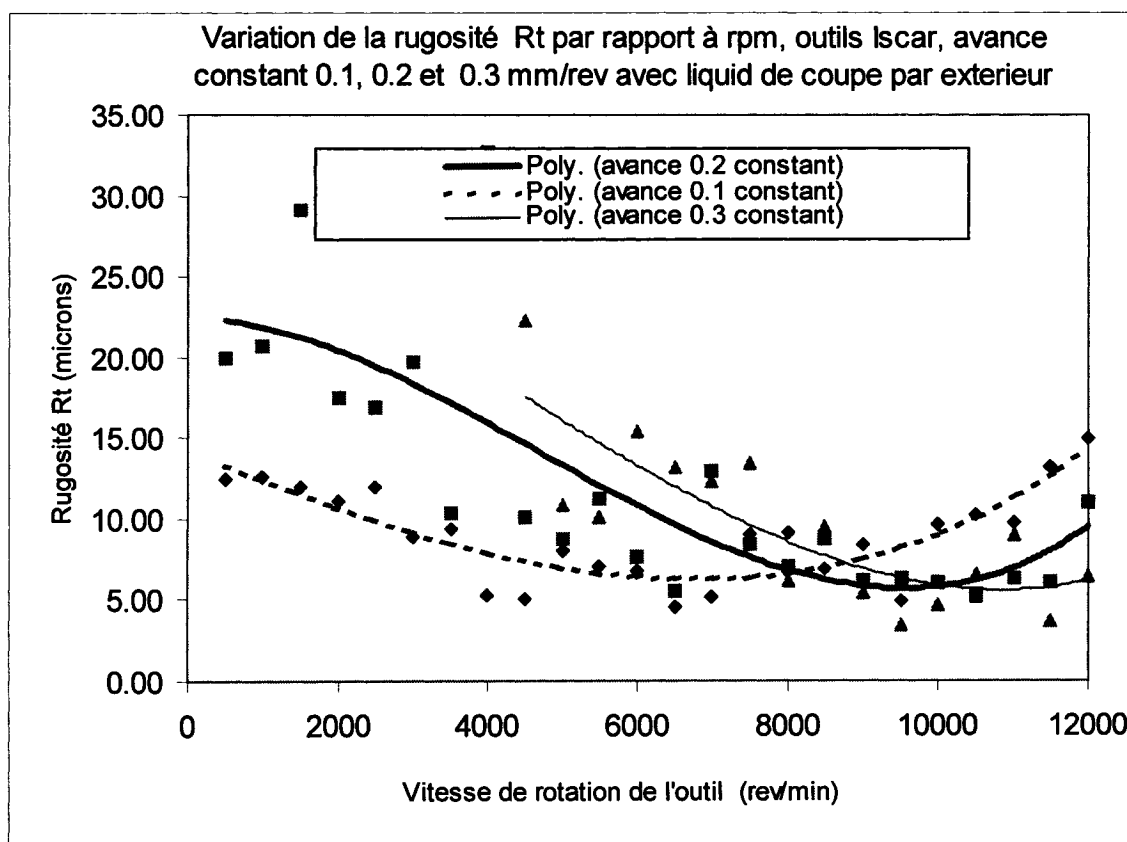
**Figure 3.60: Variation de la rugosité  $R_t$  par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.2 mm/rev.**

Dans la figure 3.64 sont présentées 3 séries de données et leur moyenne. La courbe tracée représente la courbe de tendance de la valeur moyenne.

Jusqu'à 11000 rpm, la tendance est décroissante. Entre 11000 et 12000 rpm, la variation de la rugosité  $R_t$  est très petite. Donc, on peut conclure que pour une avance de 0.3 mm/rev, la variation de la rugosité  $R_t$  est décroissante avec l'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil.



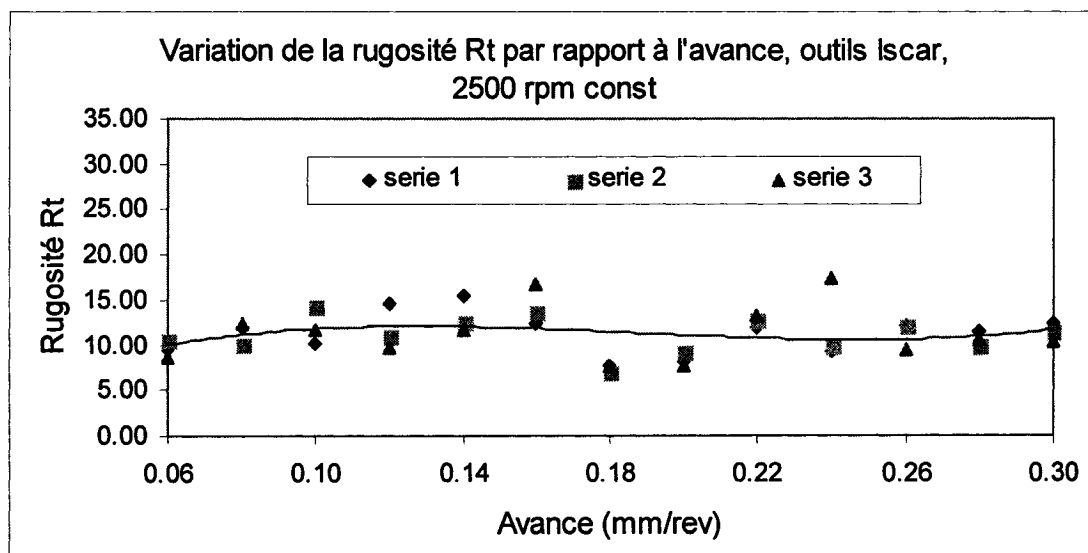
Dans la figure 3.61 sera présentée sur le même graphique la variation de la rugosité  $R_t$  pour une vitesse de rotation de l'outil variable à partir de 500 rpm jusqu'à 12000 rpm pour 3 avances : 0.1, 0.2 et 0.3 mm/rev. Le perçage a été fait avec du liquide de coupe.



**Figure 3.61: Variation de la rugosité  $R_t$  par rapport à la vitesse de rotation de l'outil, forets Iscar à plaquette avec liquide de coupe, avance 0.1, 0.2 et 0.3 mm/rev.**

L'analyse des données présentées à la figure 3.61 montre que pour les trois avances, la tendance globale de la rugosité  $R_t$  est de décroître et puis d'augmenter à partir de 10000 rpm.

La variation de la rugosité Ra sera évaluée pour différentes vitesses de rotation de l'outil et avance variable.



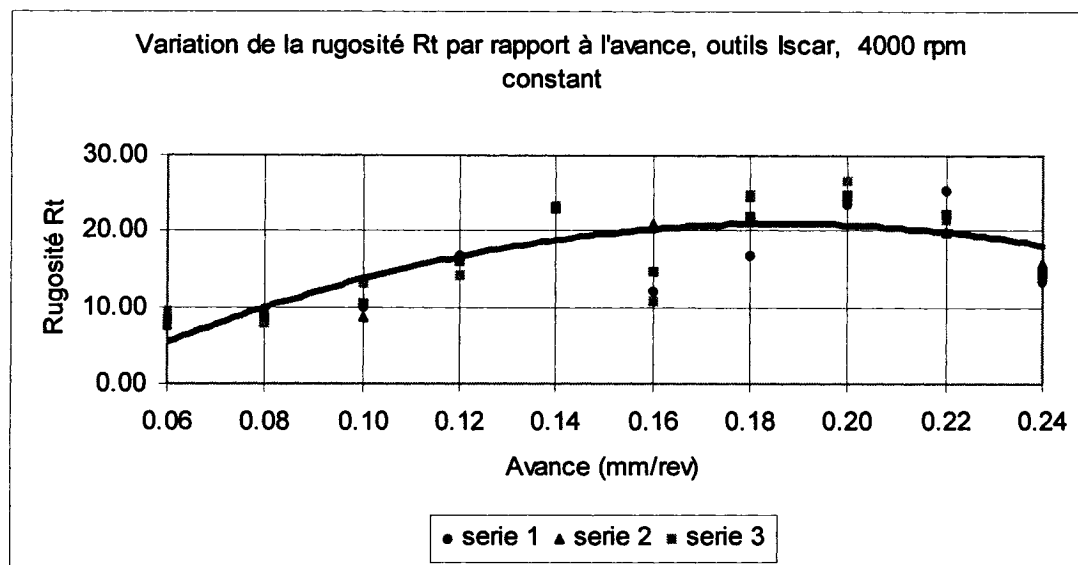
**Figure 3.62: Variation de la rugosité Rt par rapport à l'avance pour vitesse de rotation de l'outil constante 2500 rpm.**

Dans la figure 3.62 sont présentées 3 séries de données ainsi que leur valeur moyenne. Afin d'alléger la présentation, seulement les points et la courbe de la valeur moyenne sont présentés.

La courbe présentée (la courbe de tendance de la valeur moyenne) montre une influence très réduite de l'avance sur la variation de la rugosité Rt pour une vitesse de rotation de l'outil de 2500 rpm.

Pour avoir une image plus détaillée de l'influence de la vitesse de rotation de l'outil sur la rugosité Rt, les tests ont été continués pour 4000 et 8000 rpm, avance variable.

L'influence de l'avance sur la rugosité Ra pour une vitesse de rotation de l'outil de 4000 rpm est présentée à la figure 3.63.



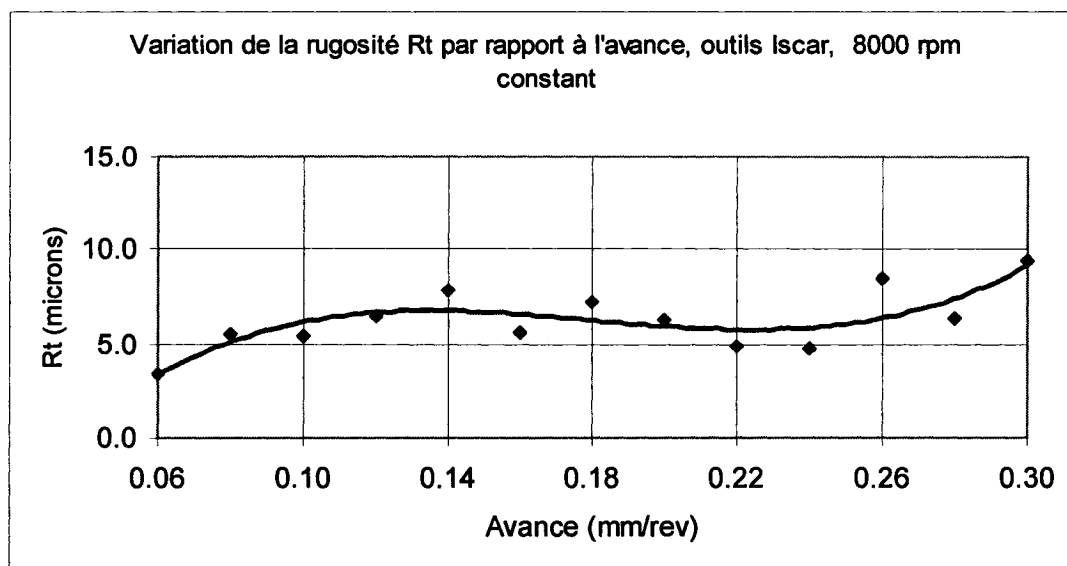
**Figure 3.63: Variation de la rugosité Rt par rapport à l'avance pour vitesse de rotation de l'outil constante 4000 rpm.**

Dans la figure 3.63 sont présentées 3 séries de données ainsi que leur valeur moyenne. Afin d'alléger la présentation, seulement les points et la courbe de la valeur moyenne sont présentés.

La courbe présentée (la courbe de tendance de la valeur moyenne) montre une influence très réduite de l'avance sur la variation de la rugosité Rt pour les valeurs comprises entre 0.14 et 0.24 mm/rev.

Dans le but de comprendre l'effet de l'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil sur la rugosité Rt, les tests ont été continués pour 8000 rpm, avance variable.

L'influence de l'avance sur la rugosité Ra pour une vitesse de rotation de l'outil de 8000 rpm est présentée à la figure 3.64.

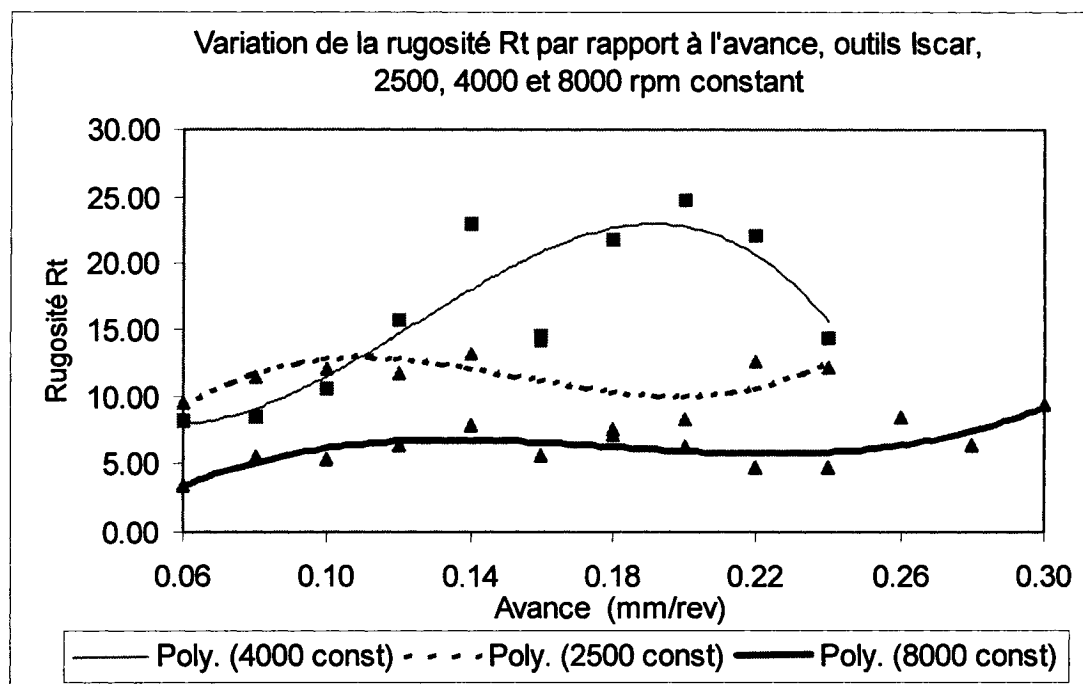


**Figure 3.64: Variation de la rugosité Rt par rapport à l'avance pour vitesse de rotation de l'outil constante 8000 rpm.**

Dans la figure 3.64, afin d'alléger la présentation, seulement les points et la courbe de la valeur moyenne sont présentés. La valeur moyenne est calculée à partir de 3 séries de données. Vu que leurs valeurs sont très serrées, pour des fins de clarté graphique, seulement les données pour la valeur moyenne sont représentées. Pour 8000 rpm, la dispersion des résultats (trois séries de tests) est plus réduite que pour 2500 et respectivement 4000 rpm.

La courbe présentée (la courbe de tendance de la valeur moyenne) montre une influence très réduite de l'avance sur la variation de la rugosité Rt pour les valeurs comprises entre 0.14 et 0.24 mm/rev.

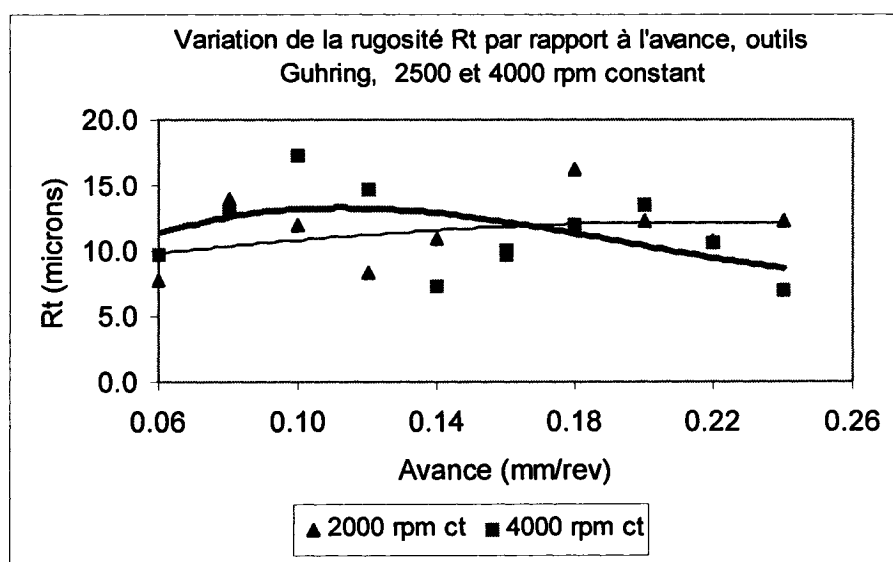
Pour faciliter l'interprétation des données reliées à l'interdépendante avance et vitesse de rotation des outils, pour les forets à plaquettes amovibles, sur le même graphique dans la figure 3.64 seront présentés les 3 graphiques précédents.



**Figure 3.64: Variation de la rugosité Rt par rapport à l'avance pour vitesse de rotation de l'outil constante 2500, 4000 et 8000 rpm.**

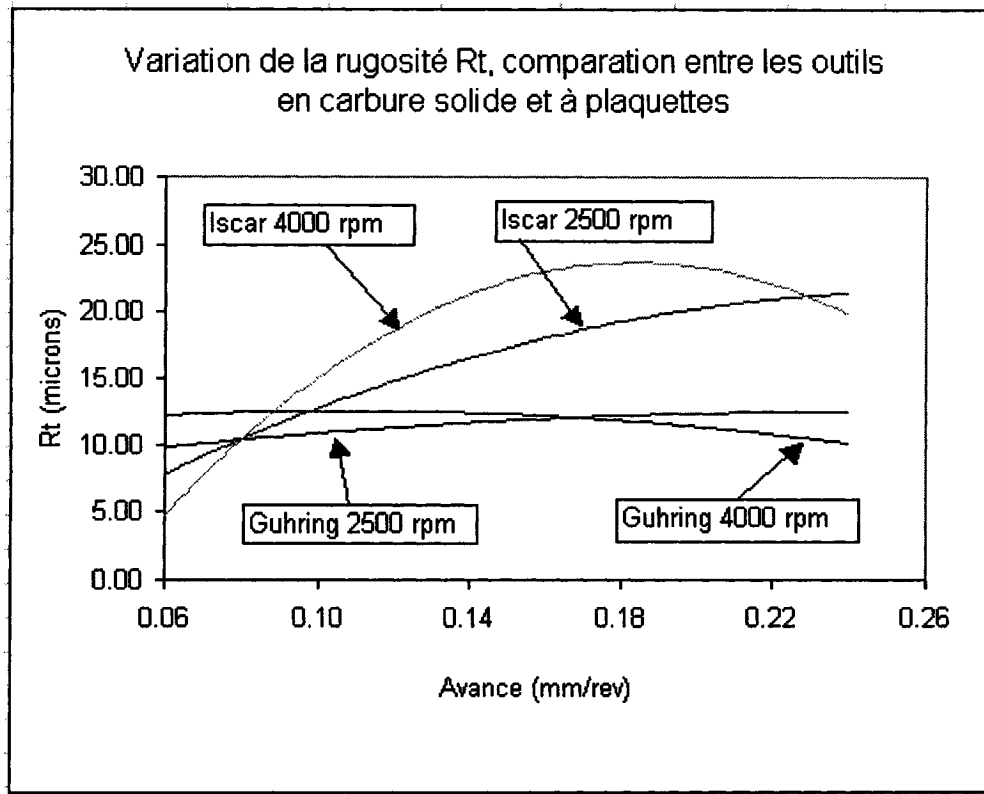
Pour 2500 rpm et respectivement 8000 rpm, la variation de la rugosité Rt est très peu sensible à la variation de l'avance. Pour 4000 rpm, la rugosité Rt a une tendance décroissante à partir de 0.2 mm/rev.

Pour les outils en carbure solide produits par Gurhing, les courbes de variation de la rugosité pour la vitesse de rotation de l'outil de 2500 et 4000 rpm et l'avance variable à partir de 0.06 mm/rev jusqu'à 0.24 mm/rev sont présentées à la figure 3.66.



**Figure 3.66: Variation de la rugosité  $R_t$  par rapport à l'avance pour vitesse de rotation de l'outil constante 2500 et 4000 rpm, outils Guhring.**

L'analyse des données présentées à la figure 3.66 montre que pour des vitesses de rotation de l'outil de 2500 et respectivement 4000 rpm, la rugosité  $R_t$  est peu sensible à la variation de l'avance. Pour les avances aux alentours de 0.18 mm/rev, les résultats sont presque identiques. Du point de vue pratique, pour les avances comprises entre 0.16 et 0.22 mm/rev, les valeurs de la rugosité  $R_t$  sont du même ordre de grandeur.

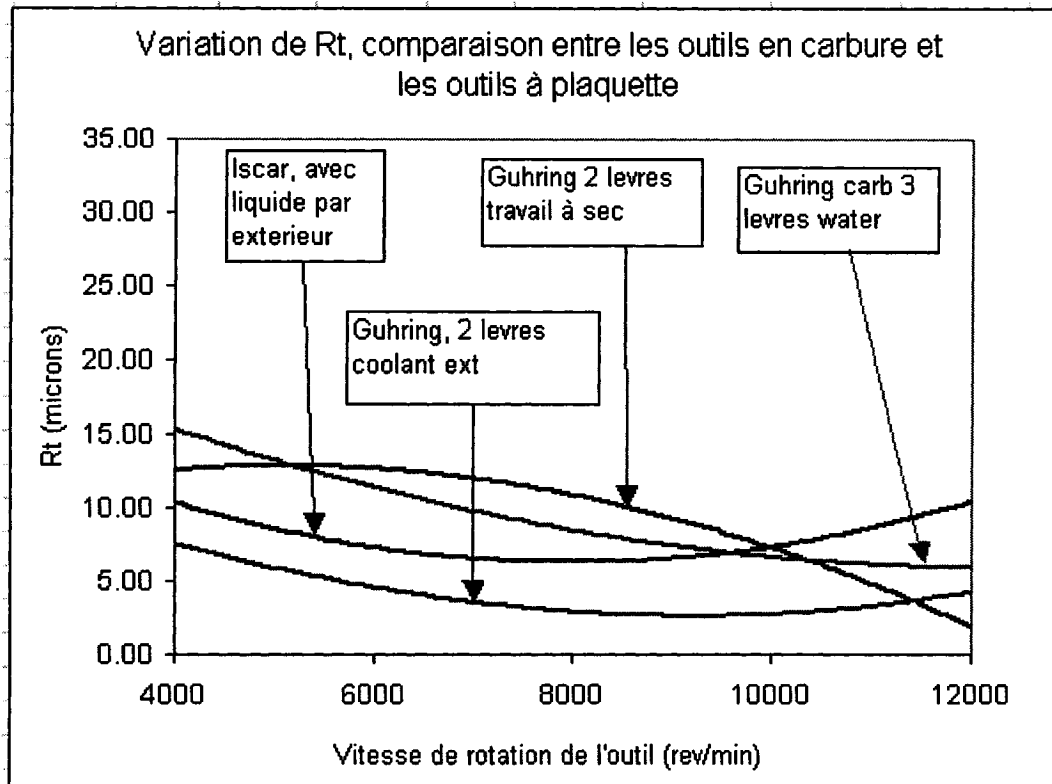


**Figure 3.67: Variation de la rugosité  $R_t$ . Comparaison entre les outils en carbure solide et à plaquettes pour 2500 et 4000 rpm.**

L'analyse de la figure 3.67 montre que les outils en carbure solide pour 2500 et 4000 rpm produisent pour le paramètre  $R_t$  de la rugosité des valeurs très proches sur tout le domaine des avances, à partir de 0.06 mm/rev jusqu'à 0.26 mm/rev.

La rugosité obtenue pour les outils en carbure solide est plus réduite que pour les outils à plaquette.

Pour avoir une image comparative des résultats produits par différentes conditions de coupe, à la figure 3.68 sont présentées sur le même graphique plusieurs courbes de tendance de la variation du paramètre Ra de la rugosité.

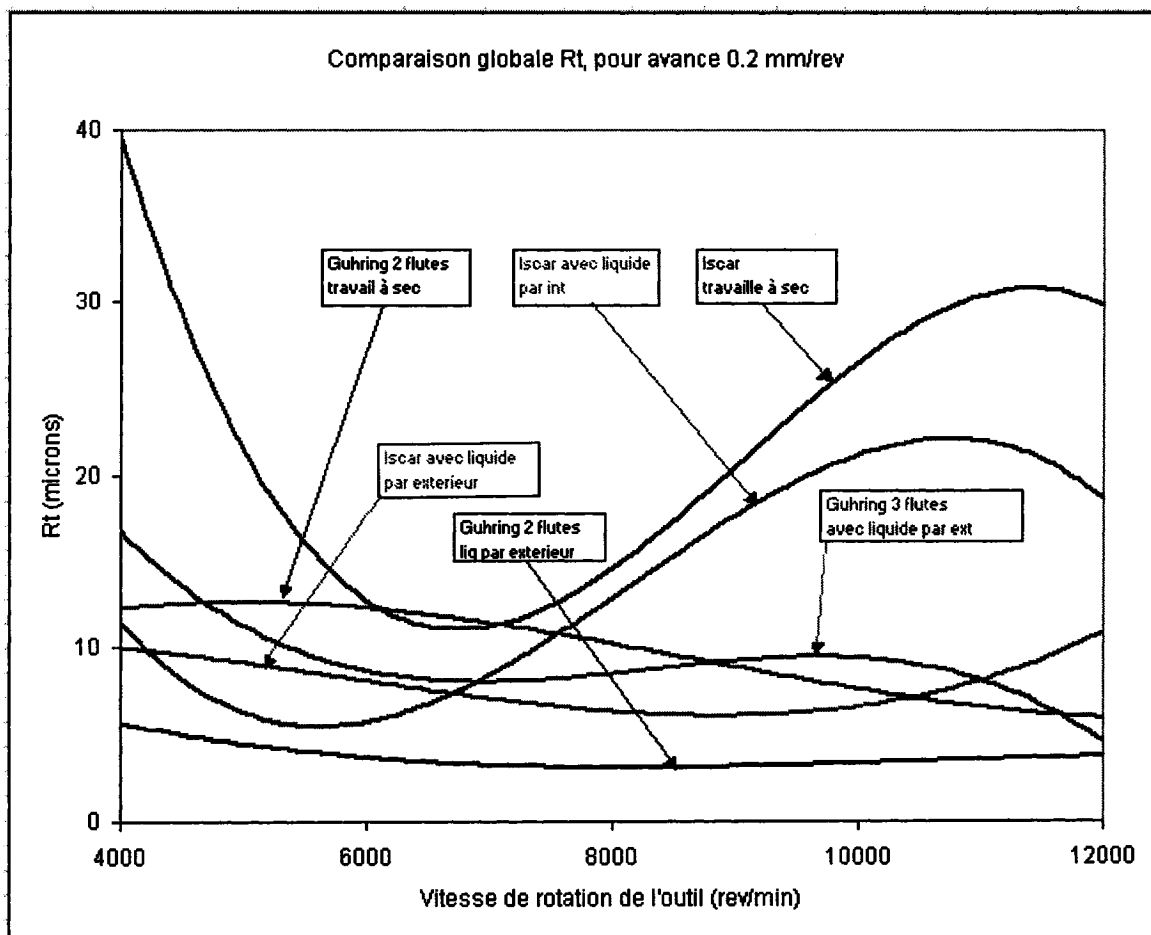


**Figure 3.68: Variation de la rugosité  $R_t$ . Comparaison entre les outils en carbure solide et à plaquettes pour différentes conditions de coupe.**

L'analyse des données présentées à la figure 3.68 montre que la tendance générale est décroissante sur la première partie du graphique, puis pour le travail avec du liquide de coupe la tendance croissante. Les outils en carbure solide, travaillant à sec, offrent une rugosité  $R_a$  décroissante par rapport à l'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil.



Pour une avance de 0.2 mm/rev, les courbes de variation de la rugosité  $R_t$  sont présentées à la figure 3.69.



**Figure 3.69: Variation de la rugosité  $R_t$ . Comparaison entre les outils en carbure solide et à plaquettes pour différentes conditions de coupe.**

À remarquer que les outils Iscar à partir de 7000 rpm ont une tendance croissante pour la rugosité  $R_t$ .

### **3.7 Forces et moments pour le perçage avec des forets en carbure solide Guhring**

Les forets utilisés ont été présentés au chapitre 2, figure 2.50, page 71. Il s'agit d'un foret en carbure solide ayant 90% WC et 10% Co avec un recouvrement TiAlN multilayer, connu commercialement sous le nom de Firex™.

Le perçage a été fait de façon continue, sans retirer le foret. Chaque trou a eu une longueur de 30 mm.

Afin de connaître l'ordre de grandeur des forces et moments, des recherches bibliographiques ont été faites, voir le chapitre 2, pages 78-80 ainsi que l'annexe 2.6. Des graphiques de variation des moments obtenus par enregistrement des données (Mellinger 2002) ont également été consultés.

L'interprétation de l'ordre de grandeur de l'usure est faite en accordance avec la norme ANSI/ASME B94.55M-195. Voir aussi la figure 2.18, page 51.

Lacalle (2001) souligne la complexité des phénomènes en usinage à haute vitesse de coupe en remarquant l'apparition d'une couche d'aluminium qui se dépose sur les outils. L'influence du recouvrement d'outil devient d'importance majeure (les résultats de recherche du présent mémoire vont démontrer ça).

Spécialement dans l'usinage à sec, le recouvrement des outils a une influence majeure dans la durée de vie des outils (Birne, 2003). Les phénomènes produits dans l'interface matériau de base - copeau - outil sont amplement influencés par le revêtement de l'outil.

La tendance dans le recouvrement des outils est l'utilisation des recouvrements autolubrifiants, spécialement les revêtements à base de MoS<sub>2</sub>.

L'évolution dans le recouvrement des outils de coupe est présentée à la figure 3.70.

La technologie de déposition en couches multiples a fait des progrès et présentement les fournisseurs d'outils de coupe offrent des solutions de revêtement ayant différents noms commerciaux, exemple "Firex®™" pour Guhring.

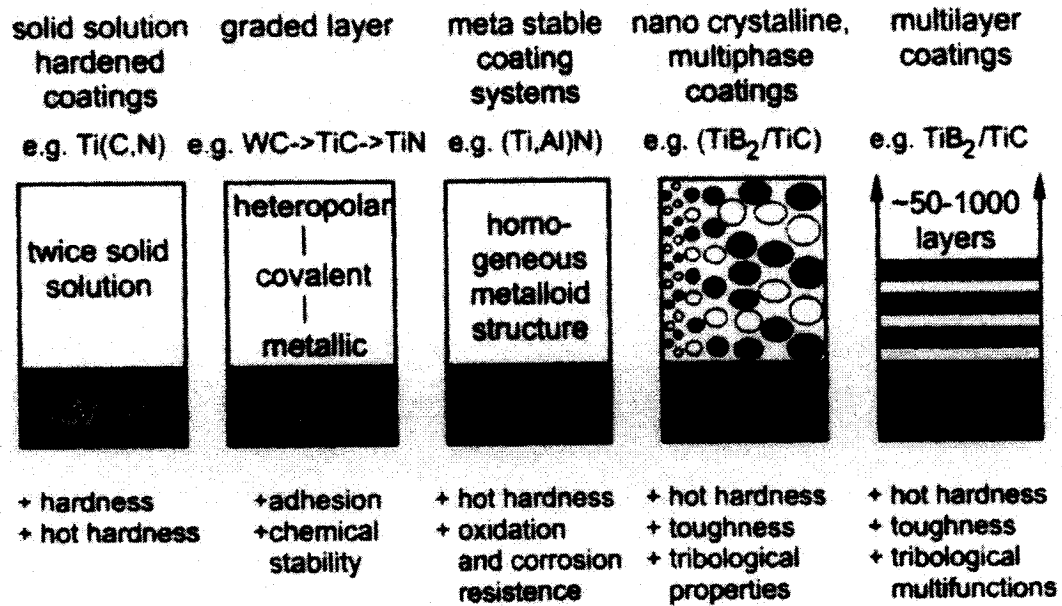


Figure 3.70. Évolution des revêtements des outils de coupe (Birne, 2003).

La figure ci haut présentée est incluse dans ce chapitre de résultats expérimentaux pour souligner l'importance du revêtement de l'outil. Les résultats obtenus durant les expériences faites pour ce mémoire ont présenté clairement la supériorité de recouvrement multicouches.

L'allure globale de la force  $F_z$  est présentée à la figure 3.71. Tous les enregistrements des forces ont la même allure pour les forets en carbure solide. Au début est visible l'entrée du point du foret dans le matériau à percer, puis une zone représentée par une bande constante et à la fin une zone décroissante quand le foret se retire du matériau à percer.



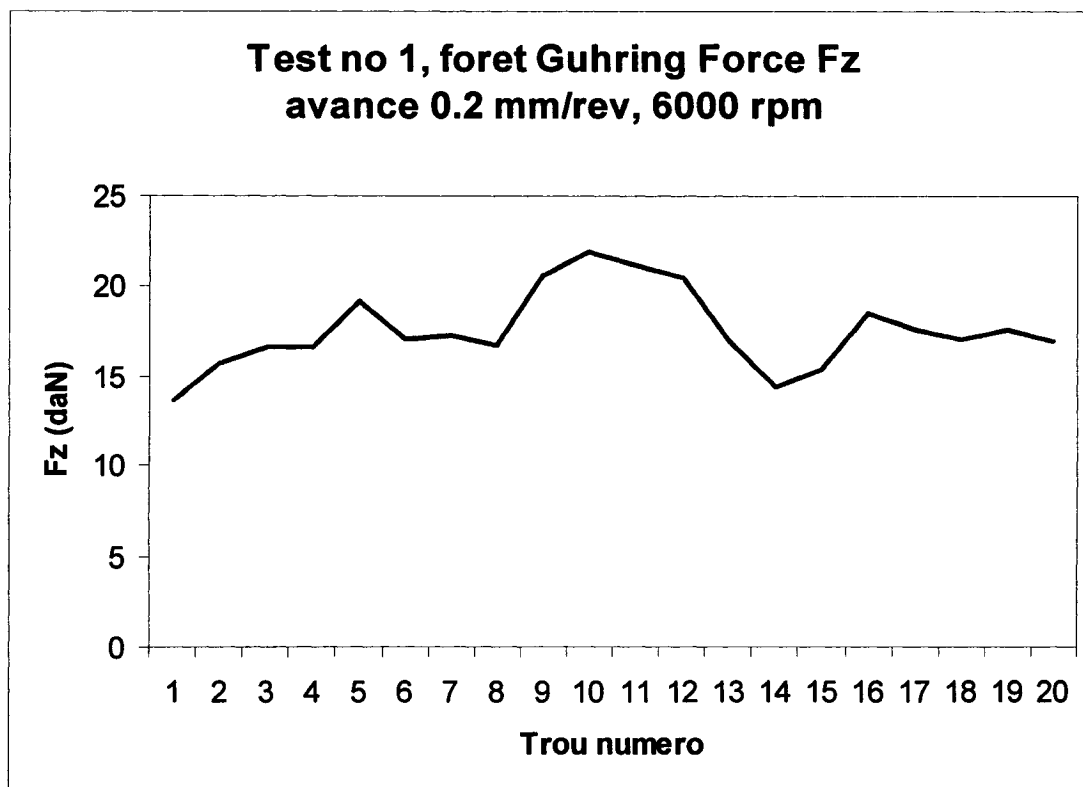
**Figure: 3.71. Allure globale de la force  $F_z$  pour forets en carbure solide.**

Cette figure est présentée pour signaler le comportement "constant" de la force  $F_z$  pour un trou. Ultérieurement sera remarqué que pour les forets à plaquette amovible, l'évolution de la force  $F_z$  est en deux "niveaux" (les détails seront donnés dans le paragraphe 3.8).

Dans l'annexe 3.4 sera présenté un set d'images où sont présentés progressivement l'outil, la force et le moment ainsi que l'émission acoustique et la vibration.

Sur la figure 3.72 est présentée la variation de la force  $F_z$  pour les premiers 20 trous, donc pour une longueur de perçage de 600 mm.

À remarquer que pour les premiers 5 trous, la force est croissante et correspond à la première étape de l'usure, connue sous le nom d'usure d'initialisation (les autres deux étapes sont l'usure technologique et puis l'usure accélérée).



**Figure 3.72. Variation de la force Fz, foret Guhring, premier test.**

Pour les trous 10-12, on observe qu'une croissance de la valeur de la force Fz augmente légèrement. Cette augmentation est causée par l'adhésion temporaire du matériau sur les goujures du foret. Le matériel collé s'enlève par lui-même et le perçage peut continuer sans l'intervention de l'opérateur humain. En caractérisant de façon globale la variation de la force Fz, on peut conclure que le comportement global est pratiquement linéaire, légèrement croissant.

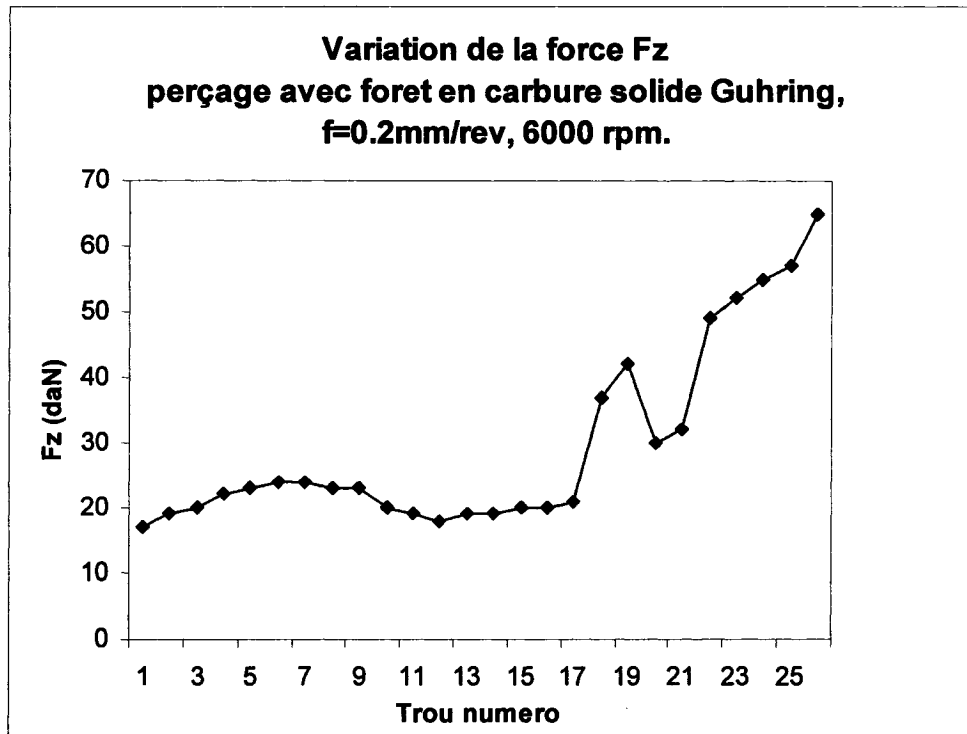
Dans la figure 3.73 est présentée l'image de l'outil avec le matériau collé, ce qui justifie l'augmentation de la force Fz pour le trou numéro 11.



**Figure 3.73. Matériau collé sur le foret carbure solide, trou numéro 11.**

L'augmentation de la force de coupe est donnée par le matériau collé sur le foret. À ce niveau d'usure et d'effacement de la couche de recouvrement, le matériau d'apport se détache par lui-même et le perçage continue sans être obligé d'arrêter la machine.

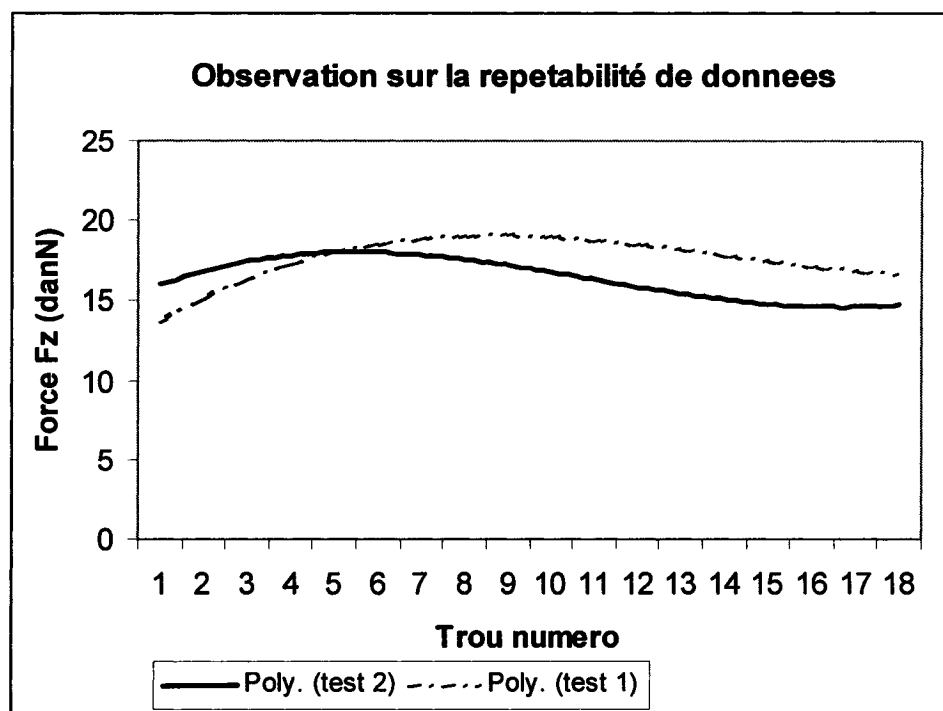
Pour connaître le comportement de la force  $F_z$  quand l'usure augmente fortement, pour le deuxième test, les enregistrements ont été continués au-dessus de la limite de l'usure technologique dite usure normale, jusqu'à la limite physique de l'outil. On constate une augmentation très rapide de la force  $F_z$ , qui correspond à l'usure dite "usure accélérée" ou usure catastrophique.



**Figure 3.74. Variation de la force Fz, foret Guhring, deuxième test.**

L'aperçu global de cette courbe montre clairement que l'usure du foret respecte le concept global de courbe d'usure.

Pour vérifier la variation des enregistrements pour Fz (la répétitivité des résultats), un graphique incluant les valeurs de la composante axiale de la force de coupe pour deux séries de données a été tracé. La répétitivité des données pour la force Fz est présentée à la figure 3.75.

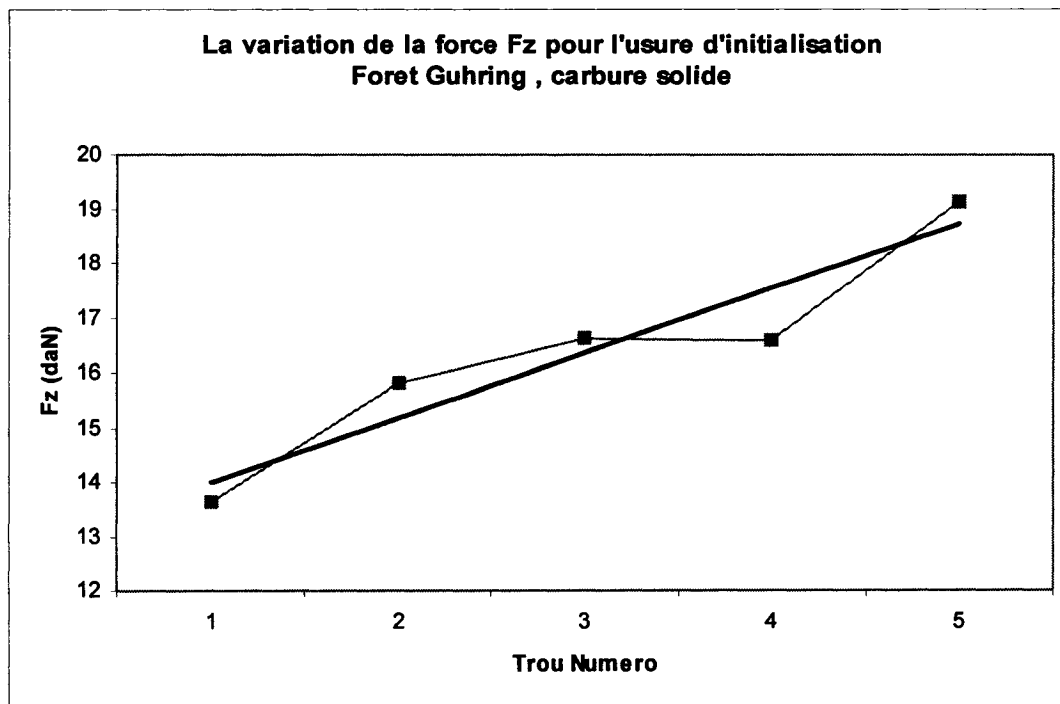


**Figure 3.75. Répétabilité des données pour la force Fz, foret Guhring.**

Les courbes globales de tendance ont la même allure et les valeurs de la force Fz mesurées sont du même ordre de grandeur. Les différences peuvent être données par la variation de l'homogénéité du matériel à percer mais d'autres facteurs peuvent intervenir (la répétitivité de la géométrie de l'outil, l'équilibrage de l'ensemble foret et porte-outil).

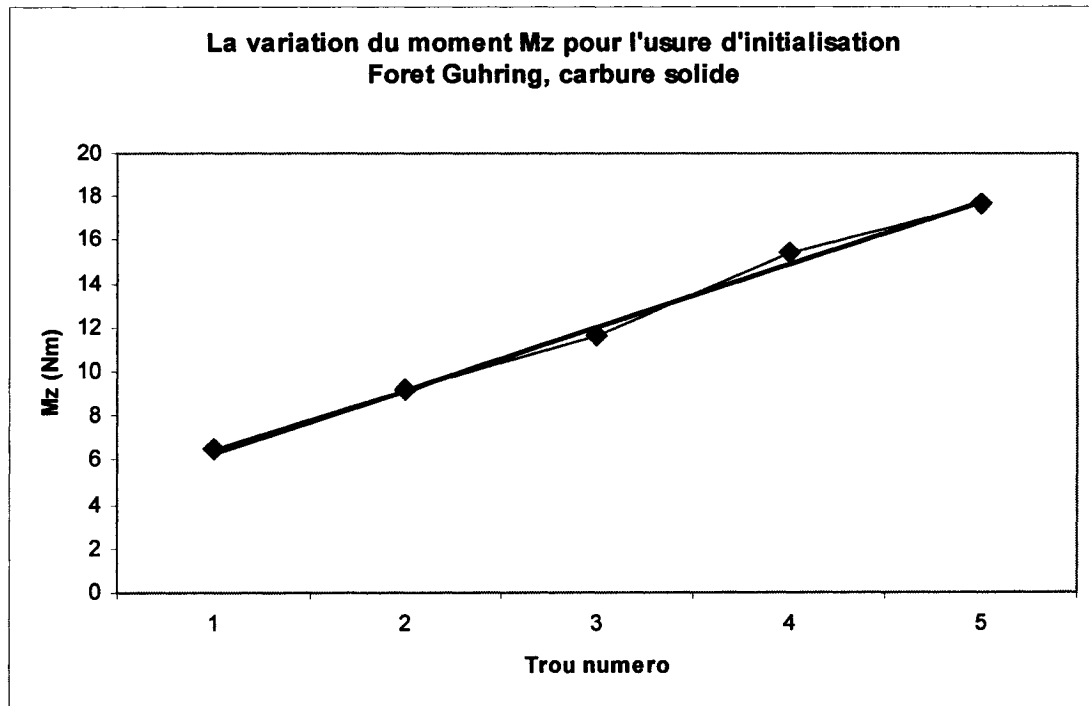
Sur la figure 3.76 sera présentée la variation de la force Fz pour les premiers trous, correspondant à la première étape de l'usure, nommée usure d'initialisation.





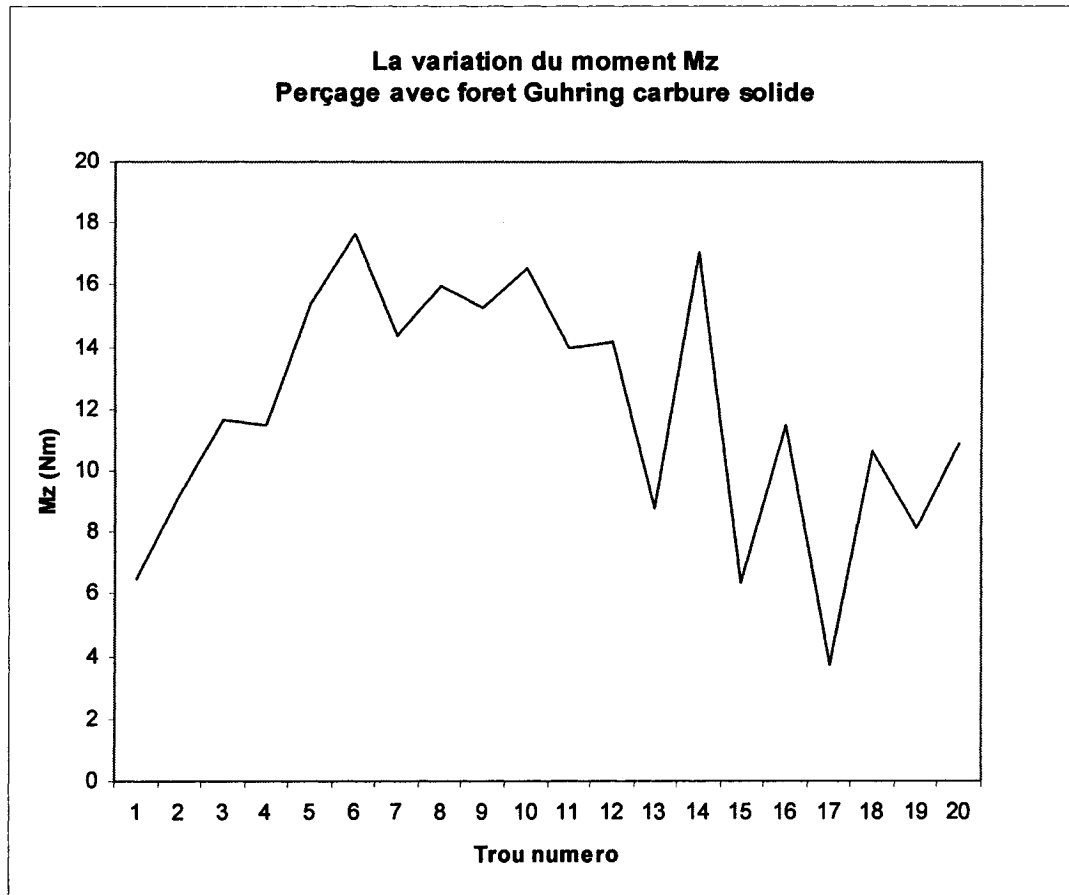
**Figure 3.76. Variation de la force Fz pour les premiers 5 trous du test numéro 1, foret Guhring en carbure solide.**

L'analyse de la figure 3.76 montre une croissance de type linéaire pour la force Fz pour les premiers 5 trous. L'interprétation de ces données permet d'affirmer que le concept global d'usure s'applique pour les forets en carbure solide durant le perçage des CMM. Pour avoir une image plus complète des paramètres de coupe pour les premiers trous (la première étape de l'usure), le graphique de la variation du moment Mz sera présenté à la figure 3.77.



**Figure 3.77. Variation du moment  $M_z$  pour les premiers 5 trous du test numéro 1, foret Guhring, carbure solide.**

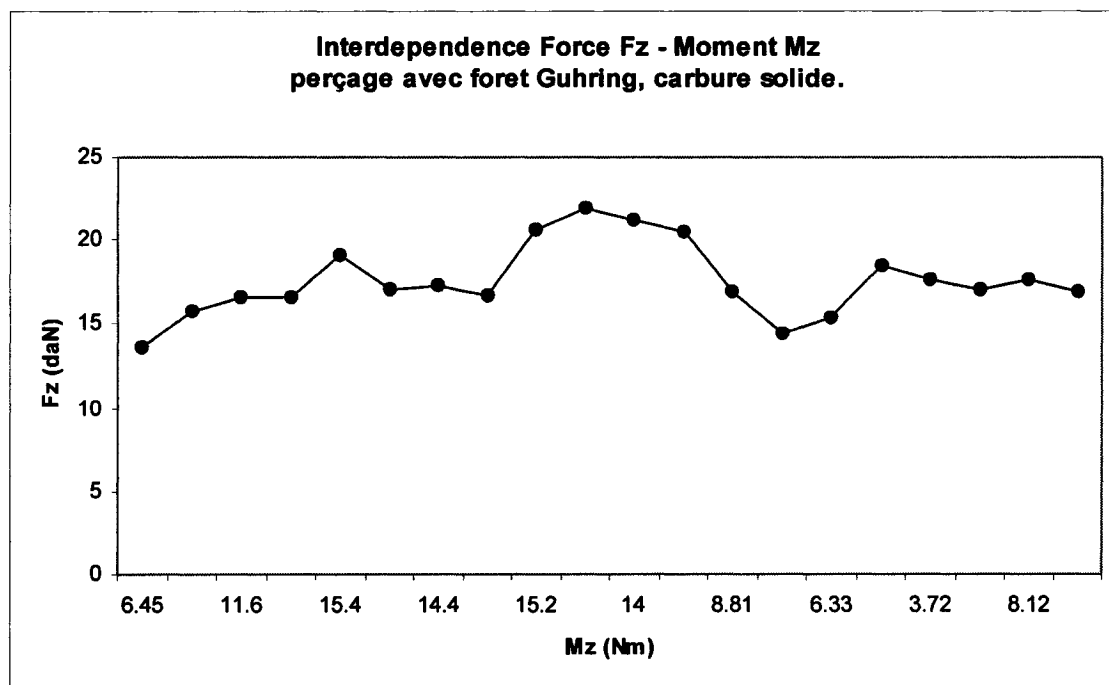
Les données présentées à la figure 3.77 montrent une dépendance linéaire du moment  $M_z$  par rapport à l'usure de l'outil dans la première étape, nommée usure d'initialisation. La variation du moment  $M_z$  pour tout le domaine d'usure technologique (usure normale) est présentée à la figure 3.78.



**Figure3.78. Variation du moment  $M_z$  par rapport à la longueur de perçage. Foret Guhring.**

La conclusion qui se dégage de l'analyse du graphique présenté à la figure3.78 est que le moment  $M_z$  est très sensible par rapport à l'adhérence du matériau sur les goujures (cannelures d'évacuation des copeaux).

Afin d'observer l'interdépendance entre la variation de la force  $F_z$  et le moment  $M_z$ , le graphique de dépendance  $F_z$ - $M_z$  sera présenté à la figure 3.79.



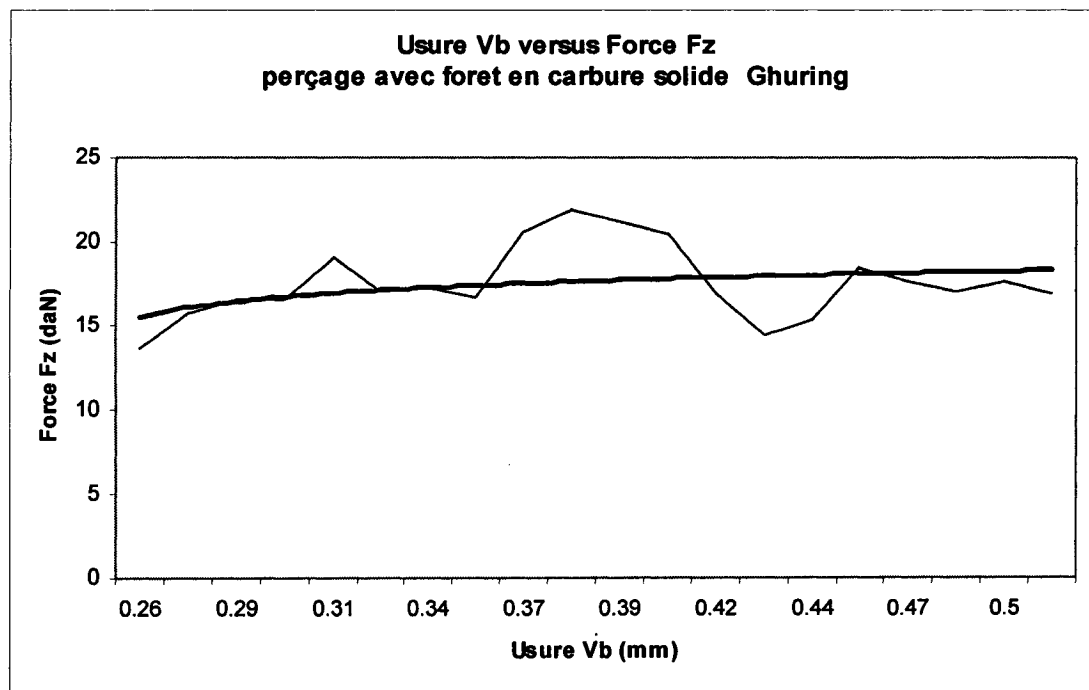
**Figure 3.79. Interdépendance Fz - Mz pour perçage avec foret Guhring en carbure solide.**

L'interdépendance de la force Fz et du moment Mz, pour le perçage avec foret en carbure solide (les premières 20 trous), montre que la croissance de la force Fz n'implique pas une croissance directement proportionnelle du moment Mz. Le moment Mz est beaucoup plus sensible que la force Fz par rapport à la déposition du matériau sur les goujures du foret. Cette conclusion donne l'idée d'étudier la variation du moment pour la même géométrie du foret mais avec des recouvrements différents.

Pour étudier l'influence de l'usure sur la force Fz, le graphique de dépendance entre la valeur de l'usure Vb et la valeur de la force Fz sera présenté à la figure 3.80.

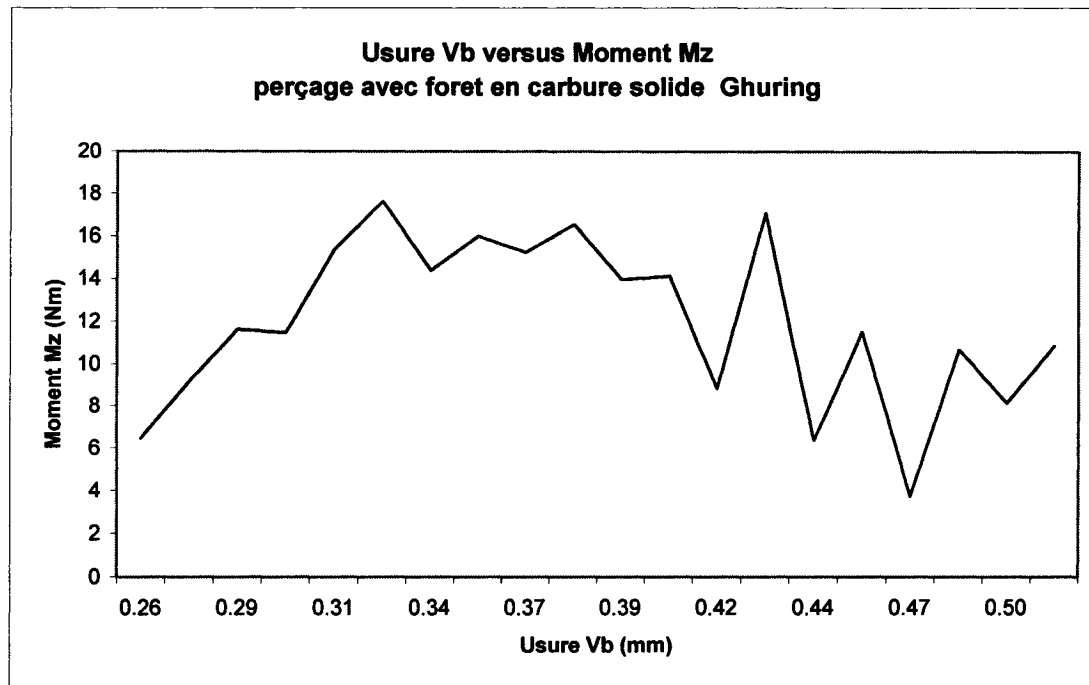
Globalement, la tendance de la force Fz est très légèrement croissante par rapport à l'usure.

La variation de la force Fz est légèrement croissante comme courbe de tendance sur la zone d'usure normale, donc une bonne corrélation entre force et usure (le même type de croissance légère).



**Figure 3.80. Usure Vb versus force Fz. Perçage avec foret en carbure solide Guhring.**

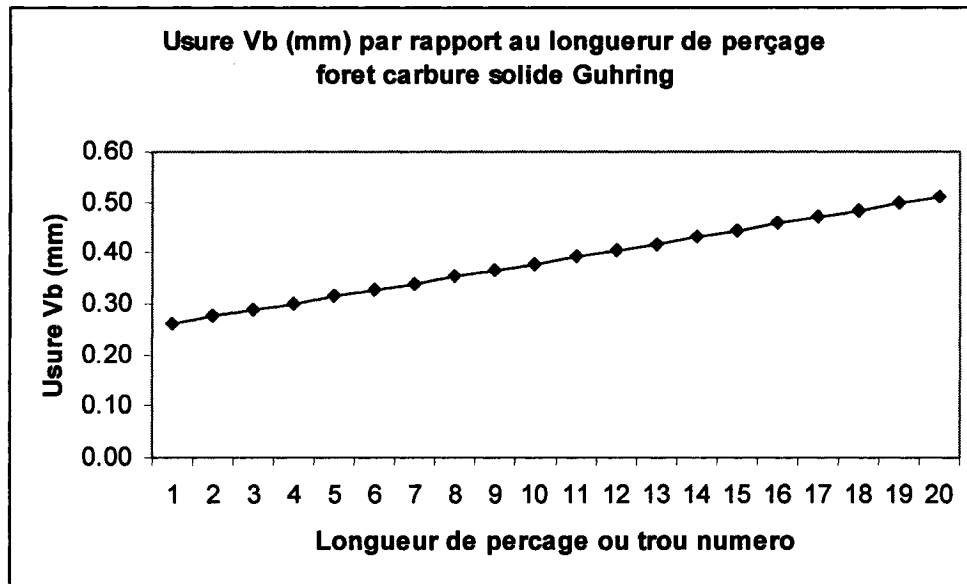
La variation du moment  $Mz$  par rapport à la variation de l'usure Vb sera présentée à la figure 3.81.



**Figure 3.81. Usure Vb versus Moment Mz, perçage avec foret Guhring, carbure solide.**

La figure 3.81 montre que le moment Mz n'est pas directement sensible à la croissance de l'usure. L'adhérence des copeaux sur les goujures du foret influence directement la variation du moment Mz.

La variation de l'usure par rapport à la longueur de perçage est présentée à la figure 3.82.



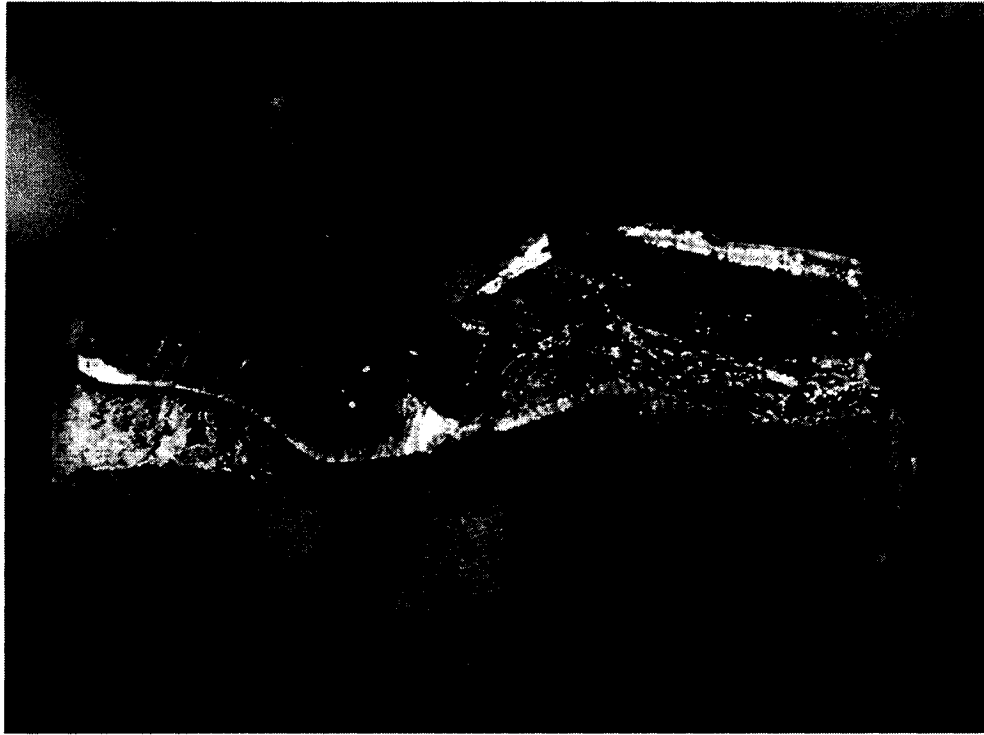
**Figure 3.82. Variation de l'usure Vb par rapport à la longueur de perçage.**

L'interprétation des données présentées à la figure montre que l'usure augmente linéairement. En analysant les figures 3.88 et 3.89, on observe que la grandeur des bavures a aussi une tendance croissante proportionnellement avec l'usure du foret.



**Figure 3.83. Matériau collé sur le foret après 1800 mm de perçage.**

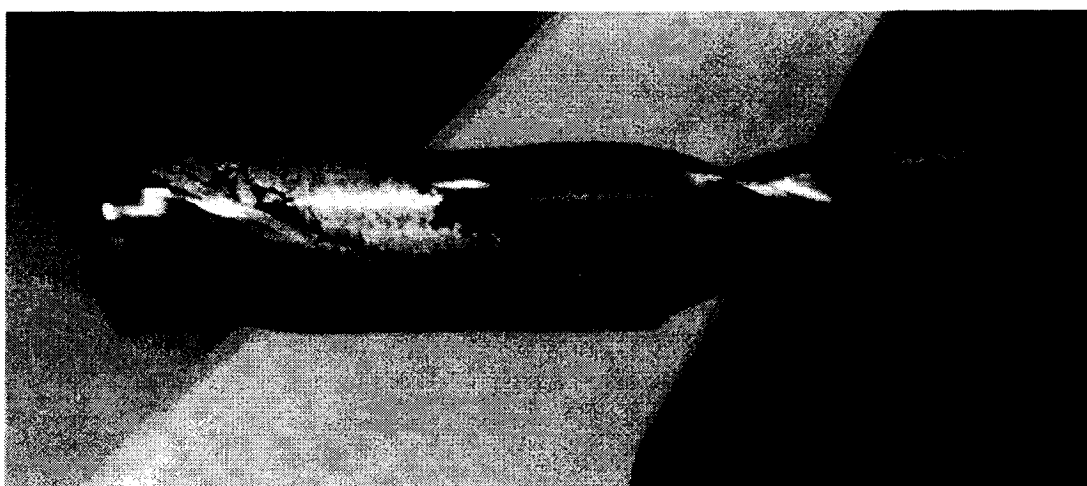




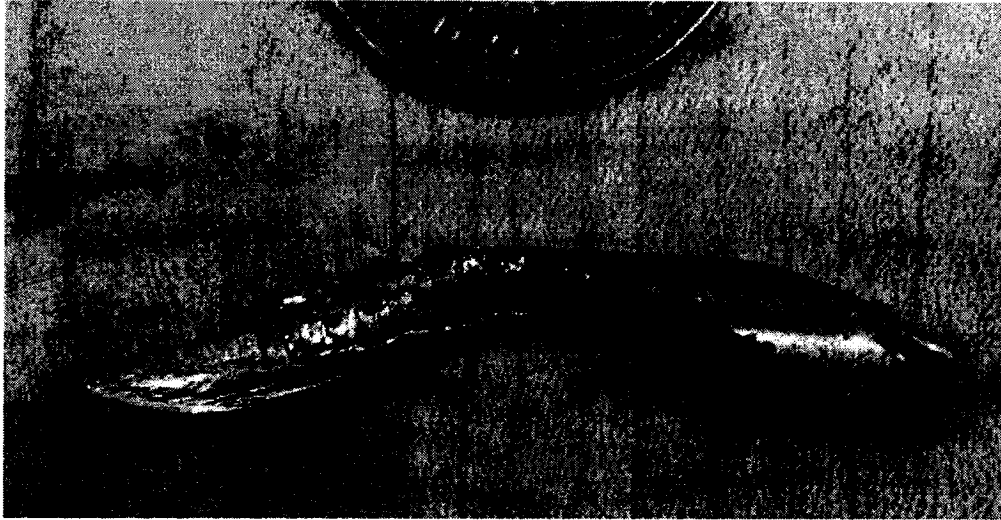
**Figure 3.84. Matériau collé sur le foret après 1950 mm de perçage.**



**Figure 3.85. Matériau collé sur le foret après 2100 mm de perçage.**

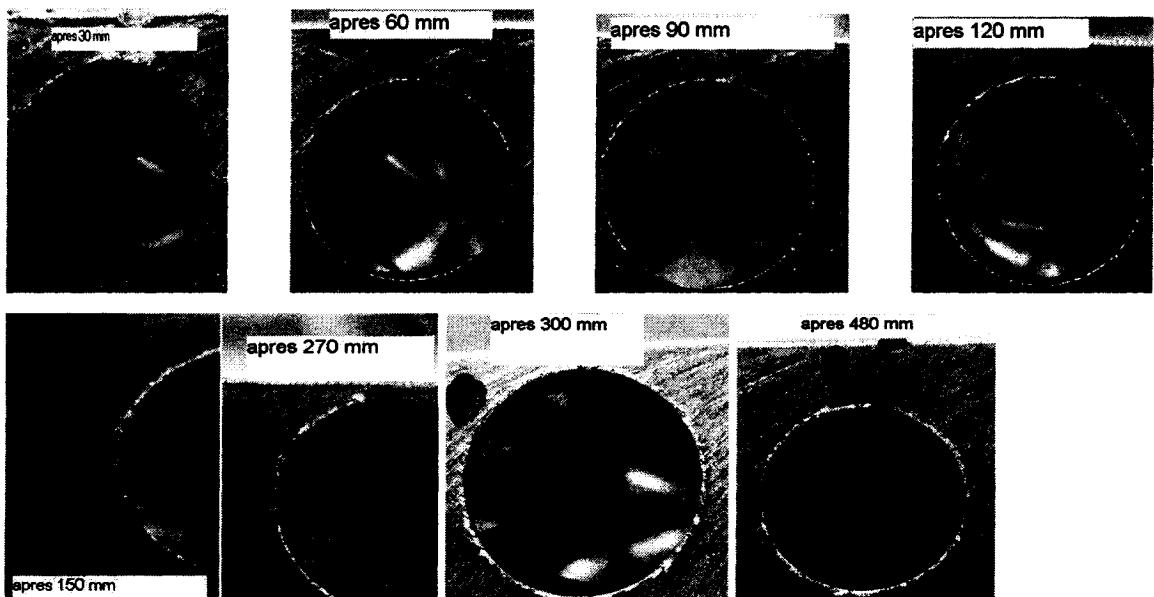


**Figure3.86. Matériau collé sur les goujures du foret après 1800 mm ou 45 trous.**

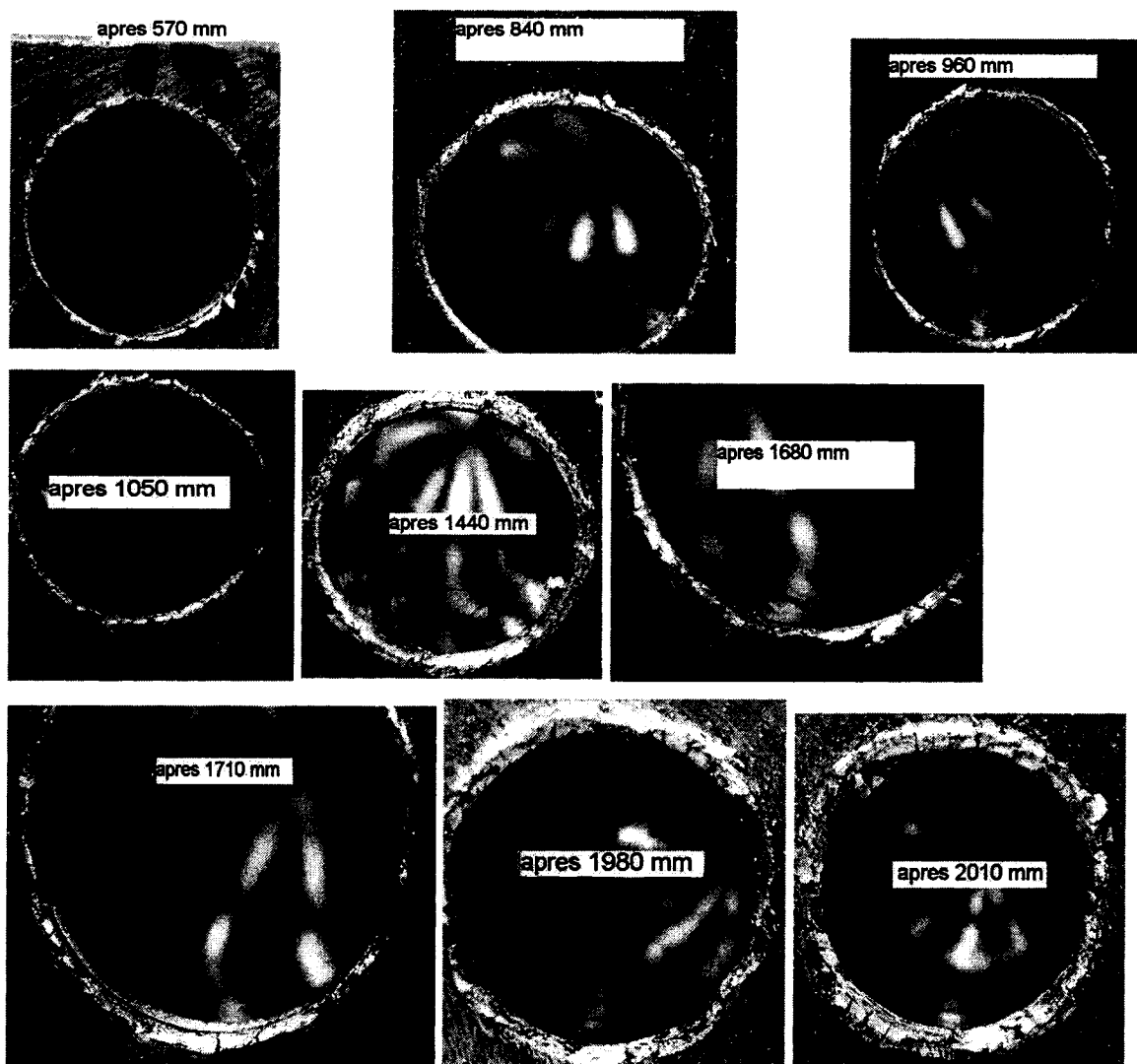


**Figure 3.87. Matériau collé sur les goujures du foret après 2200 mm.**

La formation des bavures sera présentée pour l'usure progressive du foret. Les photos ont été prises après chaque trou profond de 30 mm.

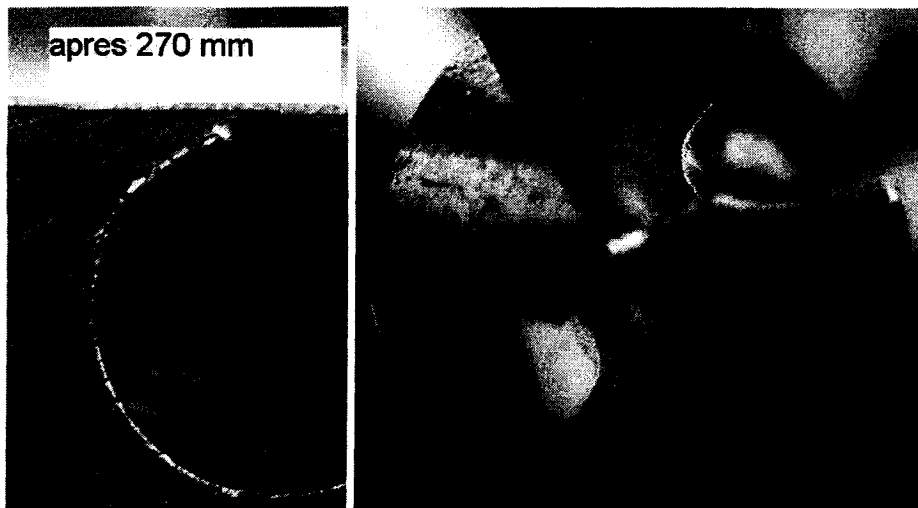


**Figure 3.88. Bavures pour les premiers 8 trous, foret carbure solide Guhring.**

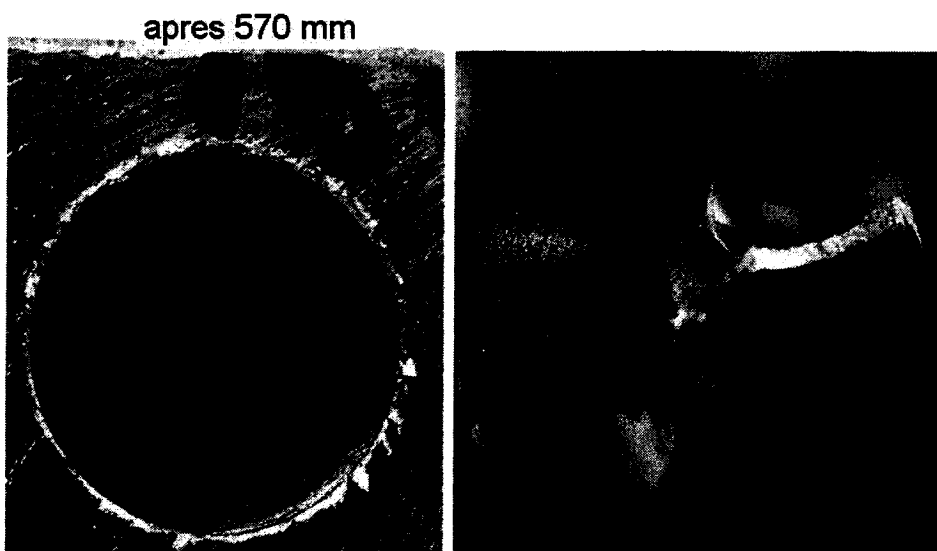


**Figure3.89. Formation des bavures par rapport à l'usure, foret carbure solide Guhring, avance 0.2 mm rev, 6000 rpm.**

Dans les figures suivantes sont présentées des images pour visualiser la corrélation entre la formation des bavures et l'usure du foret.

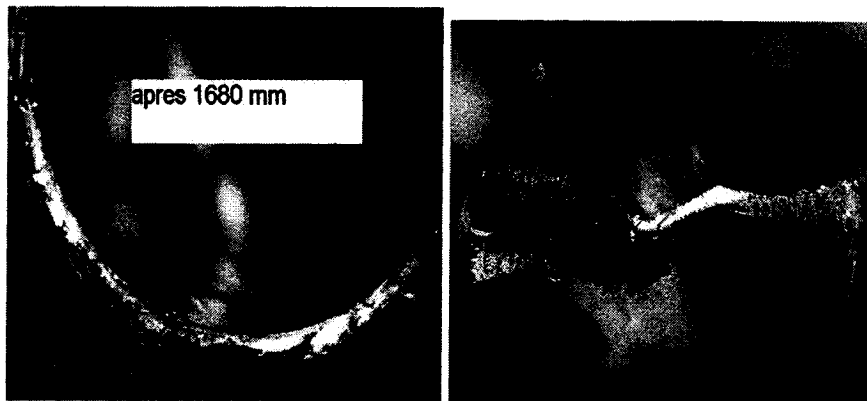


**Figure 3.90. Bavure et usure après 270 mm de perçage.**



**Figure 3.91. Bavure et usure après 570 mm de perçage.**

À remarquer qu'on est sur la zone dite d'usure normale ou technologique avec une progression linéaire, légèrement croissante. La grandeur des bavures et l'usure augmentent de façon linéaire.

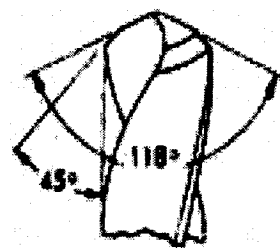


**Figure 3.92. Bavure et usure après 1680 mm de perçage.**

Plus de détails concernant la nature des bavures observées sont présentés à l'annexe 3.5 (discussions des bavures par rapport à l'avance, à la vitesse de coupe et d'autres remarques).

Pour réduire les bavures, une solution devrait être l'utilisation des forets à coins arrondis.

### Standard Point with 45 Chamfer

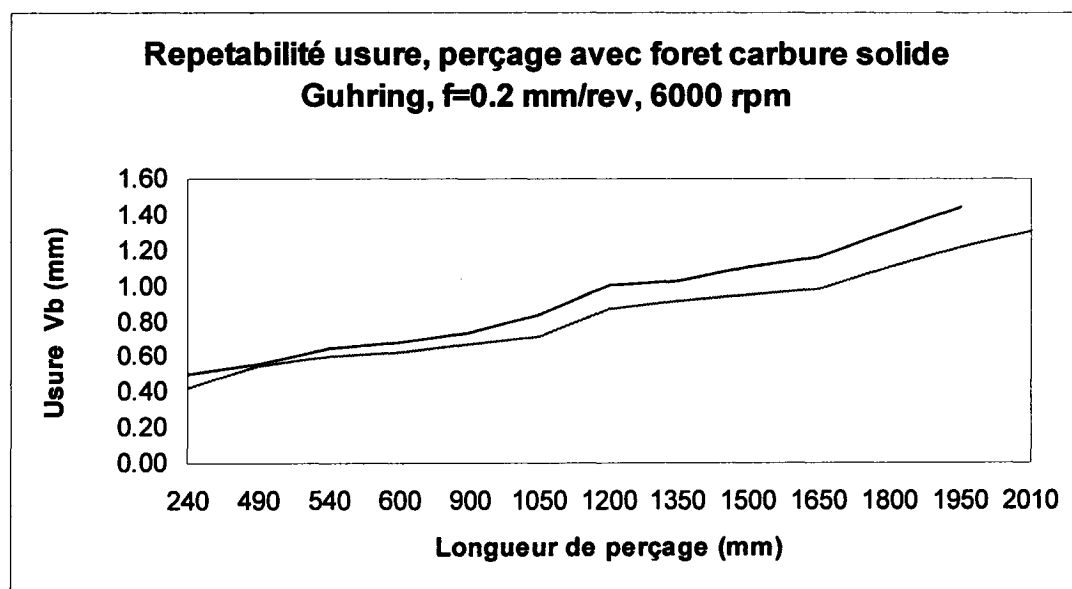


A corner chamfer is used to reduce the burr in soft materials or reduce corner breakdown in abrasive materials.

**Figure 3.93, Recommandation pour réduire les bavures en perçage (source: Catalogue Union Butterfield).**

Dans la bibliographie consultée concernant le perçage des MMC, nous n'avons pas trouvé d'observations, de recommandations ou de résultats expérimentaux pour le perçage des composites à matrice métallique avec ce type de géométrie du foret.

Afin de s'assurer que l'usure présente le même ordre de grandeur et de plus qu'elle suive la même courbe de tendance, le graphique de répétitivité de l'usure a été tracé.



**Figure 3.94. Répétabilité usure, foret Guhring, 6000 rpm, f=0.2 mm/rev.**

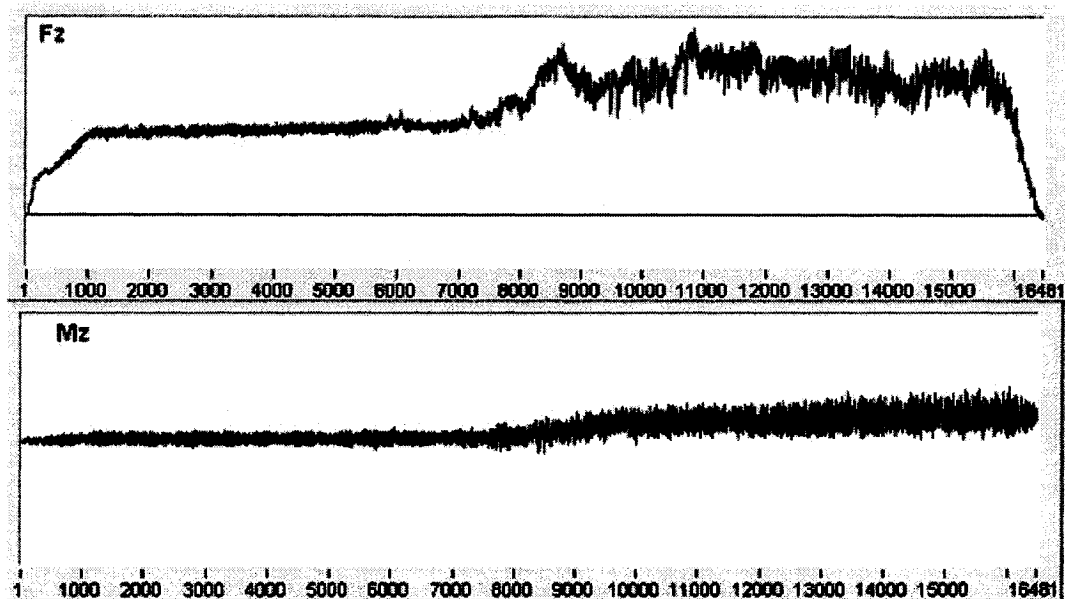
Les principales observations de ce chapitre sont :

- le moment  $M_z$  est plus sensible que la force  $F_z$  par rapport aux dépositions du matériau sur les goujures du foret;
- quand le matériau collé sur les goujures reste de façon permanente sur le foret, la force  $F_z$  augmente clairement et peut être utilisée comme un paramètre pour la supervision automatique de l'outil (tool monitoring);
- la formation des bavures est directement dépendante de l'usure du foret.

### 3.8 Forces et moments. Percage avec des forets à plaquette Iscar.

L'allure globale de l'enregistrement des forces et des moments pour perçage avec des forets à plaquette produites par ISCAR, est présenté dans la figure 3.95.

Les outils utilisés ont été présentés dans le chapitre 2, voir les figures 2.52 et 2.53. Il s'agit des plaquettes de nuance IC908 ayant un équivalent ISO K20-K30 avec un revêtement TiAlN.



**Figure 3.95. L'allure globale de l'enregistrement des forces et moments pour outils Iscar**

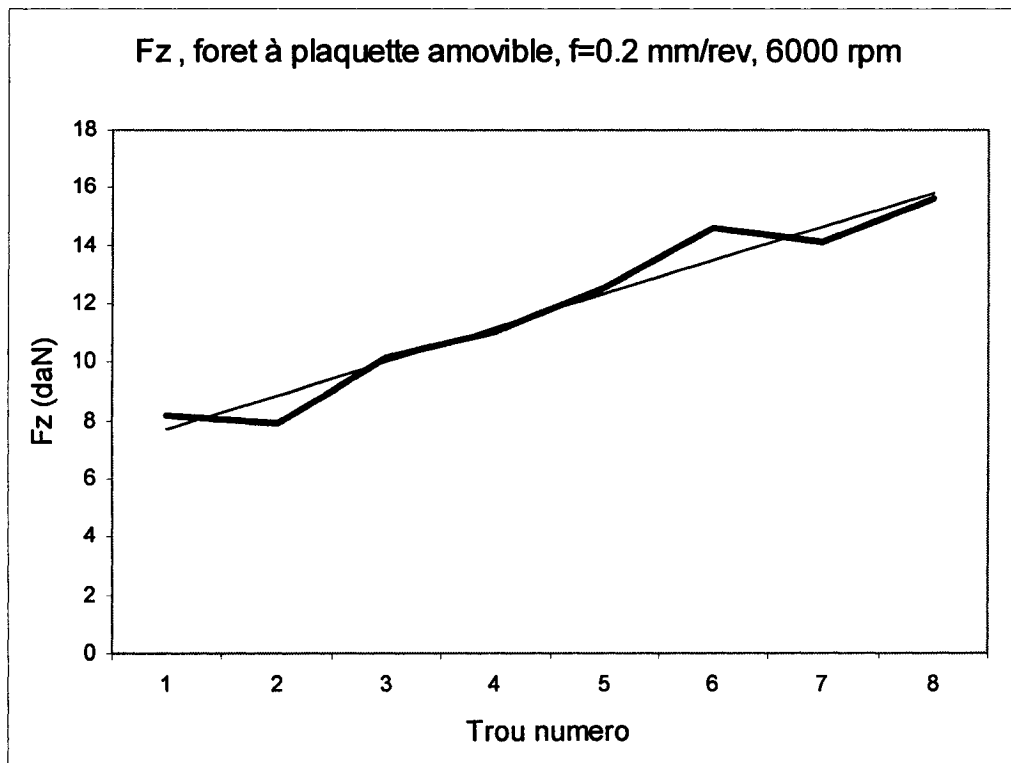
Sur la figure 3.95 on remarque 2 zones distinctes pour chaque enregistrement. La première partie de la courbe représente le perçage faite avec la première partie de l'outil, en effet quant dans le matériaux à perçer se trouve seulement la partie de l'outil avec la plaquette. Puis est remarquable une courte zone transitoire correspondant aux région de contact entre la plaquette et le corps de l'outil et puis le perçage faite quand l'outil rende



dans le matériel plus profonde que la longueur de la plaquette. Le perçage a été fait continu sans retirer l'outil du matériau durant le travail. La variation de la force  $F_z$  et du moment  $M_z$  est dépendante de l'usure de l'outil et spécialement de l'adhésion du matériau sur les goujures du foret. La première observation qui se dégage est que l'emploi de cet type d'outils impose le travail avec le retraitement de l'outil (peack drilling). Vu la nature très abrasive des microcopeaux, le peack drilling peut participer à l'usure de l'util et à la modification de la topographie de la surface de trou.

Pour étudier la variation de la force  $F_z$  et du Moment  $M_z$ , le domaine d'enregistrement a été divisé en deux parties, nommées la zone stable et la zone instable. Des graphiques de variation des forces et moments seront présentées pour les deux zones. La durée de vie des outils à plaquette produites a été beaucoup plus courte par rapport aux forets en carbure solide. Sur les graphiques suivantes seront visible des enregistrements faits pour un nombre plus réduits de trous comparativement aux forets en carbure solide. Dans le présente mémoire seront présentées quelques diagrammes de variation de la force  $F_z$  et du moment  $M_z$  afin d'apporter une contribution au connaissance du domaine de perçage des MMC. De point de vue industriel, le perçage avec des forets en carbure solide reste l'option prioritaire.

Dans la figure 3.96 est présenté la variation de la force  $F_z$  pour la première moitié de longueur des trous, quand en contact avec le matériaux à perçer se trouve seulement la plaquette.

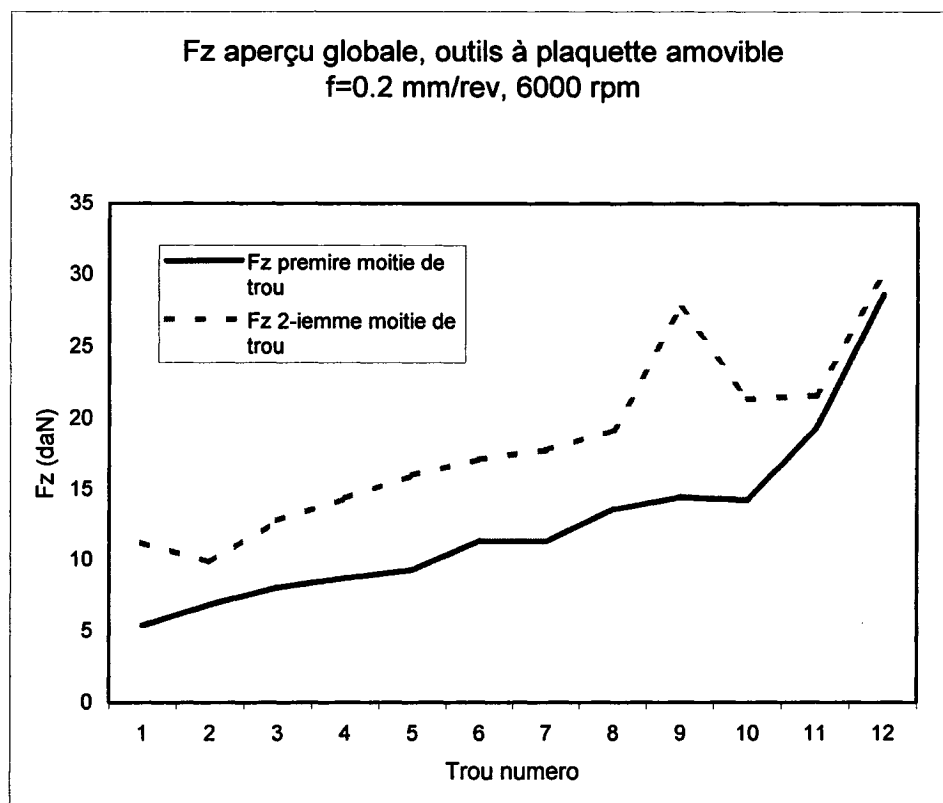


**Figure 3.96. Force Fz. Outil à plaquette, f=0.2 mm/rev, 6000 rpm**

L'augmentation de la force axiale Fz est linéaire par rapport à la longueur de perçage. Ne sont pas constatées des variations significatives de la force Fz d'un trou à l'autre.

Les tests ont été continués pour un nombre plus grand de trous (12, par rapport aux 8 trous dans l'expérience antérieure présentée dans la figure 3.96) afin de visualiser la variation de la force Fz et de moment Mz pour une usure extrême.

Dans la figure 3.97 sera présentée sur le même graphique la variation de la force Fz pour la première et respectivement pour la deuxième partie de trou.

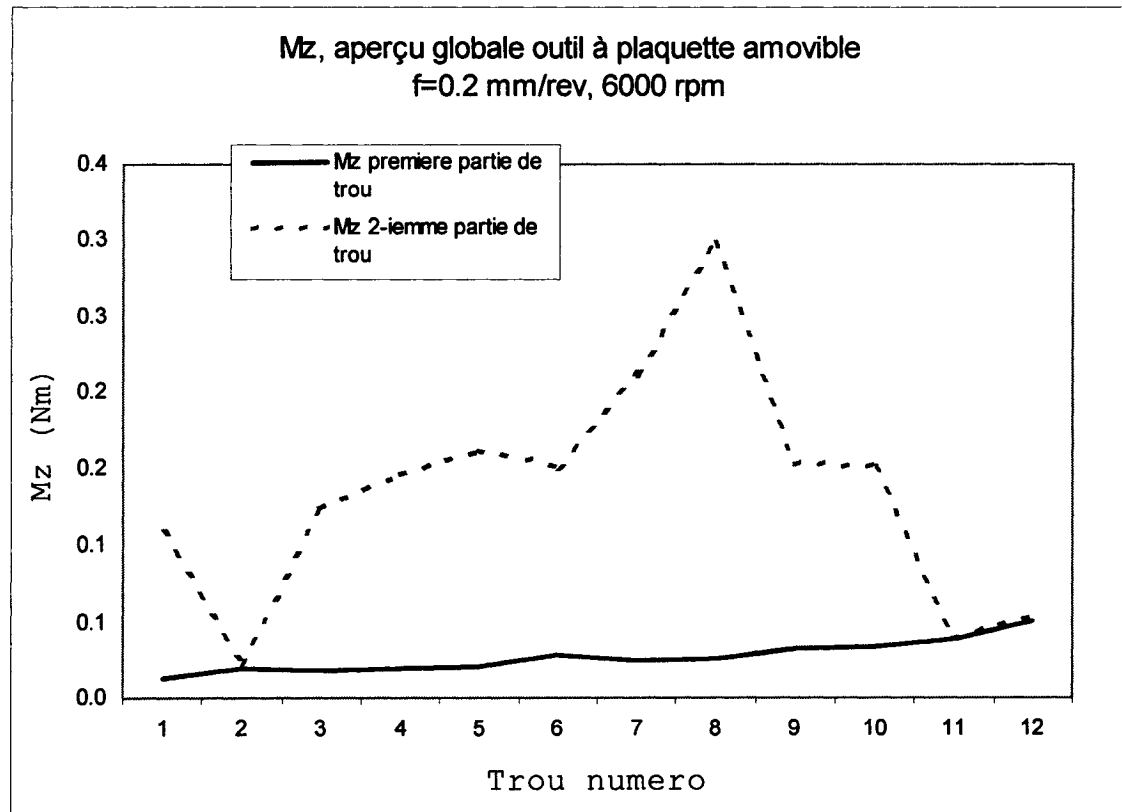


**Figure 3.97. Force Fz, aperçu globale. Outil à plaquette, f=0.2 mm/rev, 6000 rpm**

En ligne continue est présenté la variation de la force pour la première partie de trou et en ligne pointillé la variation de la force pour la deuxième partie de trou. Sur la deuxième partie de trou, la valeur de la force Fz a une valeur presque double. Pour le trou numéro 9 la valeur de la force Fz augmente visiblement vu que sur le foret a resté collé du matériau. Ultérieurement, la force augmente visiblement ayant une valeur double par rapport à la valeur enregistré pour les premières trous.

Dans la figure 3.97 est présenté la variation du moment Mz. Le moment Mz a été tracé distinctivement pour les deux zones de la courbe de variation: la zone dite stable quand en contact avec le matériau a perçer se trouve seulement la plaquette et puis la deuxième

zone dite instable quand l'outil se trouve à l'intérieur du matériau à percer plus profonde que la longueur de la plaquette.

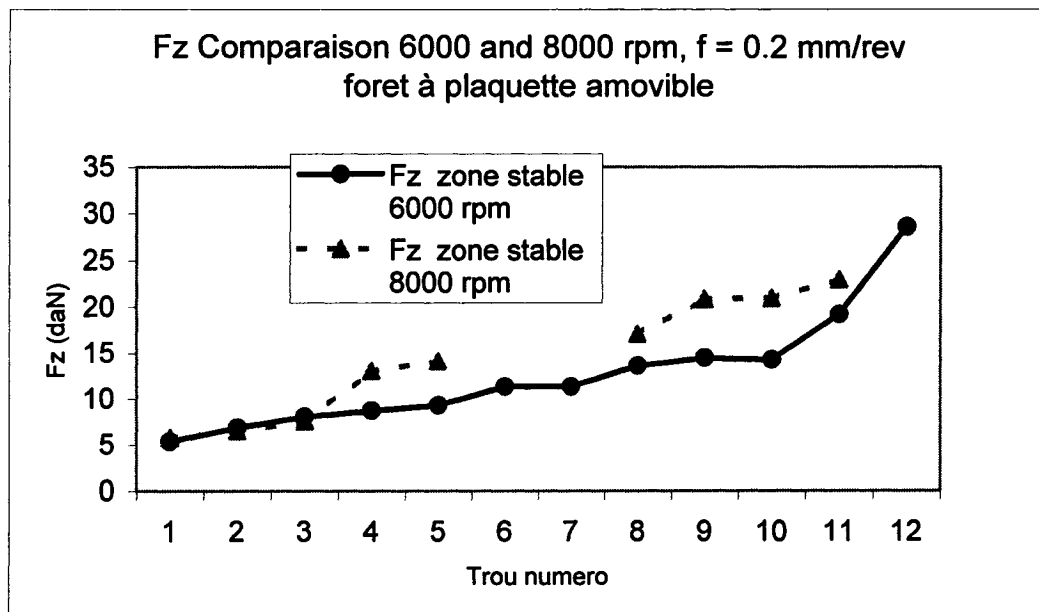


**Figure 3.98. Moment Mz, aperçu globale. Outil à plaquette, f=0.2 mm/rev, 6000 rpm**

Pour la première partie du perçage, le moment a une croissance très légère due à l'usure de la plaquette. Pour les derniers trous, on observe une croissance du moment Mz plus remarquable que pour les premiers trous, tout en restant une augmentation très légère. Pour la deuxième partie de trou, on observe une augmentation très grande du moment Mz. En regardant les graphiques de variation des forces et moments pour les deux types d'outils (carbure solide et à plaquette amovible) on constate que le moment Mz est plus sensible que la force Fz dans les deux situations.

Pour comprendre l'influence de l'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil sur la variation de la force  $F_z$  et du moment  $F_z$ , une série supplémentaire des tests a été effectué.

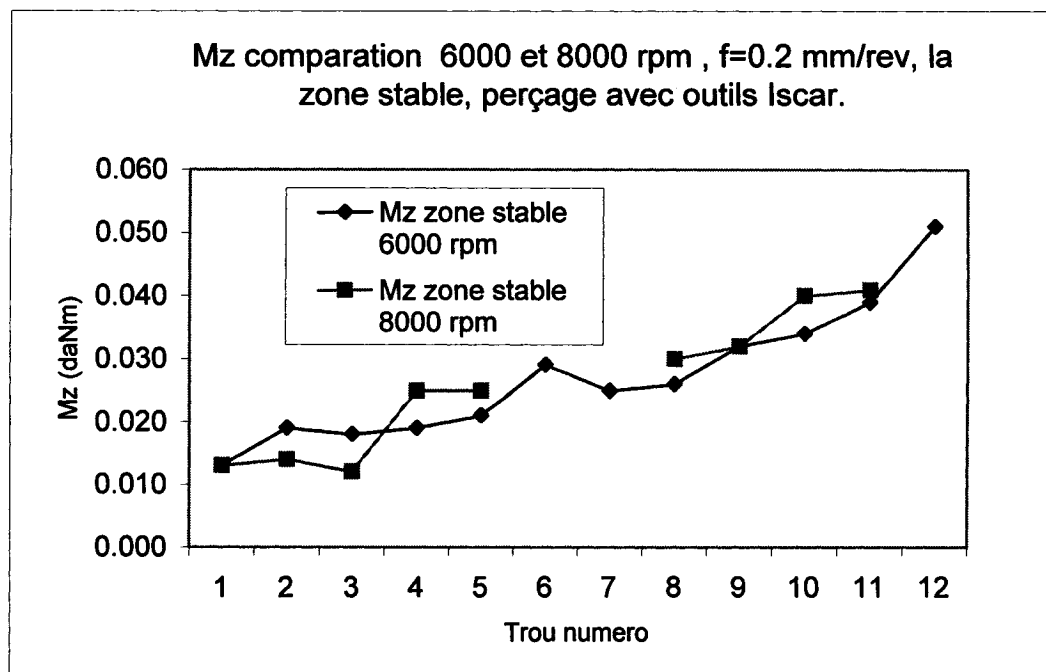
La figure 3.99 présente la variation de la force  $F_z$  pour le perçage avec des outils à plaquette avec un avance de 0.2 mm/rev et une vitesse de rotation de l'outil de 6000 rpm et respectivement 8000 rpm.



**Figure 3.99. Force  $F_z$ , comparaison pour 6000 et 8000 rpm**

En augmentant la vitesse de rotation de l'outil de 6000 rpm à 8000 rpm, on observe une augmentation de la force  $F_z$  de approximatif 50 %, en exceptant les premières trous.

Dans la figure 3.100 est présenté la variation du moment  $M_z$  pour la première partie de trou (la zone dité stable) pour 6000 et 8000 rpm, avance 0.2 mm/rev.



**Figure 3.100. Moment Mz, comparaison pour 6000 et 8000 rpm**

L'analyse de la figure 3.100 montre que l'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil de 6000 à 8000 rpm, n'influence pas de façon visible la variation du moment Mz.

Le matériau collé sur la plaquette est présenté dans la figure 3.101. A cet niveau d'adhésion, le matériau collé ne se détache par lui même durant le processus de perçage ou ultérieurement quand une autre trou commence être percé.



**Fig. 3.101. Matériau collé de façon permanent sur la plaquette.**

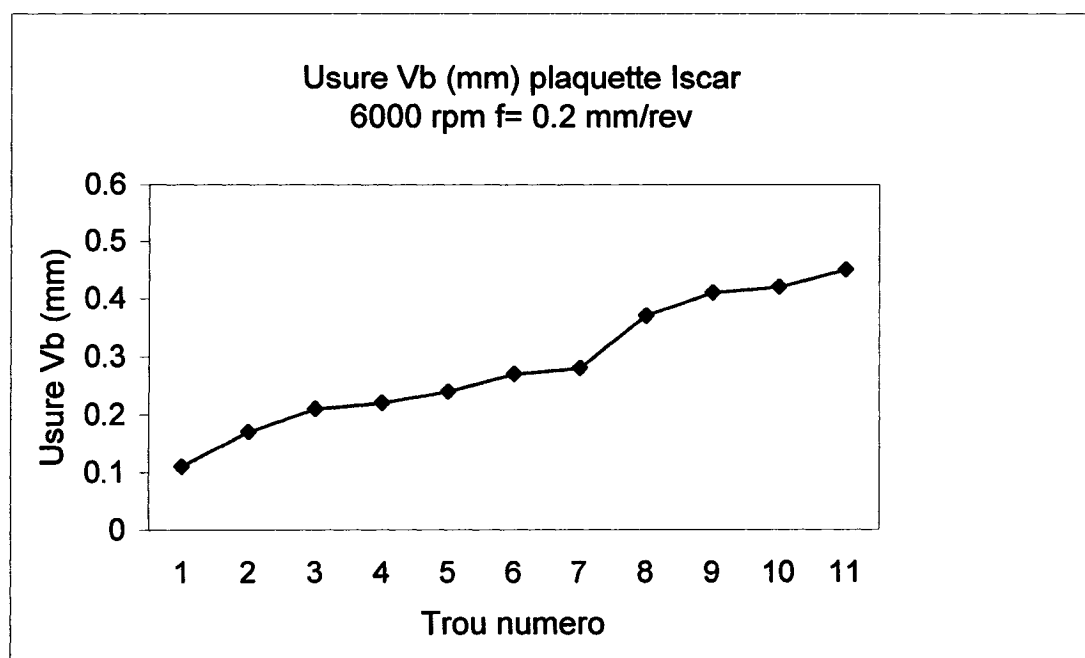


**Figure 3.102. Port-outil Iscar brisé .**

En continuant le travail avec le matériau collé sur la plaquette, le porte-outil se casse.

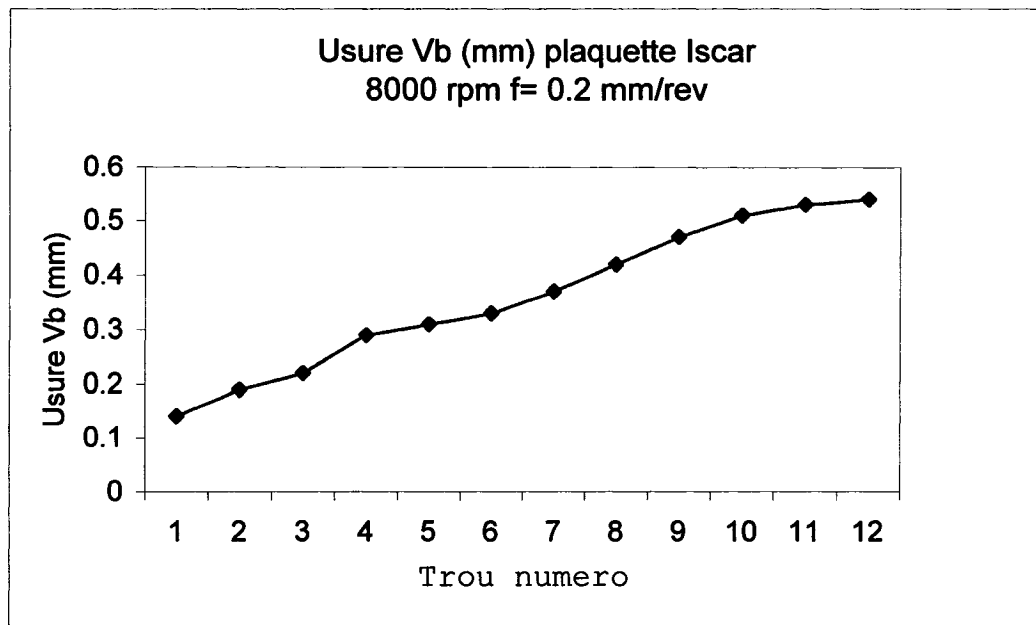
La variation de l'usure est présentée dans la figure 3.103 pour 6000 rpm et un avance de 0.2 mm/rev et dans la figure 3.104 pour 8000 rpm et le même avance de 0.2 mm/rev.

Pour comparer l'usure par rapport à l'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil, dans la figure 3.105 est présentée sur la même graphique les valeurs de l'usure pour 6000 et pour 8000 rpm.

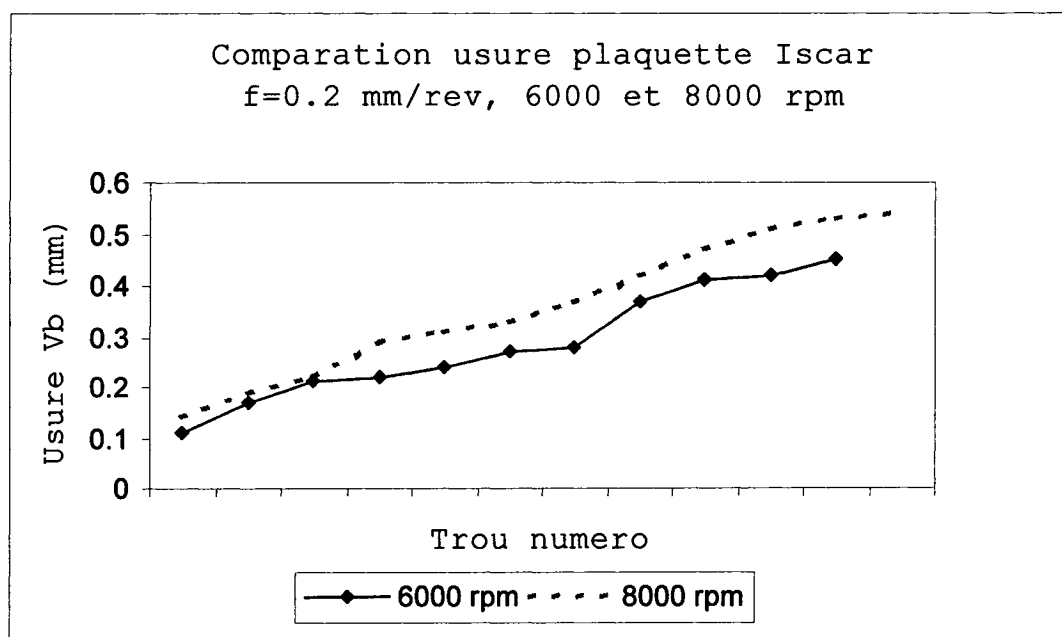


**Figure 3.103. Usure plaquette Iscar 6000 rpm, f 0.2 mm/rev**





**Figure 3.104. Usure plaquette Iscar 8000 rpm, f 0.2 mm/rev**



**Fig. 3.105. Comparison usure plaquette Iscar 6000 et 8000 rpm.**

En analysant l'usure des plaquettes pour un avance de 0.2 mm constant et une vitesse de rotation de l'outil de 6000 et respectivement 8000 rpm, on constate que globalement l'usure a une tendance linéaire de croissance. L'usure enregistré pour 8000 rpm est plus grande que l'usure enregistré pour 6000 rpm.

Vu la durée de vie très réduite (nombre de trous ou longueur totale de perçage) le perçage avec des outils à plaquette amovible, se situe en arrière de la méthode de perçage avec des forets en carbure solide.

## CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons présenté nos travaux sur l'usinage des CMM à matrice d'aluminium renforcés de particules de céramique et de graphite revêtu de nickel, connus sous le nom commercial de GrA-Ni®.

Les conclusions de ce travail concernent le perçage de GrA-Ni®.

Les résultats du perçage sont dépendants du matériau, de la géométrie du revêtement des forets ainsi que des paramètres de coupe (avance et vitesse de rotation de l'outil).

Les forets en carbure solide ont donné des résultats supérieurs par rapport aux forets avec plaquette amovible.

Le revêtement commercialement connu sous le nom Firex® appliqué sur les outils en carbure solide a donné des résultats supérieurs au revêtement régulier de type PVD appliqué sur les plaquettes amovibles produites par la compagnie Iscar.

La zone la plus représentative, ou plus stable, du point de vue des paramètres de coupe se trouve dans les limites suivantes :

- pour avance : 0.2 - 0.22 mm/rev;
- pour la vitesse de rotation de l'outil : 6000-8000 rpm.

Le travail avec liquide de refroidissement n'apporte pas un grand gain de précision et de plus génère une usure accélérée des outils (les petites particules forment une pâte abrasive). Aussi le liquide de refroidissement implique des coûts supplémentaires (achat, stockage, recyclage et problèmes dermatologiques pour les machinistes). Le travail avec

liquide de coupe ou à sec n'est pas un critère restrictif dans le choix de la méthode de perçage des CMM.

Les bavures sont plus grandes pour les petites avances. Pour des vitesses de rotation de l'outil plus grandes que 1000 rpm, les bavures sont visibles aussi pour les avances de 0.2 et 0.3 mm/rev.

Le foret à 3 lèbres offre une précision légèrement supérieure sans justifier le coût de l'outil.

La "zone" la plus efficace (diamètre de trou, circularité, rugosité) pour le travail industriel est :

- avance 0.2 mm/rev;
- vitesse de rotation de l'outil : 6000 rpm (pour un foret de 10 mm de diamètre).

Les forets en carbure solide offrent globalement des résultats supérieurs aux forets à plaquette amovible: dure de vie, rugosité de surfaces obtenues, forme de trou, bavures..

En perspective reste à évaluer les nouvelles revêtements des outils de coupe.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] 3M, (2001), Aluminium Matrix Composite. Brochure de présentation.
- [2] 3M, (2001), Continuous Fiber Aluminium Matrix Composite for High Speed Rotors. Brochure de présentation.
- [3] 3M, (2001), Reinforced Aluminium Matrix Pushrods. Brochure de présentation.
- [4] Allied Machine & Engineering Corp, 2002, Catalogue d'outils de coupe. Dover, Ohio, USA.
- [5] AIMMC Consortium (<http://www.almmc.com>)
- [6] 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
- [7] ASTAKHOV, V.P., "Metal Cutting Mechanics", CRC Press 1998
- [8] ASTAKHOV, V.P., (2004), "The assessment of cutting tool wear", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44(2004) p. 637-647.
- [9] AZZI, L., AJERSCH, F., STEPHENSON, T.F.; (2000), "Rheological Characterisation of Semi-Solid GrA-Ni@ Composite Alloy", 6<sup>th</sup> International

- Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites. Turin , Italy, Sept 27-29, 2000.
- [10] BAHAA Balout (2002), "Usinage à sec des Alliages Légers et des Composites", Mémoire maîtrise, Université du Québec, École de Technologies Supérieure, 2002, Directeur de recherche: prof. dr. ing. Victor Songmene.
- [11] BANNISTER, M., (2001), "Challenges for composites into the next millenium – a reinforcement perspective", *Composites, Part A : Applied sciences and manufacturing*,2001, p.901-910
- [12] BAPTISTA M. A., DAVIM P.J., (1997), Wear of tooling material when turning and drilling aluminium matrix composites, *Wear of materials 1997*, 11-th International Conference on Wear of Materials, April 20-23 1997, San Diego, California, Guest Editors : D. Rigney and R.G. Bayer Elsevier
- [13] BAPTISTA M. A., DAVIM P. J., (1995), "Drilling aluminium 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.
- [14] 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.
- [15] 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

- [16] BARNES, S., PASHBY, I.R.; (1995), "Machining of Aluminium Based Metal Matrix Composites", *Applied Composite Materials*, vol 2, p.31-42, 1995
- [17] BELL, J.A.E., STEPHENSON, T.F.; (1992), "Nickel Coated Performs". European Patent, Ep0539011, 16 Sept 1992, INCO.
- [18] BELL, J.A.E., (1997) STEPHENSON, T.F., WARNER, A.E.M., SONGMENE, V.; (1997), "Physical Properties of Graphitic Silicon Carbide Aluminium Metal Matrix Composites", SAE technical paper, n: 970788, SAE International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, Feb. 24-27, 1997.
- [19] BYRNE, G., DORNFELD, D., DENKENA, B.; (2003), "Advancing Cutting Technology", *Annals of the CIRP*, vol 52(2) 2003
- [20] BLANPAIN, E., (1955) Theorie et pratique des outils de coupe, Edition Eyrolles, Paris 1955
- [21] BYRNE, G., DORNFELD, D. DENKENA, B; "Advanced Cutting Technology", *Annals of the CIRP*, vol 52(2) 2003.
- [22] 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
- [23] BUSHMAN, B., GUPTA, B.K.; (1991), Handbook of Tribology, Pag 2.18 Abrasive wear, McGraw-Hill 1991,

- [24] 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.
- [25] CLARKE D.R., (1995), "An introduction to the composite materials", Second Edition, Cambridge Solid State Science Series, Chap. 12 Applications
- [26] 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
- [27] COOK, M. W. (1998) , "Machining MMC engineering components with polycrystalline diamond and diamond grinding", *Materials Science and Technology*, September - October 1998, vol. 14, p. 892-895.
- [28] COOK, M. W. (1998) , "Diamond grinding and PCD machining of MMC engineering components" , *Powder Metallurgy*, 1998, Vol 41 (2) , p. 87-89
- [29] CRONJAEGER, L., MEISTER, D. (1992), "Machining of fibre and particle-reinforced aluminium", *Annals of the CIRP*, vol. 41 (1), 1992, p 63-66.
- [30] CRONJAEGER, L.; MEISTER, D.; (1991), "Drilling of fibre and particle reinforced aluminium", PD-vol 37, p. 1985-1989, *Composite Material Technology*, ASME 1991.
- [31] 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.
- [32] CHEN,S., SUZUKI, Y., SAKAI, K.; (2000), "The effect of using small amount of lubrication oil and cold air cooling on the quality of manining surface of high silicon aluminium alloy", *5th International Conference on Progress of Machining Technology* , Beijing China 2000
- [33] COLE G.S., BIN, F.; (1993), "Scuffing Resistance of Al-based MMCs as Bores in Aluminium Engine Blocks", Proceedings of the ASM 1993 Materials Congress, Materials Week '93, Pittsburgh, Pennsylvania, October 17-21, p. 13-20, 1993
- [34] Cutting Tool Engineering, CTE Publications inc, collection 1995-2005
- [35] 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
- [36] DAVIS, J.R., editor, Davis & Associates, (1994), Aluminium Matrix Composites, The Materials Information Society ,ASM International
- [37] DEGISCHER, H. P., PRADER, P. SAN, M. C.; (2001), "Assesment of Metal Matrix Composites for Innovations - intermediate report of a European Thematic Network", *Composites*, Part A : Applies science and manufacturing vol 32 ,2001, p.1161-1166

- [38] 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.
- [39] DUCA Z., (1967) Teoria sculelor achiitoare (en langue roumaine), La theorie des outils de coupe. Maison d'edition "Editura Tehnica", 1967
- [40] DURALCAN, (1991), "Metal Matrix Composites, Machining guidelines", 4 pag. Notes du catalogue du manufacturier.
- [41] FINN E.M., SRIVASTAVA K.A., (1996), "Machining of Advanced and Engineered Materials" , dans Proceedings 13 th Symposium on Engineering Applications of Mechanics Manufacturing Science and Engineering, McMaster University, Hamilton, Ontario, 7-9 May 1996 pag. 616-623.
- [42] GONI, J., EGIZABAL, P., COLETO, J., LEUNDA, I., GURIDI, J.R.; (2003); "High performance automotive and railway components made from novel competitive aluminium composites", *Material Science and Technology*, vol 19, p. 931-934.
- [43] Gühring (2001), "The complete program, the complete know-how", c. d. outils de coupe. Albstad, Germany.
- [44] Gühring (2002), "Precision Cutting Tools", 8-th Edition, Albstad, Germany.
- [45] Gühring (2003), "High Performance HSS, HSCO, PM, Carbide Drills ", Albstad, Germany.

- [46] Gúhring (2003), "10 Commendements of Dry High Speed Machining", c.d. préparé par Dr. Tibor Cselle, Sigmaringen-Laiz, Germany.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.

- [52] Introduction to Alloy Phase Diagrams. Extract from Engineered Materials Handbook, Vol. 4, Ceramic and Glasses, ASM International
- [53] ISCAR , (2002), Catalogue outils de coupe, edition 2002
- [54] ISCAR 2002, Guide d'utilisation des forets "Chamdrill";  
[http://www.iscar.com/ProductUpdate/PDF/MetricChamdrill\\_735\\_1.pdf](http://www.iscar.com/ProductUpdate/PDF/MetricChamdrill_735_1.pdf)
- [55] 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,
- [56] 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)
- [57] JEMIELNIAK, K., OTMAN, O.; (1997), "Catastrophic Tool Failure Detection Based on Acoustic Emission Signal Analysis", *Annals of the CIRP*, vol 47(1) 1998
- [58] JEMIELNIAK, K. (1993); "Data Acquisition & Signal Processing in Manufacturing", École Polytechnique Montreal, notes de cours (professeur invité).

- [59] JEMIELNIAK, K. (1993): "Tool & Process Condition Monitoring", École Polytechnique Montreal, notes de cours (professeur invité).
- [60] JESUS, E.R.B., FILHO, E.S.J., ROSSI, J.L.; (2001) , "Effect of Reinforcement on the Machining of Aluminium Matrix Composites Obtained by Powder Metallurgy", *Key Engineering Materials*, Vol 189-191 (2001), p. 535-541.
- [61] KAKINO, Y., (1999), "High speed and high productive drilling by intelligent machine tools", *Laser Metrology and Machine Performance*, vol 4, 1999, p. 157-165.
- [62] KAICHUN, R., JUN, N.; (1999), "Analyses of Drill Flute and Cutting Angles", *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 1999, vol 15, p. 546-553.
- [63] 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
- [64] Kistler Instrument Corporation, Suisse, (2002-2005), Documentation acquisition des donnees.
- [65] 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.

- [66] LACALLE, L.N.L., LAMIKIZ, A., SANCHEZ, J.A., CABANES, I. (2001), Cutting conditions and tool optimisation in the high speed milling of aluminium alloys, *Proc. Instn Mech. Engrs.*, vol. 215, part B, p. 1257-1269
- [67] LANE C.T.,(1990), "Machining Characteristics of Particulate Reinforced Aluminium", Conf Proc of Fabrication of Particulates Reinforced Metal Composites, ASM International, Montreal 1990, p. 195-201.
- [68] LANE, C. T. (1993), "Drilling and Tapping SiC Particle Reinforced Aluminium", Proceedings of the ASM 1993 Material Congress, Pittsburgh, Pennsylvania, Oct 17-21, pag 9-16, 1993.
- [69] LANE, C.; (1992), "The Effect of Different Reinforcements on PCD Tool Life for Aluminium Composites", Proceedings of the Machining of Composite Materials Symposium, ASM materials week, Chicago, Illinois, 1-5 nov 1992, pag 17-27.
- [70] LANE, C.T., (1992), "Machinability of Aluminium 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.
- [71] LAZARESCU, I., (1961) Calcul et construction des outils de coupe (en langue roumaine), Maison d'edition "Editura Tehnica", 1961
- [72] 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, pag 131-135, 1993.

- [73] 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.
- [74] LIU, W. C., CHUANG, Y.H., CHEN, C.C.A.; (2000), "Hot machining of particulate SiC Aluminium composite material", *5th International Conference on Progress of Machining Technology*, Beijing China 2000, p. 993-1000
- [75] MASOUNAVE, J., LITWIN, J., HAMELIN, D.; (1994) "Predictin of Tool Life in Turning Matrix Composites", *Materials and Design*, Vol 15, Nov. 5, 1994, p. 287-293
- [76] MELLINGER, J.C., OZDOGANLAR, B.O., DEVOR, R.E., KAPOOR, S.G.; (2002), "Modeling Chip-Evacuatin Forces and Prediction of Chip-Clogging in Drilling", *Journal of manufacturing Science and Engineering*, vol 124, 2002, p. 605-614
- [77] Metal Cutting Tool Handbook, (1989), Industrial Press, USA  
published for the United States Cutting Tool Institute
- [78] METHA, M., SONI, A.H.; (1993), "Hole Quality, Drilling, Assesement 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.

- [79] MISRA, A., FINNIE, L.; (1982), "A Review of the Abrasive Wear of Metals", *Transactions of ASME*, vol 104, p. 94-100, 1982.
- [80] Modern Machine Shop, Gardner Publications inc, collection 1995-2005
- [81] MONAGHAN, J.; O'REILLY, P.; (1992), "Drilling of an Al/SiC metal-matrix composite", *Journal of Materials Processing Technology* , vol. 33(4) pag. 469-480, Sep, 1992.
- [82] MONAGHAN, J., O'REILLY, P.,(1992), "Machinability of an aluminium alloy / silicon carbide metal matrix composite" *Processing of Advanced Materials*, vol 2, p. 37-46, 1992.
- [83] 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.
- [84] NOVAK, A., WIKLUND, H.; (1996) , "On-line Prediction of Tool Life", *Annals of the CIRP*, vol 45(1) , 1996, p. 93-96.
- [85] ORSBORN L.M., SHOOK, G.R.; (1992), "Machining Experience with Discontinuously Reinforced Aluminium Hydraulic Components"
- [86] PREVOT, B., IP, S.W., SHRIDAR, R., TOGURI, J.M., (1996), Wettability of Nickel Coated Graphite by Aluminium, Dept. of Metallurgy & Materials Science, Work Term Report, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada, 1996



- [87] Proceedings of the Machining of Composites Materials Symposium, ASM Materials Week, Chicago, Illinois, 1-5 nov, 1992, p. 57-61.
- [88] PING, C.; (1992); "High Performance Machining of SiC Whisker Reinforced Aluminium Composite by Self Propelled Rotary Tools", *Annals of the CIRP*, vol 41/1/1992 p. 59-62
- [89] 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
- [90] 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.
- [91] RAMACHANDRA, A., CHANDRASHEKARA, 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.
- [92] RAMRATTAN, S.N., SITKINS F.Z.; (1996), "Optimization of the casting and machining processes for a metal matrix composite", Proceedings 13 th Symposium on Engineering Applications of Mechanics Manufacturing Science

and Engineering, McMaster University, Hamilton, Ontario, 7-9 May 1996 p. 624-629

- [93] 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
- [94] 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.
- [95] ROHATGI P.K., BHARADWAJ, R. NARENDRANATH, C.S.; (1993), "Influence of Initial Surface Finishes of Aluminium 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.
- [96] 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.
- [97] 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.

- [98] RUSSEL, G.S., HAROLD, A., (1993), "A review of machining studies for castable and preform infiltrated reinforced aluminium metal matrix composites", *Proceedings of ASM 1993 Materials Congress, Materials Week, '93, Pittsburgh, Pennsylvania, Published by ASM International®, Materials Park Ohio, USA, 1993.*
- [99] SCHEED, 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, McMaster University, Hamilton, Ontario Canada, 7-9 May 1996, p. 719-725.
- [100] SMITH G. R., FEEL H.; (1993), "A review of machining studies for castable and preform infiltrated reinforced aluminium 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*
- [101] SMITH, P. , Coatings, (2002), *American Machinist*, Sept 2002 p. 58-60
- [102] SONGMENE V., YAN, D.; (1997) "Machining of Aluminium Composites" , preliminary report, Industrial Research & Development Institute, Midland, Ontario, Canada, 14 pag, 1996.
- [103] SONGMENE, V., STEPHENSON, T.F., Warner, A.E.M. (1997), "Machinability of Graphitic Silicon Carbide Aluminium Metal Matrix Composite GrA-Ni™", Proc. of the 1997 ASME Int. Mech. Eng. Congress and Exposition, ASME International, Windham Anatole , Dallas, Texas, nov. 16-21, 1997, p. 193-200.

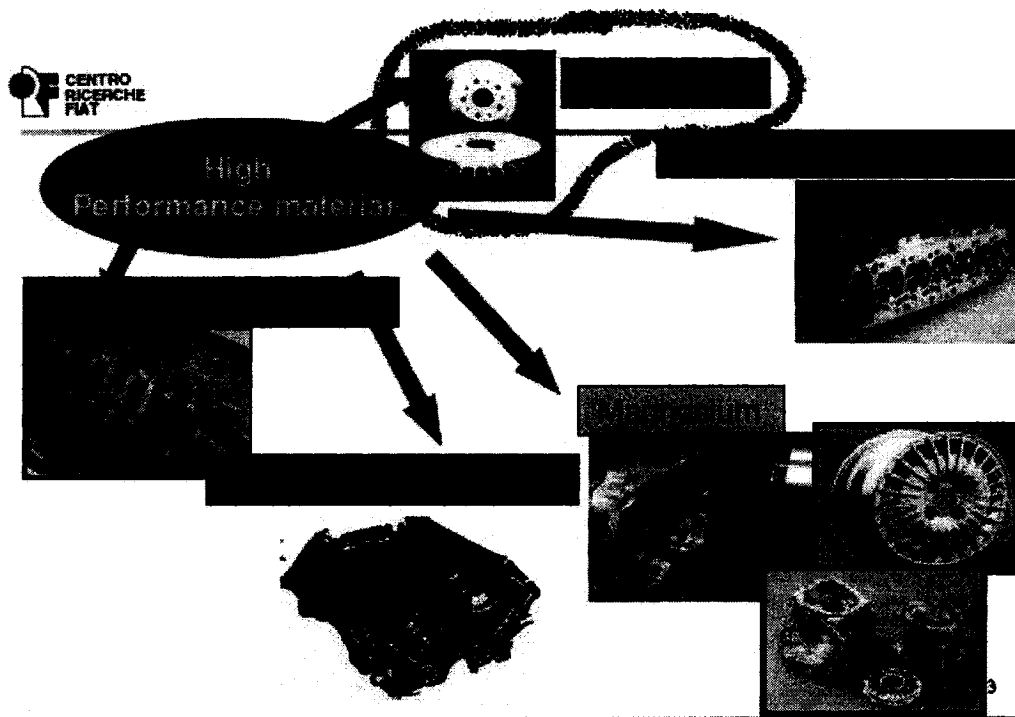
- [104] SONGMEME V., BALAZINSKI M., (1999), "Machinability of Graphitic Metal Matrix Composites as a Function of Reinforced Particles", *Annals of the CIRP*, vol. 48(1), 1999, p.77-80.
- [105] SONGMENE, V.; (2000), "Usinage des Composites à Matrice d'Aluminium Renforcée des Particules de Céramique et de Graphite Revêtu de Nickel", Thèse, Université de Montréal, École Polytechnique. Directeur de recherche: Marek Balazinski, 2000.
- [106] STEFFENS, K., WILHELM H; (2000); "Next Engine Generation: Materials, Surface Technology, Manufacturing Processes". MTU Aero Engines, Germany 2000
- [107] STUCKY, M. (1989), "Revue critique des renforts et de procedes d'elaboration des materiaux composites a matrice metallique", Fonderie Fondateur Ajuourdh'ui, Dec. 1989, p. 31-39.
- [108] STURGES, R.H., (1992), "Monitoring Milling Processes Through AE and Tool/Part Geometry", *Trans. of ASME*, vol 114, Feb 1992, p. 8-14.
- [109] 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.

- [110] 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.
- [111] TANGUY, J.C. (1988), "Guide du perçage au foret hélicoïdal", Centre Technique des Industries Mécaniques, CETIM, Senlis, France 1998.
- [112] TETI, R.; (2002) "Machining of Composites Materials", *Annals of the CIRP*, vol 51(2) 2002.
- [113] TOMAC, N., TONNESSEN, K., (1992), "Machinability of Particulate Aluminium Matrix Composites", *Annals of the CIRP*, vol. 41(1), 1992, p. 55-58.
- [114] UEHARA, K., TAKESHITA, H., SAKURAI, M., MINOWA, K.; (2000), "Cutting behaviour of SiC particulate reinforced aluminium alloy", *Progress in Machining Technology*, Proceedings of the Fifth International Conference on Progress on Machining Technology, Beijing China, 2000, p. 70-75
- [115] Union Butterfield, catalogue d'outils, edition 2002
- [116] 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.
- [117] 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.

- [118] WEINERT, K., INASAKI, I., SUTHERLAND, J.W., WAKABAYASHI, T.; (2004), "Dry Machining and Minimum Quantity Lubrification", *Annals of the CIRP*, vol 53 /2/2004
- [119] 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.
- [120] 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
- [121] ZOREV, N.N.,(1966) "Metal Cutting Mechanics", M.C. Shaw, editor, Pergamon Press, New York
- [122] ZWEBEN, C., (1993), "Metal Matrix Composites an Overview", General Electric Company, Space System Division, 4 pag, 1993.

# ANNEXE 1.1 . PRÉOCCUPATIONS FIAT COMPOSITES

Préoccupations FIAT composites



Mechanical Engineering Forum, Leipzig 21.08.2005

Fiat 2005

Centro Ricerche Fiat è un ente a partecipazione paritetica tra Fiat e IRI. È un ente di ricerca e sviluppo. Le sue attività sono svolte in stretta collaborazione con le aziende della Fiat e della IRI.


## ANNEXE 1.2: UTILISATION DES CMM DANS LA CONSTRUCTION DES MOTEURS D'AVIATION







Next Engine Generation: Materials, Surface Technology, Manufacturing Processes

MTU Aero Engines  
Dachauer Str. 665, 80995 München

### Metal Matrix Composites (MMC)



**Advanced Materials / Structural Parts: From Blisk to Bling**

Blisk Rotor Assembly	MMC - Ring * Mold Matrix Composite	Bling <sup>®</sup> - Rotor Assembly * Bladed Ring
		
Ti-Matrix		Bling Rotor versus Blisk: weight reduction: 20 - 30 % improved rotor dynamics series cost: estimated twice cost for blisk
SiC-Fibres		

MTU Aero Engines



High strength Ti-based MMCs offer a potential for weight reduction of up to 50 % relative to conventional Ti-alloys by using high strength, high modulus fibres as continuous reinforcement. The route for making Ti-MMC disks or rings comprises the following main steps:

- ◆ fibres (usually SiC,  $\varnothing \approx 0.1$  mm) are coated with a carbon layer to prevent extensive reactions between fibre and matrix during processing (HIP)
- ◆ fibres are coated with Ti-alloy using plasma or PVD- techniques
- ◆ wind coated fibres around mandrel.
- ◆ Consolidate fibre ring by HIP
- ◆ Insert fibre reinforced ring into a disk or ring and join together by HIP.

This method looks promising for making so-called blings (bladed rings) that offer distinct benefits concerning weight and rotor dynamics versus conventional disks and even versus today's blisks (integral bladed rotors), see Fig. 5.

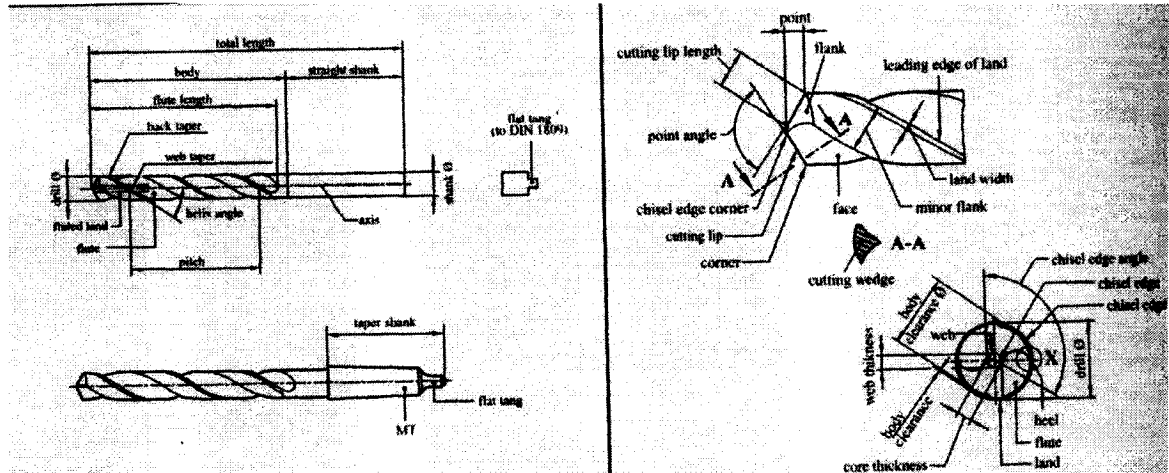
In the USA blings (dia  $\approx 400$  mm) and other MMC-parts like shafts, fan blades and vanes have been successfully tested in demonstrator engines in the IPHTET-program. An connecting rod for actuating the exhaust-flaps of the F 414 recently went into series production.

At MTU cyclic spinning tests with Ti-MMC rings are in operation and look promising.

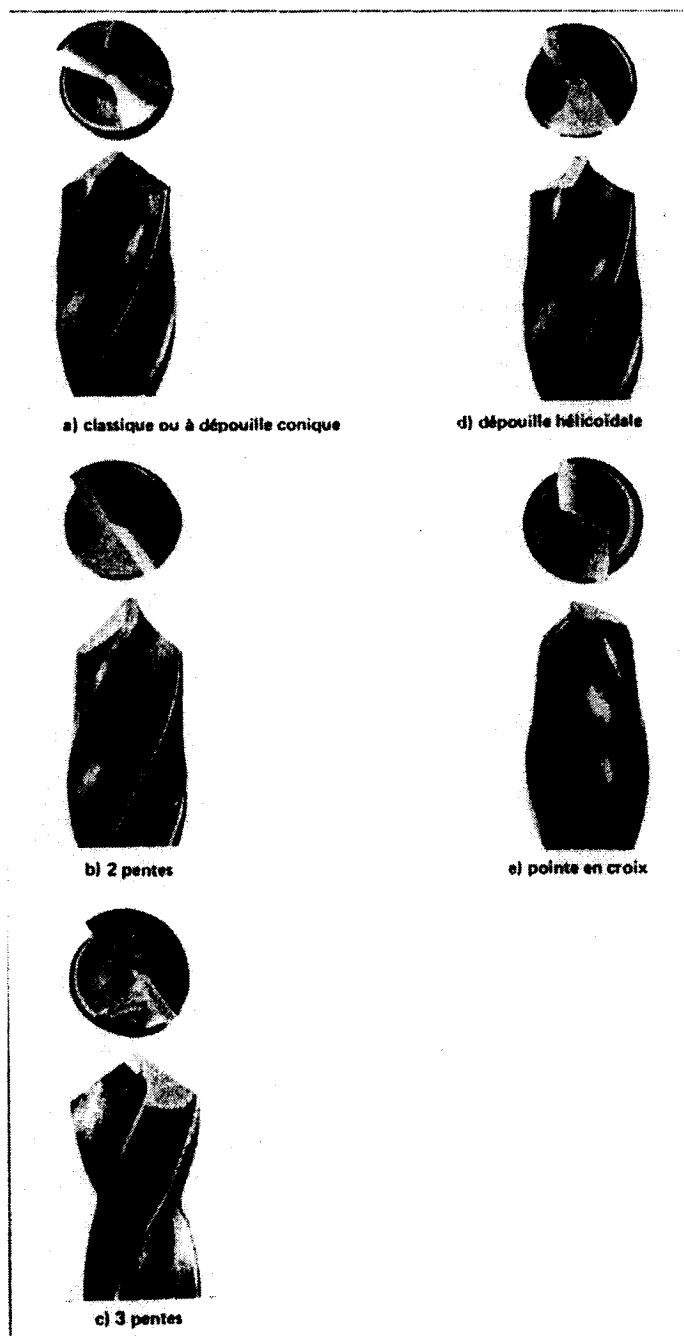
It is evident that Ti-MMC technology is sophisticated. Since the possibilities of non destructive testing methods (NDT) for detecting internal defects in composites are limited, the quality of the parts must be assured mainly by an optimised process stability of each step and by strict process control. With respect to the long chain of process steps such parts cannot be cheap. A realistic cost estimation shows that under series conditions the price for a Ti-MMC-bling could be about twice of a "normal" blisk machined from a conventional forged pancake.

For this reason potential applications in foreseeable future will be mainly in military engines.

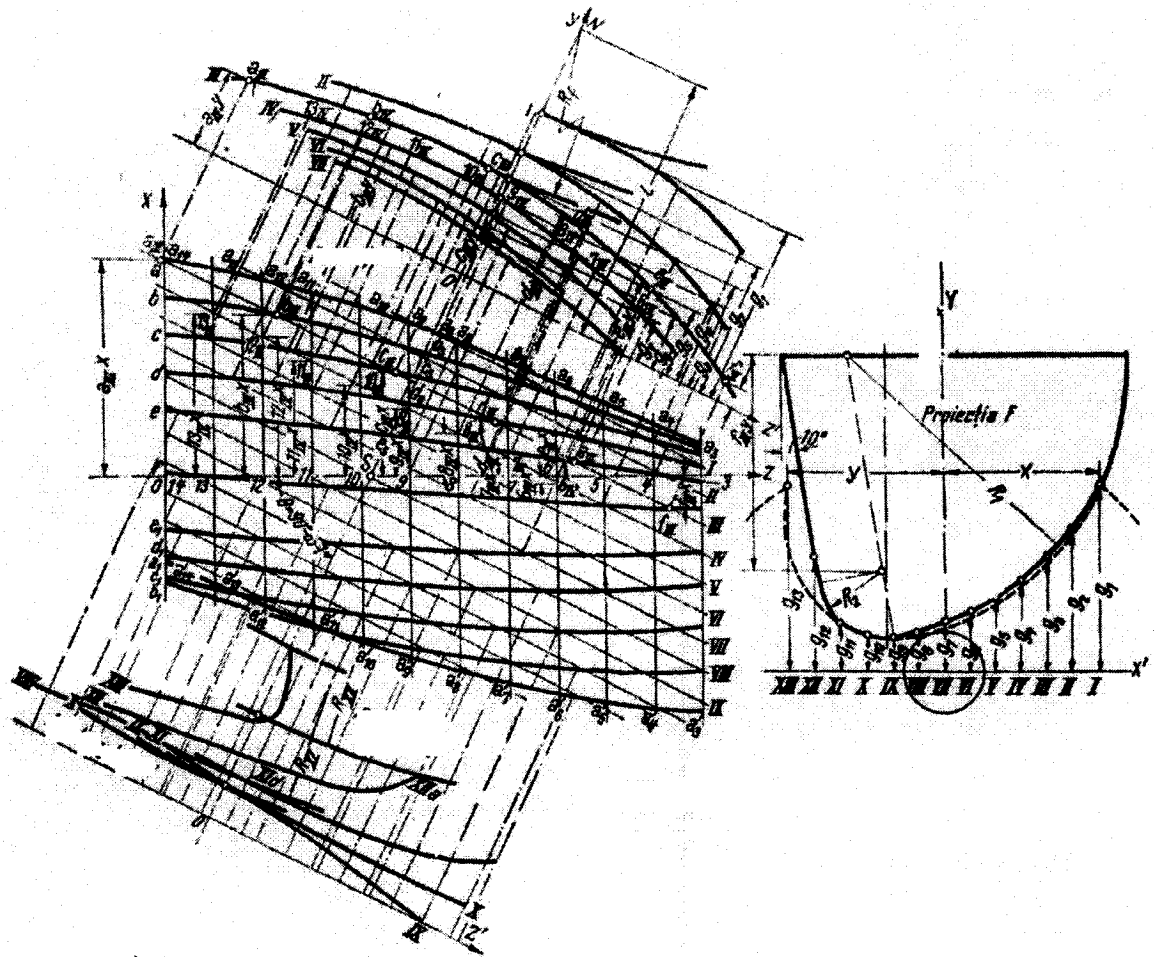
## ANNEXE 2.1. ÉLÉMENTS DU FORET, TERMINOLOGIE EN LANGUE ANGLAISE



Source: catalogue Guhring 2002

**ANNEXE 2.2. DIFFÉRENTES FORMES D'AFFÛTAGE**

Source: Tanguy

**ANNEXE 2.3. PROFILOGRAMME D'UNE GOUJURE DU FORET**

Source : Lazarescu

## ANNEXE 2.4. MACHINE HU40-T SPÉCIFICATION DU CONSTRUCTEUR MITSUI SEIKI

Mitsui Seiki Model HU40T 5 AXIS HMC

Specifications:	HU-40T	Specifications:	HU-40T
Max. part dia x H	19.8"x11.8"	Travel, X (Long.)	24.0"
Travel, Y (Cross)	22.0"	Travel, Z (Vert.)	22.0"
B axis	-90-180 deg	C axis	360 deg
Spindle speeds	80-8000	ATC type	60 tools
CNC control	Fanuc 16iMA	Rapids	1181XYZ,10800 deg/min
Spindle HP	20	Spindle taper	BT40
Turn Key	Preferred	Net weight (lbs)	28,600 lbs
Country of origin	Japan		

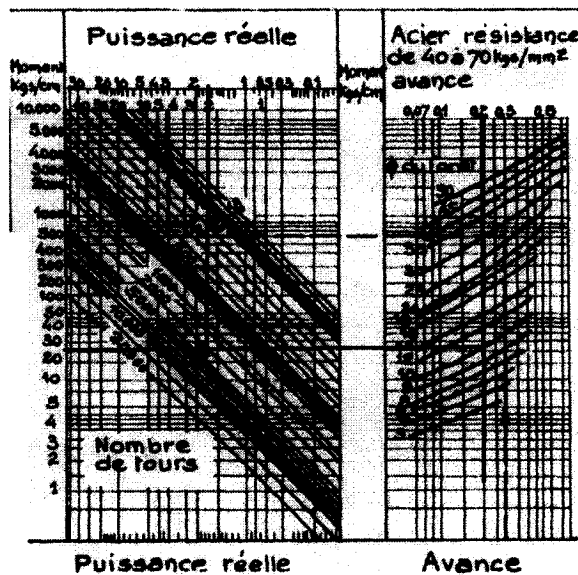
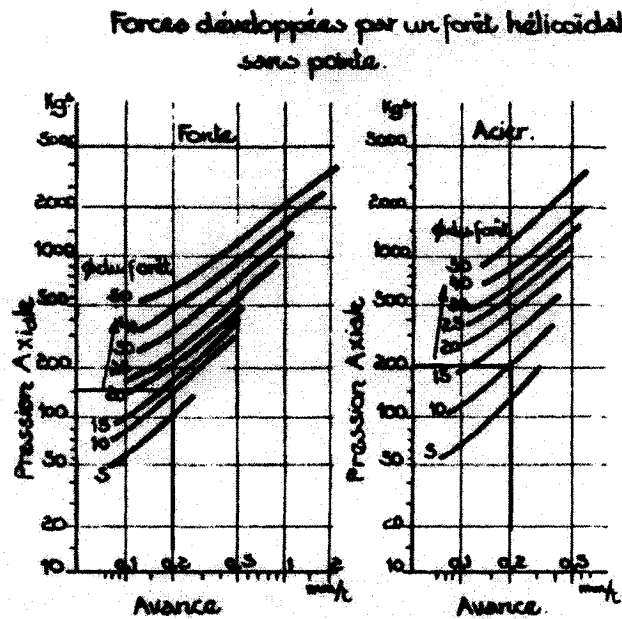
- This unique HMC has ultra performance with 1181 ipm rapids and 787 ipm cutting
- Rotary tables are infinitely variable, 0.001 deg. in both B and C axes. Hybrid table design that can switch to 1 deg. increments and clamp via a curvic coupling with high brake torque
- Large work envelope of 19.8" dia x 11.8" H x 220 lbs.

### Specifications:

- Distance spindle nose to table: 5.9-27.9"
- Distance spindle centerline to table surface with B=90 deg: 11.0-13.0"
- B axis table index angle: -90 to +180 degrees
- C axis table index angle: 360 deg.
- Max. permissible moment on table - 147 Nm
- Max. permissible Z axis thrust - 1760 lbs
- Max. permissible thrust X,Y axis - 880 lbs
- Spindle taper - BT40
- Spindle speeds - 80-8000 RPM
- Spindle HP - 20
- Spindle max. torque - 292 Nm
- Rapid traverse XYZ - 1417 ipm
- Rapid traverse B and C rotary axes - 10,800 deg/min
- Cutting feed XYZ - 0.04-787 ipm
- Cutting feed B and C - 0.04-7200 deg/min
- Feedback system XYZ - Linear
- Feedback system B and C - Rotary encoder
- Machine weight - 28,600 lbs
- Approx. floor space - 226FB x 155LR x 110"H



### ANNEXE 2.6. CHOIX DES FORCES ET DES MOMENTS À L'AIDE D'UNE ABAQUE



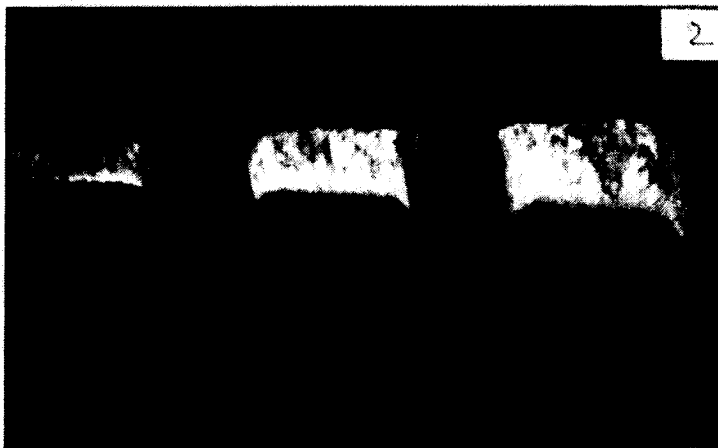
Source: Blanpain (1955)

## Annexe 3.1

### Détails concernant l'usure des forets de type lame (spade drill)

Dans les images suivantes sont présentés les détails de l'usure des plaquettes de type lame (en acier rapide et en carbure solide) pour différentes conditions de coupe : vitesse de rotation de l'outil (rpm), avance et méthode de refroidissement / lubrification. Les tests ont été arrêtés après 100 mm de perçage, vu l'usure observée sur les outils.

À remarquer l'influence du liquide de refroidissement sur la nature de l'usure. Les particules fines des copeaux forment avec le liquide de coupe une pâte abrasive qui use agressivement les outils. En utilisant l'huile noire comme liquide de coupe, on observe plus facilement l'effet de la pâte abrasive sur l'usure (l'huile noire retient plus fort les particules abrasives vu sa viscosité plus élevée).

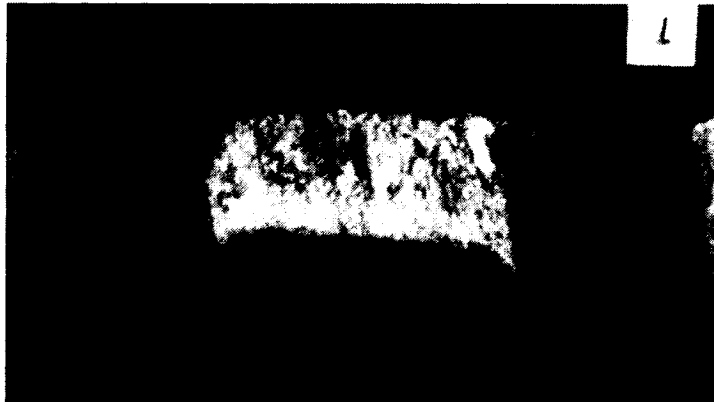


**Annexe 3.1 Figure 1: Usure de plaquette "spade drill" en carbure, 4000 rpm, travail à sec avance 0.1 mm/rev , agrandissement 25x.**

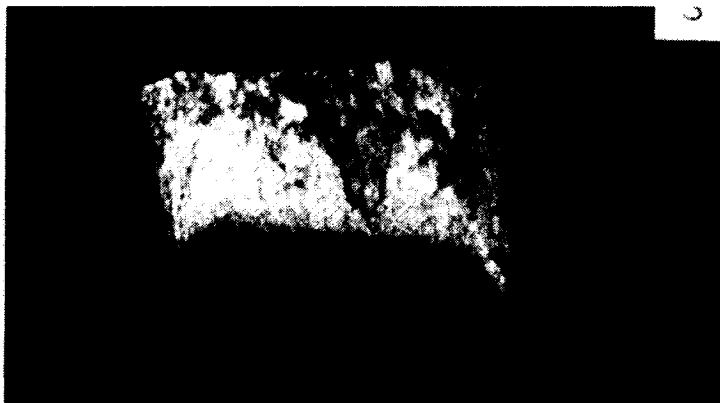
À remarquer qu'à l'extrémité de la plaquette où la vitesse de rotation est maximale,



l'usure est plus grande.



**Annexe 3.1 Figure 2: Usure de plaquette "spade drill" en carbure, 4000 rpm, travail à sec, avance 0.1 mm/rev, agrandissement 50x.**

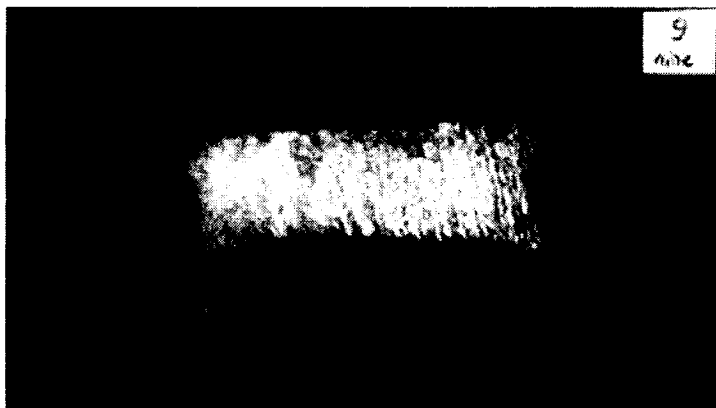


**Annexe 3.1 Figure 3: Usure de plaquette "spade drill" en carbure, 4000 rpm, travail à sec, avance 0.1 mm/rev , agrandissement 50x.**

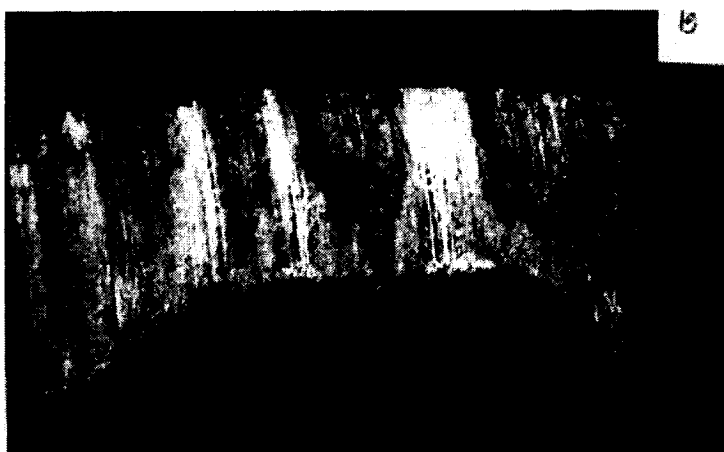
Dans la figure 3.1 est présentée en détail l'usure des plaquettes "spade drills" en carbure, pour perçage avec du liquide de coupe pour la même avance et la même vitesse de

rotation de l'outil (voir en haut les tests de perçage à sec).

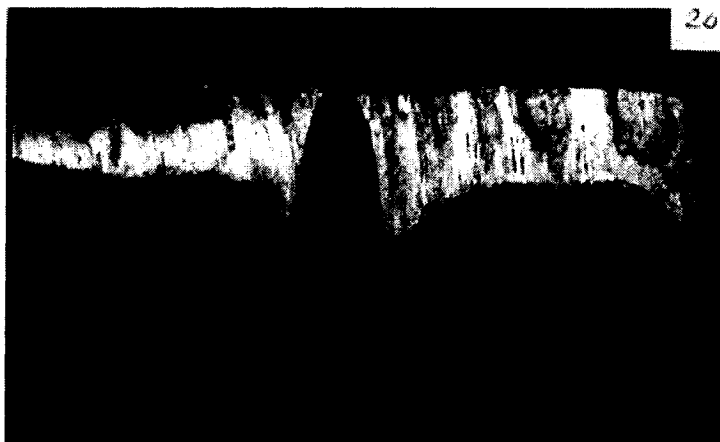
Les particules très fines des "copeaux" obtenues durant la coupe avec le liquide de refroidissement forment une pâte abrasive qui use extrêmement l'outil. Dans l'image suivante, on voit que pratiquement l'outil est "effacé".



**Annexe 3.1 Figure 4: Usure de plaquette "spade drill" en carbure, 4000 rpm, travail avec liquide de coupe, avance 0.1 mm/rev, agrandissement 50x.**



**Annexe 3.1 Figure 5: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 4000 rpm, avance 0.1 mm/rev, avec liquide de coupe, agrandissement 50x.**



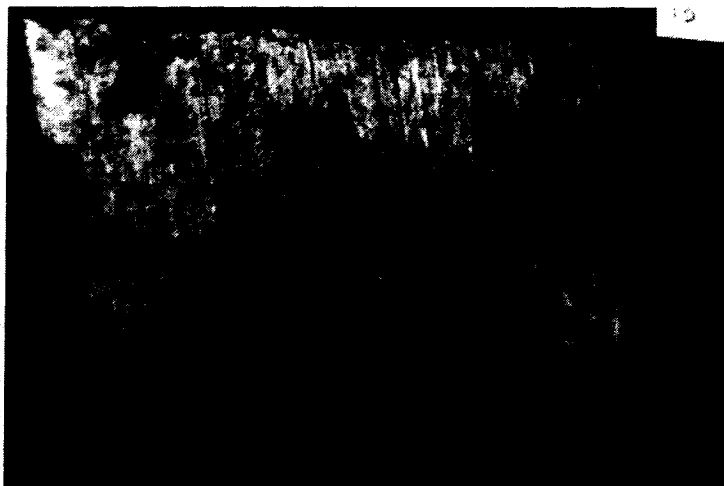
**Annexe 3.1 Figure 6: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 4000 rpm, avance 0.1 mm/rev, avec liquide de coupe, agrandissement 25x.**



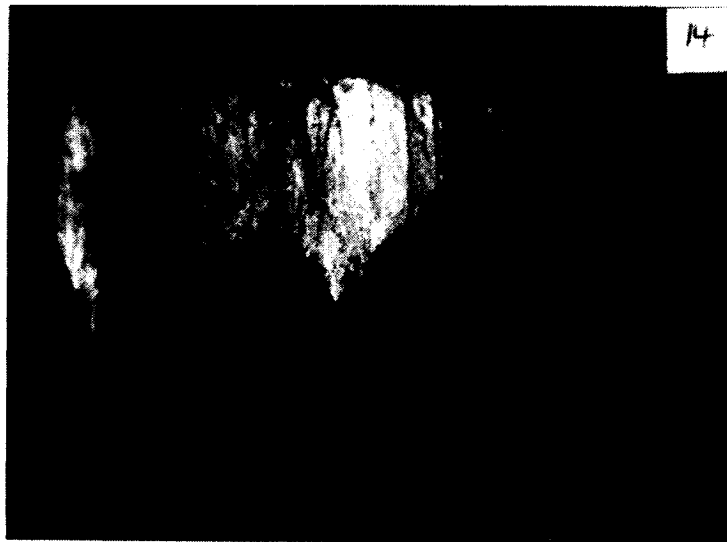
**Annexe 3.1 Figure 7: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 4000 rpm, avance 0.1 mm/rev, avec liquide de coupe, agrandissement 25x.**

À titre d'argument, pour mettre en évidence le rôle du liquide de coupe dans le perçage des composites, sont présentées des images des outils où le travail a été fait avec de

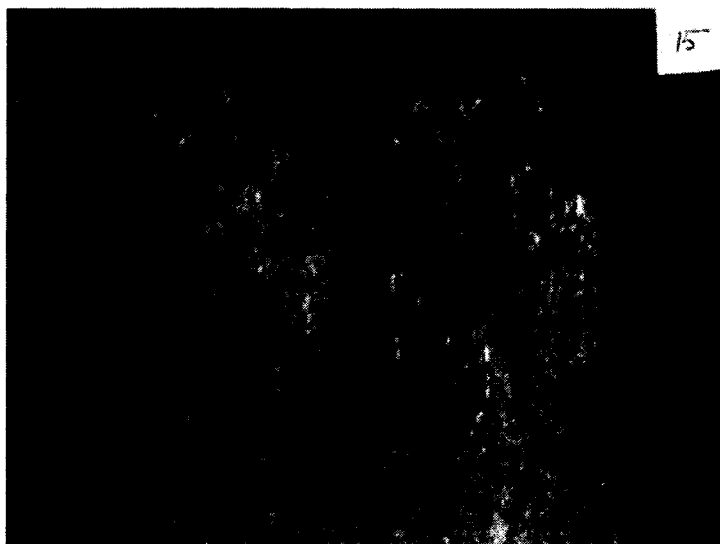
l'huile noire (sur une fraiseuse conventionnelle), huile typiquement utilisée sur les machines automatiques classiques (automatic screw machines). L'huile avec les microparticules abrasives du matériel à usiner forment une pâte abrasive qui use extrêmement rapidement les outils.



**Annexe 3.1 Figure 8: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, agrandissement 50x.**



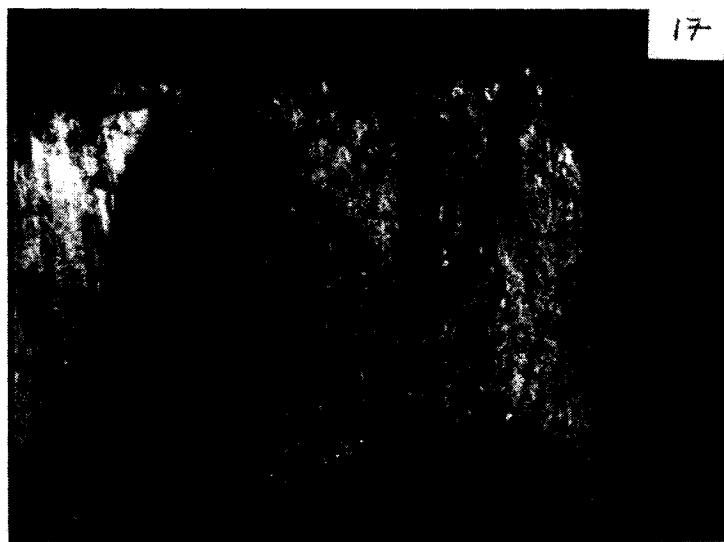
**Annexe 3.1 Figure 9: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, agrandissement 25x.**



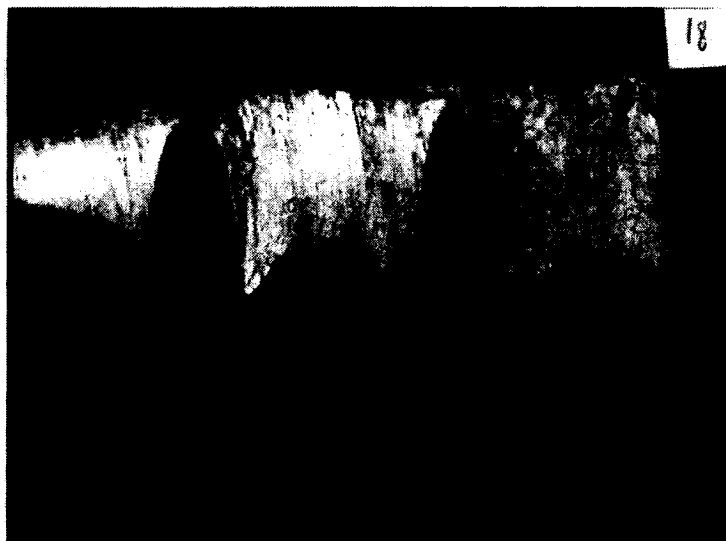
**Annexe 3.1 Figure 10: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, agrandissement 50x.**



**Annexe 3.1 Figure 11: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, agrandissement 25x.**



**Annexe 3.1 Figure 12: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, agrandissement 50x.**



**Annexe 3.1 Figure 13: Usure de plaquette "spade drill" en acier rapide, 2240 rpm, avance 0.1 mm/rev, huile noire, agrandissement 25x.**

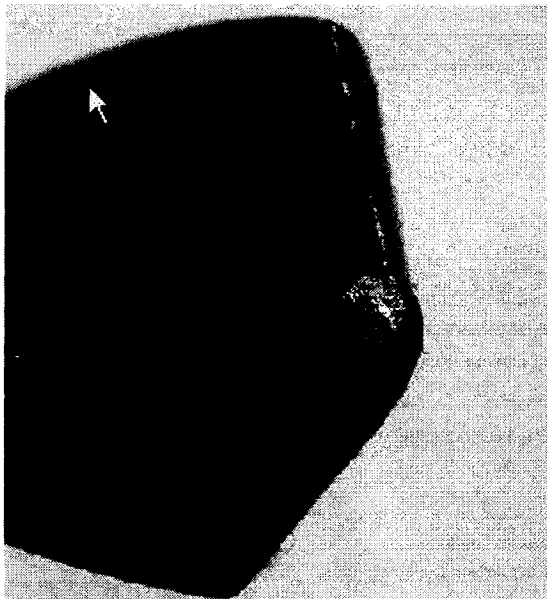
La conclusion d'après les tests faits est que le liquide de coupe a une influence visible sur l'usure des outils en acier rapide ou en carbure métallique.

Les plaquettes de type lame (ou spade drills) ont été éliminées vu leur faible résistance à l'usure avec liquide ou à sec.

Note: les numéros visibles dans le coin supérieur droit des photos représentent l'identificateur utilisé durant les tests pour lier une image avec un type d'essai.

## Annexe 3.2

### Détails concernant l'usure des forets en acier rapide



**Annexe 3-2 , Figure 1: Usure arête de coupe. Foret en acier rapide, avance 0.2 mm/rev constant, rpm variable.**

À remarquer le même type d'usure que celui présenté pour une avance de 0.1 mm/rev.  
Donc l'usure est dépendante premièrement du type de matériaux du foret (acier rapide).





**Annexe 3-2 , Figure 2: Détail usure du coin. Foret en acier rapide, avance 0.2 mm/rev constant, rpm variable.**

À remarquer que l'avance de 0.1 mm/rev use plus vite les outils que l'avance 0.2 mm/rev.

Note: la même observation que l'usure est plus grande pour une avance de 0.1 mm/rev comparativement à 0.2 mm/rev sera retrouvée pour les forets en carbure.

Concernant le recouvrement des outils, pour les forets en acier rapide (HSS), les couches déposées sur l'outil ont été effacées complètement après quelques trous. Le même revêtement (commerciallement nommé Firex™ par le producteur Guhring) appliqué sur les forets en carbure a duré plus longtemps.



**Annexe 3-2 , Figure 3: Usure arête de coupe. Foret en acier rapide, avance 0.1 mm/rev constante, rpm variable.**



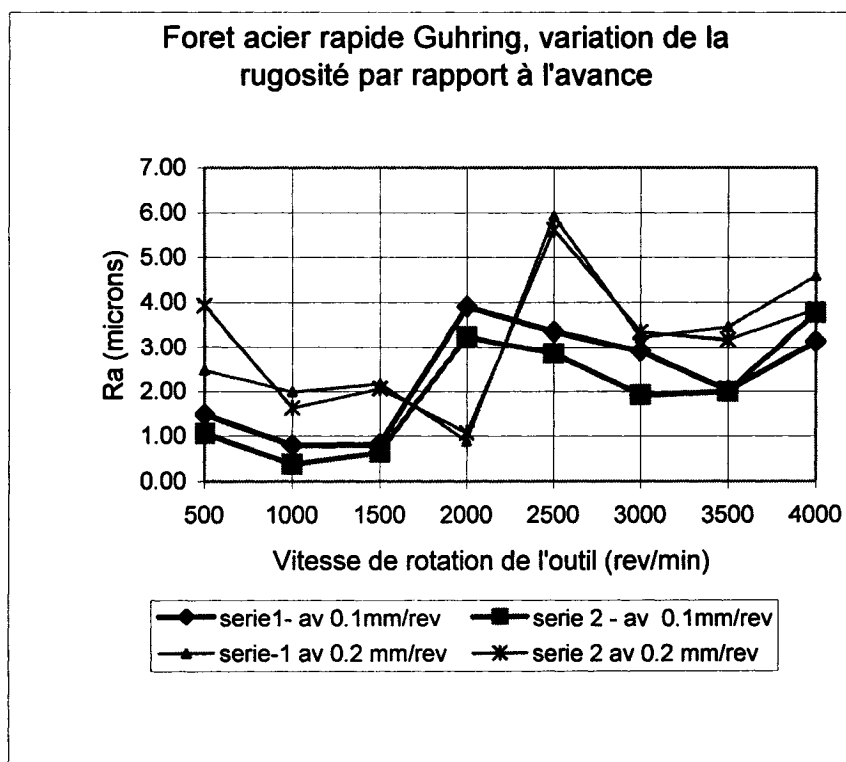
**Annexe 3-2 , Figure 4: Détail usure du coin. Foret en acier rapide, avance 0.1 mm/rev constante, rpm variable.**

### **Annexe 3.3**

Rugosité par rapport à l'avance. Foret Guhring en acier rapide.

Pour les forets en acier rapide, l'influence de la vitesse de rotation de l'outil pour deux avances (0.1 et 0.2 mm/rev), travail avec du liquide de coupe, sera présentée à la figure Annexe 3.3 figure 1. Les forets en acier rapide n'ont été retenus que pour continuer les tests d'usure et pour mesurer les efforts de coupe à cause de leur usure très rapide. La raison de ce graphique est principalement de connaître la dépendance de la rugosité par rapport à la variation de la vitesse de rotation de l'outil, mais aussi d'observer la répétabilité des résultats. Pour l'avance 0.1 mm/rev, les résultats sont présentés avec une ligne épaisse et avec des gros points afin de les distinguer des résultats obtenus pour l'avance de 0.2 mm/rev.


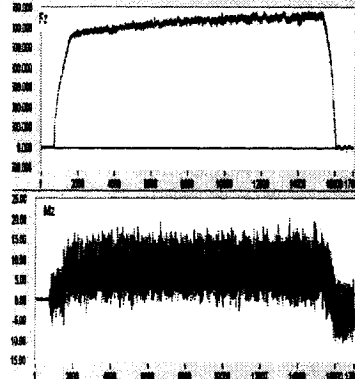
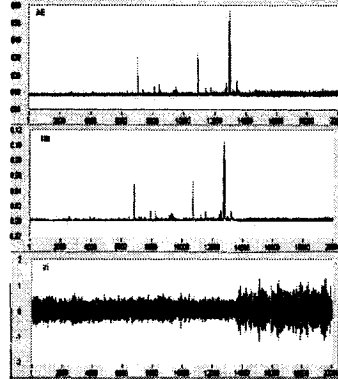

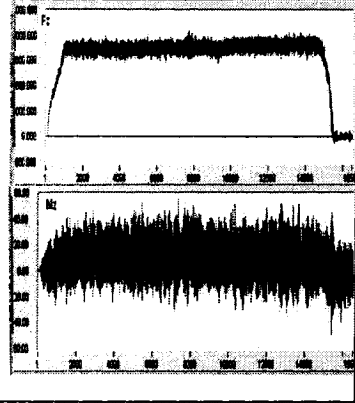
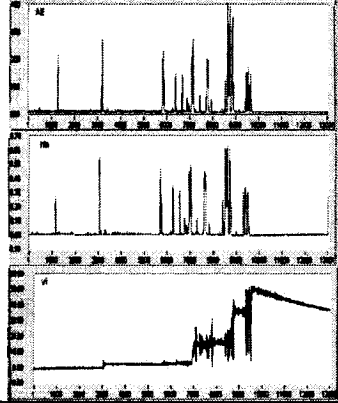

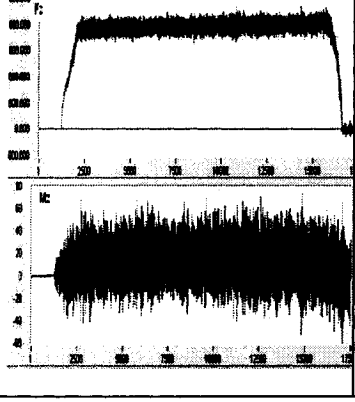
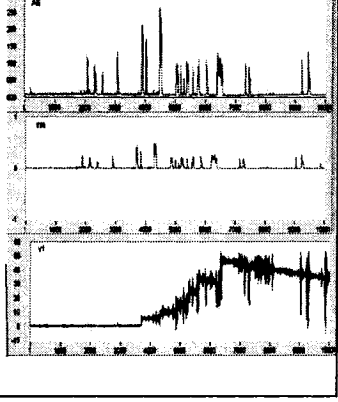
On constate une très bonne répétabilité des résultats. Pour une vitesse de rotation de l'outil de 4000 rpm, on constate des valeurs proches pour la rugosité obtenue pour 0.1 mm/rev et pour 0.2 mm/rev.

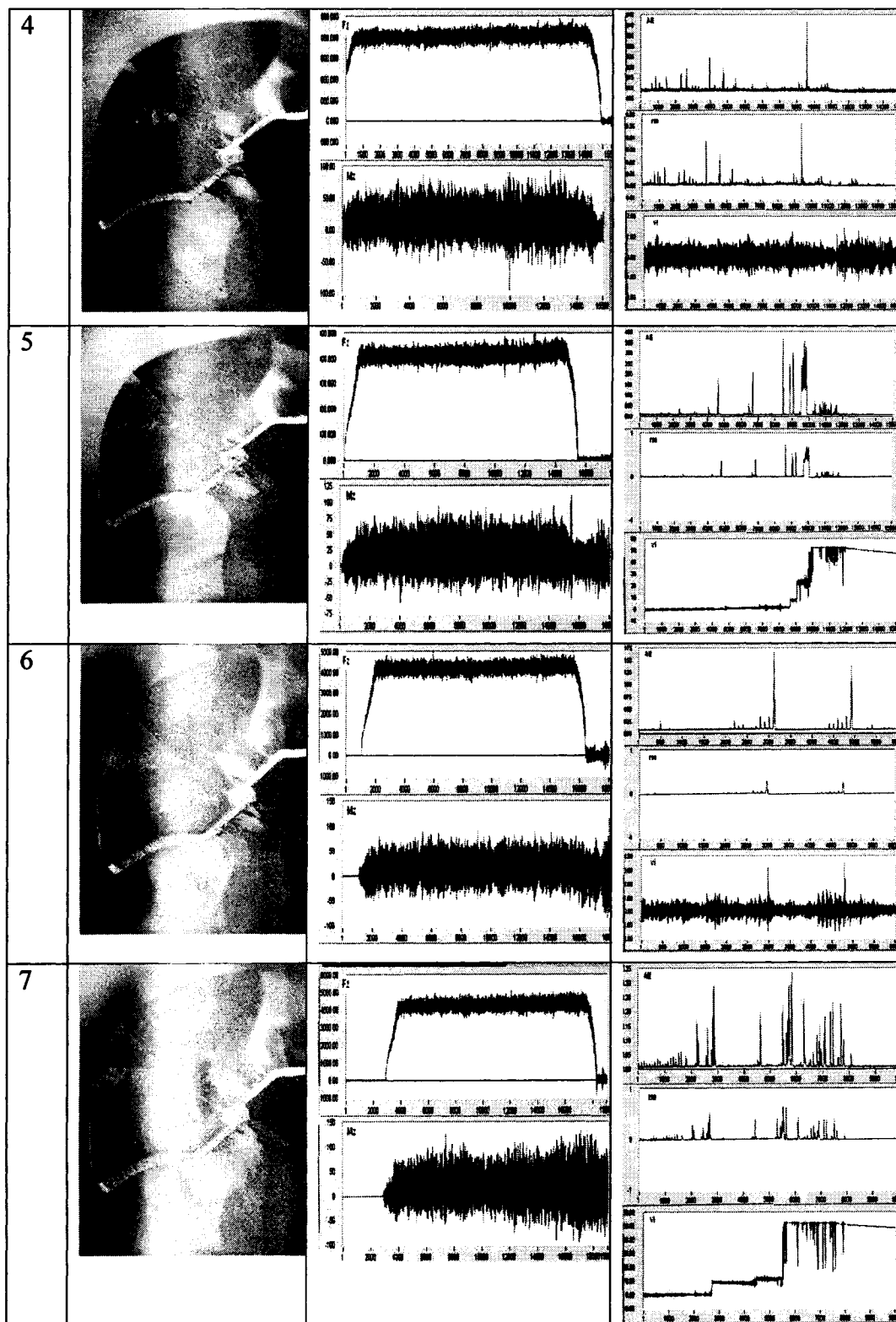


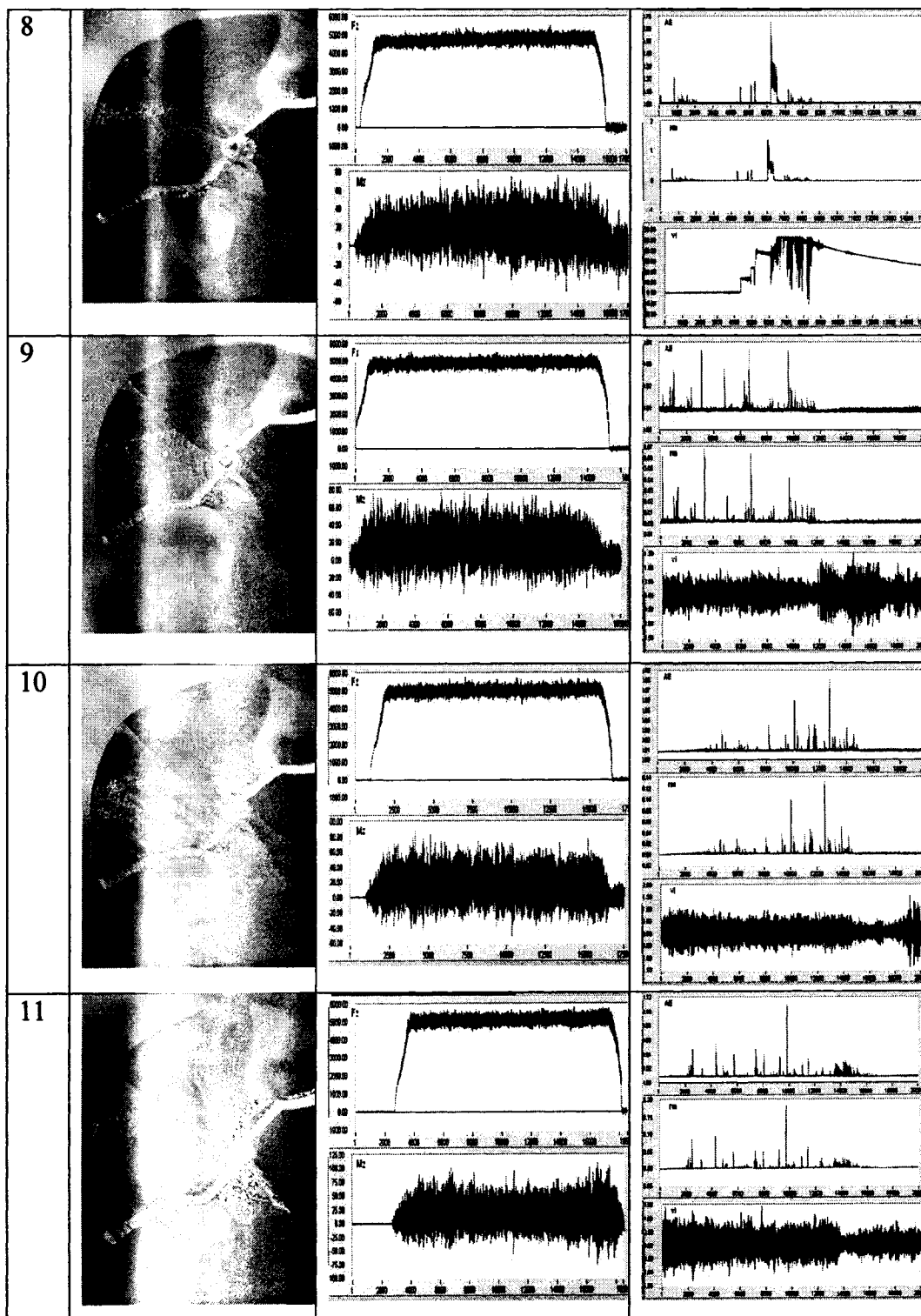
**Annexe 3.3 Figure 1: Variation de la rugosité Ra par rapport à la vitesse de rotation de l'outil pour forets en acier rapide.**

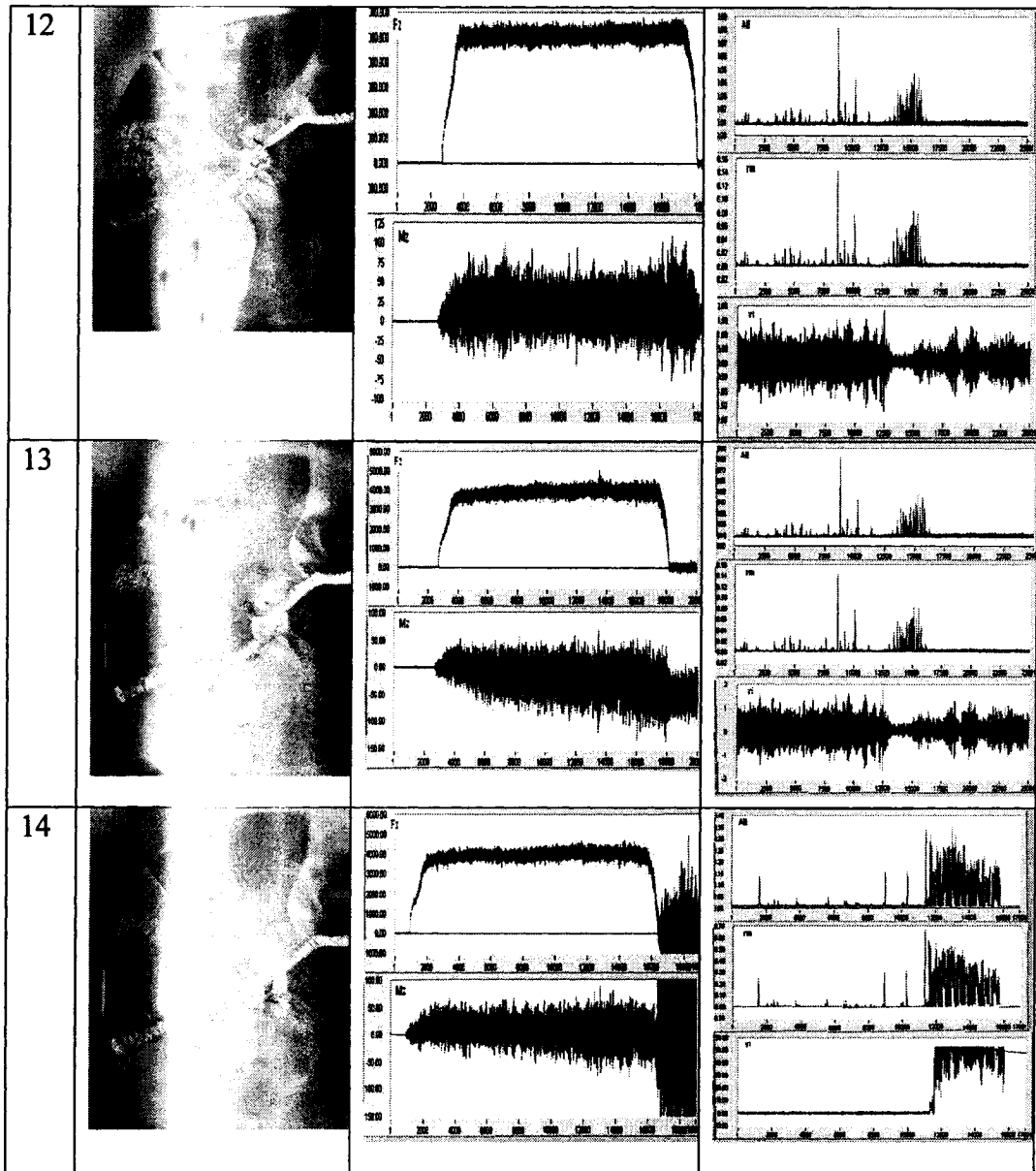
## Annexe 3.4

Foret Guhring. Force Fz, Moment Mz, vibration et émission acoustique (liste sélective). La profondeur de chaque trou a été de 30 mm.

Tr ou	Images du foret Ghuring	Force Fz et moment Mz	Vibration et émission acoustique
1			
2			
3			





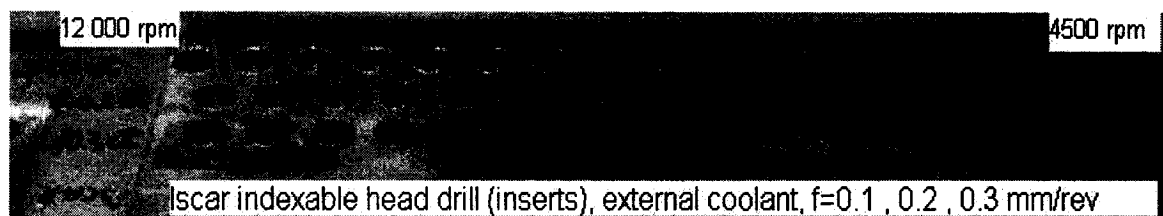


## Annexe 3.5

### Formation des bavures

Dans cette annexe sont présentées quelques images et des observations concernant la formation des bavures pour différentes conditions de coupe. Sur les images suivantes sont visibles des annotations en langue anglaise. Vu que le financement du projet a été assuré par Auto 21, les résultats expérimentaux ont été fournis au commanditaire de la recherche.

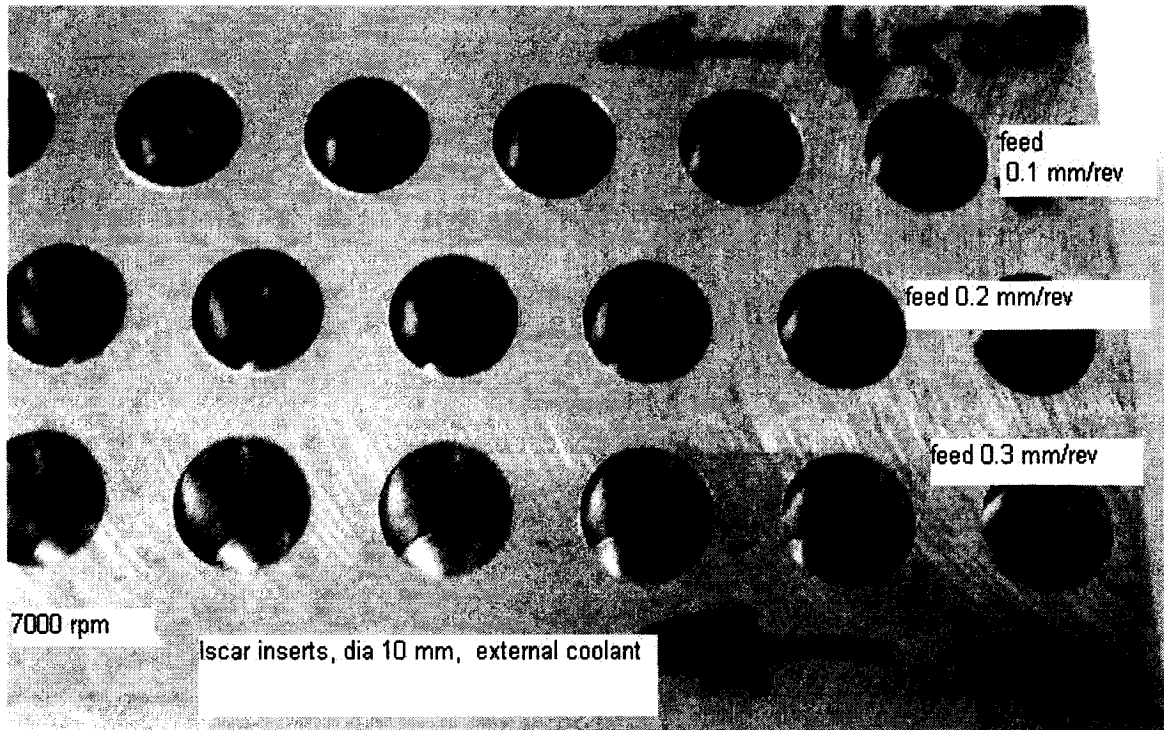
Afin d'observer la formation des bavures par rapport à l'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil, une série de tests a été effectuée pour une avance constante de 0.1, 0.2 et 0.3 mm/rev pour une vitesse de rotation de l'outil croissante à partir de 4500 rpm jusqu'à 12 000 rpm.



**Annexe 3.5 Figure 1: Formation des bavures pour avance constant et rpm variable.**

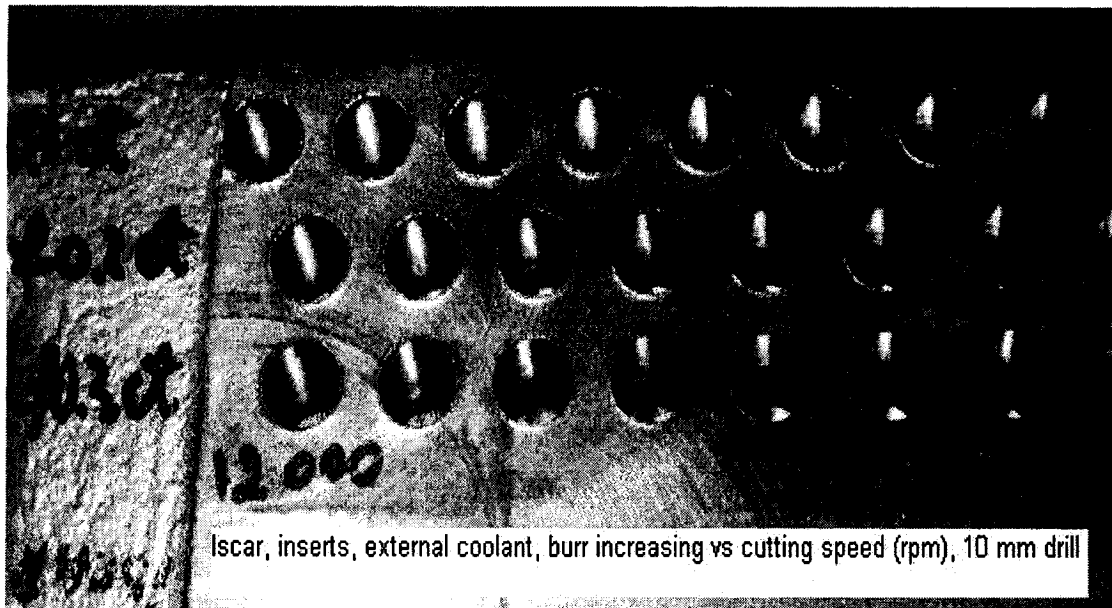
L'examination de la figure précédente montre que l'avance de 0.1 mm/rev produit des bavures plus grandes que l'avance de 0.2 et 0.3 mm/rev en augmentant la vitesse de révolution de l'outil.



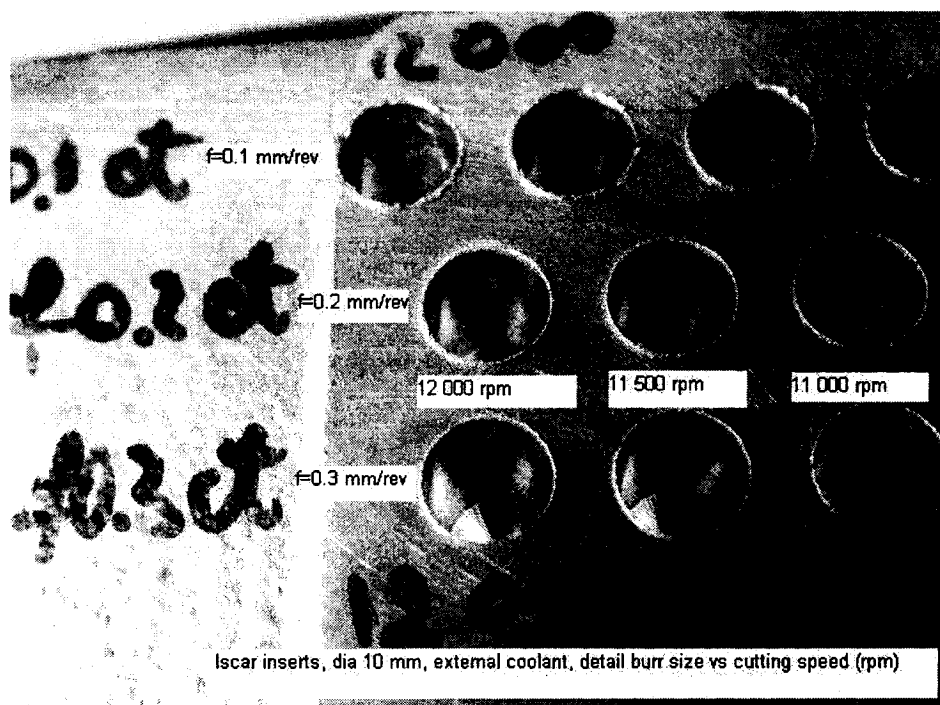


**Annexe 3.5 Figure 2: Vue de détail pour rpm entre 4500 et 7000.**

À remarquer que pour l'avance de 0.1 mm/rev, pour 6500 - 7000 rpm, les bavures sont visibles.



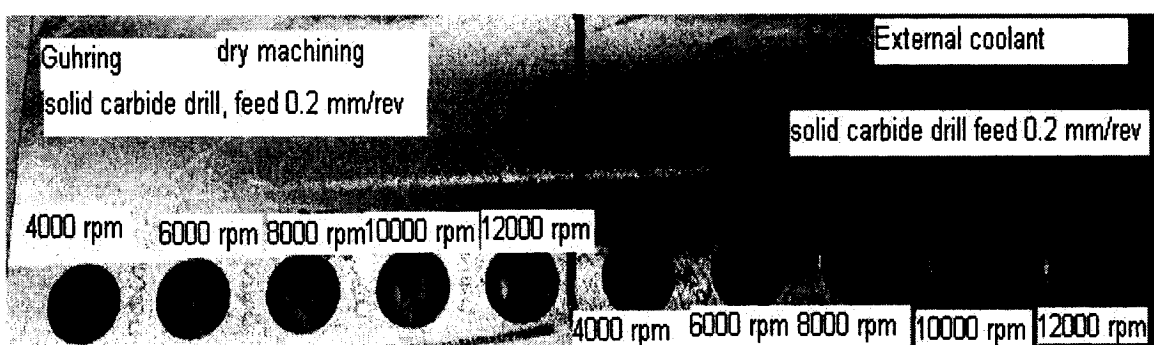
Annexe 3.5 Figure 3: Vue de détail pour rpm entre 9000 et 12000.



Annexe 3.5 Figure 4: Vue de détail pour rpm entre 11500 et 12000.

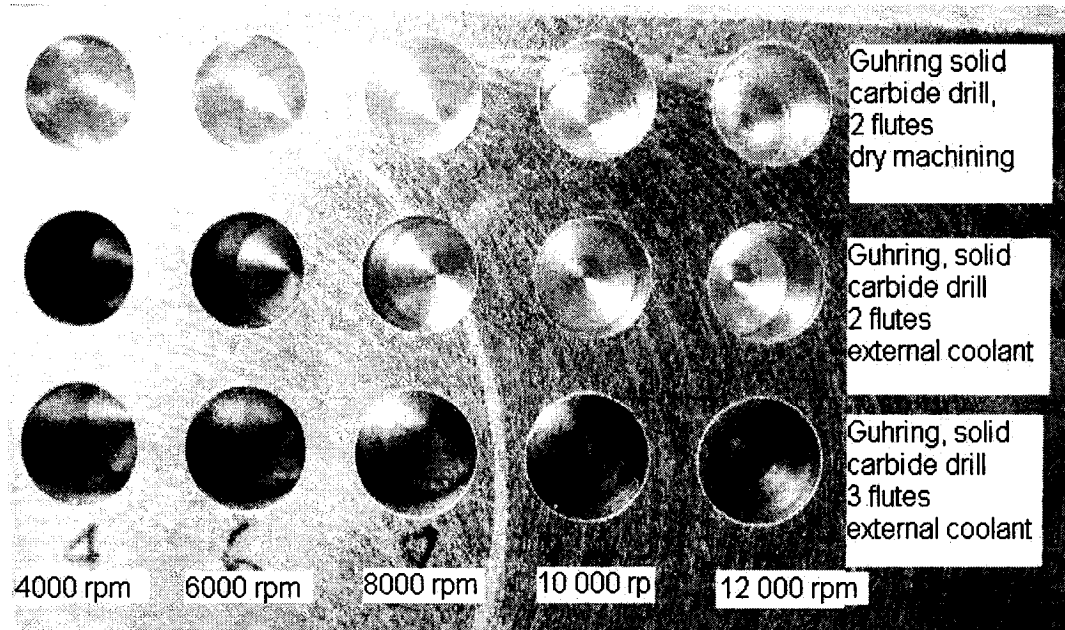
Les figures 3 et 4 de l'annexe 3.5 montrent qu'en augmentant l'avance à 0.2 mm/rev, la grandeur des bavures a diminué par rapport à l'avance 0.1 mm/rev. Une très légère diminution de la grandeur des bavures est remarquée pour l'avance de 0.3 mm/rev par rapport à 0.2 mm/rev.

Une série de tests a été effectuée pour comparer la formation des bavures pour le perçage à sec et avec du liquide de coupe.

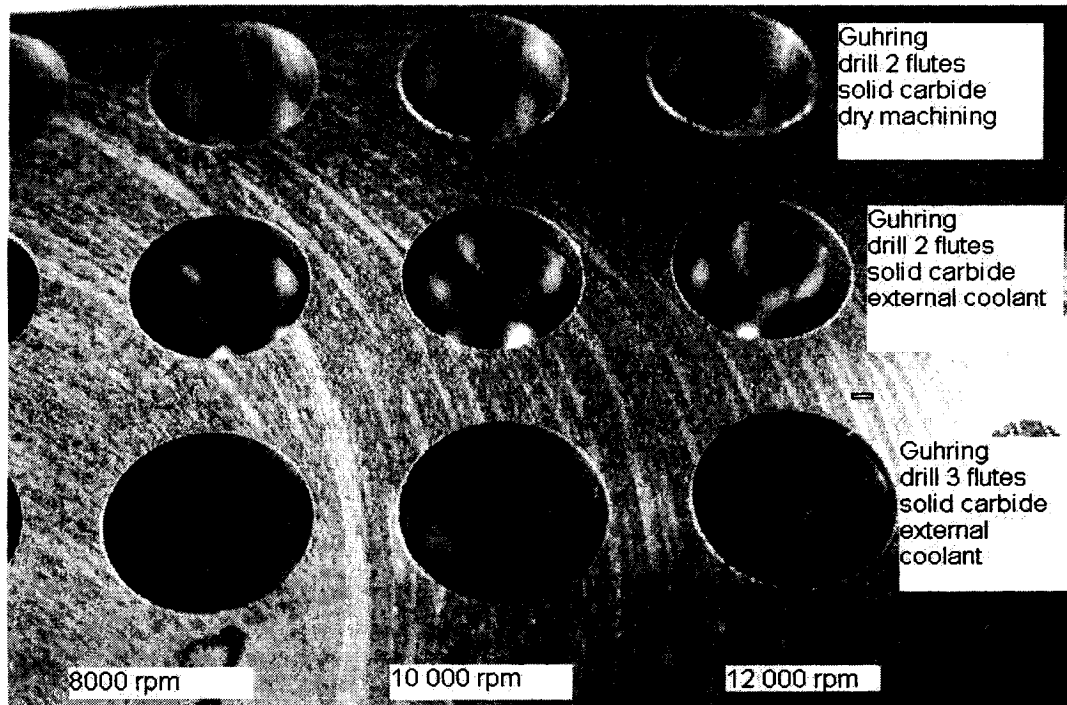


**Annexe 3.5 Figure 5: Comparaison des bavures pour travail à sec et avec du liquide de coupe, foret Guhring, avance constant 0.2 mm/rev, rpm variable.**

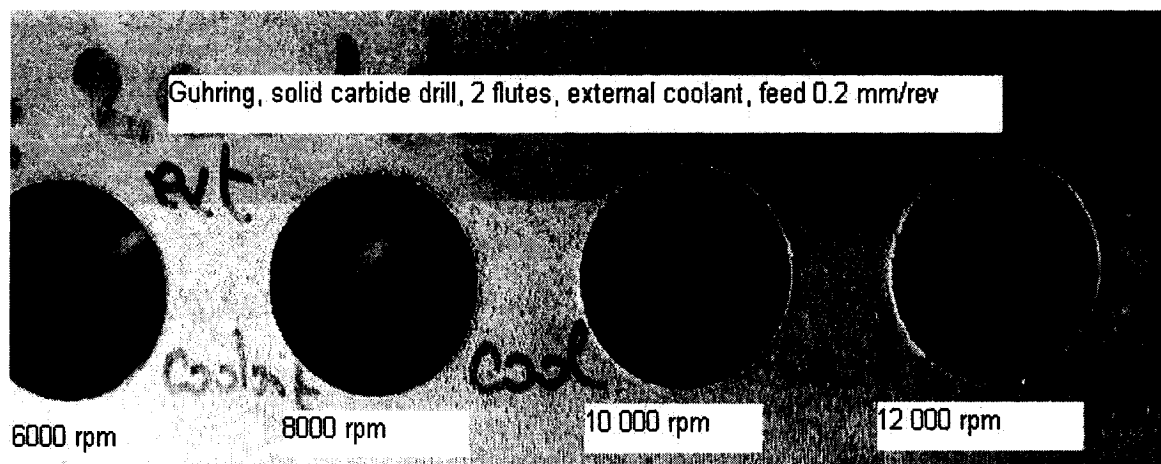
L'observation des trous présentés à la figure 4 de cette annexe laisse voir que dans la présence du liquide de coupe, la formation des bavures est plus visible.



**Annexe 3.5 Figure 6: Comparaison des bavures. Forets Guhring.**



**Annexe 3.5 Figure 7: Comparaison des bavures. Forets Guhring. Agrandissement pour 8000, 10 000 et 12000 rpm.**



**Annexe 3.5 Figure 8. Bavures, foret Guhring, détail pour 6000-12 000 rpm**

L'observation des bavures présentées à la figure 7 de l'annexe 3.5 montre qu'à partir de 8000 rpm, la formation des bavures est facilement visible.

Globalement, l'observation qui se dégage de l'analyse des bavures est que les outils en carbure solide donnent des résultats supérieurs aux outils à plaquette amovible.