

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Ing.

PAR
KIENTZY, Guillaume

ÉTUDE COMPARATIVE DE L'USINAGE À SEC ET LUBRIFIÉ DES ACIERS À
MOULES : USINABILITÉ ET COÛTS

MONTRÉAL, LE 7 JUILLET 2008

© Guillaume KIENTZY, 2008

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Victor Songmene, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Antoine Tahan, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Hoang LeHuy, examinateur externe
Sorel Forge inc.

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY

LE 20 JUIN 2008

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur Victor Songmene pour la qualité de son encadrement. C'est grâce à ses conseils, aux notions inculquées, au soutien moral et financier que j'ai pu mener à bien cette tâche.

Je tiens à remercier Sorel Forge Inc, sans qui nous n'aurions pas pu réaliser cette étude, pour nous avoir fourni les matériaux.

Je tiens également à remercier sincèrement Riad, Imed, Elvis et Samuel qui m'ont aidé dans mon travail par leur support moral et leurs conseils, mais aussi pour leur sympathie.

Un grand merci à toutes les personnes que j'ai rencontrées ici et qui ont fait de mon séjour à Montréal un moment intense. Pour ceux de la partie I : Olivier, Bertrand, Mathilde, Guillaume, Bastien, Georges, les Lyonnaises, Amélie et Léna, Daniel. Pour la partie II : tout les personnes des Arts et Métiers, de l'ESTP, Ariane.

Merci à ma famille pour leur soutien à 5000 km de là et surtout merci à Solène pour m'avoir aidé et attendu.

ÉTUDE COMPARATIVE DE L'USINAGE À SEC ET LUBRIFIÉ DES ACIERS À MOULES : USINABILITÉ ET COÛTS

KIENTZY, Guillaume

RÉSUMÉ

L'usinage avec lubrifiant entraîne des problèmes environnementaux et de santé pour l'opérateur. De plus, il représente un pourcentage non négligeable dans le coût d'usinage. Par conséquent l'usinage à sec devient une solution à envisager. Il est cependant légitime et nécessaire de se demander pour quelles conditions de coupe et quels matériaux, cette technologie sera compétitive.

Cette recherche a pour but d'établir des modèles et un protocole d'évaluation et de comparaison des performances de l'usinage à sec et de l'usinage lubrifié. Les critères de performance visés incluent l'usinabilité, la vie des outils, les efforts et énergies requises pour la coupe, le coût d'usinage ainsi que la qualité des pièces produites.

Cinq aciers à moules ont été étudiés par perçage et fraisage. Nous avons prouvé que l'usinage à sec est généralement avantageux en termes de coût mais aussi d'un point de vue forces de coupe et durée de vie des outils.

Mots-clés : aciers à moules, usinabilité, lubrification, sec, coût

ÉTUDE COMPARATIVE DE L'USINAGE À SEC ET LUBRIFIÉ DES ACIERS À MOULES : USINABILITÉ ET COÛTS

KIENTZY, Guillaume

ABSTRACT

Machining with lubricant/coolant causes environmental and health problems. Moreover it represents a considerable percentage of the machining costs. Dry machining might be a good alternative solution. It is however necessary to know for which cutting conditions and which materials this technology is competitive.

The purpose of this research work is to establish models and a protocol for evaluating and comparing the performance of dry machining and wet machining. The performance criteria used include machinability, tool life, cutting forces and machining costs as well as the quality of the produced parts.

Our study focused on five moulds steel. The operations studied are face milling and drilling. This work proved the advantage of the dry machining in terms of costs, cutting forces and tool life.

Keywords: mould steels, machinability, lubrication, dry, cost

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Usinage et usinabilité des aciers à moules en fraisage.....	4
1.1.1 Mécanismes d'usure des outils et effet sur les conditions de coupe	4
1.1.2 L'intérêt de l'usinage à sec par rapport à l'usinage lubrifié.....	10
1.1.3 Usinage MQL vs usinage à sec	12
1.1.4 L'intérêt des additifs dans les aciers à moules.....	14
1.2 Forces de coupe.....	15
1.3 Modèles d'usinabilité des matériaux.....	17
1.4 Coûts d'usinage.....	19
1.4.1 Coûts en fraisage et perçage.....	19
1.4.2 Frais généraux d'utilisation de la machine d'usinage	22
1.4.3 Coûts liés à l'utilisation d'un fluide de coupe.....	23
1.5 Analyse des copeaux générés durant l'usinage	24
1.6 Impact des lubrifiants sur la santé et l'environnement.....	25
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES	27
2.1 Problématique	27
2.2 Étude expérimentale.....	27
2.2.1 Durée de vie des plaquettes amovibles en fraisage.....	27
2.2.2 Forces de coupe en perçage.....	28
2.2.3 Qualité des pièces en fraisage	29
2.3 Dispositif expérimental	29
2.3.1 Matériaux	29
2.3.2 Machines-outils	31
2.3.3 Outils de coupe.....	31
2.3.4 Lubrifiant.....	33
2.3.5 Instruments de mesures	33
CHAPITRE 3 FORCES DE COUPE	35
3.1 Analyse statistiques et résultats expérimentaux	36
3.2 Analyse des résultats	40
3.3 Analyse des copeaux	44
3.4 Bilan du chapitre	45
CHAPITRE 4 USURE ET VIE DES OUTILS DE COUPE.....	46
4.1 Durée de vie obtenue et modèle d'usure	47
4.1.1 Durée de vie des plaquettes.....	47
4.1.2 Modèles de Taylor.....	50
4.2 Comparaison de l'usure des outils	55

4.3	Comparaison de l'usure lors de l'usinage avec lubrification vs à sec.....	57
4.3.1	Comparaison des courbes d'usure.....	57
4.3.2	Comparaisons des durées de vie entre le SF-5 et le SF-2312	59
4.3.3	Comparaisons des durées de vie entre le SF-2000 et le SP-300	61
4.3.4	Comparaisons des durées de vie entre l'usinage avec lubrification et à sec .	62
4.4	Étude des copeaux.....	64
4.4.1	Couleur des copeaux	64
4.4.2	Forme et évacuation des copeaux	66
4.5	Étude de la dureté après usinage	66
4.6	Bilan du chapitre	67
CHAPITRE 5 QUALITÉ DES PIÈCES		69
5.1	Résultats	69
5.2	Analyse des résultats	72
5.2.1	Analyse statistiques.....	72
5.2.2	Analyse des résultats	73
5.3	Bilan du chapitre	75
CHAPITRE 6 COÛT D'USINAGE		77
6.1	Établissement des temps liés à l'usinage	78
6.1.1	Temps d'usinage lorsque l'outil est dans la matière en surfaçage	79
6.1.2	Temps d'usinage lorsque l'outil est dans la matière en perçage.....	82
6.1.3	Temps lorsque l'outil n'usine pas mais se déplace	83
6.2	Établissement des formules de coûts non lié aux lubrifiants	87
6.3	Établissement des coûts d'achats des outils	88
6.4	Établissement des coûts liés au lubrifiant	92
6.5	Frais généraux	95
6.6	Modèle final	97
6.7	Calcul du coût dans un cas précis	98
6.7.1	Simplification du modèle	98
6.7.2	Valeurs numériques.....	100
6.7.3	Résultats	104
CONCLUSION		110
RECOMMANDATIONS.....		112
ANNEXE I	FICHE TECHNIQUE DE LA TABLE DYNAMOMÉTRIQUE KISTLER MODÈLE 9255B.....	113
ANNEXE II	FICHE TECHNIQUE DU LUBRIFIANT BLASOCUT 2000.....	114
ANNEXE III	VALEURS MESURÉES DES EFFORTS EN PERÇAGE À SEC....	115
ANNEXE IV	VALEURS MESURÉES DES MOMENTS EN PERÇAGE À SEC..	118

ANNEXE V	VALEURS MESURÉES DES EFFORTS EN PERÇAGE AVEC LUBRIFICATION	121
ANNEXE VI	VALEURS MESURÉES DES MOMENTS EN PERÇAGE AVEC LUBRIFICATION	123
ANNEXE VII	COURBES D'USURE EN FONCTION DU TEMPS POUR LE SF-5	125
ANNEXE VIII	COURBES D'USURE EN FONCTION DU TEMPS POUR LE SF-2312	126
ANNEXE IX	COURBES D'USURE EN FONCTION DU TEMPS POUR LE SF-2000	127
ANNEXE X	COURBES D'USURE EN FONCTION DU TEMPS POUR LE SP-300	128
ANNEXE XI	IMAGES DE LA FACE DE DÉPOUILLE ET DE COUPE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-5 À 75 M/MIN	129
ANNEXE XII	IMAGES DE LA FACE DE DÉPOUILLE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-5 À 125 M/MIN	130
ANNEXE XIII	IMAGES DE LA FACE DE COUPE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-5 À 125 M/MIN	131
ANNEXE XIV	IMAGES DE LA FACE DE DÉPOUILLE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2312 À 75 M/MIN	132
ANNEXE XV	IMAGES DE LA FACE DE DÉPOUILLE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2312 À 125 M/MIN	133
ANNEXE XVI	IMAGES DE LA FACE DE COUPE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2312 À 75 M/MIN	134
ANNEXE XVII	IMAGES DE LA FACE DE COUPE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2312 À 125 M/MIN	135
ANNEXE XVIII	IMAGES DE LA FACE DE DÉPOUILLE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2000 ET SP-300 À 75 M/MIN	136
ANNEXE XIX	IMAGES DE LA FACE DE DÉPOUILLE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2000 ET SP-300 À 125 M/MIN	137

ANNEXE XX	IMAGES DE LA FACE DE COUPE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2000 ET SP-300 À 75 M/MIN	138
ANNEXE XXI	IMAGES DE LA FACE DE COUPE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2000 ET SP-300 À 125 M/MIN	139
ANNEXE XXII	STRUCTURE CRISTALLOGRAPHIQUE	140
ANNEXE XXIII	VALEURS RELEVÉES DES TESTS DE RUGOSITÉ À SEC.....	141
ANNEXE XXIV	VALEURS RELEVÉES DES TESTS DE RUGOSITÉ AVEC LUBRIFICATION	142
	LISTE DE RÉFÉRENCES	143

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 2.1	Composition chimique et dureté des aciers à moules étudiés	30
Tableau 3.1	Résultats et calculs statistiques sur les efforts en perçage.....	38
Tableau 3.2	Résultats et calculs statistiques sur les moments en perçage	39
Tableau 3.3	Type de copeaux obtenus en perçage selon les matériaux	44
Tableau 4.1	Durée de vie expérimentale des outils en fraisage avec lubrification	49
Tableau 4.2	Durée de vie expérimentale des outils en fraisage à sec	49
Tableau 4.3	Modèle de Taylor lors du fraisage avec lubrification.....	54
Tableau 4.4	Modèle de Taylor lors du fraisage à sec.....	54
Tableau 4.5	Dureté après fraisage des aciers	67
Tableau 5.1	Moyenne des rugosités mesurées lors de l'usinage.....	70
Tableau 5.2	Analyse statistique de la valeur de la rugosité R_a	72
Tableau 5.3	Analyse statistique de la valeur de la rugosité R_q	73
Tableau 6.1	Différence de coût entre les deux modes de lubrification	105

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	<i>Manifestations d'usure des plaquettes d'usinage</i> 6
Figure 1.2	<i>Schématisation simplifiée expliquant le modèle de calcul d'efforts en perçage</i> 16
Figure 1.3	<i>Longueur caractéristique d'un perçage débouchant</i> 22
Figure 1.4	<i>Classements des types de copeaux</i> 24
Figure 2.1	<i>Machine NEXUS 410 A utilisée pour tous nos essais</i> 31
Figure 2.2	<i>Géométrie des plaquettes des tests de durée de vie et de fini de surface</i> 32
Figure 2.3	<i>Microscope utilisé lors des tests de durée de vie des outils de coupe</i> 34
Figure 2.4	<i>Rugosimètre utilisé lors de nos essais de fini de surface</i> 34
Figure 3.1	<i>Comparatif des efforts en perçage du SF-5 et du SF-2312</i> 40
Figure 3.2	<i>Comparatif des efforts à sec du SF-200, du SP-300 et du SF-2050v</i> 41
Figure 4.1	<i>Courbe d'usure du SF-2312 en fraisage avec lubrification</i> 47
Figure 4.2	<i>Durée de vie des outils en fonction de la vitesse de coupe de l'acier SF-5</i> ... 51
Figure 4.3	<i>Durée de vie des outils en fonction de la vitesse de coupe de l'acier SF-2312</i> 51
Figure 4.4	<i>Durée de vie des outils en fonction de la vitesse de coupe de l'acier SF-2000</i> 52
Figure 4.5	<i>Durée de vie des outils en fonction de la vitesse de coupe de l'acier SP-300</i> 52
Figure 4.6	<i>Image d'une plaquette utilisée pour usiner l'acier SF-2312, montrant une défaillance par fissures thermiques</i> 56
Figure 4.7	<i>Comparaison des modèles de Taylor du SF-5 et du SF-2312</i> 59
Figure 4.8	<i>Comparaison des modèles de Taylor du SF-2000 et du SP-300</i> 61
Figure 5.1	<i>Comparatif des valeurs de rugosité R_a en fraisage</i> 71

Figure 5.2	<i>Comparatif des valeurs de rugosité R_q en fraisage.</i>	71
Figure 6.1	<i>Explication de la longueur d'usinage dans le modèle de Parent.</i>	81
Figure 6.2	<i>Explication de la longueur d'usinage pour notre modèle.</i>	81
Figure 6.3 :	<i>Déplacement de l'outil pour le calcul de coût.</i>	103
Figure 6.4	<i>Coût total des deux modes de lubrification.</i>	104
Figure 6.5	<i>Pourcentage de la différence de coût total entre les deux modes de lubrification quand le prix du brut n'est pas pris en compte.</i>	106
Figure 6.6	<i>Coûts générés par les outils en fonction de la vitesse de coupe.</i>	107

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Éléments chimique :

Al	aluminium	Mn	manganèse	P	phosphore
B	bore	Mo	molybdène	S	souffre
C	carbone	N	azote	Si	silicium
Cr	chrome	Ni	nickel	Ti	titane
Cu	cuivre	O	oxygène	V	vanadium

AISI American Iron and Steel Institute

ASME American Society of Mechanical Engineers

cot Le symbole de la fonction mathématique cotangente

CVD Chemical Vapor Deposition (Dépôt chimique en phase vapeur)

FAO Fabrication assistée par ordinateur

HSS High Speed Steel (Acier rapide)

MQL Quantité de lubrification minimale

NIOSH National Institute of Occupational Safety and Health

PVD Physical Vapor Deposition (Dépôt physique par vapeur)

LISTE DES UNITÉS DE MESURE

Unités de base		Unités croisées et autres	
Longueur		Puissance	
m	mètre	kW	kilowatt
mm	millimètre	W	Watt
µm	micromètre		
Aire		Énergie	
m^2	mètre carré	kWh	kilowatt par heure
mm^2	millimètre carré		
Volume		Force	
m^3	mètre cube	N	Newton
dm^3	décimètre cube		
L	litre ($= 1dm^3$)		
masse		Pression	
kg	kilogramme	N/mm^2	Newton par millimètre carré
Temps			
an	année		
d	jour		
h	heure		
min	minute		
s	secondes		
Angle des outils		Moment d'une force	
°	degré	N.mm	Newton millimètre
K	Kelvin		
<hr/> Unités mécanique		Masse volumique	
Vitesse		kg/L	kilogramme par litre
m/min	mètre par minute		
mm/min	millimètre par minute		
Vitesse angulaire		Débit de fluide	
tr/min	tour par minute	m^3/d	mètre cube par jour
		L/min	litre par minute
		mL/h	millilitre par heure
		Dureté	
		HB	dureté Brinell
		HRA	dureté Rockwell
		Conductivité thermique	
		$W.m^{-1}.K^{-1}$	Watt par mètre et par Kelvin

LISTE DES SYMBOLES

A_{fg}	Surface du système de traitement par filtration par gravité du lubrifiant de la machine outil	m^2
A_m	Nombre d'années prévues pour amortir le prix de la machine-outil	an
a_{pa}, a_{paf}, a_{par}	Profondeur de passe axiale (cas général, finition, ébauche)	mm
a_{pr}	Profondeur de passe radiale (cas général)	mm
C, C_1, C_2, C_3, C_4	Constante utilisées dans les équations de durée de vie des outils en fraisage	
C_{abs}	Coût du système d'absorption du carbone	\$/an
C_{aig}	Coût d'aiguisage de l'outil monobloc	\$
C_{aofp}, C_{aorp}	Coût des outils pour usiner une pièce en perçage (finition, ébauche)	\$/pièce
C_{aofs}, C_{aors}	Coût des outils pour usiner une pièce en surfaçage (finition, ébauche)	\$/pièce
C_{appf}, C_{appr}	Coût d'achat du porte-plaquette (finition, ébauche)	\$
C_b	Coût d'achat de la matière brute	\$
C_{co}	Coût lié aux temps de changement des outils	\$
C_{fao}	Coût lié à la fabrication assistée par ordinateur	\$
C_{fg}	Coût du système de filtration par gravité	\$/an
C_{fl}	Prix du fluide de coupe au litre	\$/L
C_{fpa}	Coût du système de flottation par insufflation d'air	\$/an
C_{kwh}	Coût du kilowatt par heure	\$/kWh

C_m	Coûts liés à la mise en route de la machine et du chargement du programme	\$/pièce
C_{ombf}, C_{ombr}	Coût d'achat de l'outil monobloc (finition, ébauche)	\$
C_p, C_{pfs}, C_{prs}	Coût d'une plaquette (cas général, ébauche, finition)	\$/plaquette
CP	Charges patronales (coefficient porté sur le salaire brut)	
C_{per}	Coût en lubrifiant rajouté par semaine pour compenser les pertes	\$/semaine
C_{pie}	Coûts liés à la mise en place et à l'enlèvement de la pièce	\$/pièce
C_{shg}	Coût du système de séparation de l'huile par gravité	\$
C_{sys}	Coût du système de lubrification de la machine par an	\$/an
D	Diamètre de l'outil (cas général)	mm
D_{fp}, D_{rp}	Diamètre de l'outil lors du perçage (finition, ébauche)	mm
D_{fs}, D_{rs}	Diamètre de l'outil lors du surfaçage (finition, ébauche)	mm
E	Trajet effectué pour le positionnement et l'approche de l'outil à l'avance utilisé lors de l'enlèvement de matière	mm
Err	Erreur d'estimation dans notre étude statistique	
f_{tp}, f_{fp}, f_{rp}	Avance lors du perçage (cas général, finition, ébauche)	mm/(tr.dent)
f_t, f_{fs}, f_{rs}	Avance lors du surfaçage (cas général, finition, ébauche)	mm/(tr.dent)
F_{loc}	Frais du local où la machine est installée	\$(m ² .an ¹)
F_{re}	Frais de réparation et d'entretien de la machine	\$/an

F_{rl}, F_{r2}	Forces radiales exercées sur le foret	N
F_{tl}, F_{t2}	Forces tangentialles exercées sur le foret	N
F_z	Force de coupe en perçage	N
HB	Dureté Brinell du matériau	HB
H_v	Hauteur totale du volume à fraiser	mm
I	Taux d'intérêts liés à l'achat de la machine	
k_s	Pression spécifique de coupe	N/mm ²
L	Longueur totale à fraiser	mm
L_{ap}, L_{afp}, L_{arp}	Longueur d'approche en perçage (cas général, finition, ébauche)	mm
L_{dp}, L_{dfp}, L_{drp}	Longueur de dépassement en perçage (cas général, finition, ébauche)	mm
L_f, L_r	Longueur durant laquelle l'outil fraise (finition, ébauche)	mm
L_{huf}, L_{hur}	Longueur de déplacement de l'outil entre les passes	mm
LI	Longueur de la plaquette	mm
L_b, L_{lfp}, L_{trp}	Profondeur du perçage (cas général, finition, ébauche)	mm
M	Frais généraux pour l'utilisation de la machine outil	\$/min
M_{fao}	Frais généraux liés aux temps de programmation sous FAO	\$/min
Moy	Moyenne pour l'étude statistique	
M_{pui}	Pourcentage d'utilisation de la puissance de la machine	%
M_r	Moment du aux forces radiales exercées sur le foret	N.mm

M_{reg}	Frais généraux lié au département de réglage des paramètres de l'outil	\$/min
M_t	Moment du aux forces tangentielles exercées sur le foret	N.mm
M_z	Moment en perçage autour de l'axe z du foret	N.mm
n_e	Nombre d'échantillons dans l'étude statistique	
N_{afp}, N_{arp}	Nombre de dents sur l'outil de perçage (finition, ébauche)	dent ⁻¹
N_a, N_{afs}, N_{ars}	Nombre d'arêtes de coupe sur la plaquette utilisée lors du surfaçage (cas général, finition, ébauche)	dent ⁻¹
N_{afmb}, N_{armb}	Nombre de fois ou l'outil monobloc peut être aiguisé avant sa fin de vie (finition, ébauche)	
N_{afp}, N_{arp}	Nombre de fois ou le foret peut être aiguisé avant sa fin de vie (finition, ébauche)	
N_{dres}	Nombre de surfaces latérales à réaliser en rainurage	
N_{fp}, N_{rp}	Vitesse de rotation en perçage (finition, ébauche)	tr/min
N_b, N_{fs}, N_{rs}	Vitesse de rotation en surfaçage (cas général, finition, ébauche)	tr/min
N_{han}	Nombres d'heures d'utilisation de la machine par an	h/an
N_{ser}	Nombre de pièces à réaliser dans la série	
N_{sys}	Nombre de fois par an ou l'on change entièrement le lubrifiant de la machine outil	/an
N_{tp}	Nombre de trous à réaliser en perçage	
OC	Concentration de l'huile de coupe dans le fluide	
P_{am}	Prix d'achat de la machine	\$
P_m	Puissance maximale de la machine	kW

Q_{shg}, Q_{fpa}	Débit en liquide de coupe usagé	m^3/d
R_ϵ	Rayon de bec de la plaquette	Mm
R_a	Rugosité moyenne arithmétique de toutes les ordonnées du profil à l'intérieur de la longueur de base	μm
R_q	Rugosité moyenne quadratique de toutes les ordonnées du profil à l'intérieur de la longueur de base	μm
R_{sk}	Profondeur moyenne des creux de rugosité dépassant la partie centrale du profil	μm
R_{vk}	Somme de l'asymétrie de la courbe de distribution d'amplitude de rugosité à l'intérieur d'une longueur de base	μm
S	Épaisseur de la plaquette	Mm
S_b	Salaire brut de l'employé	$\$/\text{h}$
S_m	Surface occupée par la machine au sol	m^2
t_{cf}, t_{cr}	Temps d'usinage pour une pièce (finition, ébauche)	Min
t_{co}	Temps de changement d'un outil (cas général)	Min
$T_{cot}, t_{cop}, t_{cos}$	Temps de changement de l'outil et des opérations liés à celui-ci (total, perçage, surfaçage)	Min
t_{dtp}	Temps moyen de déplacement de l'outil en perçage entre deux trous	Min
t_{dop}	Temps moyen de déplacement de l'outil de l'origine à la pièce (aller/retour)	Min
t_{fao}	Temps de programmation des opérations d'usinage de la pièce sous FAO	Min
T_{lub}	Temps d'utilisation de fluide par an	An
t_m	Temps de préparation de la machine	Min

t_{pie}	Temps de mise en place et d'enlèvement de la pièce	Min
t_{regp}, t_{regs}	Temps de réglage des paramètres de l'outil au département de ré affûtage (pour le foret en perçage, pour l'outil monobloc en surfaçage)	Min
T_u	Temps d'usinage complet (cas général)	min
t_{uf}, t_{ur}	Temps d'usinage (finition, ébauche)	min
T_{ufp}, T_{urp}	Temps d'usinage en perçage lorsque l'outil travaille (finition, ébauche)	min
T_{ufph}, T_{urph}	Temps d'usinage en perçage lorsque l'outil est hors de la matière (finition, ébauche)	min
T_{ufs}, T_{urs}	Temps d'usinage en surfaçage lorsque l'outil coupe (finition, ébauche)	min
T_{ufsh}, T_{ursh}	Temps d'usinage en surfaçage lorsque l'outil est hors de la matière (finition, ébauche)	min
T_{umj}	Temps de travail sur la machine par jour	h/d
t_0	Durée de vie de l'outil (cas général)	mm
t_{0fp}, t_{0rp}	Durée de vie de l'outil en perçage (finition, ébauche)	min
t_{0fs}, t_{0rs}	Durée de vie de l'outil en surfaçage (finition, ébauche)	min
t_{0ppf}, t_{0ppr}	Durée de vie du porte-plaquette utilisé (finition, ébauche)	min
V_C	Vitesse de coupe (cas général)	m/min
VB	Usure en dépouille des plaquettes	mm
VB_{max}	Usure en dépouille maximale autorisé pour les plaquettes	mm
V_{abs}	Volume du système d'absorption du carbone	m^3

V_{car}	Vitesse de coupe lors des déplacements à vitesse rapide	m/min
v_{cfs}, v_{crs}	Vitesse de coupe en surfaçage (finition, ébauche)	m/min
v_{ff}, v_{fr}	Vitesse d'avance en finition, en ébauche	m/min
V_{per}	Volume de fluide rajouté pour combler les pertes	L/semaine
V_{sys}	Volume du système de lubrification de la machine outil	L
W	Largeur de la plaquette	mm
W_v	Largeur totale du volume à fraiser	mm
w_f, w_r	Largeur à usiner en une passe (finition, ébauche)	mm
Z	Intervalle de confiance	
Z	Nombre de dents ou plaquettes sur l'outil (cas général)	Dents
Z_{fp}, Z_{rp}	Nombre de dents en perçage (finition, ébauche)	Dents
Z_{fs}, Z_{rs}	Nombre de dents en surfaçage (finition, ébauche)	Dents
A	Coefficient de l'équation de durée de vie de l'outil lié à la vitesse de coupe (V_c)	
B	Coefficient de l'équation de durée de vie de l'outil lié à l'avance (f_i)	
Γ	Coefficient de l'équation de durée de vie de l'outil lié à la profondeur de passe axiale (a_{pa})	
Δ	Coefficient de l'équation de durée de vie de l'outil lié à l'usure maximale admissible en dépouille des plaquettes (VB_{max})	
E	Coefficient de l'équation de durée de vie de l'outil lié au nombre de dents de l'outil (Z)	

Ω	Coefficient de l'équation de durée de vie de l'outil lié au diamètre de l'outil (D)	
Φ	Coefficient de l'équation de durée de vie de l'outil lié à la profondeur de passe radiale (a_{pr})	
Σ	Écart type	
κ, χ_f, χ_r	Angle d'attaque en perçage (cas général, finition, ébauche)	°
Δ_{cout}	Pourcentage de la différence de coût entre l'usinage à sec et l'usinage lubrifié	%
Δ_{stat}	Erreur d'estimation en statistique	%

INTRODUCTION

Les lubrifiants sont utilisés en usinage pour plusieurs raisons : diminuer la température, réduire la friction, évacuer les copeaux, améliorer la durée de vie des outils et améliorer le fini des surfaces usinées.

Mais l'utilisation de lubrifiant pose aujourd'hui des problèmes environnementaux et des problèmes de santé pour les opérateurs. Par conséquent les gouvernements imposent des normes de plus en plus sévères pour écarter ces risques. Ces normes se traduisent par la suppression de certains constituants ou par l'augmentation des contraintes au niveau des traitements des fluides, ce qui entraîne des augmentations significatives de coûts d'exploitation (achat et traitement des fluides).

Par conséquent, l'idée d'usiner à sec devient attrayante. Néanmoins, il faut s'assurer dans ce cas de plusieurs points comme, la durée de vie des outils selon les paramètres d'usinage, la productivité et la qualité des pièces. En effet, d'un point de vue écologique et social, supprimer les lubrifiants est une notion approuvée par tous. Mais d'un point de vue comptable, il est nécessaire d'examiner si cette transition est financièrement intéressante. Il est donc nécessaire de se pencher sur l'usinabilité de ces matériaux.

Le but principal de ce travail est de conclure sur la nécessité d'utiliser un lubrifiant lors du fraisage en étudiant l'usinabilité d'acières à moules. Ces matériaux sont très utilisés dans l'industrie et leur fabrication est généralement onéreuse. Il va donc être d'autant plus important de voir si l'usinage à sec ne serait pas préférable à l'usinage lubrifié.

L'étude de l'usinabilité comprend plusieurs parties : l'usure des outils, les forces de coupes et la rugosité. En effet, la réduction des coûts générée par la suppression du lubrifiant ne doit pas inférieure à une possible augmentation des dépenses liées aux outils de coupe. Il faut donc vérifier si la vie des outils lors de l'usinage à sec est comparable avec la lubrification. Ensuite il faut vérifier les efforts de coupe. Ceux-ci sont liés à la puissance que

la machine devra délivrer. Ces deux aspects, l'usure et les efforts, sont importants pour l'ébauche. Mais en ce qui concerne la finition, même si l'usinage à sec s'avérait meilleur en termes de durée de vie et d'efforts, il ne pourrait pas être applicable à l'usinage de finition si celle-ci ne permettait pas de produire des pièces de qualité comparable.

Ensuite, nous établirons un modèle économique de l'usinage par fraisage afin de déterminer lequel des deux types d'usinage (à sec ou lubrifié) sera le plus rentable.

Le présent travail est organisé comme suit :

- Chapitre 1 Revue de littérature : résume les travaux réalisés dans ce domaine,
- Chapitre 2 Méthodologie et procédure expérimentale : Description des tests réalisés.
- Chapitre 3 Forces de coupe : Présente les résultats et commentaires en fonction du mode de lubrification et du matériau testé.
- Chapitre 4 Usure et vie des outils de coupe : Présente les résultats et commentaires selon le mode de lubrification et du matériau testé.
- Chapitre 5 Qualité des pièces : Présente les résultats et commentaires selon le mode de lubrification et du matériau testé.
- Chapitre 6 Coût d'usinage : Présente les résultats et commentaires selon le mode de lubrification et du matériau testé.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Pour déterminer l'usinabilité des aciers à moule lors de l'usinage avec lubrification ou à sec, il est nécessaire de se pencher sur plusieurs points : l'usure et la vie des outils, les efforts de coupe, la qualité des pièces et la forme des copeaux.

Pour étudier la vitesse d'usure des outils, il faut connaître le comportement dans les deux modes d'usinage considérés (à sec et lubrifié) mais aussi connaître les méthodes de modélisation mathématique de cette usure. En effet, la modélisation nous permettra de synthétiser nos résultats et offrira un outil pour les industriels. Il faut donc revoir les modèles élaborés jusqu'à aujourd'hui.

Les efforts engendrés par l'usinage peuvent aussi influencer l'usure. Il est important de connaître leur ordre de grandeur pour savoir quelle puissance sera nécessaire à fournir avec la machine. Ces deux indices, usure et efforts, dépendent aussi de la formation des copeaux. Nous observerons donc le type de copeaux formé et le type d'usure des plaquettes pour mieux comprendre les différences entre l'usinage à sec et l'usinage avec lubrification.

Ces trois points s'appliquent pour l'ébauche et la finition. En plus, lors de la finition, un autre critère de décision entre en compte : le fini des surfaces générées. Il faut donc analyser les résultats actuels entre l'usinage à sec et avec lubrification.

Ensuite, nous étudierons le coût engendré par chacun des deux types d'usinage. Nous allons donc rechercher des modèles existants à l'heure actuelle pour les étendre ensuite à notre étude.

1.1 Usinage et usinabilité des aciers à moules en fraisage

Dans cette partie, nous traitons des différences existantes entre l'usinage à sec et l'usinage avec lubrification du point de vue de l'usinabilité. Nous nous concentrerons sur l'usure des outils et la qualité des surfaces générées.

1.1.1 Mécanismes d'usure des outils et effet sur les conditions de coupe

Il existe différents types et mode d'usure, les voici avec leurs facteurs :

- Par adhérence (facteurs mécaniques et thermiques).
- Par abrasion (facteurs abrasifs),
- Par diffusion (facteurs chimiques),
- Par oxydation (facteurs chimiques),
- Par fatigue statique ou dynamique (facteurs mécaniques),

Usure par adhérence :

- Elle est présente à de faibles vitesses de coupe (≤ 50 m/min) lorsque les températures sont assez faibles.
- Elle est liée à la pression existante entre le copeau et l'outil. Ainsi, la dureté et l'écrouissabilité du matériau, l'épaisseur du copeau, l'avance, la rigidité de la liaison outil-pièce et la vitesse de coupe sont à l'origine de ce type d'usure.
- Elle se manifeste par des microsoudures issues des efforts de coupes à l'interface copeau/outil qui cassent ensuite à cause du mouvement entre le copeau et l'outil.
- Elle peut générer de l'arête rapportée.

Usure par abrasion :

- Elle se retrouve principalement sur la face de coupe de l'outil.
- Elle croît avec la vitesse de coupe.
- Son mécanisme est celui de l'arrachement de micro copeaux du aux particules abrasives présentes dans le matériau usiné. Ce mécanisme est similaire à celui de la meule (pièce usinée ici) sur un matériau (l'outil ici)
- Un outil résiste bien à ce type d'usure s'il est suffisamment dur, mais pour cela, les particules dures présentes dedans doivent être bien réparties, fines et serrées pour favoriser sa résistance à l'usure.
- Ce type d'usure est progressif et se fait de façon plutôt uniforme.

Usure par diffusion :

- Elle est générée surtout pour de grandes vitesses de coupe.
- Elle est liée aux propriétés chimiques des deux matériaux (pièce et outil) et à la vitesse de diffusion.
- Elle est liée à la composition chimique de la pièce et de l'outil. Par exemple, un acier usiné avec du diamant réagira car les deux contiennent du carbone.

Usure par oxydation :

- Elle s'opère par le contact de l'air avec l'outil et s'intensifie avec l'augmentation de la température et par conséquent avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

Ces différents modes d'usures sont liés aux conditions de coupe et entraînent chacun certains types d'usures sur l'outil.

Voici les différents types d'usure que l'on peut trouver sur les plaquettes. Elles sont tirées des catalogues de fabricants ((Sandvik-Coromant, 2007) et (Kennametal)) et du livre de Stephenson (Stephenson, Agapiou et NetLibrary, 1997). Les commentaires issus du catalogue Sandvik seront suivis par un (S), ceux de Kennametal par un (K) et ceux de Stephenson (Stephenson, Agapiou et NetLibrary, 1997) par un (D). Tous les mécanismes d'usure possibles sont montrés par des photos et des schémas dans la Figure 1.1.

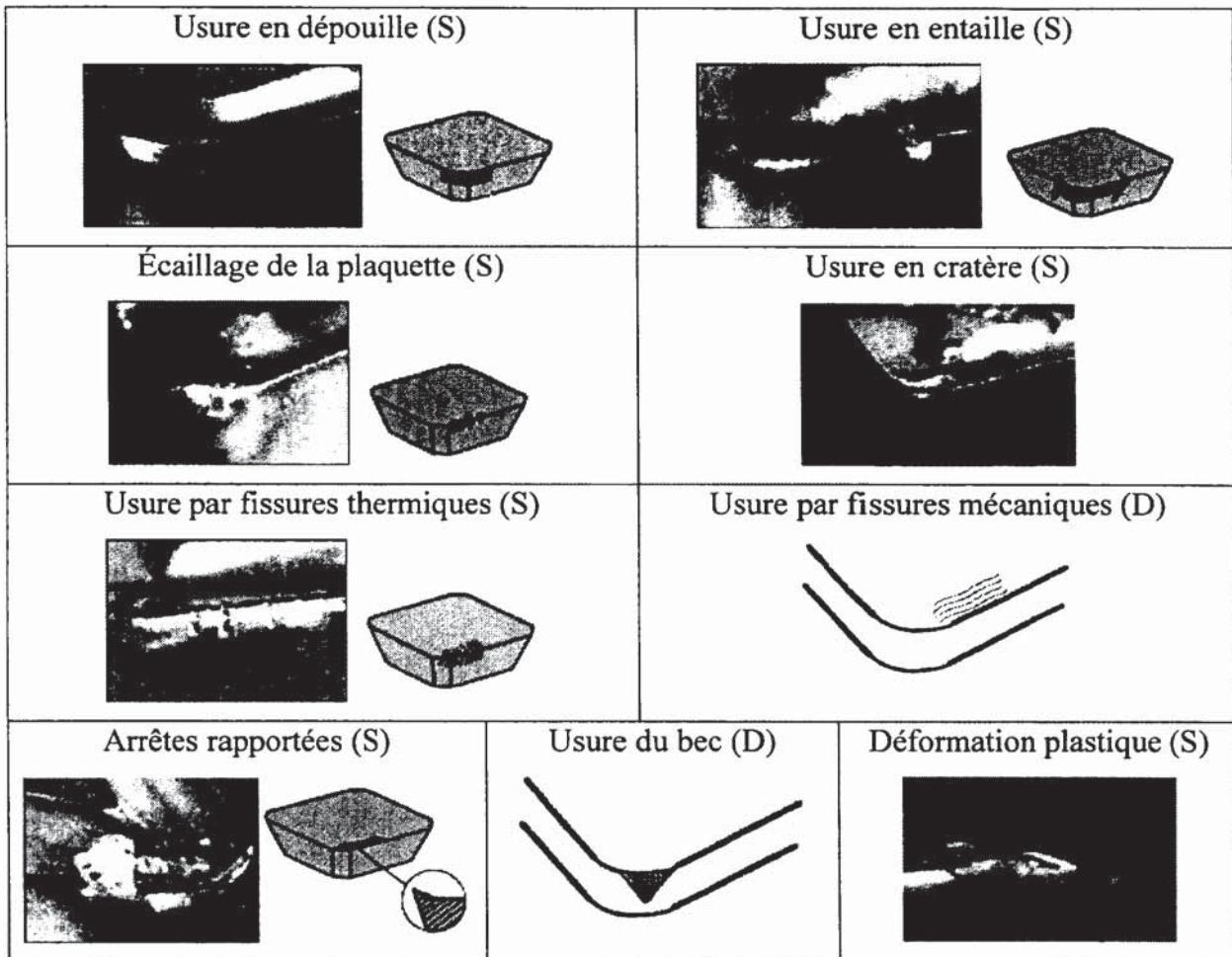


Figure 1.1 Manifestations d'usure des plaquettes d'usinage.

(Balazinski, 2007; Kennametal, ; Sandvik-Coromant, 2007; Stephenson, Agapiou et NetLibrary, 1997)

Sources : Le catalogue en ligne de Sandvik, « Metalcutting Products » (2007); le catalogue Technical Data de Kennametal, le cours MEC4530 « Fabrication Mécanique Avancée » de M. Balazinski à l'école Polytechnique de Montréal et le livre de Stephenson « Metal cutting theory and practic » (1997).

Les recommandations ci-dessous sont une synthèse des catalogues de fabricants ((Sandvik-Coromant, 2007) et (Kennametal)) et du livre de Stephenson (Stephenson, Agapiou et NetLibrary, 1997).

- Usure en dépouille (abrasion) : création d'un état de surface déplorable. Les causes et les solutions sont :
 - Augmenter la vitesse de coupe et l'avance,
 - Géométrie de l'outil mal adaptée ou choisir une plaquette plus résistante ou changer le revêtement,
 - Nettoyer la pièce ou raffiner sa microstructure,
 - Filtrer le lubrifiant.
- Usure en entaille (abrasion ou oxydation) : cela entraîne un mauvais état de surface et risque de rupture de la plaquette sur l'arrête. Les solutions sont :
 - Réduire la vitesse de coupe (oxydation) et l'avance, changer la profondeur de coupe pour un matériau abrasif (abrasion),
 - Choisir une plaquette plus résistante (abrasion),
 - Changer le lubrifiant (oxydation).
- Écaillage : réduit la qualité de l'état de surface et entraîne une usure importante en dépouille de la plaquette
 - Abrasion : Choisir une plaquette plus résistante et réduire l'avance,
 - Vibration : Réduire la profondeur de coupe, augmenter la rigidité du système et choisir une plaquette plus résistante,
 - Géométrie de l'outil mal adaptée,
 - Supprimer le lubrifiant,
 - Évacuer mieux les copeaux (changer la géométrie de l'outil ou utiliser un fluide de coupe),
 - Réduire le broutement.

- Fissures thermiques : entraînent de l'écaillage et conduit à un mauvais état de surface. Elles sont reconnaissables par des fissures perpendiculaires à l'arête de coupe. Les causes et les solutions sont :
 - Réduire la vitesse de coupe et l'avance,
 - Choisir une plaquette plus résistante et choisir un matériau d'outil plus résistant aux chocs thermiques lors d'un usinage discontinu,
 - Utiliser copieusement le fluide de coupe ou le supprimer ou vérifier s'il est bien adapté.
- Fissures mécaniques : reconnaissables par des fissures parallèles à l'arête de coupe. Les solutions sont de réduire l'avance ou d'utiliser un outil plus dur.
- Arêtes rapportées (adhésion) : cela réduit la qualité de l'état de surface et peut entraîner de l'écaillage quand l'arête rapportée est enlevée. Les solutions sont :
 - Augmenter la vitesse de coupe et l'avance,
 - Augmenter l'angle de coupe,
 - Utiliser un liquide de coupe ayant une meilleure capacité de lubrification.
- Usure en cratère : augmente la température, augmente la friction entre l'outil et le copeau, et l'angle de coupe et peut diminuer les efforts de coupe (El-Hofy Hassan, 2007)

Les solutions lors d'une diffusion (visible par une usure rapide) sont de :

- Réduire la vitesse de coupe,
- Choisir un outil plus résistant à l'usure,
- Augmenter la capacité de refroidissement du lubrifiant.

Les solutions lors d'une attaque chimique du revêtement (visible par une usure lisse) sont de changer : l'outil, le revêtement ou le lubrifiant.

- Déformation plastique : ramollissement de la pièce par effet thermique. Cela réduit la qualité de surface, entraîne une perte de contrôle du type de copeau généré et accélère l'usure en dépouille. Les solutions sont de :
 - Réduire la vitesse de coupe et l'avance
 - Utiliser un outil plus résistant à l'usure par abrasion,
 - Augmenter la quantité de liquide de refroidissement.
- Usure du bec de la plaquette (abrasion). Les solutions sont de :
 - Réduire l'avance,
 - Utiliser un outil plus dur et ayant un rayon de bec élevé.

Stephenson (Stephenson, Agapiou et NetLibrary, 1997) préconise de modifier les paramètres de l'usinage lorsque l'usure n'est pas correcte par les moyens autres que diminuer la vitesse de coupe, l'avance ou la profondeur de passe. En effet, ces paramètres, s'ils sont diminués, entraînent une réduction du taux d'enlèvement de matière donc une augmentation du coût.

Le lubrifiant joue également un rôle sur l'usure des outils. D'après El-Hofy (El-Hofy Hassan, 2007) le lubrifiant :

- Réduit la température de coupe,
- Réduit l'usure de l'outil donc augmente sa durée de vie,
- Crée des fissures thermiques (surtout entre deux phases de coupe).

Pour Hubbard (Hubbard, Callahan et Strong, 2006), le lubrifiant :

- Augmente la durée de vie des outils,
- Réduit les possibilités de formation d'arêtes rapportées,

1.1.2 L'intérêt de l'usinage à sec par rapport à l'usinage lubrifié

Vieira (Vieira, Machado et Ezugwu, 2001) compare la performance de différents lubrifiants, synthétiques ou semi synthétiques (débit de 4,3L/min), avec l'usinage à sec lors du fraisage de l'acier AISI-8640 (283 HB). L'usinage est réalisé avec une vitesse de coupe comprise entre 100 et 220 m/min et une avance de 0,1 à 0,25 mm/dents. Les plaquettes sont revêtues (TiN/TiC/TiN). Vieira note les conclusions suivantes :

- La durée de vie des outils en fraisage est toujours meilleure à sec qu'avec lubrifiant. Mais cette différence diminue lorsque l'on s'approche des hautes vitesses. L'explication est le mode d'usure des plaquettes : on observe de la nucléation puis des fissures thermiques. Avec l'utilisation de fluide, les fissures thermiques se forment plus rapidement.
- L'énergie consommée est nettement plus faible à sec que pour les essais avec lubrification. À sec, la température de la pièce augmente de façon plus importante et la pièce devient moins résistante et est donc plus facile à usiner. Mais plus la vitesse de coupe augmente, plus le transfert de chaleur vers le liquide de coupe diminue. La pièce s'échauffe de plus en plus donc l'usinage avec lubrification prend un comportement qui tend vers le cas de l'usinage à sec.

Hubbard (Hubbard, Callahan et Strong, 2006) résume les avantages de l'usinage lubrifié par rapport à l'usinage à sec. Pour lui, le lubrifiant peut agir de manière bénéfique :

- Réduit la température engendrée par l'usinage au niveau des interfaces outil/copeau et outil/pièce,
- Réduit les efforts de coupe,
- Réduit ou élimine les vibrations,
- Permet d'usiner à des vitesses de coupe et des avances plus élevées,
- Réduit ou élimine la nécessité de réaliser des traitements thermiques après usinage,
- Augmente la qualité des surfaces d'un point de vue rugosité,
- Réduit les contraintes résiduelles en surface générées par le phénomène de coupe et améliore la précision géométrique.

Rahman (Rahman et al., 2001; Rahman, Senthil Kumar et Salam, 2002) compare le fraisage d'un acier ASSAB 718HH (classé ISO P20) de dureté 357 HB à sec versus un lubrifiant synthétique à haut débit (42 L/min). La vitesse de coupe utilisée est comprise entre 75 et 125 m/min et l'avance entre 0,3 et 0,70 mm/dents. L'outil est un carbure non revêtu de diamètre 20 mm. Il note plusieurs éléments :

- La fin de vie des outils est caractérisée par une usure catastrophique dans le cas de l'usinage avec lubrification. Ceci est du à d'intenses contraintes thermiques liées à l'utilisation du lubrifiant. Aucun écaillage n'est observé dans les essais avec lubrification.
- L'usure est moins rapide en usinage à sec qu'en usinage lubrifié. Mais plus l'avance augmente, plus cet écart diminue à cause de l'augmentation de température de la pièce.
- La qualité de surface est meilleure avec la lubrification que ce soit en faisant varier la vitesse de coupe, la profondeur de passe ou l'avance. La qualité de surface augmente lorsque la vitesse de coupe augmente.
- Les copeaux sont plus longs lors de l'usinage à sec.
- Les forces de coupe en fraisage sont comparables.

Pour Vieira (Vieira, Machado et Ezugwu, 2001) et Rahman (Rahman et al., 2001; Rahman, Senthil Kumar et Salam, 2002), la durée de vie des outils est meilleure à sec qu'avec lubrifiant, mais cet écart diminue quand on augmente les paramètres (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe). Par contre, pour Hubbard (Hubbard, Callahan et Strong, 2006), c'est le phénomène inverse. Il note en général que le lubrifiant augmente la durée de vie car le lubrifiant empêche mieux l'augmentation de la température que l'air.

Si on examine les raisons de cette usure plus rapide dans le cas de la lubrification, Vieira (Vieira, Machado et Ezugwu, 2001) et Rahman (Rahman et al., 2001; Rahman, Senthil Kumar et Salam, 2002) avancent tous les deux la cause des fissures thermiques, qui par la suite vont entraîner une usure catastrophique d'après Rahman.

En ce qui concerne les états de surface, Vieira les trouvent meilleurs à sec qu'avec lubrification, ce qui est contradictoire avec Rahman. Cette opposition entre les deux auteurs pourrait s'expliquer par la dureté des matériaux étudiés, des paramètres de coupe et des outils différents. Par conséquent, suivant les conditions et les paramètres de coupe, un seul point paraît être invariant : la durée de vie est meilleure à sec.

1.1.3 Usinage MQL vs usinage à sec

Un autre type de lubrification est celui réalisé avec une quantité minimale de lubrification (MQL). Ce procédé consiste à projeter une dose minime de lubrifiant sur la zone de coupe.

Diniz (Diniz, Ferreira et Silveira, 2004) compare l'usinage MQL (15 mL/h) et l'usinage à sec sur un matériau référencé SAE H13 (481 HB). La vitesse de coupe est de 300 m/min, l'avance de 0,16 mm/dents et l'outil est un cermet non revêtu de diamètre 12 mm. L'auteur arrive aux conclusions que :

- Les deux modes de coupe (MQL et sec) donnent une durée de vie pratiquement identique. Ceci est dû à la grande vitesse de coupe utilisée. Le lubrifiant atteint difficilement la zone de l'outil-pièce et la zone outil-copeau car il est, soit évaporé avant à cause de la température, soit le fluide est stoppé par l'éjection des copeaux ou soit les turbulences de l'air freinent sa projection.
- L'état de surface est également comparable mais avec un léger avantage pour l'usinage à sec.

L'auteur conclue donc que l'usinage MQL, dans les conditions testées, n'est pas avantageux par rapport à l'usinage à sec.

Une autre étude comparative entre l’usinage avec MQL (10 mL/h) et l’usinage à sec a été réalisée par Liao (Liao et Lin, 2007). Le matériau usiné dans cette étude est le NAK80 (ou AISI-P20). La vitesse de coupe est comprise entre 200 et 500 m/min avec une avance de 0,1 à 0,2 mm/dents pour un usinage en finition. L’outil est un carbure revêtu (TiAlN+TiN) de diamètre 16 mm. Il est à noter que l’auteur juge une plaquette comme usée lorsque VB atteint 0,1 mm. La plupart des études utilisent un VB de 0,3 mm.

L’auteur (Liao et Lin, 2007) arrive à la conclusion que l’utilisation du MQL procure à l’outil une meilleure durée de vie peu importe les conditions de coupe (vitesse, avance, profondeur de passe) testées. Il explique cette différence par un apport d’oxygène supplémentaire sur la zone outil/copeau lors de l’usinage MQL, ce qui crée une couche d’oxyde protectrice. Il a également noté qu’il existe une certaine vitesse de coupe pour laquelle cette couche d’oxyde est plus efficace. En dessous de cette vitesse, la durée de vie est augmentée grâce à celle-ci mais de façon moins significative. Par contre, au dessus de cette vitesse de coupe, cette couche d’oxyde tend à s’effacer, ce qui correspond ici dans les ordres de 500 m/min. La couche d’oxyde ayant disparu, les conditions entre l’usinage à sec et celui avec le système MQL deviennent pratiquement identiques. Le procédé MQL est donc déconseillé aux très hautes vitesses de coupe (supérieures ici à 500 m/min).

Par contre, toujours selon Liao (Liao et Lin, 2007), il est préférable d’utiliser l’usinage à sec en termes d’efforts de coupe. Ceux-ci sont légèrement plus faibles. De même, l’état de surface est meilleur à sec. Dans le cas de l’utilisation du MQL, la couche d’oxyde est la cause d’une dégradation de l’état de surface. Quand on augmente la vitesse de coupe, Liao remarque une diminution de cette couche protectrice, donc l’écart de qualité de surface diminue aussi en même temps, ce qui prouve le lien entre la couche d’oxyde et l’état de surface.

Diniz (Diniz, Ferreira et Silveira, 2004) et Liao (Liao et Lin, 2007) concluent donc tous les deux que l’état de surface des pièces est légèrement ou bien meilleur à sec. Liao donne aussi l’avantage à l’usinage à sec pour les efforts engendrés. Par contre, pour la durée de vie des

outils, les deux auteurs sont opposés. Diniz trouvent des durées de vie similaires dans les trois cas (forte lubrification, MQL et à sec) alors que Liao trouvent une meilleure durée de vie lors de l'utilisation du procédé MQL. Il est à noter que les deux auteurs utilisent des vitesses de coupe supérieures à 200 m/min. De plus, Liao se place dans le cas de finition (profondeur de passe de 0,3 mm) et Diniz dans le cas de l'ébauche (profondeur de passe de 2 mm).

1.1.4 L'intérêt des additifs dans les aciers à moules

Selon Rech (Rech, Le Calvez et Dessoly, 2004), l'addition de soufre a un impact significatif sur la durée de vie de l'outil. Dans son étude, Rech compare deux matériaux, le W1.2311 et le W1.2312 possédant presque la même composition chimique. Seul le W1.2312 possède plus de soufre. Leur dureté est de 300HB. Les vitesses de coupe testées sont comprises entre 150 et 300 m/min avec une avance de 0,1 à 0,35 mm/dents. L'usinage est réalisé à sec.

Rech (Rech, Le Calvez et Dessoly, 2004), a observé une augmentation en moyenne de 50 % de la durée de vie dans le cas de l'utilisation du soufre. Mais cette augmentation n'est pas constante, elle dépend principalement de l'avance. Si l'avance est petite (de l'ordre de 0,1 mm/dent), l'augmentation ne sera que de 16 %. Par contre, si l'avance approche 0,35 mm/dent, celle-ci passe à 90 %. On note donc un réel intérêt dans l'ajout de soufre d'un point de vue économique.

Néanmoins, le soufre a l'inconvénient de diminuer significativement la qualité de surface. Son addition devient donc intéressante uniquement en ébauche car il peut permettre, pour une même durée de vie, d'augmenter le débit de matière enlevé, ou bien prolonger la durée de vie des outils dans des conditions d'usinage identiques. Pour la finition, l'état de surface prenant une importance plus grande, l'ajout de soufre est à proscrire.

Cette augmentation de la durée de vie, grâce au soufre, est également une des conclusions de Chandrasekaran (Chandrasekaran et M'Saoubi, 2006). Il note également que l'usure est différente. Alors que pour un matériau P20 l'usure est plutôt linéaire, en ce qui concerne un P20 auquel on a ajouté du soufre, l'usure est plus lente et à la fin devient beaucoup plus brutal donc catastrophique.

Selon Baïlon et Dorlot (Baïlon et Dorlot, 2002) :

- Pour augmenter la trempabilité, on ajoute du Mn, du Cr et du Ni et si possible les trois en même temps.
- On augmente la résistance au revenu en ajoutant du Cr, du Mo.
- Le Cr, Mo et V forment des carbures et peuvent entraîner des zones de fortes duretés réduisant l'usinabilité de ces aciers et par conséquent la durée de vie des outils. Mais le pourcentage des additifs étant faibles, ces carbures seront très petits.
- Le C et le Mn augmentent la résistance à l'usure.

1.2 Forces de coupe

El-Hofy (El-Hofy Hassan, 2007) propose une formule permettant de calculer le moment autour de l'axe de rotation d'un foret. Ce moment est décomposé en deux parties : le moment M_r dû aux forces de coupe radiales (F_{r1} et F_{r2}) et le moment M_t dû aux forces de coupes tangentialles (F_{t1} et F_{t2}). Par contre M_r est jugé en général proche de zéro suivant El-Hofy (El-Hofy Hassan, 2007). On obtient donc :

$$M_z = M_r + M_t = 0 + k_s \times \frac{f_{tp} \times Z \times D^2}{8} \quad (1.1)$$

- D : Diamètre du trou à réaliser
- f_{tp} : Avance de l'outil
- Z : nombre de dents de l'outil
- k_s : Pression spécifique de coupe

Cette formule du moment se retrouve aussi dans les articles publiés par les « Techniques de l'ingénieur BM7088 »(Techniques de l'ingénieur, 2001). On trouve aussi la formule donnant la valeur de l'effort de coupe selon l'axe du foret qui, adaptée, est la suivante :

$$F_z = \frac{1}{4} \times k_s \times D \times f_{ip} \times Z \times \sin(\kappa) \quad (1.2)$$

Avec κ l'angle d'attaque. (Schématisation : Figure 1.2)

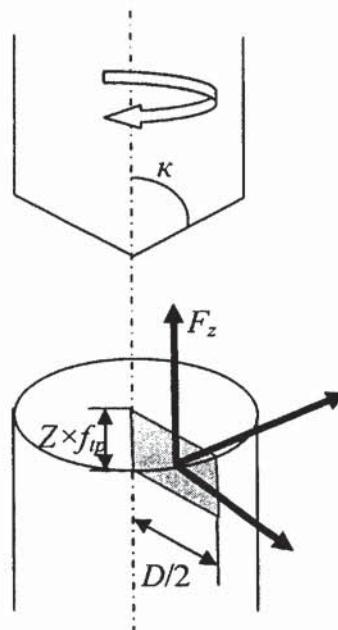


Figure 1.2 Schématisation simplifiée expliquant le modèle de calcul d'efforts en perçage.

(Adapté des Techniques de l'ingénieur, 2001).

Sources : Cette figure est adaptée d'un article intitulé Perçage issu des Techniques de l'Ingénieur qui a été publié en 2001;

En observant ces formules, on note que les forces et les moments de coupe dépendent surtout du matériau usiné, du diamètre du foret, du nombre de dents et de l'avance. La vitesse de rotation de l'outil n'est prise en compte.

1.3 Modèles d'usinabilité des matériaux

Le premier modèle proposé pour décrire la durée de vie des outils est celui de Taylor (Taylor, 1907) :

$$t_0 = C \times V_C^\alpha \quad (1.3)$$

C'est le modèle le plus simple pour définir la durée de vie (t_0) des outils en fraisage. Il ne tient compte que de la vitesse de coupe (V_C) combinée avec deux constantes (C et α). Les modèles proposés par la suite par d'autres chercheurs ajoutent d'autres paramètres (avance, profondeur de passe...) et/ou en modifient le modèle mathématique (produit, polynôme...).

Mamalis (Mamalis, Kundrak et Horvath, 2005) résume plusieurs modèles avec comme unique paramètre, la vitesse de coupe :

$$\text{Safonov} \quad t_0 = \frac{C_1}{C_2^{C_3 \times V_C}} \quad (1.4)$$

$$\text{Temchin} \quad t_0 = \frac{C_1}{V_C^{C_2} + C_3} \quad (1.5)$$

$$\text{Wu} \quad t_0 = \frac{C_1}{V_C^{C_2 + V_C \times C_3}} \quad (1.6)$$

$$\text{Kronenberg} \quad t_0 = \frac{C_1}{(V_C + C_2)^{C_3}} \quad (1.7)$$

$$\text{Metchisen} \quad t_0 = \frac{V_C}{C_1 \times V_C^2 + C_2 \times V_C + C_3} \quad (1.8)$$

$$\text{Granovski} \quad t_0 = C_1 \times V_C^{C_2} \times C_3^{C_4 \times V_C} \quad (1.9)$$

$$\text{König-Depiéreaux} \quad t_0 = C_1^{C_2 \times V_C^{C_3}} \quad (1.10)$$

$$\text{Bali} \quad t_0 = \frac{C_1 \times V_C}{V_C^{C_2} + C_1} \quad (1.11)$$

$$\text{Kundrák} \quad t_0 = \frac{C_1}{V_C^3 + C_2 \times V_C^2 + C_3 \times V_C} \quad (1.12)$$

D'autres modèles prennent en compte, en plus de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe ainsi que d'autres paramètres :

- El-Hofy (El-Hofy Hassan, 2007) et Shaw (Shaw, 2005b) donne la durée de vie de l'outil (t_0) en fonction de : la vitesse de coupe (V_C), l'avance par dents (f_t), la profondeur de passe (a_{pa}) :

$$t_0 = C \times V_C^\alpha \times f_t^\beta \times a_{pa}^\gamma \quad (1.13)$$

- Vieira (Vieira, Machado et Ezugwu, 2001) utilise les mêmes paramètres que précédemment en rajoutant l'usure maximale autorisée en dépouille pour les plaquettes (VB_{max}). Cette formule est la suivante :

$$t_0 = C \times V_C^\alpha \times f_t^\beta \times a_{pa}^\gamma \times VB_{max}^\delta \quad (1.14)$$

- Dans le « Fundamental of tool design » (Nee et Society of Manufacturing, 1998), l'auteur propose dans un premier temps le même modèle que Shaw et El-Hofy puis il rajoute un autre paramètre qui est la dureté du matériau (HB) :

$$t_0 = C \times V_C^\alpha \times f_t^\beta \times a_{pa}^\gamma \times HB^\delta \quad (1.15)$$

- Sreeram (Sreeram et al., 2006) ajoute à la formule de base de EL-Hofy, le nombre de dents (Z) présentes sur l'outil ainsi que la profondeur de passe radiale (a_{pr}). Cette formule est utilisée pour la finition en fraisage par Sreeram :

$$t_0 = C \times V_C^\alpha \times f_t^\beta \times a_{pa}^\gamma \times a_{pr}^\varphi \times Z^\varepsilon \times D^\omega \quad (1.16)$$

Ainsi, un grand nombre de formules sont proposées. Nous adopterons pour notre étude celle qui interprétera le mieux nos résultats. Mais dans notre cas, seulement la vitesse de coupe changera. Les modèles donnés par les équations (1.13) à (1.16) reviendront finalement au modèle de Taylor car il sera impossible de définir certaines constantes. Nous utiliserons donc plutôt les modèles (1.3) à (1.12).

1.4 Coûts d'usinage

1.4.1 Coûts en fraisage et perçage

Le but de cette section est d'établir un modèle de coût qui nous permettra de connaître quel type d'usinage est le plus avantageux économiquement (à sec ou avec lubrification). Pour cela, nous allons définir différents points qui devront être pris en compte dans notre modèle. Leur justification sera faite dans le chapitre coût d'usinage. Les différentes composantes du coût sont :

- Enlèvement de métal lors du perçage et du surfaçage (en ébauche et en finition),
- Mise en route de la machine et de chargement du programme,
- Programmation sur un logiciel de FAO,
- Mise en place de l'outil,
- Coût de la pièce brute et sa prise de valeur au fur et à mesure des passes,
- Montage de la pièce,
- Achat des outils et des plaquettes en finition et en ébauche,
- Déplacements à vide de l'outil,
- Achat du lubrifiant,
- Traitement du lubrifiant pour prolonger sa durée de vie,
- Traitement du lubrifiant lorsqu'il est usé.

De plus, nous devrons déterminer tous les paramètres pour le cas du fraisage et du perçage. Ceci étant les deux procédés prépondérants dans la réalisation de moule.

Maintenant que cette liste est définie, nous allons analyser différents modèles proposés dans la littérature. Ceux-ci seront étudiés, simplifiés, adaptés à notre cas et uniformisés au niveau des notations lorsque cela sera possible. Par la suite, dans le chapitre traitant du coût d'usinage, nous comparerons chaque partie pour obtenir notre modèle.

Le premier modèle est issu du livre « *Machining Data Handbook* » (Machinability Data, 1980). Ce modèle prend en compte plusieurs points : le coût d'utilisation (M) de la machine en fonction du temps de travail et de positionnement de l'outil à basse ou à grande vitesse, du temps de changement de l'outil, du nombre de pièces à usiner. Le modèle tient compte aussi de la dépréciation de la fraise monobloc utilisée, ainsi que son coût d'achat, d'affûtage et de réglage. Par contre, il ne fait aucune différence entre l'ébauche et la finition. De plus, cette formule ne détaille pas la longueur à usiner (nombre de passes) et ne traite pas du perçage.

Le second modèle, de Parent (Parent, Songmene et Kenne, 2007) :

- Tient compte de la différence entre l'ébauche et la finition.
- Ne tient pas compte des coûts liés aux temps de changement des outils. En effet, lors de cette étape, la machine bien qu'inactive possède un coût. Elle est utilisée malgré qu'aucun travail d'usinage ne se réalisé. Un opérateur travaille dessus donc il engendre aussi des coûts. Et de plus, la machine entraîne des frais financiers quelque soit son fonctionnement (éteinte, en marche...).
- Propose une méthode pour calculer les coûts à partir d'un volume à enlever. Le coût des outils tient également compte de l'aiguillage de celui ci car il est prévu pour un outil monobloc.

Le troisième modèle de coûts présenté provient de Shunmugam (Shunmugam, Reddy et Narendran, 2000).

- Ici la formule de coût est présentée comme une somme. Le principe est le même que pour Parent ou le Machining Data Handbook (Machinability Data, 1980) sauf que Shunmugam rajoute l'idée que plusieurs opérations différentes peuvent être réalisées.
- Aucune différence n'est faite entre l'ébauche et la finition. Les conditions de coupe sont généralement différentes entre les deux et qui plus est, les plaquettes ne sont pas forcément identiques.
- Aucune prise en compte du prix de la pièce n'est réalisée. Pour des pièces massives à usiner, ce prix est très important.
- Le modèle prend en compte le fait qu'il peut y avoir plusieurs passes à réaliser sur la hauteur de la pièce, mais pas sur la largeur.
- Le modèle prend en compte les temps de mise en place et de changement de l'outil, mais pas ceux de mise en route de la machine et lancement du programme, voir de la programmation de celui-ci. Ce temps peut être beaucoup plus significatif par rapport aux deux autres surtout dans le cas d'usinage à l'unité.
- La modélisation de la pièce à fraiser est différente de Parent.

Les deux modèles précédents (Parent, Songmene et Kenne, 2007; Shunmugam, Reddy et Narendran, 2000) ne tiennent pas compte des coûts liés aux temps de changement des outils lors de la réalisation d'une même opération. Par contre Sreeram (Sreeram et al., 2006) présente une méthode simple pour déterminer ce coût. Ce temps prend en compte le nombre de fois qu'il sera nécessaire de changer les outils pour réaliser l'usinage complet de la pièce :

$$C_{co} = M \times \frac{t_{co} \times T_u}{t_0} \quad (1.17)$$

Avec t_{co} le temps de changement de l'outil, M les frais généraux, T_u le temps d'usinage et t_0 la durée de vie de l'outil.

Il faut aussi déterminer les coûts d'usinage en perçage. Le temps d'usinage en perçage est donné par El-Hofy (El-Hofy Hassan, 2007). La formule de temps d'usinage est donnée pour le cas du perçage en général d'un trou débouchant. Voici cette formule :

$$N_{ip} \times \frac{L_{ip} + L_{ap} + L_{dp}}{N_{rp} \times f_{ip} \times Z_{rp}} \quad (1.18)$$

$$L_{ap} = \frac{D}{2} \times \cot(\chi_r) \quad (1.19)$$

Avec : l'approche du foret (L_{ap}), la longueur du trou (L_{tp}), la longueur de sortie du foret (L_{dp}), la vitesse de rotation de la broche (N_{rp}), l'avance par dents (f_{ip}) et le nombre de dents (Z_{rp}).

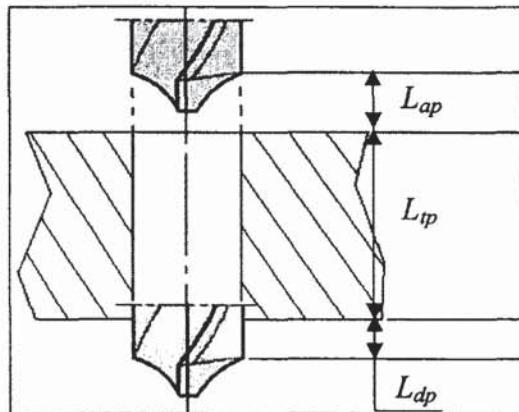


Figure 1.3 Longueur caractéristique d'un perçage débouchant.

(El-Hofy Hassan, 2007)

Source : Adapté du livre de El-hofy, « Fundamentals of machining processes : conventional and unconventional processes » publié en 2007.

1.4.2 Frais généraux d'utilisation de la machine d'usinage

Dans tous les modèles de coût précédents, les auteurs évaluent le coût d'utilisation de la machine comme le temps d'utilisation multiplié par un coefficient estimant les frais à l'heure. Mais aucun ne détaille ce coût. Duverlie (P. Duverlie, 1999) le modélise en tenant compte de deux facteurs : les frais d'exploitation et l'amortissement de la machine. Les frais d'exploitation prennent en compte les frais de réparation et d'entretien de la machine,

d'occupations dans le bâtiment, de consommation en énergie électrique et de la charge salariale. La partie amortissement traduit le coût d'achat de la machine. Ce modèle n'oublie aucun des frais annexes. Il tient compte de tous les paramètres extérieurs agissant sur les frais de fonctionnements.

1.4.3 Coûts liés à l'utilisation d'un fluide de coupe

Nous devons également déterminer le coût du système de lubrification, du prix d'achat du lubrifiant et de son traitement. Ce coût représente environ 16-17% des coûts d'usinage totaux (Klocke et Eisenblaetter, 1997; Weinert et al., 2004).

Nicolaou (Nicolaou, Thurston et Carnahan, 2002) a établi un modèle pour l'utilisation de fluides de coupe de type soluble, semi-synthétique ou synthétique. Ce modèle se décompose en plusieurs parties : le coût lié à l'achat du fluide de coupe, les dépenses faites pour prolonger la durée de vie du fluide de coupe et son traitement final.

- La prolongation de la durée de vie du fluide peut se réaliser de trois manières :
 - Par filtration par gravité,
 - Par sédimentation,
 - Par centrifugation et pasteurisation.
- Les traitements de ces fluides usagés se décomposent en trois séquences :
 - Séquence 1 : traitement par sédimentation ou par séparation de l'huile par gravité.
 - Séquence 2 : traitement par flottation par insufflation d'air ou ultrafiltration dans le but de traiter l'eau présente dans le fluide de coupe.
 - Séquence 3 : traitement par absorption du carbone.

Lors de l'énonciation de ces différents coûts, Nicolaou (Nicolaou, Thurston et Carnahan, 2002) distingue le coûts du processus en lui-même (lié par exemple au filtre) et celui de l'énergie qui devra être fournie pour réaliser ce traitement.

Avec la méthodologie proposée par Nicolaou (Nicolaou, Thurston et Carnahan, 2002), nous sommes en mesure de déterminer le coût total d'utilisation du lubrifiant de la première à la dernière étape de son parcours et ceci quelque soit le mode de traitement et de recyclage.

1.5 Analyse des copeaux générés durant l'usinage

L'étude des copeaux est nécessaire car elle permet de mieux comprendre l'état de surface généré, d'évaluer l'élévation de température due au procédé d'usinage... Un des paramètres d'étude des copeaux, est sa forme géométrique car elle influe sur la qualité des surfaces et la facilité avec laquelle les copeaux sont évacués. La Figure 1.4 résume l'ensemble des formes de copeaux qui peuvent être générés :

1 COPEAU RUBAN	2 COPEAU TUBULAIRE	3 COPEAU EN SPIRALE	4 COPEAU HELICOÏDAL RONDELINE	5 COPEAU HELICOÏDAL CONIQUE	6 COPEAU EN ARC	7 COPEAU ÉLÉMENTAIRE	8 COPEAU AIGUILLE
1.1 Long	2.1 Long	3.1 Plat	4.1 Long	5.1 Long	6.1 Attaché		
1.2 Court	2.2 Court	3.2 Conique	4.2 Court	5.2 Court	6.2 Déattaché		
1.3 Enchevêtré	2.3 Enchevêtré		3.3 Enchevêtré	4.3 Enchevêtré			

Figure 1.4 Classements des types de copeaux.
(International Organization for Standardization, 1993)

Source : Ce classement est tiré de la norme ISO 3685 de 1993.

Selon Shaw (Shaw, 2005a), certains types de copeaux sont jugés comme favorables et d'autres non.

- Copeaux favorables : ruban court, tubulaire court, hélicoïdal (rondelle et conique) court, en arc attaché et détaché, élémentaire,
- Copeaux défavorables : ruban long et enchevêtré, tubulaire long et enchevêtré, en spirale plat et conique, hélicoïdal (rondelle et conique) long et enchevêtré, aiguille.

Avec ce classement des copeaux en favorables ou défavorables, nous serons en mesure de conclure de l'impact du copeau sur nos résultats.

1.6 Impact des lubrifiants sur la santé et l'environnement

Les lubrifiants sont connus pour certaines aptitudes techniques et pour leur propriété de refroidissement. Par contre, leurs impacts négatifs sur l'environnement et la santé sont beaucoup moins connus.

Selon le *National Institute of Occupational Safety and Health* (NIOSH, 1998), les lubrifiants sont sources de problèmes pulmonaires dus aux inhalations, de problèmes intestinaux lorsqu'ils sont ingérés, ou de problèmes de peau quand ils sont mis en contact avec celle-ci. Les problèmes respiratoires et les maladies des poumons connus sont : la toux, les resserrements de la poitrine, l'asthme, les irritations des voies respiratoires aiguës, les bronchites chroniques. Les problèmes de peau sont les irritations, les éruptions ou l'acné. De plus, les lubrifiants peuvent irriter la gorge, les yeux et le nez.

Ce genre de problèmes survient même avec des courtes périodes d'exposition. D'après le NIOSH (NIOSH, 1998), si on considère le cas d'un opérateur qui travaille toute la journée sur une machine, et ceci pendant des années (20 ans ou plus), les risques de cancers sont accrus. Les cancers surviennent au niveau du larynx, du pancréas, de la peau, du rectum, du scrotum ou de la vessie. L'exposition répétée aux lubrifiants augmente les risques de maladie des poumons de 300 % comparé à une personne non exposée (NIOSH, 1998).

Les lubrifiants sont des produits chimiques. Ils ont forcément un impact sur l'environnement. Or, cet impact doit dans une société de plus en plus soucieuse des problèmes environnementaux, respecter la nature. Leur traitement est souvent complexe compte tenu de leur complexité et du nombre d'additifs présents dans le fluide. Soković (Sokovic et Mijanovic, 2001) et Marksberry (Marksberry, 2004) listent le but des différents additifs qu'on peut retrouver dans les fluides de coupes. Ils ont pour but de :

- Réduire l'usure des outils en formant un film protecteur,
- Permettre de lubrifier sous de fortes pressions (exemple : paraffines chlorées),
- Empêcher la corrosion (exemple : sulfonate de calcium),
- Réduire la formation d'aérosol,
- Réduire la corrosion de la pièce usinée,
- Empêcher la formation de mousse.

De plus, des agents émulsifiants, des bioacides, des substances odorantes et des colorants (pour pouvoir les identifier plus facilement par exemple) sont aussi ajoutés.

Cette complexité des lubrifiants est due aux multiples rôles qu'on souhaite leur donner et par conséquent rend leur fabrication délicate. Il devient très difficile de trouver un lubrifiant écologique, qui préserve la santé de l'opérateur et qui peut apporter tous les avantages décrits par Soković (Sokovic et Mijanovic, 2001) et Marksberry (Marksberry, 2004). Le développement de l'usinage à sec devient par conséquent la solution si les résultats de durée de vie, de rugosité et de force de coupe ne sont pas négatifs.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

2.1 Problématique

Le but principal de ce travail est d'étudier l'usinabilité (durée de vie, force de coupe, état de surface) des aciers à moules dans le but de comparer l'usinage à sec et celui avec lubrification. Nous voulons aussi déterminer le coût en fonction des conditions de coupe et des paramètres d'usinage pour permettre de voir sous un autre angle notre choix (usinage à sec ou usinage lubrifié).

Dans les sections qui suivent, nous présenterons notre méthodologie et la procédure expérimentale à utiliser.

2.2 Étude expérimentale

2.2.1 Durée de vie des plaquettes amovibles en fraisage

Procédures :

- Fraiser (surfaçage) les matériaux à différentes vitesses de coupe et mode d'usinage (à sec ou avec lubrification),
- Mesurer l'usure en dépouille (VB) des deux plaquettes amovibles toutes les 2 à 6 passes. Le critère de fin de vie utile des plaquettes est $VB=0.3$ mm,
- Mesurer la durée de vie des outils grâce aux courbes d'usure (VB en fonction du temps).

Nos essais de fraisage seront réalisés avec les paramètres de coupe suivants :

- Vitesse de coupe = 75, 100, 125, 150, 200, 250 et 300 m/min,
- Avance = 0,1016 mm/dent,
- Profondeur de passe radiale = 12,7 mm,
- Profondeur de passe axiale = 2,54 mm.

2.2.2 Forces de coupe en perçage

Nous nous servirons des tests de perçage pour évaluer les forces de coupe nécessaire pour chacun des matériaux.

Procédures :

- Percer les aciers aux conditions déterminées (vitesse de coupe, avance, diamètre du foret, profondeur du trou, etc),
- Relever la force et le moment selon l'axe du foret (effort normal),
- Faire une analyse statistique des résultats (moyenne et écart-type) de la force et du moment pour chaque matériau et pour chaque mode de lubrification.

Nos essais de perçage seront réalisés avec les conditions et paramètres de coupe suivants :

- Diamètre du foret = 10 mm,
- Profondeur des trous = 12,7 mm,
- Vitesse de coupe = 7,07 m/min,
- Vitesse de rotation = 225 tr/min,
- Vitesse d'avance = 57,15 mm/min,
- Avance = 0,127 mm /dents,
- Nombre de dents : 2.

2.2.3 Qualité des pièces en fraisage

L'opération choisie pour évaluer l'effet des conditions de coupe sur le fini de surface est le fraisage.

Procédures :

- Fraiser (surfaçage) les aciers aux conditions déterminées,
- Relever les valeurs de rugosité,
- Répéter la mesure cinq fois,
- Calculer la moyenne, l'écart type (etc) des valeurs Ra et Rq pour chaque matériau et pour chaque mode de lubrification.

Nos essais seront réalisés avec les conditions et paramètres de coupe suivants :

- Vitesse de coupe = 125 m/min,
- Avance = 0,1016 mm/dent,
- Profondeur de passe radiale = 12,7 mm,
- Profondeur de passe axiale = 0,508 mm.

2.3 Dispositif expérimental

2.3.1 Matériaux

Dans cette étude, cinq aciers à moules sont étudiés dont voici la dureté et la composition chimique telle que données par le manufacturier (Sorel Forge) des aciers testés (Tableau 2.1):

Tableau 2.1

Composition chimique et dureté des aciers à moules étudiés

Matériaux	SF-5	SF-2312	SF-2000	SP-300	SF-2050V
Dureté (HB)	300	300	341	341	352
Carbone (C)	0.370	0.400	0.340	0.270	0.360
Manganèse (Mn)	0.810	1.470	0.820	1.390	0.980
Phosphore (P)	0.012	0.014	0.013	0.010	0.014
Soufre (S)	0.005	0.091	0.007	0.010	0.009
Silicium (Si)	0.400	0.360	0.400	0.100	0.390
Nickel (Ni)	0.110	0.160	0.490	0.300	0.500
Chrome (Cr)	1.400	1.900	1.800	1.430	1.840
Molybdène (Mo)	0.250	0.200	0.530	0.480	0.530
Cuivre (Cu)	0.140	0.150	0.150	0.210	0.150
Aluminium (Al)	-	-	0.016	0.280	0.023
Vanadium (V)	-	-	-	-	0.147

Source : La composition chimique ainsi que la dureté ont été fournies par Sorel-Forge.

D'après Sorel Forge, nous avons quelques remarques sur ces matériaux :

- L'acier SF-5 est un acier de type AISI-4130 avec une forte teneur en chrome et en molybdène. Cet acier a de bonnes caractéristiques pour le polissage. Il est compatible avec l'usinage par électroérosion. Ces applications sont variées : support de matrices, châssis pour moules en plastique, supports pour matrice forgée, moules ne nécessitant pas de très bonnes finitions. Cet acier sert aussi pour faire des moules à injection plastique, dans le cas de moules de faibles épaisseurs.
- L'acier SF-2312 (ou DIN 1.2312) est un acier possédant une bonne usinabilité. Il est déconseillé pour le grainage chimique.

- L'acier SF-2000 possède une bonne usinabilité, apte pour le polissage et le grainage chimique. Il produit un bon fini de surface. Il est utilisé pour les moules à injection plastique lorsque ceux-ci sont de grandes dimensions.

2.3.2 Machines-outils

MAZAK NEXUS 410 A

C'est une fraiseuse 3 axes à commandes numériques possédant une vitesse de rotation de broche de 12000 tr/min maximum avec une puissance de 18,5 kW et une vitesse d'avance maximale de 36 m/min.

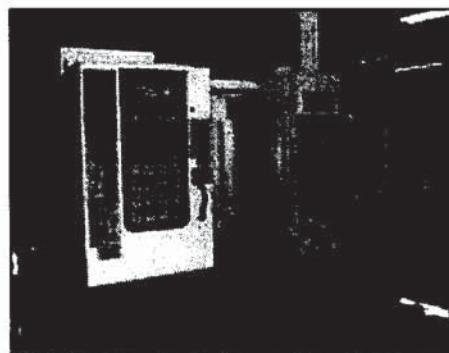


Figure 2.1 Machine NEXUS 410 A utilisée pour tous nos essais.

2.3.3 Outils de coupe

Les tests de durée de vie et de fini de surface sont réalisés avec des plaquettes Kennametal.

Ces plaquettes ont pour code XPMT2533L KC725M et comme caractéristiques :

- Carbure,
- Angle de dépouille: 11°,
- Nombre d'arrêtes de coupe : 2,
- Composition: triple revêtement PVD (dépôt physique en phase vapeur) : TiN/TiCN/TiN pour les plaquettes de type KC725M,
- ISO : P20-35 et M15-35.

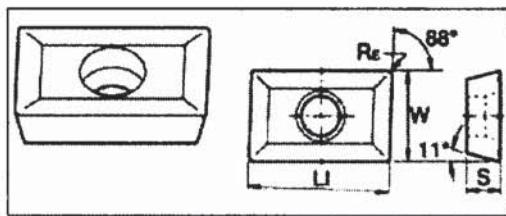


Figure 2.2 Géométrie des plaquettes des tests de durée de vie et de fini de surface.

(Kennametal)

Dimension de la plaquette :

$$w = 0,500 \text{ po} = 12,7 \text{ mm}$$

$$LI = 0,639 \text{ po} = 16,2 \text{ mm}$$

$$S = 0,188 \text{ po} = 4,8 \text{ mm}$$

$$R_e = 0,047 \text{ po} = 1,2 \text{ mm}$$

Source : tiré du site internet de Kennametal (Kennametal)

Application : Les plaquettes utilisées sont recommandées pour le fraisage avec ou sans lubrification. On peut usiner des alliages de carbone, des aciers austénitiques inoxydables et des alliages de titane. Ce type de plaquette revêtue en carbure par dépôt physique en phase vapeur (PVD) résiste bien aux chocs thermiques afin d'obtenir une bonne et fiable durée de vie. De plus, le revêtement par PVD est préférable au dépôt chimique en phase vapeur (CVD) d'après le Modern Machine Shop (Graham, 2007) :

« Les revêtements PVD [...] sont minces et lisses, et ne transmettent que de très faibles tensions résiduelles au carbure qu'ils recouvrent, ce qui aide à une bonne résistance à l'usure en entaille et par écaillage. Comparés aux revêtements CVD, ceux PVD suivent plus fidèlement le profil des arêtes de coupe très vives dont on tire largement profit aujourd'hui. Ceci veut dire que les arêtes des plaquettes revêtues PVD sont intrinsèquement plus tenaces que celles des plaquettes revêtues CVD. [...] Les revêtements PVD apportent de la résistance à l'usure, une stabilité chimique à la surface de l'outil et une bonne résistance à la formation d'arêtes rapportées. » (Graham, 2007)

De plus, les conclusions de la revue de littérature sur le choix des outils préconisent l'utilisation d'un outil à plaquettes rapportées. Pour le matériau de l'outil, Urbanski (Urbanski et al., 2000) préconise un carbure ayant un revêtement TiCN+TiN. Notre choix est donc encore mieux car il y a trois revêtements (TiN/TiCN/TiN). Les plaquettes utilisées sont donc très bien adaptées à nos types d'essais pour comparer la durée de vie et le fini de surface entre l'usinage à sec et l'usinage avec lubrification.

Les plaquettes utilisées sont prévues par Kennametal (Kennametal, 2008) pour usiner dans des vitesses de coupes de l'ordre de 90 à 200 m/min et pour des avances de 0,1 à 0,3 mm/dents. L'utilisation que nous en faisons est donc en accord avec le fabricant.

Le porte-plaquette est également manufacturé par Kennametal. Son code ISO est le : KISZR150XP253L905 (Kennametal). Deux plaquettes sont montées dessus pour obtenir un diamètre de 38,1 mm.

Les tests d'efforts en perçage sont réalisés avec un foret de la marque Dromer A150 type BLUE (HSS) prévu pour usiner de l'acier. C'est un outil possédant deux dents et un diamètre de 10 mm.

2.3.4 Lubrifiant

Le lubrifiant utilisé lors de nos différents tests est le Blasocut 2000 universal dont voici les caractéristiques :

- Teneur en huile minérale : 55%,
- Teneur en eau : 4%,
- Additifs : paraffines chlorées,
- Viscosité à 40°C : 46 mm²/s.

Ce lubrifiant est prévu pour la fonte, les aciers et les alliages d'aluminium.

(Sa fiche technique détaillée est fournie en ANNEXE II)

2.3.5 Instruments de mesures

- Table Kistler : modèle 9255B

Elle mesure les efforts selon les trois axes et calcule le couple autour de l'axe de rotation de l'outil (voir la fiche technique en ANNEXE I).

Tableau 2.1

Composition chimique et dureté des aciers à moules étudiés

Matériaux	SF-5	SF-2312	SF-2000	SP-300	SF-2050V
Dureté (HB)	300	300	341	341	352
Carbone (C)	0.370	0.400	0.340	0.270	0.360
Manganèse (Mn)	0.810	1.470	0.820	1.390	0.980
Phosphore (P)	0.012	0.014	0.013	0.010	0.014
Soufre (S)	0.005	0.091	0.007	0.010	0.009
Silicium (Si)	0.400	0.360	0.400	0.100	0.390
Nickel (Ni)	0.110	0.160	0.490	0.300	0.500
Chrome (Cr)	1.400	1.900	1.800	1.430	1.840
Molybdène (Mo)	0.250	0.200	0.530	0.480	0.530
Cuivre (Cu)	0.140	0.150	0.150	0.210	0.150
Aluminium (Al)	-	-	0.016	0.280	0.023
Vanadium (V)	-	-	-	-	0.147

Source : La composition chimique ainsi que la dureté ont été fournies par Sorel-Forge.

D'après Sorel Forge, nous avons quelques remarques sur ces matériaux :

- L'acier SF-5 est un acier de type AISI-4130 avec une forte teneur en chrome et en molybdène. Cet acier a de bonnes caractéristiques pour le polissage. Il est compatible avec l'usinage par électroérosion. Ces applications sont variées : support de matrices, châssis pour moules en plastique, supports pour matrice forgée, moules ne nécessitant pas de très bonnes finitions. Cet acier sert aussi pour faire des moules à injection plastique, dans le cas de moules de faibles épaisseurs.
- L'acier SF-2312 (ou DIN 1.2312) est un acier possédant une bonne usinabilité. Il est déconseillé pour le grainage chimique.

- L'acier SF-2000 possède une bonne usinabilité, apte pour le polissage et le grainage chimique. Il produit un bon fini de surface. Il est utilisé pour les moules à injection plastique lorsque ceux-ci sont de grandes dimensions.

2.3.2 Machines-outils

MAZAK NEXUS 410 A

C'est une fraiseuse 3 axes à commandes numériques possédant une vitesse de rotation de broche de 12000 tr/min maximum avec une puissance de 18,5 kW et une vitesse d'avance maximale de 36 m/min.

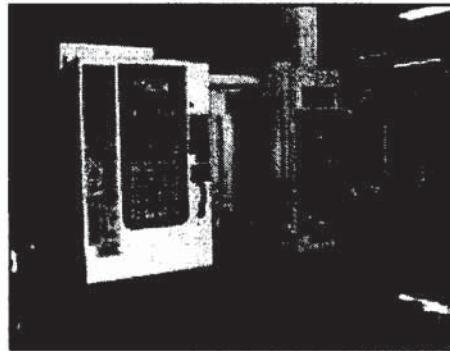


Figure 2.1 Machine NEXUS 410 A utilisée pour tous nos essais.

2.3.3 Outils de coupe

Les tests de durée de vie et de fini de surface sont réalisés avec des plaquettes Kennametal.

Ces plaquettes ont pour code XPMT2533L KC725M et comme caractéristiques :

- Carbure,
- Angle de dépouille: 11°,
- Nombre d'arrêtes de coupe : 2,
- Composition: triple revêtement PVD (dépôt physique en phase vapeur) : TiN/TiCN/TiN pour les plaquettes de type KC725M,
- ISO : P20-35 et M15-35.

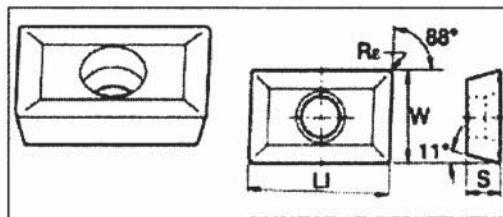


Figure 2.2 Géométrie des plaquettes des tests de durée de vie et de fini de surface.

(Kennametal)

Dimension de la plaquette :

$$w = 0,500 \text{ po} = 12,7 \text{ mm}$$

$$LI = 0,639 \text{ po} = 16,2 \text{ mm}$$

$$S = 0,188 \text{ po} = 4,8 \text{ mm}$$

$$R_e = 0,047 \text{ po} = 1,2 \text{ mm}$$

Source : tiré du site internet de Kennametal (Kennametal)

Application : Les plaquettes utilisées sont recommandées pour le fraisage avec ou sans lubrification. On peut usiner des alliages de carbone, des aciers austénitiques inoxydables et des alliages de titane. Ce type de plaquette revêtue en carbure par dépôt physique en phase vapeur (PVD) résiste bien aux chocs thermiques afin d'obtenir une bonne et fiable durée de vie. De plus, le revêtement par PVD est préférable au dépôt chimique en phase vapeur (CVD) d'après le Modern Machine Shop (Graham, 2007) :

« Les revêtements PVD [...] sont minces et lisses, et ne transmettent que de très faibles tensions résiduelles au carbure qu'ils recouvrent, ce qui aide à une bonne résistance à l'usure en entaille et par écaillage. Comparés aux revêtements CVD, ceux PVD suivent plus fidèlement le profil des arêtes de coupe très vives dont on tire largement profit aujourd'hui. Ceci veut dire que les arêtes des plaquettes revêtues PVD sont intrinsèquement plus tenaces que celles des plaquettes revêtues CVD. [...] Les revêtements PVD apportent de la résistance à l'usure, une stabilité chimique à la surface de l'outil et une bonne résistance à la formation d'arêtes rapportées. » (Graham, 2007)

De plus, les conclusions de la revue de littérature sur le choix des outils préconisent l'utilisation d'un outil à plaquettes rapportées. Pour le matériau de l'outil, Urbanski (Urbanski et al., 2000) préconise un carbure ayant un revêtement TiCN+TiN. Notre choix est donc encore mieux car il y a trois revêtements (TiN/TiCN/TiN). Les plaquettes utilisées sont donc très bien adaptées à nos types d'essais pour comparer la durée de vie et le fini de surface entre l'usinage à sec et l'usinage avec lubrification.

Les plaquettes utilisées sont prévues par Kennametal (Kennametal, 2008) pour usiner dans des vitesses de coupes de l'ordre de 90 à 200 m/min et pour des avances de 0,1 à 0,3 mm/dents. L'utilisation que nous en faisons est donc en accord avec le fabricant.

Le porte-plaquette est également manufacturé par Kennametal. Son code ISO est le : KISZR150XP253L905 (Kennametal). Deux plaquettes sont montées dessus pour obtenir un diamètre de 38,1 mm.

Les tests d'efforts en perçage sont réalisés avec un foret de la marque Dromer A150 type BLUE (HSS) prévu pour usiner de l'acier. C'est un outil possédant deux dents et un diamètre de 10 mm.

2.3.4 Lubrifiant

Le lubrifiant utilisé lors de nos différents tests est le Blasocut 2000 universal dont voici les caractéristiques :

- Teneur en huile minérale : 55%,
- Teneur en eau : 4%,
- Additifs : paraffines chlorées,
- Viscosité à 40°C : 46 mm²/s.

Ce lubrifiant est prévu pour la fonte, les aciers et les alliages d'aluminium.

(Sa fiche technique détaillée est fournie en ANNEXE II)

2.3.5 Instruments de mesures

- Table Kistler : modèle 9255B

Elle mesure les efforts selon les trois axes et calcule le couple autour de l'axe de rotation de l'outil (voir la fiche technique en ANNEXE I).

- La mesure de l'usure des plaquettes est réalisée à l'aide d'un microscope électronique (Leica) équipé d'une caméra digitale liée par ordinateur avec un logiciel spécial (Clemex captiva).

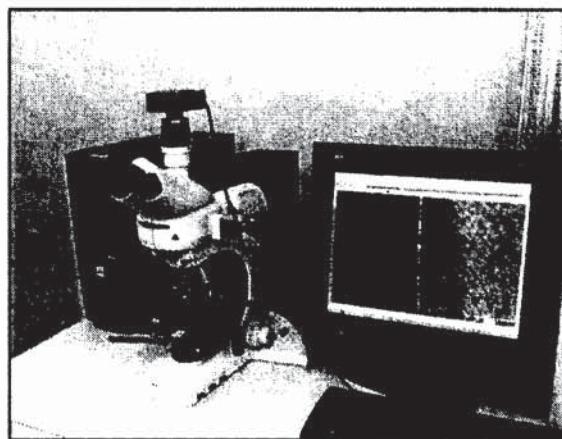


Figure 2.3 Microscope utilisé lors des tests de durée de vie des outils de coupe.

- Rugosimètre : Mitutoyo Surface Measuring instrument SURFTEST SV 600



Figure 2.4 Rugosimètre utilisé lors de nos essais de fini de surface.

CHAPITRE 3

FORCES DE COUPE

Les matériaux possédant la plus faible dureté sont le SF-5 et le SF-2312 avec 300 HB. Puis vient le SF-2000 et le SP-300 avec 341 HB et enfin le plus dur le SF-2050v avec 352 HB (voir le Tableau 2.1). Par conséquent, dans un premiers temps nous pouvons penser que le SF-2050v engendrera des efforts de coupe plus élevés et au contraire, le SF-5 et le SF-2312 les efforts les plus faibles.

Au vu des différents teneurs en additifs, on peut aussi prévoir quels matériaux étudiés entraîneront des efforts plus importants. On sait que le chrome, le molybdène, le nickel et le vanadium augmentent la dureté des aciers en créant des carbures. Il peut donc y avoir des zones localisées de plus grandes dureté. Le chrome est surtout présent dans le SF-2312, le SF-2000 et le SF-2050v, le molybdène dans le SF-2000 et le SF-2050v, le nickel dans le SF-2000 et le SF-2050v et enfin le vanadium dans le SF-2050v. Par conséquent, au vu de ces additifs, nous supposons donc que le SF-2050v exigera le plus d'efforts, que les forces de coupes liés aux perçages du SF-2000 sont supérieures au SP-300, que les forces de coupe pour le SF-2312 sont supérieures au SF-5.

Le SF-2050v, du point de vu de ses additifs et de sa dureté, sera le matériau qui demandera le plus d'efforts. Le SF-2000 devrait se situer derrière car il possède une dureté légèrement plus faible, légèrement moins de chrome et de vanadium et autant de molybdène. Ensuite, le SP-300 devrait être le troisième. Il possède une dureté identique au SF-2000 mais il ne possède aucun additif favorisant cette dureté. Puis le SF-2312 devrait suivre car il possède une dureté Brinell mesuré la plus faible. Enfin le SF-5 devrait générer le moins d'efforts ou être similaire au SF-2312.

Nous devrions donc trouver ce classement lorsque l'on compare nos matériaux avec le même type d'usinage (sec ou lubrifié). Or maintenant, si l'on veut comparer la performance de chaque matériau entre son essai avec lubrifiant et son essai sans, la comparaison ne se fera plus sur les propriétés des additifs mais sur les propriétés de refroidissement du lubrifiant. En effet, le lubrifiant a une meilleure capacité de refroidissement que l'air. Par conséquent, la pièce lors de l'usinage à sec devrait être plus chaude. On sait aussi qu'un matériau se ramollit quand sa température augmente ce qui devrait le rendre moins dur. On peut donc supposer que les essais à sec engendreront des efforts au minimum identiques sinon plus faibles que lors des essais avec lubrification.

Nos essais sont réalisés avec les caractéristiques suivantes :

- Vitesse de coupe = 7,07 m/min,
- Profondeur des trous = 12,7 mm,
- Nombre de dents du foret : 2,
- Vitesse de rotation de l'outil := 225 tr/min,
- Avance = 0.127 mm/dents.

3.1 Analyse statistiques et résultats expérimentaux

Durant les essais, deux réponses sont mesurées, les efforts suivant l'axe du foret ainsi que le moment autour de ce même axe. Ces mesures sont répétées dix fois. Grâce à ces valeurs relevées nous pouvons obtenir une moyenne. Les valeurs maximale et minimale sont également relevées. L'écart type sera aussi calculé. Ensuite nous pouvons réaliser une étude statistique. Nous présenterons donc la méthode statistique, puis les résultats obtenus et enfin nous conclurons sur la pertinence des essais. Les résultats de chaque essai pour chaque mode de lubrification et chaque matériau sont fournis en ANNEXE III et ANNEXE IV.

Nous devons calculer l'erreur d'estimation pour déterminer la plage, autour de la moyenne, que pourra prendre notre valeur d'effort ou de moment. Cette notion d'erreur est importante. Si la plage trouvée est trop importante par rapport à la moyenne, les résultats ne sont donc pas concluants et nécessiteront certainement une augmentation de la taille de l'échantillon. Nous devons avoir une marge d'erreur ne dépassant pas les quelques pourcents de la moyenne pour avoir des résultats convenables.

Maintenant nous allons calculer cette erreur pour deux niveaux d'intervalle de confiance : 95% et 98%. Cela veut dire que nous allons déterminer une plage de valeur autour de la moyenne pour laquelle nous serions sûr à 95% (ou 98%) de nous situer si nous recommencions un essai. Par exemple, si nous trouvons une moyenne de 4000 N et que la valeur de l'erreur est de 20 pour un intervalle de confiance de 95%, cela voudrait dire qu'il y a 95% de probabilité qu'un nouvel essai donne une force comprise entre 3980 et 4020 N. La formule pour calculer cette erreur est la suivante :

$$err = z \times \frac{\sigma}{\sqrt{n_e}} \quad (3.1)$$

Avec : err l'erreur d'estimation, σ l'écart type, n_e la taille d'échantillonnage et $z = 1,96$ si l'intervalle de confiance est de 95% et $z = 2,57$ si l'intervalle de confiance est de 98%.

Ensuite nous allons déterminer la proportion de cette plage vis-à-vis de la valeur moyenne. Cela a pour but de mieux juger de la qualité de cette plage.

La formule pour calculer ce pourcentage est :

$$\Delta_{stat} \% = 100 \times \left(1 - \frac{moy - err}{moy} \right) \quad (3.2)$$

Si nous reprenons l'exemple précédent, cela voudrait dire que la plage de valeur représente 0,5% de la moyenne. Si nous avions eu un résultat de 20%, la dispersion aurait été importante et la valeur des résultats telle que la moyenne beaucoup moins significative.

Dans les Tableau 3.1 et Tableau 3.2, les valeurs maximale, minimale, la moyenne, l'écart type et l'erreur d'estimation sont fournies pour les deux modes de lubrification ainsi que pour les forces puis les moments. Ces valeurs sont données sur la moyenne des dix essais réalisés par matériaux et par mode de lubrification sauf pour le cas du SF-5 lors du perçage avec fluide de coupe. Un problème technique est survenu lors des essais rendant inutilisables la table de mesure pour une longue période. Nous n'avons pu réaliser que 3 essais dans ce cas là. Néanmoins, au vu des résultats, nous verrons par la suite que ceci n'avait pas de conséquences sur la suite de nos travaux

Tableau 3.1

Résultats et calculs statistiques sur les efforts en perçage

Matériau	Dureté (HB)	Sec ou lubrifié	Efforts (N)				Pourcentage de l'erreur avec un intervalle de confiance de	
			Moyenne	Maximum	Minimum	Ecart type	95%	98%
SF-5	300	Sec	3627	3671	3563	90	1,54	2,02
		Lubrifié	3960	4241	3672	108	3,09	4,05
SF-2312	300	Sec	3821	4068	3690	88	1,43	1,87
		Lubrifié	3694	3826	3476	58	0,97	1,28
SF-2000	341	Sec	5020	5272	4848	80	0,99	1,30
		Lubrifié	5179	5427	4988	112	0,14	0,19
SP-300	341	Sec	3956	4161	3804	73	1,14	1,50
		Lubrifié	4503	4788	4246	110	1,51	1,99
SF-2050v	352	Sec	5161	5360	4987	63	0,76	0,99
		Lubrifié	5457	5736	5221	110	1,25	1,64

Tableau 3.2

Résultats et calculs statistiques sur les moments en perçage

Matériaux	Dureté (HB)	Sec ou lubrifié	Efforts (N)				Pourcentage de l'erreur avec un intervalle de confiance de	
			Moyenne	Maximum	Minimum	Ecart type	95%	98%
SF-5	300	Sec	12,39	12,89	11,87	0,73	3,65	4,79
SF-2312	300	Sec	9,09	13,29	4,54	1,72	21,41	28,08
SF-2000	341	Sec	13,91	16,70	12,08	0,75	3,34	4,38
		Lubrifié	13,02	14,50	11,53	0,55	2,62	3,43
SP-300	341	Sec	11,12	13,04	9,52	0,66	3,68	4,82
		Lubrifié	12,11	14,67	9,94	0,80	4,09	5,37
SF-2050v	352	Sec	13,36	15,45	11,76	0,61	2,83	3,71
		Lubrifié	13,42	14,83	12,06	0,50	2,31	3,03

Le pourcentage d'erreur sur les efforts de coupe ne dépasse pas le 1,5% (sauf cas particulier ou le nombre d'essais a été trop faible) avec un intervalle de confiance de 95 ou 98%. Pour les moments, ce pourcentage peut être plus élevé, allant jusqu'à 4,5% (excepté un cas). Ces valeurs sont donc suffisamment faibles pour conclure à la faible variabilité de nos essais. Cette variabilité est due aux faibles erreurs de mesures de la table dynamométrique, à la variabilité inhérente des matériaux, etc. Les dix essais suffisent à tirer des conclusions sur les efforts et les moments.

3.2 Analyse des résultats

La Figure 3.1 et la Figure 3.2 permettent de mieux visualiser les différences d'efforts entre les matériaux lors d'un des deux modes d'usinage (avec ou sans lubrification).

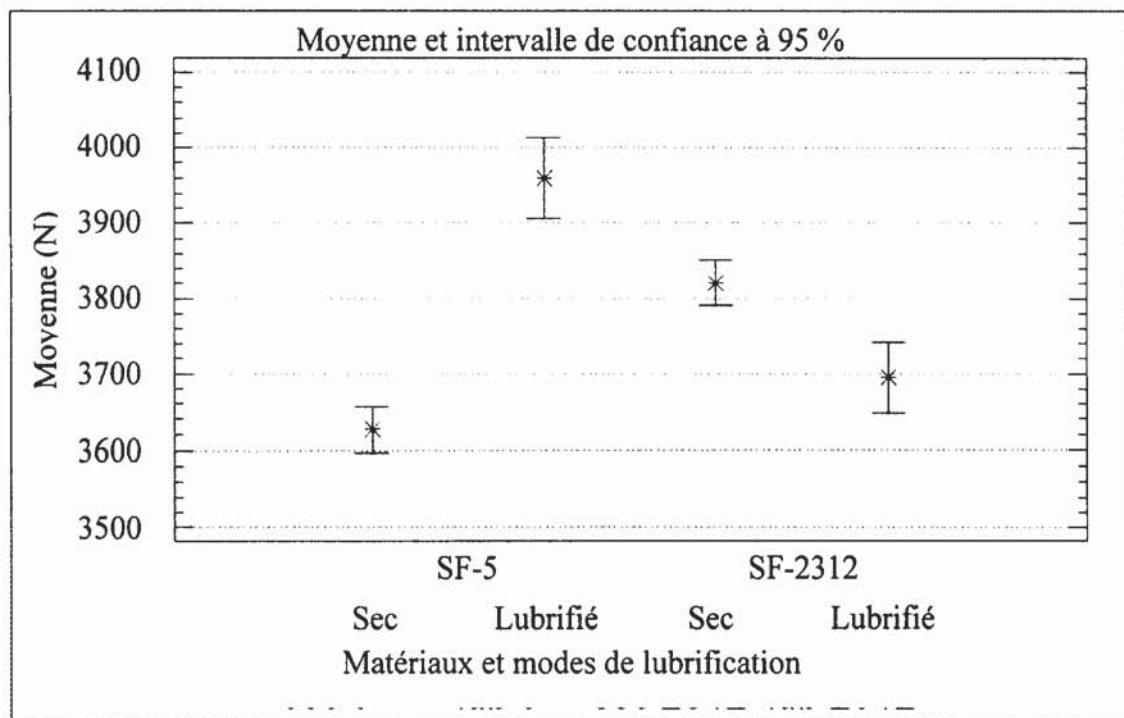


Figure 3.1 *Comparatif des efforts en perçage du SF-5 et du SF-2312.*

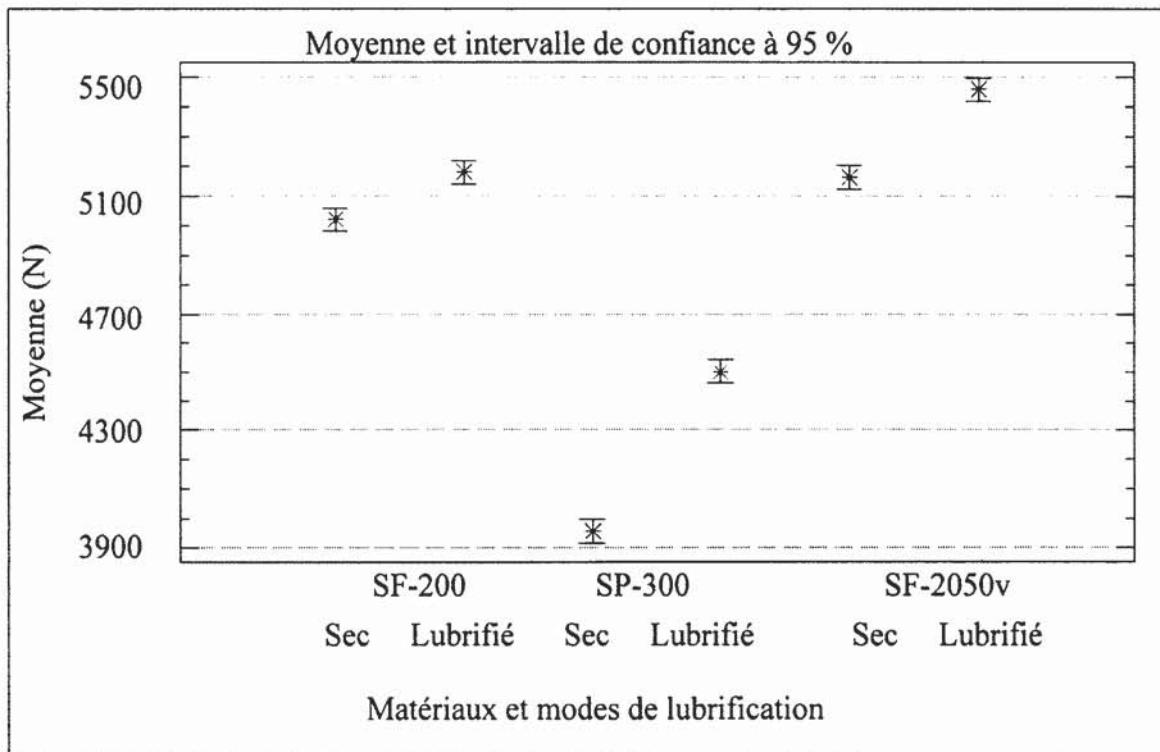


Figure 3.2 Comparatif des efforts à sec du SF-200, du SP-300 et du SF-2050v.

Plusieurs remarques apparaissent à la première observation des efforts :

- Les efforts à sec sont généralement plus faibles qu'avec lubrification
 - 12,1 % de moins pour le SP-300 (soit 547 N),
 - 8,4 % de moins pour le SF-5 (soit 333 N),
 - 5,4 % de moins pour le SF-2050v (soit 376 N),
 - 3,1 % de moins pour le SF-2000 (soit 159 N).
- Le SF-2312 est le seul matériau possède une augmentation des efforts de 3,4% (soit 127 N) lorsque l'on passe de l'usinage lubrifié à l'usinage à sec, mais la faible différence relevé entre les deux ne peut pas permettre de conclure sur l'avantage de l'usinage avec lubrification de façon certaine.

Si l'on compare la moyenne entre les matériaux de dureté identique :

- SF-5 vs SF-2312 : $\frac{F_{Z,SF-5} - F_{Z,SF-2312}}{F_{Z,SF-5}} \times 100$. On trouve un pourcentage de -5,3 % dans le cas de l'usinage à sec et de 6,7 % dans le cas de l'usinage à sec.
- SF-2000 vs SP-300 : $\frac{F_{Z,SF-2000} - F_{Z,SP-300}}{F_{Z,SF-2000}} \times 100$. On trouve un pourcentage de -21,2 % dans le cas de l'usinage à sec et de 13 % dans le cas de l'usinage à sec.

Les efforts lors de l'usinage à sec et l'usinage lubrifié sont assez comparables. Néanmoins, ils sont généralement plus faibles à sec. La raison est la température de la pièce comme nous l'avons expliqué au début du chapitre. Mais un matériau ne respecte pas cela, le SF-2312. Nous avons une légère augmentation des efforts.

Comme prévu le SF-2050v demande les plus grands efforts suivis par le SF-2000 car ce matériau est celui possédant la plus grande dureté (352 HB contre 341 HB). Le SP-300 demande moins d'efforts que le SF-2000 malgré leur dureté identique, ce qui était prévu au vu de leur composition chimique. Le SF-2312 demande des forces de coupe plus faibles que le SF-5 uniquement dans le cas de l'usinage à sec. Or la différence de comportement pour tous les autres matériaux restent identiques lorsqu'on compare l'usinage à sec ou l'usinage avec lubrification. Dans le cas de l'usinage avec lubrification on a une inversion. Mais c'est le seul matériau où les forces de coupe sont plus faibles lors de l'usinage avec lubrification par rapport à l'usinage à sec.

La différence entre le SF-2000 et le SP-300, qui sont pourtant deux matériaux de dureté identique et de composition chimiques similaire, pourrait s'expliquer par leur conductivité thermique. Sorel Forge nous a précisé que le SP-300 possédait une conductivité thermique de $40 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (à 20°C) alors que le SF-5, SF-2312 et le SF-2000 ont une conductivité thermique de $29 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. On note donc que du point de vue conductivité thermique le SP-300 en possède une bien meilleur que le SF-2000. Par conséquent la pièce augmente beaucoup plus facilement en température ce qui expliquerait ces valeurs plus faible en

efforts pour le SP-300. En ce qui concerne le SF-5 et le SF-2312, leur conductivité thermique étant similaire, leur comportement est lui aussi similaire. L'importance ici de la conductivité thermique lors des efforts de perçage se trouve vérifiée.

On note aussi un phénomène particulier sur les valeurs calculées pour les écarts types. En effet celles-ci sont toujours supérieures lors de l'usinage avec lubrification (sauf pour le SF-2312). Cette différence ne peut que s'expliquer par l'utilisation du lubrifiant. Le jet du lubrifiant, par la pression générée, peu peut être crée des variations malgré qu'il n'est pas dirigé sur la surface de la pièce mais sur l'outil. A part cela, on ne voit aucune autre raison à cette différence.

En conclusion, l'usinage à sec apparaît comme étant le plus propice car il entraîne des efforts généralement plus faibles, excepté un matériau. Mais cette différence entre l'usinage à sec et l'usinage lubrifié n'est pas très importante. Vieira (Vieira, Machado et Ezugwu, 2001) notait aussi que les forces de coupes étaient plus faibles, tandis que Rahman (Rahman et al., 2001; Rahman, Senthil Kumar et Salam, 2002) jugeait leur différence peu significative mais néanmoins plus faible à sec. Nos résultats sont donc en accord avec les leurs, sauf pour un matériau sur cinq dont nous ne pouvons expliquer la raison.

3.3 Analyse des copeaux

Tableau 3.3

Type de copeaux obtenus en perçage selon les matériaux

Matériaux Copeaux	Mode d'usinage	SF-5	SF-2312	SF-2000	SP-300	SF-2050v
fragmentés	A sec	Non	Oui	Oui	Non	Oui
	Lubrifié	Non	Oui	Non	Non	Oui
hélicoïdaux court	A sec	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	Lubrifié	Non	Non	Oui	Non	Oui
hélicoïdaux long	A sec	Oui	Oui	Non	Oui	Oui
	Lubrifié	Oui	Non	Oui	Oui	Oui

En ce qui concerne la couleur des copeaux, ceux-ci sont toujours gris que ce soit à sec ou avec lubrification. L'exception ne se fait que dans deux cas, pour le SF-2050v et le SP-300 lors de l'usinage à sec. Les copeaux sont dans ce cas là bleu/violet pour les fragmentés ou les hélicoïdaux courts. Ils sont par contre en dégradés, du gris vers le violet puis le bleu pour les hélicoïdaux longs. Ces différences de couleur sont dues à des gradients thermiques. Cela peut s'expliquer par la friction entre l'outil et la pièce. Si celle-ci est plus importante pour ces deux matériaux là, le dégagement de chaleur est supérieur. Autre solution, la conductivité thermique est supérieure pour le SF-2050v et le SP-300. Dans ce cas, les aciers chauffent beaucoup plus facilement et atteindre des températures plus élevées.

Les copeaux continus ne sont pas vraiment désirés surtout en perçage. Ils sont difficiles à évacuer et peuvent nécessiter de ressortir l'outil pour nettoyer, ce qui est une perte de temps. Les copeaux fragmentés par contre sont les plus faciles à évacuer et donc préférable. Il est à noter que les copeaux sont en général plus fragmentés lors de l'usinage à sec lorsque ceux-ci prennent une teinte bleu/violet, ce qui est le cas du SF-2000 et du SF-2050v. Cela rejoint en partie les résultats de Rahman (Rahman et al., 2001; Rahman, Senthil Kumar et Salam, 2002) qui trouvait également que les copeaux étaient plus fragmentés à sec. Le perçage à sec en plus de réduire les efforts peut faciliter l'évacuation des copeaux pour certains matériaux.

3.4 Bilan du chapitre

L'usinage réduit dans la majorité des cas les valeurs des forces de coupe nécessaires au perçage. Néanmoins cet écart n'est pas très important. De plus, l'usinage à sec peut faciliter l'évacuation des copeaux en les fragmentant selon les matériaux. Finalement, on note un léger avantage pour l'usinage à sec. Par conséquent notre choix, en se référant uniquement aux valeurs des efforts et des moments, se reportera pour l'usinage à sec.

CHAPITRE 4

USURE ET VIE DES OUTILS DE COUPE

Lors de la réalisation de moules, l'enlèvement de matière par fraisage est une étape importante de leur fabrication, étape qui de surcroit, est généralement la plus longue. L'étude de la durée de vie des outils est donc importante pour déterminer le meilleur rapport coût-rapidité. De plus, l'étude de leur usinabilité à sec joue un rôle primordial. Si l'usinabilité s'avère meilleure à sec, nous pourrons optimiser la réalisation des moules et nous aurons fait un pas dans la réduction de l'utilisation de matières polluantes.

Selon Rech (Rech, Le Calvez et Dessoly, 2004), l'ébauche des moules est l'opération la plus coûteuse car elle nécessite le plus de temps. Il est donc primordial de tester l'usinage en ébauche. Par contre l'usinage en finition s'avère moins importante car le critère principal est la trajectoire de l'outil.

Nous allons donc étudier la durée de vie de chaque acier dans le cas de l'usinage avec lubrification et les comparer entre eux. Puis, nous réaliserons la même opération dans le cas de l'usinage à sec. Enfin nous comparerons chaque matériau pour déterminer sous quelles conditions l'usinage à sec peut être préférable à l'usinage avec lubrification.

La vitesse de coupe étant le seul paramètre que nous ferons varier, nous utiliserons donc le modèle de Taylor pour déterminer la durée de vie des aciers.

$$V_c = C \times t_0^\alpha \quad (4.1)$$

Où V_c est la vitesse de coupe en mètre par minutes, T la durée de vie de l'outil en minutes, C et α les constantes de l'équation.

L'acier SF-2312 possède la teneur en soufre la plus importante. Par conséquent nous devrions trouver une plus grande durée de vie pour cet acier. Suivant ce critère, les aciers pourraient se classer par ordre croissant de durée de vie : SF-2050v, SP-300, SF-5, SF-2000 et enfin SF-2312. Mais comme l'avance utilisée reste faible, les différences de durée de vie ne devraient pas être trop importantes comme Rech (Rech, Le Calvez et Dessoly, 2004) l'a démontré.

4.1 Durée de vie obtenue et modèle d'usure

4.1.1 Durée de vie des plaquettes

Les mesures prises lors des essais permettent d'obtenir des courbes présentant l'usure de l'outil (VB) en fonction du temps d'usinage. Voici en exemple les tendances obtenues pour le SF-2312 lors de l'usinage avec lubrification.

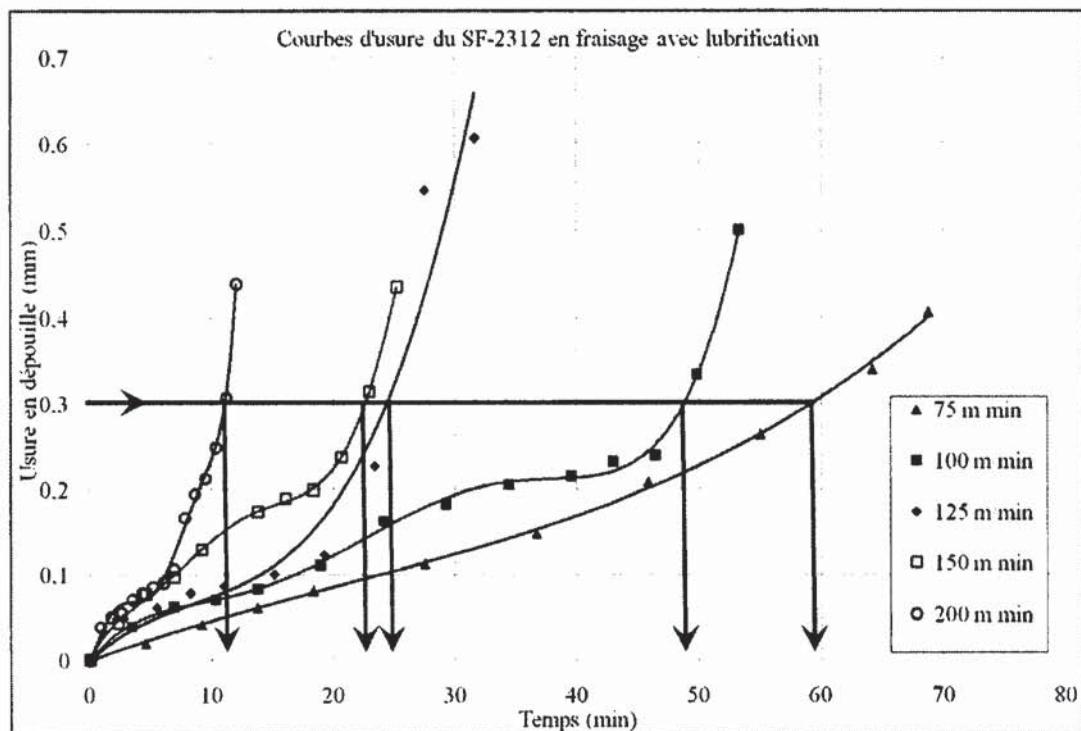


Figure 4.1 Courbe d'usure du SF-2312 en fraisage avec lubrification.

Les données obtenues pour les autres matériaux sont fournies de l'ANNEXE VII à l'ANNEXE X. Ensuite grâce à ces données, on est en mesure d'interpoler et par conséquent de déterminer les durées de vie, c'est-à-dire quand l'outil atteint une usure VB de 0,3 mm. Néanmoins les valeurs relevées sont à voir comme des valeurs d'ordre de grandeur. En effet, nous avons pris la moyenne d'usure de deux plaquettes pour obtenir ces courbes, mais pour avoir des résultats plus précis, il aurait fallu répéter ces essais. Mais la durée de réalisation d'un essai rend ceci difficile car cela prend beaucoup de temps et augmenterait les coûts. Donc il faut voir les valeurs de durée de vie comme un ordre de grandeur.

Les durées de vie relevées au cours des différents essais sont résumées dans le Tableau 4.1, lors de l'usinage avec lubrification et dans le Tableau 4.2, lors de l'usinage à sec :

Tableau 4.1

Durée de vie expérimentale des outils en fraisage avec lubrification

Vitesse de coupe (m/min)	Durée de vie des outils (min)			
	SF-5 (300 HB)	SF-2312 (300 HB)	SF-2000 (341 HB)	SP-300 (341 HB)
75	94	89	78	164
100	-	49	52	99
125	41	24	30	36
150	19	22	18	17
200	11	11	11	12

Tableau 4.2

Durée de vie expérimentale des outils en fraisage à sec

Vitesse de coupe (m/min)	Durée de vie des outils (min)			
	SF-5 (300 HB)	SF-2312 (300 HB)	SF-2000 (341 HB)	SP-300 (341 HB)
75	>> 350	356	137	124
100	211	140	60	55
125	247	132	22	24
150	79	46	13	29
200	23	33	15	12
250	54	9	20	19
300	9	12	8	4

La durée de vie pour l'acier SF-5 à 75 m/min n'a pas été trouvée car l'usure était encore très faible. VB était de l'ordre de 0,06 mm en moyenne sur les deux plaquettes au bout de 350 min d'usinage.

4.1.2 Modèles de Taylor

Comme mentionné précédemment, nous allons utiliser comme modèle mathématique pour approximer la durée de vie des outils, le modèle de Taylor. Ce modèle approxime le mieux dans la grande majorité des cas tout en restant très simple d'utilisation. Grâce aux données recueillies, nous sommes en mesure de déterminer les coefficients du modèle de Taylor pour chacun des matériaux. Les équations de ces modèles seront présentées juste après dans les Tableau 4.3 et Tableau 4.4.

Lors de l'usinage à sec, nous avons pu relever des valeurs de durée de vie pour des vitesses de coupes supérieures à 200 m/min. Mais pour une comparaison avec les tests réalisés avec le lubrifiant, nous donnerons un modèle de Taylor déterminé uniquement sur les vitesses de coupes comprises entre 75 et 200 m/min. De plus, pour la courbe de Taylor du SF-5 lors de l'usinage à sec, elle a été réalisée sans tenir compte de la vitesse de coupe de 125 m/min. En effet celle-ci se démarque énormément par rapport aux autres vitesses de coupe.

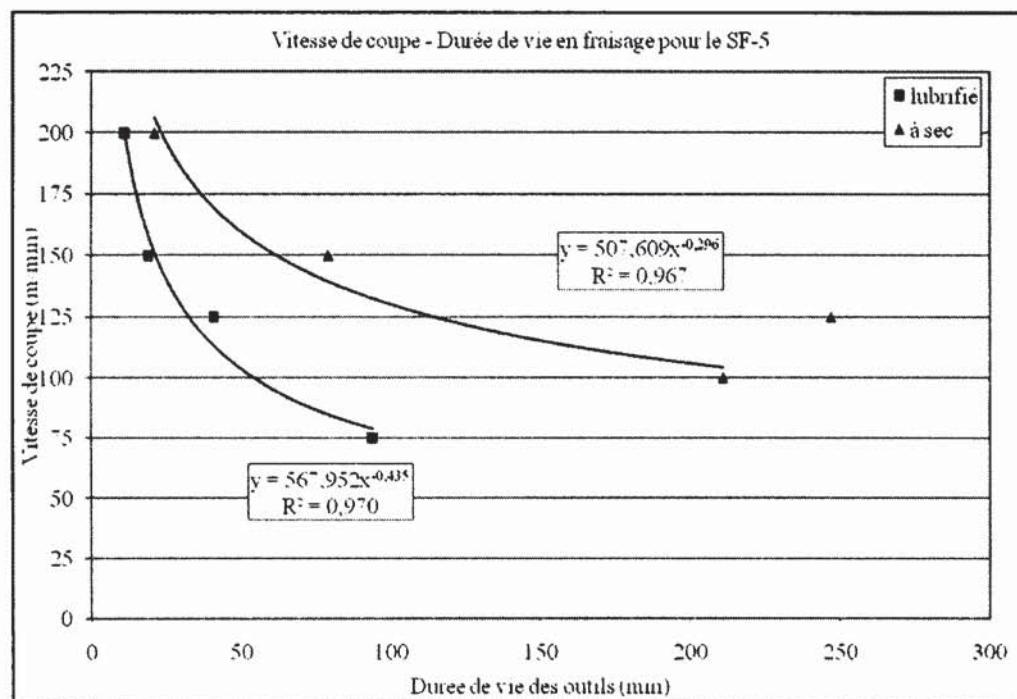


Figure 4.2 Durée de vie des outils en fonction de la vitesse de coupe de l'acier SF-5.

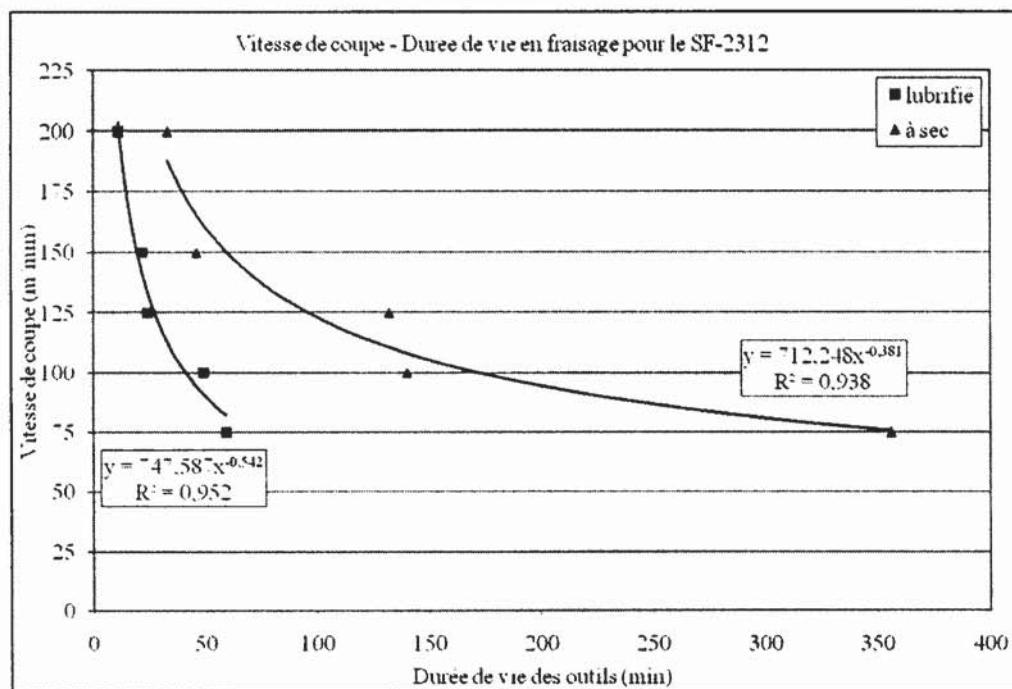


Figure 4.3 Durée de vie des outils en fonction de la vitesse de coupe de l'acier SF-2312.

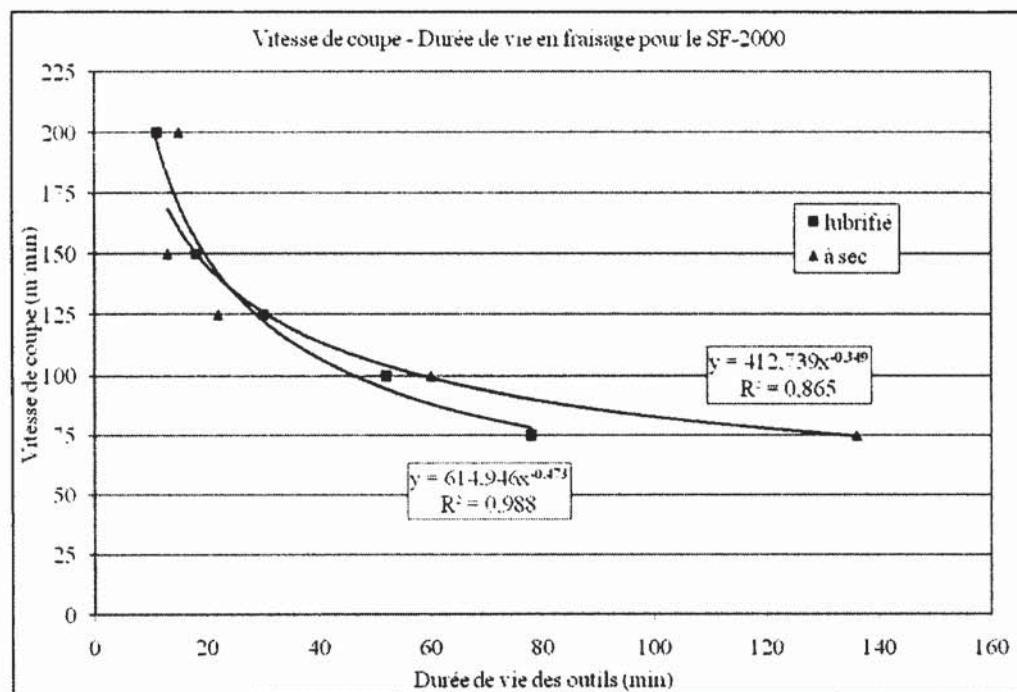


Figure 4.4 Durée de vie des outils en fonction de la vitesse de coupe de l'acier SF-2000.

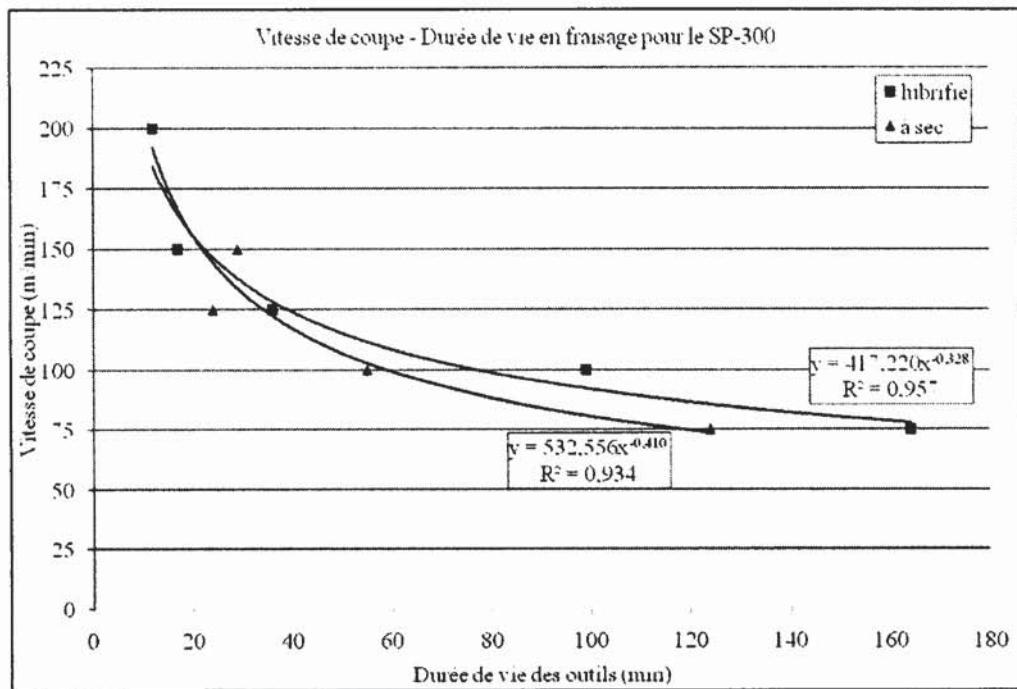


Figure 4.5 Durée de vie des outils en fonction de la vitesse de coupe de l'acier SP-300.

Première remarque, en observant la Figure 4.2 à la Figure 4.5, est la nette différence de comportement entre les matériaux. Pour le SF-5 et le SF-2312, l'usinage à sec se démarque beaucoup de l'usinage avec lubrification, ce qui n'est pas le cas pour le SF-2000 et le SP-300.

Les équations de Taylor sont résumées dans le Tableau 4.3 lors de l'usinage avec lubrification et dans le Tableau 4.4 lors de l'usinage à sec :

Tableau 4.3
Modèle de Taylor lors du fraisage avec lubrification

Matériaux	Dureté	Modèle de Taylor
SF-5	300	$V_c = 568 \times T^{-0,435}$ (4.2)
SF-2312	300	$V_c = 748 \times T^{-0,542}$ (4.3)
SF-2000	341	$V_c = 615 \times T^{-0,47}$ (4.4)
SP-300	341	$V_c = 417 \times T^{-0,32}$ (4.5)

Tableau 4.4
Modèle de Taylor lors du fraisage à sec

Matériaux	Dureté	Modèle de Taylor
SF-5	300	$V_c = 508 \times T^{-0,296}$ (4.6)
SF-2312	300	$V_c = 712 \times T^{-0,381}$ (4.7)
SF-2000	341	$V_c = 413 \times T^{-0,349}$ (4.8)
SP-300	341	$V_c = 533 \times T^{-0,41}$ (4.9)

Le modèle de Taylor pour le SF-5 lors de l'usinage à sec a été calculé sans la vitesse de coupe de 125 m/min pour pouvoir mieux approximé par rapport aux autres vitesses de coupe. Le coefficient de détermination pour chacun des matériaux dans le cas de l'usinage avec lubrification est supérieur à 0,950 (0,970 pour le SF-5, 0,952 pour le SF-2312, 0,988 pour le SF-2000 et 0,957 pour le SP-300). Pour l'usinage à sec, il est un peu plus faible

(0,967 pour le SF-5, 0,938 pour le SF-2312, 0,865 pour le SF-2000 et 0,934 pour le SP-300). La modélisation de la durée de vie par la formule proposée par Taylor (Taylor, 1907) est pertinente sur la plage de vitesse de coupe considérée surtout pour l'usinage excepté pour l'usinage à sec du SF-2000. Mais pour une meilleure comparaison, le modèle de Taylor a été maintenu.

4.2 Comparaison de l'usure des outils

Il est possible de prévoir lors de la réalisation des essais à sec, quand les plaquettes sont en fin de vie ($VB=0,3$ mm) grâce à deux critères. Le premier est la température des plaquettes. Elles deviennent de plus en plus chaudes au fur et à mesure de l'usure. Pourtant entre chaque phase de mesure au microscope, les plaquettes retrouvent la température ambiante. Mais au fur et à mesure que l'usure augmente, la température des plaquettes, juste après avoir été usinée quelques minutes, augmente. Il devient par la suite impossible de tenir les plaquettes dans la main durant quelques minutes après quelques passes de fraisage, ce qui n'est jamais le cas lors de l'usinage lubrifié.

Deuxième point lors de l'usinage à sec, les copeaux changent de couleur, ce qui signifie l'existence d'un transfert thermique. Par conséquent, si les copeaux sont bien gris, ils dénotent une usure proche de $VB = 0,3$ mm ou supérieure. Ces observations se notent moins lors de l'usinage lubrifié. Premièrement, les copeaux gardent pratiquement toujours la même couleur quelque soit le matériau. De plus, ces augmentations observées de la température des plaquettes se notent moins. La capacité de refroidissement étant très certainement la cause principale. On peut donc prévoir par des moyens assez simples l'état d'avancement de l'usure des plaquettes par simple observation des copeaux ou par contact avec les plaquettes alors de l'usinage à sec.

Nous allons analyser maintenant les mécanismes d'usure des plaquettes. Des photos prises au microscope électronique sont fournies de l'ANNEXE XI à l'ANNEXE XXI.

Lors de l'usinage lubrifié :

- L'usure en dépouille apparaît lisse jusqu'à environ $VB=0,15\text{mm}$ après une usure en entaille apparaît.
- L'usure en entaille conduit souvent à une usure catastrophique : arrachement important de matière d'un coup. C'est 90% du temps la cause de fin de vie de la plaquette.
- On note aussi des fissures thermiques dues aux changements brutaux de température (par exemple le SF-2312 à 125 m/min).



Figure 4.6 Image d'une plaquette utilisée pour usiner l'acier SF-2312, montrant une défaillance par fissures thermiques.

- Les vibrations augmentent de façon proportionnelle avec l'augmentation de l'usure. Ceci pourrait favoriser les arrachements important de matières en fin de vie des plaquettes.
- Les arrachements de matières observés pourraient aussi être du à une distribution non uniforme des carbures.

Lors de l'usinage à sec :

- Pour le SF-5, on observe de l'arrachement sur l'arête par endroit mais aussi toute une partie d'usure bien lisse comme en polissage sur la face de dépouille. Cette usure lisse est plus présente à 125 m/min qu'à 75 m/min. On observe aussi de la déformation plastique sur la face de dépouille. La matière a glissé sur elle-même à cause de la température à 75 m/min.

- Pour le SF-2312, on observe une usure très lisse sur la face de dépouille. On observe de la matière collée sur la face de dépouille à 75 m/min.
- Pour le SF-2000, l'usure est de type en dépouille. La surface est plus lisse à 125 m/min qu'à 75 m/min. Ceci doit être une des conséquences de l'élévation de température avec l'élévation de la vitesse de coupe. On trouve de l'arrêté rapportée sur l'une des plaquettes à 125 m/min.
- Pour le SP-300, on observe de l'arrêté rapportée pour les vitesses de 75 et 125 m/min. Le mode d'usure est principalement de type en dépouille. L'usure est progressive et présente de façon assez identique sur toute la largeur de la partie usée. Néanmoins, cette partie usée est plus petite que pour le SF-5 par exemple. L'usure observée à la fin n'est pas catastrophique.

Lors de l'usinage à sec, on ne trouve pas d'usure catastrophique résultant d'arrachement important de la matière comme dans le cas de l'usinage avec lubrification. Le type d'usure est surtout abrasif avec une usure en dépouille progressive. On retrouve de temps en temps de l'arrêté rapportée.

4.3 Comparaison de l'usure lors de l'usinage avec lubrification vs à sec

4.3.1 Comparaison des courbes d'usure

Les courbes d'usure des matériaux (ANNEXE VII à ANNEXE X) en fonction de la vitesse de coupe ont des caractéristiques classiques. On note généralement une usure en trois étapes :

- Une usure rapide jusqu'à atteindre une valeur VB comprise entre 0,1 et 0,15 mm,
- Une usure progressive (forme de palier sur la courbe) observé généralement pour une usure comprise entre 0,1 et 0,2 mm,
- Une usure à nouveau rapide qui amène la plaquette à sa fin de vie.

Ces paliers sont en général présent sur toutes les courbes quelque soit le matériau ou la vitesse de coupe. Mais plus la vitesse de coupe devient élevé (au dessus de 200 m/min) plus il est difficile de pouvoir observer ce palier. En effet, sa durée se raccourcit avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Autre phénomène observé aussi, il est possible d'avoir deux voir trois paliers. Ces cas sont peu fréquents et apparaissent toujours sur des vitesses de coupe inférieures à 125 m/min. De même il est possible de ne pas observer nettement le palier pour des vitesses de coupe de l'ordre de 75 m/min. La transition, usure rapide, usure progressive n'étant pas assez importante. Mais cette constatation s'applique pour des cas où l'usure est très lente tel que l'usinage à sec de l'acier SF-5 à une vitesse de coupe de 75 m/min. Pour ces cas là aussi, l'usure rapide finale observée chez les autres matériaux peut ne pas apparaître. Il est possible qu'elle se passe pour une usure bien supérieure à 0,3 mm.

Si l'on observe les pentes des portions de courbe où l'usure est rapide, elles sont identiques pour un même matériau à une vitesse donné. La vitesse d'usure initiale est sensiblement identique à celle qui conduira la plaquette à sa fin de vie. Cette vitesse d'usure dans les portions dites « d'usure rapide » augmente lorsque la vitesse de coupe augmente. Ceci peut s'expliquer par les mécanismes d'usure des outils et par l'augmentation des contraintes quand la vitesse de coupe augmente.

L'usure dans le cas de l'usinage avec fluide de coupe présente des pentes lors de phases d'usure rapide plus grandes. De même les phases d'usure progressive sont plus courtes. Ceci s'explique bien avec le mécanisme d'usure des plaquettes. En effet, l'usure plus catastrophique observée lors de l'usinage avec lubrification se traduit par une vitesse d'usure plus rapide.

4.3.2 Comparaisons des durées de vie entre le SF-5 et le SF-2312

Nous comparons ces deux matériaux ensemble car ils ont la même dureté (300 HB). Voici les durées de vie présentées dans la Figure 4.7 :

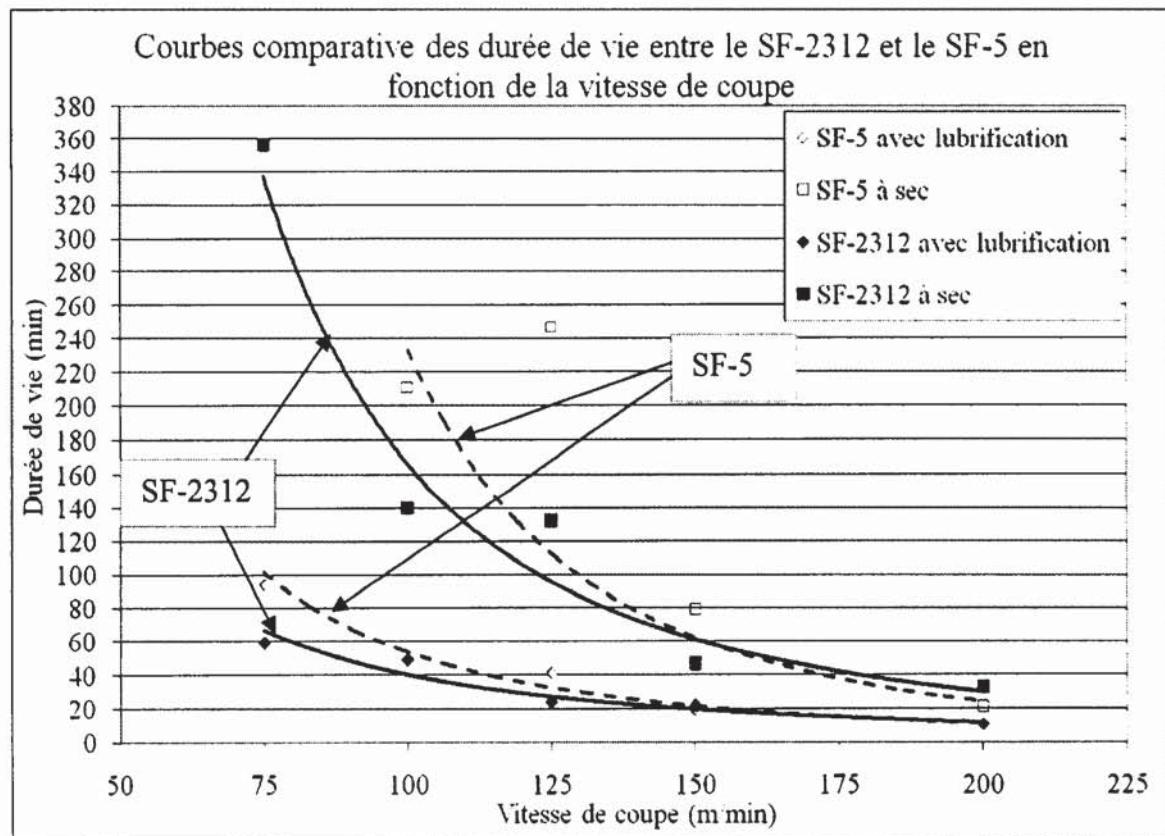


Figure 4.7 Comparaison des modèles de Taylor du SF-5 et du SF-2312.

Avant d'analyser cette Figure 4.7, il faut penser que les résultats obtenus, comme nous l'avons vu précédemment, sont issus d'un seul essai. Les valeurs relevées sont correctes mais non exactes. En effet, l'usure de l'outil dépend de la qualité des outils utilisés lors de l'essai, du brut qui peut d'un bloc à un autre avoir de légère variation, etc. Par conséquent, les courbes présentées ne doivent pas être vues comme des lignes, mais des bandes dont la largeur dépendrait de l'incertitude de tous les paramètres mis en jeu (matériaux, outils, etc). La comparaison entre deux matériaux ou entre deux modes de lubrification doit donc tenir compte de ceci.

D'après la Figure 4.7, on note que la durée de vie est plus rapide lors de l'usinage du SF-2312 que du SF-5 quelque soit le mode d'usinage (à sec ou avec lubrification). La différence entre les matériaux est similaire à sec comme avec lubrification et par conséquent l'apport de fluide de coupe ne joue pas un rôle prépondérants justifiant cet différence. De plus, la différence de durée de vie entre les deux matériaux à même mode d'usinage tant à diminuer et à s'annuler quand la vitesse de coupe augmente.

Cette différence de durée entre les deux matériaux peut s'expliquer par leur composition chimique. Plusieurs composés chimiques agissent sur la résistance à l'usure ou non à l'usure. Le soufre augmente la durée de vie tandis que le chrome, le molybdène, le carbone et le manganèse augmentent la résistance à l'usure. En ce qui concerne les éléments ayant un impact négatif sur la durée de vie des outils, leur quantité diffère dans les deux aciers. En ce qui concerne le carbone, la différence entre le SF-2312 et le SF-5 est négligeable. Le carbone n'explique donc pas cette différence. Pour le manganèse, le SF-2312 en comporte presque le double, pour le chrome, le SF-2312 en comporte un peu plus et pour le molybdène, le SF-5 en comporte un quart de plus. Pour le soufre, le SF-2312 en possède 18 fois plus. L'ajout de soufre en grande quantité pour le SF-2312 ne compense pas la plus forte teneur en manganèse et en chrome que pour le SF-5.

Maintenant, il faudrait regarder aussi ce que les matériaux ont subi comme traitement thermique et s'ils ont réagi de la même façon face à ce traitement.

La réduction de l'écart entre les deux matériaux avec l'augmentation de la vitesse de coupe pourrait aussi s'expliquer par une augmentation de la température lors des fortes vitesses de coupe. Cette augmentation de température réduit les efforts engendrés car le matériau se ramollit. Ceci pour atténuer les différences de structures entre le SF-5 et le SF-2312.

4.3.3 Comparaisons des durées de vie entre le SF-2000 et le SP-300

Nous allons comparer le SF-2000 et le SP-300 car ils possèdent la même dureté (341 HB). Voici les durées de vie présentées dans la Figure 4.8 :

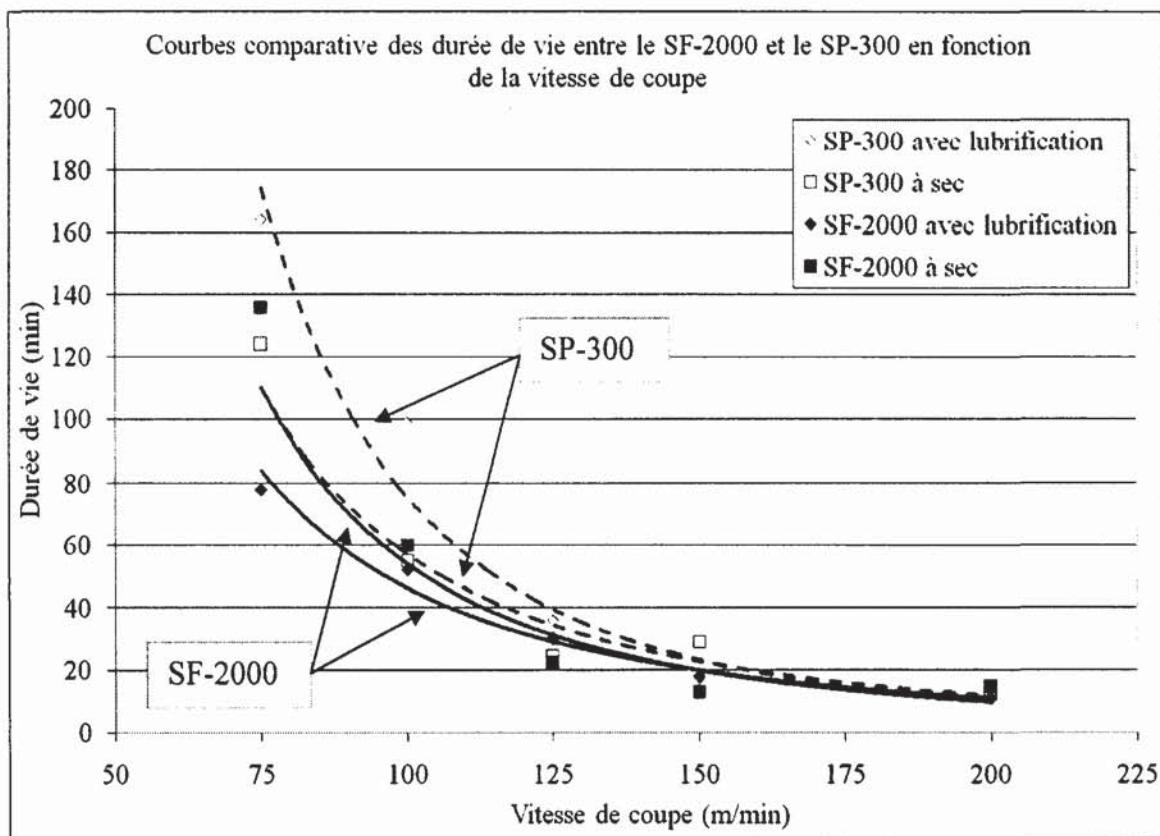


Figure 4.8 Comparaison des modèles de Taylor du SF-2000 et du SP-300.

Le comportement entre ces deux matériaux de même dureté diffère par rapport au SF-5 et au SF-2312. Le comportement entre le SF-5 et le SF-2312 était similaire que ce soit à sec ou avec un fluide de coupe. Or ici, dans le cas de l'usinage à sec, la durée de vie des outils est plus longue dans le cas du SP-300, alors que pour le cas de l'usinage avec lubrifiant, la durée de vie des outils est similaire. L'utilisation ou non de lubrifiant a un impact lorsque l'on compare deux matériaux de même dureté. La raison de cette différence pourrait

s'expliquer encore une fois par la température de la pièce comme dans le cas des efforts. L'inconvénient d'un matériau en termes de composition chimique pour la durée de vie pourrait se voir amoindrir par la conductivité thermique de celui ci.

Si l'on regarde la composition chimique des deux matériaux, on voit que la différence en Molybdène et en soufre est peu significative. Par contre le SF-2000 possède plus de chrome, un peu plus de carbone, mais moins de manganèse. Le SF-2000 possède plus de carbures de chrome qui réduit l'usinabilité.

Comme pour le SF-5 et le SF-2312, il faudrait regarder les traitements thermiques et les comportements vis-à-vis de ceux-ci pour le SP-300 et le SF-2000.

4.3.4 Comparaisons des durées de vie entre l'usinage avec lubrification et à sec

Comparaison de la durée de vie entre les matériaux lors de l'usinage avec lubrification (d'après la Figure 4.6 et la Figure 4.7) :

- Le SP-300 est le matériau dont la durée de vie est la meilleure, devançant le SF-5, le SF-2000 puis le SF-2312. Le SP-300 possède une meilleure durée de vie lors des basses vitesses, mais supporte moins bien les hautes vitesses de coupe (au dessus de 125 m/min) comme le SF-5.
- L'augmentation de la vitesse de coupe tend à rendre les durées de vie des outils similaires quelque soient les modes de lubrification utilisées. Au dessus de 150 m/min, leur comportement peut être jugé identique.
- Le SF-2312 et le SF-5 possède une dureté inférieure au SP-300 mais pourtant leur durée de vie est inférieure.

Comparaison de la durée de vie entre les matériaux lors de l'usinage à sec (d'après la Figure 4.6 et la Figure 4.7) :

- Le SF-5 possède la durée de vie la plus longue suivis du SF-2312, puis du SF-2000 et enfin du SP-300.
- Les matériaux possédant la dureté la plus faible, sont ceux ayant la plus longue durée de vie contrairement au cas de l'usinage avec lubrification.
- On note que la vitesse de coupe de 125 m/min pour le SF-5 et le SF-2312 est une vitesse où la durée de vie est bien supérieure, voir plus qu'à 100 m/min comme pour le SF-5. Pour le SP-300, c'est la vitesse de coupe de 150 m/min que l'on note. Pour le SF-2000, aucune vitesse n'a un comportement supérieur aux autres.

Comparaison de la durée de vie l'usinage lubrifié et l'usinage à sec (d'après la Figure 4.6 et la Figure 4.7) :

- La durée de vie est généralement supérieure lors de l'usinage à sec. La différence n'est pas identique suivant les matériaux. Pour le SF-5 et le SF-2312, l'usinage à sec est très nettement préférable pour toutes les vitesses de coupe étudiées. Pour le SF-2000 l'usinage à sec est préférable mais la différence entre les deux (sec ou lubrifié) est nulle à partir de 100 m/min. À l'opposé, pour le SP-300, l'usinage avec lubrification est préférable mais au dessus de 100 m/min, cette différence devient peu significative.
- La différence s'estompe avec l'augmentation de la vitesse de coupe.
- L'usinage à sec peut être utilisé pour des vitesses de coupe supérieures. On a atteint 300 m/min lors de l'usinage à sec, alors que les vibrations nous empêchaient de monter au dessus de 200 m/min pour l'usinage avec fluide de coupe. Néanmoins cela n'est valable que pour le SF-5 surtout et le SF-2312.
- À certaines vitesses de coupe suivant les matériaux, on peut trouver un allongement de la durée de vie par rapport à ce que l'ensemble des résultats laisseraient penser. Ceci se note surtout lors de l'usinage à sec, avec la vitesse de coupe de 125 m/min pour le SF-5 et le SF-2312 et la vitesse de 150 m/min pour le SP-300.

4.4 Étude des copeaux

4.4.1 Couleur des copeaux

Pour ce qui est de la couleur, on peut noter une différence entre l'usinage à sec et l'usinage lubrifié. Lors de l'usinage lubrifié, les copeaux gardent toujours la même couleur grise quelque soit l'acier fraisé ou la vitesse de coupe utilisée. Ceci est différent dans le cas de l'usinage à sec. La couleur des copeaux varient suivant l'usure et la vitesse de coupe. La couleur du copeau tend à devenir la même que celle de l'usinage avec lubrification lorsque l'usure de la pièce augmente. De même, plus la vitesse de coupe augmente (à usure identique) plus la couleur se rapproche du gris en début d'usure.

Ce changement de couleur peut s'expliquer par une élévation de la température. Lors de l'usinage lubrifié, le fluide de coupe refroidit la pièce et l'outil. Par conséquent le copeau ne s'élève jamais suffisamment en température pour changer de couleur. Ceci n'est pas le cas lors de l'usinage à sec. Le copeau et la pièce doivent absorber beaucoup plus de chaleur. Le copeau monte donc plus en température que lors de l'usinage lubrifié d'où ce changement de couleur.

De plus, nous avons observé un changement de couleur lors de l'évolution de l'usure ou bien du changement de vitesse de coupe à usure identique. Ceci se traduit également par un gradient thermique. Lorsque la plaquette est neuve, le transfert thermique s'opère beaucoup plus facilement entre l'outil et le copeau. Le copeau monte donc en température et change de couleur. Par contre, plus l'usure augmente, plus ce transfert diminue. Ceci s'explique aussi par une autre remarque faite précédemment sur les plaquettes. Nous avions expliqué que l'augmentation de l'usure conduisait à une température plus élevées de la plaquette lors de l'usinage à sec. La chaleur émise par le phénomène de coupe se propage différemment suivant l'usure. Au début le transfert thermique se fait principalement dans le copeau puis dans la plaquette.

Maintenant si nous observons la couleur prise par les copeaux lors de l'usinage à sec au début d'usure des plaquettes, celle-ci diffère selon les matériaux. Les stades de couleur sont les suivants (dans l'ordre décroissant par rapport à la température) : brun, violet, bleu foncé, bleu clair et enfin gris. Plus on se rapproche du brun, plus cela traduit une température du copeau élevé et inversement si on se rapproche du gris. On déduit ceci en se basant sur deux principes. Premièrement, l'élévation de température est plus importante lorsque les vitesses de coupe augmentent. Deuxièmement, la température évolue suivant le degré d'usure des plaquettes. En effet, on sait que lors de l'usinage avec lubrification, la température est plus faible grâce à l'action du fluide de coupe, donc la couleur grise (couleur des copeaux lors de l'usinage avec lubrification quelque soit la vitesse de coupe et l'usure des outils) correspond à une température plus faible que pour les autres couleurs (brun, violet et bleu).

Maintenant pour comparer les matériaux, il faut regarder la couleur de ceux-ci pour une même vitesse de coupe et un même niveau d'usure pour les raisons vues dans les paragraphes précédents. Nous allons donc observer pour une usure naissante sur les plaquettes pour une vitesse de coupe de 75 m/min. La couleur des copeaux est :

- Entre le brun et le violet foncé pour le SF-5 (300 HB),
- Majoritairement brune et légèrement violette pour le SF-2312 (300 HB),
- Bleu foncé pour le SF-2000 (341 HB),
- Majoritairement brune et légèrement violette pour le SP-300 (341 HB).

Cette différence entre les matériaux vient très certainement de leur conductivité thermique. Plus le matériau conduit convenablement la chaleur, plus les copeaux devraient avoir une couleur s'approchant du brun. Le SF-2312 et le SP-300 devrait donc avoir la meilleure conductivité thermique.

4.4.2 Forme et évacuation des copeaux

Dans tous les cas, les copeaux sont très courts et ont une forme hélicoïdale conique. Leur longueur est telle qu'ils ne sont pas enroulés sur eux même de plus de 1 tour. Maintenant, si on regarde en fonction de l'usure des plaquettes, quand elles sont neuves, les copeaux ont un bord bien lisse, alors qu'à $VB=0,3$ mm, les bords sont en dents de scie.

Dans tous les cas, les copeaux sont très courts et sont donc facile à évacuer quelque soit le mode d'usinage (avec ou sans lubrifiant). De plus sous l'effet de la vitesse de rotation de l'outil, les copeaux sont évacués immédiatement et ne gêne pas l'usinage. Le lubrifiant n'apporte pas d'avantages pour évacuer les copeaux.

4.5 Étude de la dureté après usinage

Nous avons réalisé une mesure de la dureté macroscopique sur les échantillons usinés pour contrôler la qualité de l'état de surface. Les valeurs de dureté sont présentées dans le Tableau 4.5. Elles ont été obtenues par moyenne sur les dix valeurs mesurées. Il est à noter que l'appareil de mesure donnait des valeurs de dureté sur l'échelle de Rockwell (HRA) dont nous donnons l'équivalent selon Brinell (HB).

Tableau 4.5

Dureté après fraisage des aciers

Matériaux	Dureté manufacturier (HB)	Lubrifié		Sec		Écart type (HRA)		Variation (HBsec - HBLub) / HBsec
		HRA	HB	HRA	HB	Lubrifié	Sec	
SF-2312	300	63,6	262	62,8	253	0,52	1,01	-3,5 %
SF-5	300	63,0	255	64,2	270	1,57	1,03	+ 5,5 %
SF-2000	341	63,1	256	63,2	257	0,52	0,41	+ 0,4 %
SP-300	341	64,8	280	65,5	281	1,93	2,11	+ 0,4 %
SF-2050v	352	63,7	263	65,9	295	1,69	0,41	+ 10,8 %

Les valeurs trouvées sont inférieures, dans tout les cas, aux valeurs données par le manufacturier. Cette différence n'est pas non plus égale suivant les matériaux et suivant le mode de lubrification. Par exemple, pour le SF-5, la dureté est plus faible dans le cas de l'utilisation de la lubrification, alors qu'elle est plus élevée dans le cas du SF-2312 et qu'elle est identique dans le cas du SP-300.

On ne peut pas conclure sur le changement de dureté suite à l'application ou non du lubrifiant car les données sont très écartées et aucun profil commun entre les matériaux ne ressort.

4.6 Bilan du chapitre

La durée de vie est généralement meilleure à sec. Mais cette différence dépend des matériaux car elle peut être très importantes (SF-5 et SF-2312) ou quasi nulle (SF-2000). L'élévation de la vitesse de coupe tend à faire coïncider les courbes de durée de vie de l'usinage à sec et de l'usinage lubrifié, mais aussi de faire coïncider les courbes des quatre matériaux.

Ces conclusions sont les mêmes que Vieira (Vieira, Machado et Ezugwu, 2001) et Rahman (Rahman et al., 2001; Rahman, Senthil Kumar et Salam, 2002) quand à l'avantage de l'usinage à sec en terme de durée de vie.

Lors de l'usinage avec lubrification, on observe des fissures thermiques sur les plaquettes, de l'écaillage et une fin de vie généralement catastrophique. Alors que pour l'usinage à sec, l'usure apparaît plus progressive et beaucoup moins catastrophique. On note aussi de l'arrêté rapportée surtout dans le cas de l'usinage à sec. Vieira (Vieira, Machado et Ezugwu, 2001) explique aussi que la différence entre l'usinage à sec et l'usinage avec lubrification s'explique par l'usure des outils. Il trouve lui aussi beaucoup plus de fissures thermiques dans le cas de l'usinage avec lubrification, ce qui est une des causes de l'usure plus rapide dans ce cas.

Les copeaux sont très courts et donc leur évacuation est aisée. Ils montrent également une élévation de température lors de l'usinage à sec en changeant de couleur. Cette couleur est fonction de l'usure de l'outil et de la vitesse de coupe testée.

Enfin, il aurait été intéressant de connaître les traitements thermiques subis par les différents matériaux, ainsi que la structure cristallographique, pour pouvoir apporter une meilleure interprétation aux résultats. Néanmoins, le but principal était de comparer l'usinage à sec versus l'usinage lubrifié. Cet objectif a été atteint. Cependant, on a remarqué que suivant la dureté le comportement changeait vis-à-vis de l'usinage à sec par rapport à l'usinage lubrifié.

CHAPITRE 5

QUALITÉ DES PIÈCES

Il est nécessaire de pouvoir comparer les finis de surface entre l'usinage à sec et l'usinage avec lubrification. Les paramètres de rugosité de surface pris en compte sont :

- R_a : moyenne arithmétique de toutes les ordonnées du profil à l'intérieur de la longueur de base,
- R_q : moyenne quadratique de toutes les ordonnées du profil à l'intérieur de la longueur de base,
- R_{vk} : somme de l'asymétrie de la courbe de distribution d'amplitude à l'intérieur d'une longueur de base,
- R_{sk} : représente la profondeur moyenne des creux dépassant la partie centrale du profil.

Selon l'ASME B46.1 (ANSI/ASME, 1985), la méthode la plus employée aux états unis pour désigner la qualité d'une surface est la moyenne arithmétique R_a , mais on utilise aussi la moyenne quadratique R_q . De plus selon l'ASME B46.1, le rapport R_q/R_a doit être compris entre 1,16 et 1,40 lors de fraisage.

5.1 Résultats

Les différentes mesures relevées sur les pièces après les différents essais sont fournies en ANNEXE XXIII pour l'usinage à sec et en ANNEXE XXIV pour l'usinage avec lubrification. La répétition des essais est de 5.

Les moyennes des résultats lors de l'usinage avec lubrification sont :

Tableau 5.1

Moyenne des rugosités mesurées lors de l'usinage

		R_a (μm)	R_q (μm)	R_q/R_a	R_q/R_a (ASME)	R_{vk} (μm)	R_{sk} (μm)
SF-5	Lubrifié	0,1258	0,1440	1,14	1,16–1,40	0,0866	-0,1126
	Sec	0,4250	0,5314	1,25		0,9232	-0,4724
SF-2312	Lubrifié	0,1614	0,1872	1,16	1,16–1,40	0,1514	-0,2172
	Sec	0,3054	0,3752	1,23		0,5430	-0,3982
SF-2000	Lubrifié	0,0918	0,1096	1,19	1,16–1,40	0,1028	-0,3028
	Sec	0,4080	0,5172	1,27		1,3656	-0,6562
SP-300	Lubrifié	0,2408	0,2944	1,22	1,16–1,40	0,6340	-0,4308
	Sec	0,2760	0,3330	1,21		0,6226	-0,2686
SF-2050v	Lubrifié	0,0986	0,1164	1,18	1,16–1,40	0,1162	-0,2672
	Sec	0,3292	0,4152	1,26		0,8174	-0,3910

Les différentes moyennes R_a (Figure 5.1) et R_q (Figure 5.2) sont représentées graphiquement à l'aide de Statgraphics pour permettre une meilleure comparaison entre les matériaux et entre les modes de lubrification (sec ou lubrifié). La valeur de la moyenne est donnée ainsi que l'intervalle de confiance à 95 %.

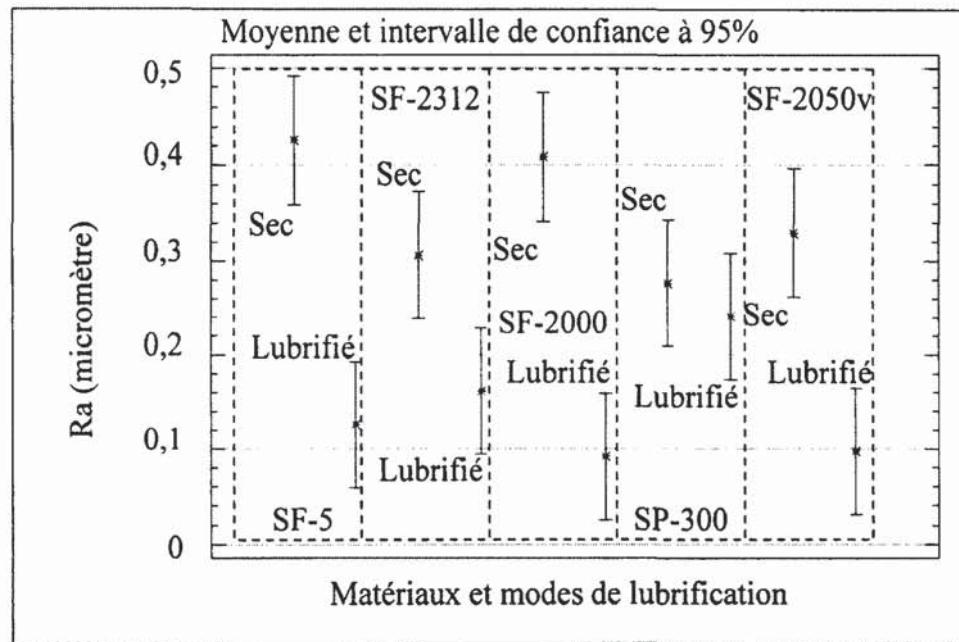


Figure 5.1 Comparatif des valeurs de rugosité R_a en fraisage.

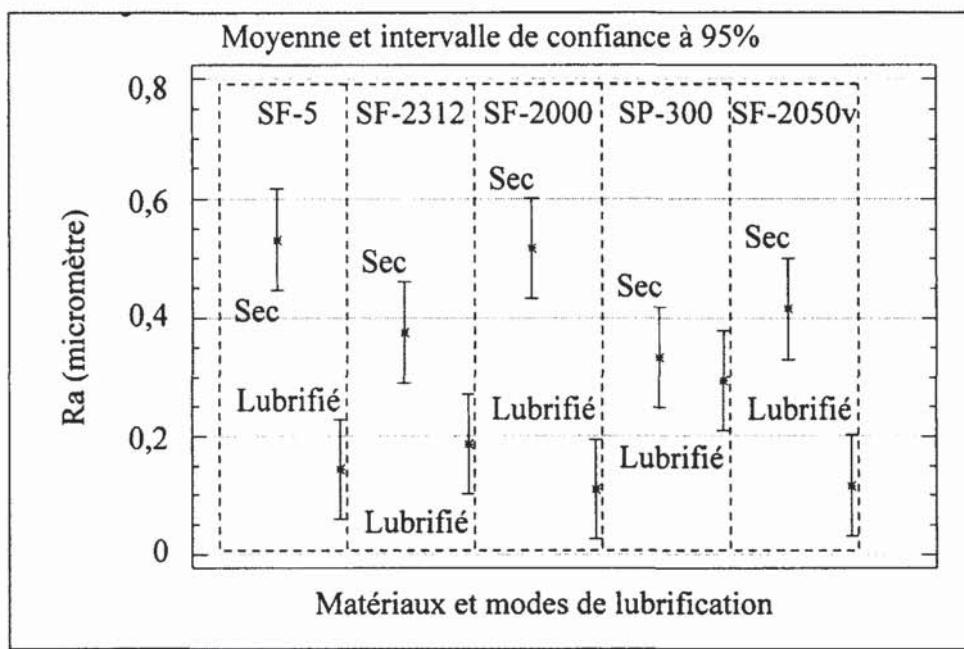


Figure 5.2 Comparatif des valeurs de rugosité R_q en fraisage.

5.2 Analyse des résultats

5.2.1 Analyse statistiques

L'analyse statistique est réalisée comme lors des tests des efforts de coupe. L'analyse statistique de R_a est fournie dans le Tableau 5.2 et celle de R_q dans le Tableau 5.3.

Tableau 5.2

Analyse statistique de la valeur de la rugosité R_a

Matériaux	Mode d'usinage	R_a (μm)	Ecart type	Pourcentage de l'erreur avec un intervalle de confiance de :	
				95%	98%
SF-5	Sec	0,4250	0,158	32,6	42,7
	Lubrifié	0,1258	0,039	27,2	35,6
SF-2312	Sec	0,3054	0,141	40,5	53,1
	Lubrifié	0,1614	0,068	36,9	48,4
SF-2000	Sec	0,4080	0,214	46,0	60,3
	Lubrifié	0,0918	0,026	24,8	32,6
SP-300	Sec	0,2760	0,050	15,9	20,8
	Lubrifié	0,2408	0,065	23,7	31,0
SF-2050v	Sec	0,3292	0,064	17,0	22,3
	Lubrifié	0,0986	0,035	31,1	40,8

Tableau 5.3
Analyse statistique de la valeur de la rugosité R_q

Matériaux	Mode d'usinage	R_q (μm)	Ecart type	Pourcentage de l'erreur avec un intervalle de confiance de :	
				95%	98%
SF-5	Sec	0,5314	0,200	33,0	43,3
	Lubrifié	0,1440	0,042	25,6	33,5
SF-2312	Sec	0,3752	0,175	40,9	53,6
	Lubrifié	0,1872	0,077	36,1	47,3
SF-2000	Sec	0,5172	0,280	47,5	62,2
	Lubrifié	0,1096	0,028	22,4	29,4
SP-300	Sec	0,3330	0,055	14,5	19,0
	Lubrifié	0,2944	0,075	22,3	29,3
SF-2050v	Sec	0,4152	0,093	19,6	25,7
	Lubrifié	0,1164	0,042	31,6	41,5

L'erreur est assez importante, mais ceci est du à un écart type très grand comparé à la moyenne relevée (cela peut aller jusqu'à 60%). Mais pour la plupart des matériaux, l'écart entre l'usinage à sec et tellement grand par rapport à l'usinage avec lubrification, que l'importance de l'erreur d'estimation n'est pas un handicap pour pouvoir conclure entre les deux modes de lubrification (comme nous pouvons le voir sur les Figure 5.1 *Comparatif des valeurs de rugosité R_a en fraisage*.Figure 5.1 et Figure 5.2).

5.2.2 Analyse des résultats

En général, l'usinage à sec produit des pièces à R_a et R_q plus élevé que l'usinage lubrifié (Figure 5.1 et Figure 5.2). Pour comparer les états de surface, nous allons utiliser le SF-2000 comme matériau de référence et ceci lors de l'usinage avec lubrification. Le comparatif sera

donné en pourcentage et donc le SF-2000 lors de l'usinage avec lubrification aura pour correspondance une valeur de 100 % dans le cas de R_a .

En usinage avec lubrification, le SF-2000 possède les meilleures caractéristiques (100%), suivi de très près par le SF-2050v (107%). Ensuite le SF-5 (137%), puis le SF-2312 (176%) suivent, pour terminer de loin par le SP-300 (262%) qui possède le pire état de surface. En usinage à sec, ceci est complètement différent. Le SP-300 possède cette fois la meilleure qualité de surface (300%). Le SF-2312 (333%) et le SF-2050v (359%) possèdent un état de surface légèrement moins bon. Par contre le SF-2000 (444%) et le SF-5 (463%) se retrouvent loin derrière. Néanmoins, compte tenu de l'écart type important, la comparaison des matériaux selon un même mode de lubrification

En général nous voyons sur la Figure 5.1 et la Figure 5.2 que les valeurs en usinage à sec sont beaucoup plus importantes (de 1,5 à 4,5 fois plus grandes) que pour l'usinage avec lubrification. De plus, le matériau possédant le meilleur état de surface en usinage avec lubrification n'est pas forcément celui qui possède le meilleur en usinage à sec.

En ce qui concerne la différence d'état de surface entre l'usinage à sec et l'usinage avec lubrification, chaque matériau se comporte différemment. L'acier SP-300 a un comportement sensiblement égal entre les deux modes d'usinage. Or, pour le SF-2312, la valeur de R_a de l'usinage à sec double presque et pour les autres matériaux, elle fait plus que tripler.

La raison du meilleur état de surface obtenue lors de l'usinage à sec pourrait s'expliquer par l'élévation de température. A cause de cette hausse, deux phénomènes se produisent : de l'arrêté rapportée sur l'outil et de la déformation plastique. Ces deux phénomènes pourraient contribuer à réduire la qualité des surfaces.

5.3 Bilan du chapitre

- Le SF-2000 a le meilleur état de surface dans les essais avec lubrification.
- Le SP-300 a le meilleur état de surface dans les essais à sec.
- Le SP-300 est le seul matériau à posséder un comportement similaire entre l'usinage à sec et l'usinage lubrifié en ce qui concerne le fini de surface.
- Les états de surface sont soit sensiblement identiques (SP300) ou pires (autres matériaux) dans le cas de l'usinage à sec.

L'utilisation de la lubrification apparaît donc nécessaire lorsqu'on réalise une passe de finition en ayant des contraintes de qualité de surface.

Ce résultat sur l'état de surface rejoint les conclusions de Rahman ((Rahman, Senthil Kumar et Salam, 2002) et (Rahman et al., 2001)) sur le fait que l'usinage avec lubrification est préférable. Par contre, ceci va à l'encontre des résultats de Vieira (Vieira, Machado et Ezugwu, 2001) qui trouvait un meilleur état de surface lors de l'usinage à sec. Il expliquait que l'usinage à sec entraîne des efforts plus faibles (résultats que nous trouvons également) et donc il émettait l'hypothèse que cela entraînait moins de vibrations ce qui jouerait sur l'état de surface. Liao (Liao et Lin, 2007) aussi trouvait que l'usinage à sec entraînait de meilleur état de surface. Pour Diniz (Diniz, Ferreira et Silveira, 2004), l'état de surface était similaire entre l'usinage avec lubrification, l'usinage à sec et le procédé MQL, mais avec un léger avantage pour l'usinage à sec. Nous retrouvons le résultat de Diniz dans le cas du SP-300.

Néanmoins, les comparaisons sont à faire avec précautions. Pour Vieira, les paramètres de coupes sont similaires, mais pour Diniz la dureté est plus élevée (481 HB), pour Rahman, l'avance est plus élevée (0,3 à 0,70 mm/dents) et pour Diniz et Liao, les vitesses de coupe sont supérieures (300 m/min pour Diniz et de 200 à 500 m/min pour Liao). De même, l'avance joue un rôle différent, d'après Vivancos (Vivancos et al., 2004), selon si on usine en avalant ou en opposition. La comparaison avec les autres auteurs semblent difficiles.

On peut simplement dire que l'état de surface est préférable avec lubrification en général pour des aciers à moules de dureté comprise entre 300 et 350 HB, pour des vitesses de coupe conventionnelles (125m/min) et une avance modérée (0,1 mm/dent).

CHAPITRE 6

COÛT D'USINAGE

Deux axes peuvent être envisagés pour étudier l'impact économique de l'usinage avec lubrifiant par rapport à celui de l'usinage à sec. Le premier axe est le plus simple. Il s'agit uniquement de comparer les éléments du modèle de coût pour lesquelles le prix lié au lubrifiant intervient. Le deuxième axe consiste à prendre en compte tout les coûts liés à l'usinage. Ce calcul est bien entendu plus complexe, mais a l'avantage de donner une autre information par rapport au premier axe. En plus de connaître la différence de coût entre l'usinage avec lubrifiant et à sec, nous connaîtrons également la proportion de cette différence sur l'ensemble des coûts. Nous allons donc nous intéresser au second axe car il donne des résultats plus complets et plus intéressants pour les industriels.

Les différentes composantes du coût à étudier sont :

- Enlèvement de métal en perçage et fraisage (en ébauche et en finition),
- Mise en route de la machine et de chargement du programme,
- Programmation sur un logiciel de FAO,
- Mise en place de l'outil,
- Coût de la pièce brute et sa prise de valeur au fur et à mesure des passes,
- Montage de la pièce,
- Achat des outils et des plaquettes en finition et en ébauche,
- Déplacements à vide de l'outil,
- Achat du lubrifiant,
- Traitement du lubrifiant pour prolonger sa durée de vie,
- Traitement du lubrifiant lorsqu'il est usé.

Nous séparons les coûts liés à l'ébauche de ceux liés à la finition car les régimes de vitesse de coupe et d'avance sont généralement différents. Nous tenons compte aussi du temps de chargement du programme, car il peut devenir important dans le cas d'usinage à l'unité. De même, le coût de programmation n'est pas négligeable, surtout si la pièce s'avère complexe et est réalisée à l'unité. Le coût de la pièce est également primordial dans le cas de pièce massive.

Pour ce qui est du coût de l'outil, nous allons considérer deux cas : l'outil monobloc ou le porte-plaquette avec plaquettes amovibles pour le fraisage. Dans le cas de l'outil monobloc, il faut tenir compte des coûts de raffûtage et dans le cas de plaquettes amovibles du changement de plaquettes durant l'usinage d'une même pièce et du coût du porte-plaquette. Pour le perçage, les coûts de raffûtage sont également tenus en compte.

L'établissement du modèle se fait en plusieurs étapes. Tout d'abord nous définissons les temps d'usinage lorsque l'outil est dans la pièce, puis les temps hors usinage (déplacement de l'outil hors de la pièce, changement d'outil...). Ensuite nous batissons le modèle de coût en étudiant les coûts d'usinage, puis les coûts annexes (pièces, outils...) et enfin les coûts liés au lubrifiant.

Il est à noter que nous souhaitons déterminer le coût d'une pièce, donc les valeurs de coût pour chaque critère étant parfois annuel, hebdomadaire ou autre, sont ramenées au prix de fabrication d'une pièce.

6.1 Établissement des temps liés à l'usinage

Pour établir les temps d'usinage, nous décomposons en deux parties : premièrement, le surfacage puis le perçage. Chacune de ces parties sera décomposée pour donner une formule pour le cas de l'ébauche et une formule pour le cas de la finition. Puis nous étudierons le cas des déplacements de l'outil hors de la matière.

6.1.1 Temps d'usinage lorsque l'outil est dans la matière en surfacage

Nous allons établir les temps d'usinage en surfacage en finition T_{ufs} et en ébauche T_{urs} . Ces temps représentent les périodes où l'outil coupe de la matière. Les temps de déplacements de l'outil hors de la matière seront traités à part. En effet, nous avons besoin de séparer ces temps pour une meilleure compréhension, mais aussi pour leur utilisation dans la formule de coût d'achat des plaquettes.

Le modèle du Machining Data Handbook (Machinability Data, 1980) est établi pour une seule passe. Nous, nous devons pouvoir calculer le temps d'usinage ou un grand nombre de passes est nécessaires. Nous allons donc écarter ce modèle pour définir nos temps d'usinage.

Maintenant regardons les autres modèles :

➤ Parent (Parent, Songmene et Kenne, 2007) :

En ébauche :

$$t_{cr} = \frac{L \times W_v \times H_v - (W_v - w_f) \times L \times a_{pf} - H_v \times L \times w_f}{w_r \times a_{pr} \times v_{fr}} \quad (6.1)$$

En finition :

$$t_{cf} = \frac{W_v \times L}{D_{fs} \times v_{ff}} \quad (6.2)$$

➤ Shunmugam (Shunmugam, Reddy et Narendran, 2000):

En ébauche :

$$t_{uf} = \frac{L_f}{Z \times f_t \times N_t} = \frac{L + D}{Z \times f_t \times N_t} \quad (6.3)$$

En finition :

$$t_{ur} = \frac{L_r}{Z \times f_t \times N_t} = \frac{L + \frac{D}{2} + \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{W_v}{2}\right)^2}}{Z \times f_t \times N_t} \quad (6.4)$$

Différents points sont à observer :

- Pour Shungman (Shunmugam, Reddy et Narendran, 2000), le temps d’usinage est calculé pour plusieurs passes dans la direction de l’axe de l’outil. Parent (Parent, Songmene et Kenne, 2007) va plus loin en tenant compte du fait que l’usinage peut nécessiter plusieurs passes dans la direction axiale de l’outil mais aussi radiale. Pour nous adaptés à un plus grand nombre de situation, nous suivrons Parent.
- Pour la méthode de modélisation d’une passe, Shungman (Shunmugam, Reddy et Narendran, 2000) utilise une somme, alors que Parent (Parent, Songmene et Kenne, 2007) lui utilise le rapport entre l’usinage total en hauteur ainsi qu’en largeur puis le divise par les profondeurs de passes radiales et axiales. Cela revient donc au même que le modèle de Shungman (Shunmugam, Reddy et Narendran, 2000) mais présenté de manière différente. Nous utiliserons la méthode de Parent qui peut être moins clair aux abords mais préférable pour une programmation.
- Dans ces deux modèles nous observons une similitude. Dans les deux cas on définit la longueur de fraisage à réalisée divisé par la vitesse d’avance (v_f ou $Z*f_t*N_t$). Nous nous utiliserons la décomposition de la vitesse d’avance par choix arbitraire.
- La longueur d’usinage est définie pour Shunmugam comme la somme de la longueur réelle à fraiser plus une longueur d’approche à la vitesse d’usinage. Parent lui considère uniquement la longueur effective de fraisage. Ici, nous nous attachons à définir le temps effectif d’usinage. Par conséquent, les distances d’approche sont à écarter. Par contre elles seront utilisées dans un autre point car elles font parties du temps d’utilisation de la machine et donc elles ont un coût.

Maintenant en ce qui concerne la longueur réelle de fraisage, pour l’ébauche chez Parent, elle est définie comme le volume à fraiser total moins le volume à fraiser en finition. On obtient donc le volume total à fraiser en ébauche. Puis il divise cette valeur par la largeur d’une passe et par la profondeur d’une passe. On obtient donc directement la somme des longueurs de chaque passe. Cette méthode est très pratique. Mais elle est prévue pour le cas d’un surfaçage où il y a une surface à dresser en finition.

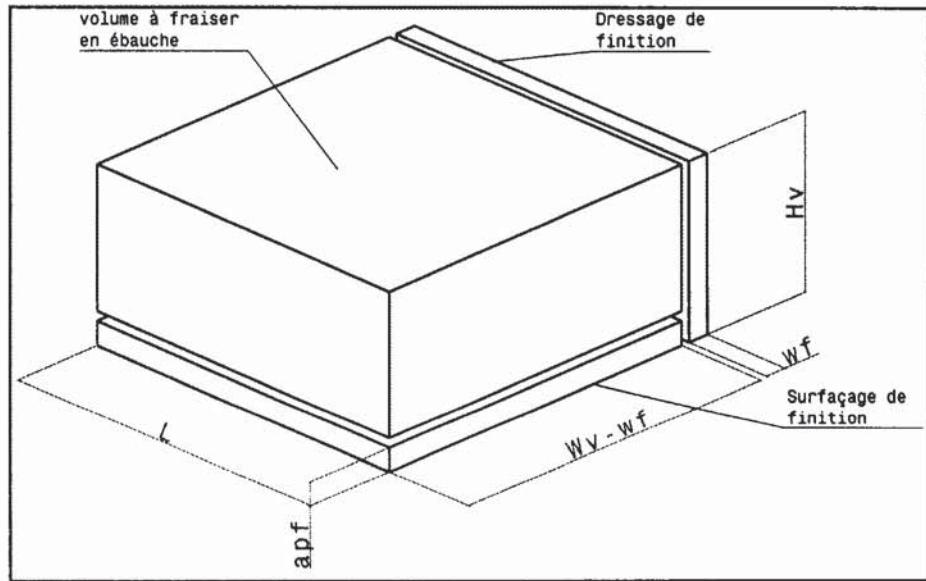


Figure 6.1 *Explication de la longueur d'usinage dans le modèle de Parent.*

Dans le cas du rainurage, il y a deux des surfaces latérales à usiner pour la finition ou dans le cas d'un simple surfaçage, il n'y en a évidemment pas. Par conséquent il est nécessaire d'introduire un paramètre N_{dres} qualifiant le nombre de surfaces latérales à réaliser.

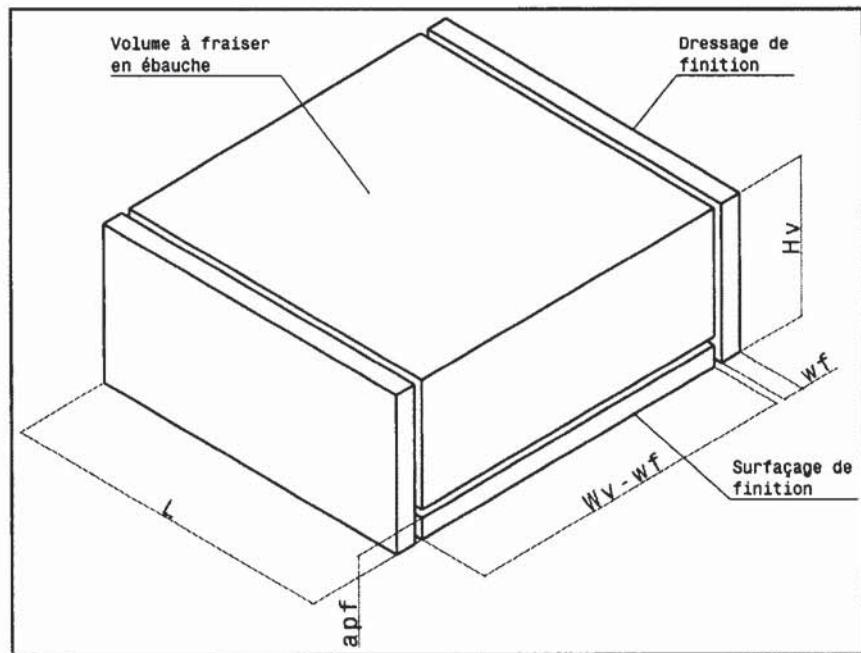


Figure 6.2 *Explication de la longueur d'usinage pour notre modèle.*

Vu les deux modèles, il s'avère que celui de Parent est le plus élaboré et facile à mettre en œuvre. Nous allons donc utiliser cette méthode pour déterminer la longueur réelle d'usinage, tandis que la méthode de Shunmugam (Shunmugam, Reddy et Narendran, 2000) sera utilisée pour la partie liée aux déplacements de l'outil hors usinage.

Le temps d'usinage en ébauche devient :

$$T_{urs} = \frac{1}{Z_{rs} \times f_{rs} \times N_{rs}} \times L \times \frac{W_v \times H_v - (W_v - N_{dres} \times w_f) \times a_{paf} - H_v \times N_{dres} \times w_f}{w_r \times a_{par}} \quad (6.5)$$

Le temps d'usinage en finition est :

$$T_{ufs} = \frac{1}{Z_{fs} \times f_{fs} \times N_{fs}} \times L \times \left(\frac{W_v}{D_{fs}} + \frac{(H_v - a_{paf}) \times N_{dres}}{a_{par}} \right) \quad (6.6)$$

6.1.2 Temps d'usinage lorsque l'outil est dans la matière en perçage

Le modèle en ébauche et en finition sont identiques et se construisent de la même manière. Ils se construisent également de la même façon que lors du fraisage. De plus EL-Hofy (El-Hofy Hassan, 2007) va aussi dans ce sens. Nous allons donc réutiliser sa formule en rajoutant un léger détail : le nombre de trou. Dans cette partie seront supprimés les temps liés à l'approche et au dépassement car on ne s'attache qu'au temps de coupe du métal parce que ce temps sera nécessaire par la suite pour calculer la durée de vie de l'outil. Les temps n'entrant pas de la coupe du métal sont traités dans une autre partie. Les formules de temps d'usinage en perçage sont :

- En ébauche :

$$T_{urp} = N_{tp} \times \frac{L_{trp}}{N_{rp} \times f_{rp} \times Z_{rp}} \quad (6.7)$$

- En finition :

$$T_{ufp} = N_{tp} \times \frac{L_{ifp}}{N_{fp} \times f_{fp} \times Z_{fp}} \quad (6.8)$$

6.1.3 Temps lorsque l'outil n'usine pas mais se déplace

Ces temps sont:

- Les déplacements de l'outil entre chaque passe à vitesse rapide,
- Les déplacements de l'outil pour l'approche à vitesse d'usinage,
- Les déplacements pour changer l'outil,
- Les déplacements de l'origine à la pièce.

Nous allons traiter les temps en perçage, puis en surfaçage et nous terminerons par le temps nécessaire aux changements d'outils.

- Formule des temps en perçage :

En ce qui concerne ceux à vitesse lente, ils sont liés aux longueurs d'approche (L_{arp} ou L_{afp}) et de dépassement (L_{drp} ou L_{dfp}) lorsque le trou est débouchant. Par contre, il va falloir tenir compte aussi du temps que va mettre l'outil à se dégager. Le dégagement se faisant toujours aux mêmes paramètres de coupe. De plus ce temps est facile à calculer, il correspond aux temps liés pour parcourir les trois longueurs que El-Hofy (El-Hofy Hassan, 2007) a présentés (longueur d'approche, du trou et de dépassement). Le temps lié à la distance parcourue par l'outil pour faire l'approche comptera double car c'est le même que celui du dégagement de l'outil. De même, le temps lié à la sortie de l'outil lorsque le trou est débouchant comptera double (l'aller et le retour).

Temps d'ébauche en perçage :

$$N_{tp} \times \frac{2 \times (L_{arp} + L_{drp}) + L_{trp}}{N_{rp} \times f_{rp} \times Z_{rp}} \quad (6.9)$$

$$L_{arp} = \frac{D_{rp}}{2} \times \cot(\chi_r) \quad (6.10)$$

Temps de finition en perçage :

$$N_{tp} \times \frac{2 \times (L_{afp} + L_{dfp}) + L_{ifp}}{N_{fp} \times f_{fp} \times Z_{fp}} \quad (6.11)$$

$$L_{afp} = \frac{D_{fp}}{2} \times \cot(\chi_f) \quad (6.12)$$

Maintenant, traitons les déplacements à vitesse rapide. Ils sont de trois types : les temps de déplacements entre deux trous et les temps entre l'origine et la pièce. Le calcul de ces temps par une formule est difficile. La seule solution est de faire une estimation.

Ce temps donc va comprendre le nombre de trous (N_{tp}) à réaliser multiplié par un coefficient correspond à un temps moyen pour parcourir la distance entre deux trous (t_{dtp}) plus un coefficient correspondant au temps pour l'aller/retour de l'outil de l'origine à la pièce (t_{dop}). Le temps total de déplacement hors usinage (sans les temps de changements d'outils) pour le perçage :

En ébauche :

$$T_{urph} = N_{tp} \times \frac{2 \times (L_{arp} + L_{drp}) + L_{trp}}{N_{rp} \times f_{rp} \times Z_{rp}} + (N_{tp} - 1) \times t_{dtp} + t_{dop} \quad (6.13)$$

En finition :

$$T_{ufph} = N_{tp} \times \frac{2 \times (L_{afp} + L_{dfp}) + L_{ifp}}{N_{fp} \times f_{fp} \times Z_{fp}} + (N_{tp} - 1) \times t_{dtp} + t_{dop} \quad (6.14)$$

- Formule des temps en fraisage.

- Dans un premier temps, comme pour le perçage, nous allons estimer les temps d'approche à vitesse d'usinage et en particulier sur la distance à parcourir à cette vitesse. Pour Parent cette distance d'usinage est négligée. Dans le modèle du Machining Data Handbook (Machinability Data, 1980), on considère que cette longueur est définie par le paramètre e . Pour Shungman (Shunmugam, Reddy et Narendran, 2000), cette longueur est plus complexe. Elle est définie comme ceci :

$$\frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{W_v}{2}\right)^2} \quad (6.15)$$

L'intérêt de faire intervenir la largeur radiale n'est pas très pertinent. Cette valeur est déterminée par l'opérateur et reste-la même. De plus, le dégagement de la matière par l'outil peut se faire de plusieurs manières suivant la pièce réalisée. Le dégagement peut se faire dans la continuité de la trajectoire, par le haut, ou par le côté. Par conséquent, nous allons considérer que la solution du Machining Data Handbook est plus judicieuse et utiliser une valeur e qui sera déterminée par l'opérateur en fonction du diamètre de l'outil et de la configuration de la pièce. Il suffit donc de diviser cette valeur e par la vitesse de coupe qui est celle d'usinage (V_{cfs} et V_{crs}).

- Pour ce qui concerne le temps de déplacement de l'origine à la pièce pour l'outil, à vitesse rapide, ce sera le même que lors du perçage (t_{dop}). Ce temps devra être multiplié par le nombre de fois ou ce trajet sera effectué : le trajet initial avec le retour final de l'outil plus le nombre de fois ou l'outil devra être changé à cause de son usure. Le rapport du temps d'usinage avec la durée de vie de l'outil nous donne le nombre de fois ou l'outil devra être changé si nous prenons la valeur entière. Nous utilisons donc la fonction $E()$ pour expliquer que nous prenons la partie entière.

- La dernière partie porte sur les trajets hors matière entre deux passes. Ce trajet est difficile à modéliser car il est particulier à chaque pièce. Le déplacement à faire tient compte de la forme usinée, des libertés qu'à l'outil pour se dégager, etc.... Par conséquent, nous allons utiliser aussi une longueur qui caractérisera le temps hors usinage (L_{hur} ou L_{huf}).

Les temps en fraisage sont :

En ébauche :

$$T_{ursh} = \frac{e}{v_{crs}} \times \frac{H_v - a_{paf}}{a_{par}} + t_{dop} \times \left[1 + E\left(\frac{T_{urs}}{t_{0rs}}\right) \right] + \frac{L_{hur}}{1000 \times V_{car}} \quad (6.16)$$

En finition :

$$T_{ufsh} = \frac{e}{v_{crs}} \times \left[\frac{W_v}{D_{fs}} + \frac{(H_v - a_{paf}) \times N_{dres}}{a_{par}} \right] + t_{dop} \times \left[1 + E\left(\frac{T_{ufs}}{t_{0fs}}\right) \right] + \frac{L_{huf}}{1000 \times V_{car}} \quad (6.17)$$

- Formules des temps de changements des outils (T_{cot})

Nous utilisons la formule de Sontie Sreeram (Sreeram et al., 2006). Nous tenons compte que les opérations d'ébauche et de fraisage peuvent nécessiter des outils différents et qu'il y a des opérations de perçage et de fraisage. Donc pour résumer, ce coût est le produit :

- Des frais généraux lié à l'utilisation de la machine car celle ci est en marche même si l'outil ne coupe pas de la matière et l'opérateur est présent (M).
- Du nombre de fois où il faudra changer l'ensemble des plaquettes.
- Du temps de changement de l'outil monobloc ou de toutes les plaquettes présentes sur l'outil (t_{cos} ou t_{cop} suivant qu'on est en surface ou en perçage). Ce temps de changement de l'outil est lié à plusieurs opérations comme le temps de positionner l'outil, l'ouverture de la porte, l'enlèvement de l'outil... Par conséquent il est plus simple de déterminer le temps l'ensemble du processus de chaque étape.

$$T_{cot} = t_{cos} \times \left(\frac{T_{urs}}{t_{0rs}} + \frac{T_{ufs}}{t_{0fs}} \right) + t_{cop} \times \left(\frac{T_{urp}}{t_{0rp}} + \frac{T_{ufp}}{t_{0fp}} \right) \quad (6.18)$$

6.2 Établissement des formules de coûts non lié aux lubrifiants

Nous séparerons les différents coûts liés à la machine ou à l'achat des outils, etc, pour permettre une meilleure compréhension.

- Le coût lié à l'utilisation de la machine (C_u) est le produit des différents temps liés à son utilisation multiplié par les frais généraux (M) (lié à la machine, à l'opérateur, au local...). Ces temps comprennent, le temps où l'outil coupe la matière, le temps où l'outil se déplace entre deux passes, les temps de changements de l'outil. Ce coût regroupe les opérations d'ébauche et de finition en surfaçage et en perçage dont les frais généraux sont identiques. Nous obtenons donc la formule suivante :

$$C_u = M \times (T_{urs} + T_{ursh} + T_{ufs} + T_{ufsh} + T_{urp} + T_{urph} + T_{ufp} + T_{ufph} + T_{cot}) \quad (6.19)$$

- Le coût lié au processus de mise en route de la machine et de chargement du programme (C_m) est lié au nombre de pièce qui seront usinées (N_l) suite au processus de mise en route de la machine, de chargement du programme et à la fin de l'arrêt total de la machine comme l'explique Parent (Parent, Songmene et Kenne, 2007). Ce coût est donc :

$$C_m = M \times \frac{t_m}{N_l} \quad (6.20)$$

- Les coûts liés au temps de programmation sur un logiciel de FAO dépendent du temps passé à programmer (t_{fao}), des frais généraux liés aux personnes et aux matériels requis pour cela (M_{fao}) et enfin du nombre de pièce de la série (N_{ser}). En effet, le prix de programmation doit être divisé de manière à être réparti sur le coût de chaque pièce. Le coût lié à la programmation est donc :

$$C_{fao} = \frac{t_{fao} \times M_{fao}}{N_{ser}} \quad (6.21)$$

- Le coût de la pièce prend en compte le prix d'achat du brut (C_b) (Parent, Songmene et Kenne, 2007).

- Le coût de mise en place de la pièce est seulement abordée dans le modèle de Parent (Parent, Songmene et Kenne, 2007). Sa formule est simple et difficilement gérable autrement. Elle correspond au produit du temps mis pour enlever et ôter la pièce plus le temps de repérer la pièce par palpation sur la machine (t_{pie}) multiplié par les frais généraux (M). Ce temps peut être déterminé par une mesure avec un chronomètre. La formule du coût est :

$$C_{pie} = M \times t_{pie} \quad (6.22)$$

6.3 Établissement des coûts d'achats des outils

Les formules de coûts d'achats des outils sont données pour chaque cas, que l'on soit en perçage ou surfaçage, que l'on soit en ébauche ou en finition ou que l'outil soit monobloc ou à plaquettes rapportées (dans le cas du surfaçage).

- Les coûts d'achat des outils en finition et en ébauche lors du surfaçage pour le cas de plaquettes amovibles :

- Machining data handbook (Machinability Data, 1980) :

$$\frac{L}{t_0} \times \frac{Z \times C_p}{N_a} \quad (6.23)$$

- Parent (Parent, Songmene et Kenne, 2007) : en ébauche puis en finition

$$\frac{C_{Pr_s} \times Z}{t_{0r} \times N_{ars}} \quad (6.24)$$

$$\frac{C_{Pfs} \times Z}{t_{0f} \times N_{afs}} \quad (6.25)$$

- Shunmugam (Shunmugam, Reddy et Narendran, 2000) : en ébauche puis en finition

$$Z \times C_p \times \frac{t_{ur}}{t_0} \quad (6.26)$$

$$Z \times C_p \times \frac{t_{uf}}{t_0} \quad (6.27)$$

Les trois formules sont assez similaires mais diffèrent par de petits détails. Pour celle tiré du Machining Data Handbook (Machinability Data, 1980), aucune différence n'est réalisée entre la finition et l'ébauche. Pour le modèle présenté par Parent (Parent, Songmene et Kenne, 2007), il est nécessaire de retirer la partie lié à l'aiguillage de l'outil car nous modélisons le cas d'utilisation de plaquettes amovibles. Pour Shunmugam (Shunmugam, Reddy et Narendran, 2000), le prix d'achat ne tient pas compte qu'une plaquette possède plusieurs arrêtes de coupe exploitable. Par conséquent si l'on tient compte de ces remarques, le nouveau modèle devrait être de la forme suivante (en ébauche puis en finition) :

$$\frac{Z_{rs} \times C_{prs} \times T_{urs}}{t_{0rs} \times N_{ars}} \quad (6.28)$$

$$\frac{Z_{fs} \times C_{pfs} \times T_{ufs}}{t_{0fs} \times N_{afs}} \quad (6.29)$$

Le coût d'usinage d'une pièce est donc lié proportionnellement au prix d'achat des plaquettes (C_{prs} ou C_{pfs}), du nombre de dents présentes sur l'outil (Z_{prs} ou Z_{pfs}) et du temps d'usinage nécessaire (T_{urs} ou T_{ufs}). Il est inversement proportionnel à la durée de vie d'une plaquette (t_{0rs} ou t_{0fs}). Ainsi en divisant le temps d'usinage par la durée de vie, on obtient le nombre de fois où il est nécessaire de changer les plaquettes pour réaliser notre pièce. Puis, ce coût est également inversement proportionnel au nombre d'arrêtes de coupe (N_{ars} ou N_{afs}) présentes sur l'outil car il faut ramener le prix d'achat d'une plaquette au prix par arrête. Puis à ce coût, il est nécessaire de rajouter le prix d'achat du porte-plaquette (C_{pp}). Ce prix est rapporté au nombre d'heure d'utilisation du porte-plaquette pour usiner une pièce en

faisant le rapport du temps d'usinage d'une pièce (T_{urs} ou T_{ufs}) par la durée de vie du porte plaquette (t_{0ppr} ou t_{0ppf}). Le coût total dans le cas d'outil avec plaquettes rapportées en surfaçage est :

Ébauche :

$$C_{aors} = \frac{Z_{rs} \times C_{prs} \times T_{urs}}{t_{0rs} \times N_{ars}} + \frac{T_{urs} \times C_{appr}}{t_{0ppr}} \quad (6.30)$$

Finition :

$$C_{aofs} = \frac{Z_{fs} \times C_{pfs} \times T_{ufs}}{t_{0fs} \times N_{afs}} + \frac{T_{ufs} \times C_{appf}}{t_{0ppf}} \quad (6.31)$$

- Les coûts d'achat des outils en finition et en ébauche lors du surfaçage pour le cas d'outils monoblocs

Ce coût d'achat dépend de son achat mais aussi du coût d'aiguiseage et de réglage des paramètres de l'outil ((Parent, Songmene et Kenne, 2007) et (Machinability Data, 1980)). Le coût d'achat est défini comme le coût d'achat de l'outil monobloc (C_{ombr} ou C_{ombf}) multiplié par un coefficient reportant ce prix de façon équitable sur chaque pièce. Ce coefficient est le rapport du temps d'usinage (T_{urp}) divisé par la durée de vie entre chaque aiguiseage (t_{0rs}). On obtient donc le nombre de fois où il faut aiguise l'outil pour réaliser notre pièce. Puis on divise ce temps par le nombre de fois où l'outil peut être aiguisé (N_{armb} ou N_{afmb}). Par conséquent, si ce coefficient est inférieur à un, c'est que l'outil est encore utilisable, donc il faudra imputer qu'une partie de son prix sur notre pièce, le reste étant sur une autre pièce. S'il est supérieur, c'est que nous aurons du utiliser plusieurs outils dont le dernier n'est pas forcément complètement usé aussi.

Le coût d'aiguiseage est le produit du prix lié à l'aiguiseage même (meule, opérateurs...) (C_{aig}) multiplié par le nombre de fois où il doit être aiguisé. Ce nombre est le rapport du temps d'usinage total en perçage (T_{urp}) que l'on divise par la durée de vie de l'outil entre chaque aiguiseage (t_{0rs}).

Le Machining Data Handbook (Machinability Data, 1980) incorpore dans le coût le temps de réglage des paramètres de l'outil au département de ré affûtage. En effet, après chaque aiguiseage de celui-ci, il est nécessaire de définir les paramètres de l'outil pour pouvoir les corriger dans la machine outil. Ce coût dépend du temps de réglage que l'on va noter t_{reg} multiplié par les frais lié M_{reg} (les appareils de mesure, l'opérateur...), multiplié par le nombre de fois ou il aura fallu aiguiser l'outil pour la pièce.

Le coût total (achat, aiguiseage et affûtage) devient donc :

En ébauche :

$$C_{aors} = \frac{T_{urs}}{t_{0rs}} \times (C_{aig} + \frac{1}{N_{armb}} \times C_{ombr} + t_{reg} \times M_{reg}) \quad (6.32)$$

En finition :

$$C_{aofx} = \frac{T_{ufs}}{t_{0fx}} \times (C_{aig} + \frac{1}{N_{afmb}} \times C_{ombf} + t_{reg} \times M_{reg}) \quad (6.33)$$

- Les coûts d'achat des outils en finition et en ébauche lors du perçage

Ces coûts sont similaires à ceux des outils monobloc pour le fraisage. Nous allons donc nous en inspirer pour déterminer nos formules.

En ébauche :

$$C_{aorp} = \frac{T_{urp}}{t_{0rp}} \times (C_{aig} + \frac{1}{N_{arp}} \times C_{ombr} + t_{regp} \times M_{reg}) \quad (6.34)$$

En finition :

$$C_{aofp} = \frac{T_{ufp}}{t_{0fp}} \times (C_{aig} + \frac{1}{N_{afp}} \times C_{ombf} + t_{regp} \times M_{reg}) \quad (6.35)$$

6.4 Établissement des coûts liés au lubrifiant

Ce coût se divise en trois : l'achat du lubrifiant, le traitement du lubrifiant pour prolonger sa durée de vie, le traitement du lubrifiant lorsqu'il est usagé.

- Le coût d'achat du lubrifiant :

La formule suivante est celle donnée par Nicolaou (Nicolaou, Thurston et Carnahan, 2002) :

$$V_{sys} \times OC \times C_{fl} \times N_{sys} + C_{per} \times 52 \quad (6.36)$$

Nous la conserverons quasiment telle quelle pour deux raisons. Premièrement, elle prend bien en compte le coût de changement du lubrifiant dans la machine et les pertes (sur les copeaux, les pièces...). Deuxièmement, il est difficile de quantifier le coût pour la réalisation d'une pièce. La seule méthode possible étant de déterminer les dépenses en achat de lubrifiant pour une année comme le présente Nicolaou puis de ramener cette dépense à notre pièce. Nous changerons la valeur de semaines de 52 par le chiffre 52,176, qui correspond à une meilleure moyenne (sur 4 ans) du nombre de semaines par an. De plus, nous changerons la formulation du coût en lubrifiant rajouté par semaine (C_{per}) en la décomposant par la quantité de fluide rajouté fois le prix du fluide car c'est ce produit que l'on fait pour obtenir le coût C_{per} au final. La formulation de C_{sys} devient donc :

$$C_{sys} = (V_{sys} \times OC \times N_{sys} + V_{per} \times 52,176) \times C_{fl} \quad (6.37)$$

Nous ramenons ensuite ce coût par année à un prix journalier en divisant par le nombre de jour moyen par an : 260,8 (calculer sur une base de 4 ans). Ensuite nous divisons par le temps où la machine peut être utilisée par jour (T_{umj}), moins le temps nécessaire par jour pour l'allumer et l'éteindre (T_m), pour avoir ce prix par heure d'utilisation de la machine, puis par 60 pour l'avoir à la minute. Puis nous multiplions par les temps pendant lesquelles nous utilisons la machine : les temps d'enlèvement de la matière et de déplacement et de changement d'outil. En effet, nous ramenons le coût annuel à la minute sans distinction de

l'utilisation que l'on fait de la machine : si l'on usine, ou si l'on met la pièce en place ou si l'outil se déplace sans usiner, etc. Nous faisons une moyenne sur chaque pièce usinée dans l'année en partant du principe que dès qu'on réalise une pièce, on a la même proportion de temps où la pompe de projection du fluide de coupe est mise en marche par rapport aux temps d'usinage complet. Nous multiplierons donc notre coût annuel C_{sys} par :

$$T_{lub} = \frac{1}{260,8 \times 60} \times \frac{T_{urs} + T_{ursh} + T_{ufs} + T_{ufsh} + T_{urp} + T_{urph} + T_{ufp} + T_{ufph} + T_{cot} + T_{pie}}{T_{umj} - T_m / 60} \quad (6.38)$$

- Le coût de traitement du lubrifiant pour prolonger sa durée de vie :

Nicolaou (Nicolaou, Thurston et Carnahan, 2002) présente trois façons de prolonger la durée de vie des lubrifiants : la filtration par gravité, la sédimentation et la centrifugation-pasteurisation. Nous choisirons la filtration par gravité. Le choix du procédé de traitement est subjectif. Il dépend des industries les plus proches traitant les fluides tels que les liquides de coupe et par conséquent des systèmes qu'ils possèdent. Nous ne donnerons que la formule de coût pour la filtration, les autres pouvant être trouvées dans l'article de Nicolaou :

$$C_{fg} = 300 \times \left(\frac{A_{fg}}{10} \right)^{0,69} \quad (6.39)$$

Ce coût est en dollar par an. Nous devons le ramener à l'usinage de notre pièce. Il faut donc multiplier par T_{lub} (6.38) comme dans le cas de l'achat du lubrifiant.

- Le coût de traitement du lubrifiant lorsqu'il est usagé :

Nous utiliserons les trois séquences définies par Nicolaou (Nicolaou, Thurston et Carnahan, 2002) pour optimiser le nettoyage des lubrifiants et éviter au maximum les rejets toxique pour l'environnement et l'homme. Chaque formule pour chaque type de traitement sera définie par une première partie liée à l'appareil de traitement et au personnel, puis une autre lié aux frais énergétiques. Pour avoir un meilleur processus de traitement, nous devons utiliser au moins un système de traitement par séquence, donc trois traitements. De même que pour la partie précédente, nous ne fournirons que les formules des traitements utilisés.

Première séquence de traitement, deux procédés : la sédimentation ou la séparation de l'huile par gravité. Nous opterons pour la séparation de l'huile par gravité. Ce coût se décompose par le prix de traitement du lubrifiant donné par $0,23 \times Q_{shg} + 1,346$, plus le coût énergétique quotidien $(0,052 \times Q_{shg} + 2,6) \times C_{kWh}$. Nous ramenons le coût énergétique par an pour pouvoir avec l'intégrer avec le prix du traitement. Ainsi nous aurons le coût annuel total du système de séparation de l'huile par gravité au débit Q_{shg} . Puis nous divisons par le nombre de jour par an pour obtenir le coût journalier. Ensuite, nous multiplions par le rapport de la quantité de fluide utilisé par le débit Q_{shg} . Nous aurons donc le coût engendré pour traiter une certaine quantité de liquide de coupe. Il reste à multiplier ce coût par la quantité de liquide utilisée pour réaliser une pièce. Pour cela on utilise la formule d'achat du lubrifiant pour mesurer la quantité de fluide nécessaire ainsi que le temps T_{lub} (6.38) Le rapport 1000 est pour transformer des litres en mètre cube. Le coût de traitement sera donc le produit de T_{lub} et de celui-ci :

$$C_{shg} = \frac{[0,23 \times Q_{shg} + 1,346] + [(0,052 \times Q_{shg} + 2,6) \times 260,8 \times C_{kWh}]}{260,8 \times Q_{shg}} \times \frac{V_{sys} \times OC \times N_{sys} + V_{per} \times 52,176}{1000} \quad (6.40)$$

- Deuxième séquence de traitement, deux procédés : la flottation par insufflation d'air ou l'ultrafiltration. Nous choisirons la flottation et comme pour le cas de la séparation de l'huile par gravité, nous ramènerons ce coût annuel au coût par pièce.

$$C_{fpa} = \frac{[34 \times Q_{fpa} + 134,6] + [(0,198 \times Q_{fpa} + 5,28) \times 260,8 \times C_{kWh}]}{260,8 * Q_{fpa}} \times \frac{V_{sys} \times OC \times N_{sys} + V_{per} \times 52.176}{1000} \quad (6.41)$$

- Troisième séquence de traitement : un seul procédé, l'absorption du carbone (Nicolaou, Thurston et Carnahan, 2002). Comme pour le cas de la filtration par gravité, nous devrons multiplier ce coût par la fraction annuelle d'utilisation du lubrifiant (T_{lub}) :

$$C_{abs} = [-0,26 \times V_{abs}^2 + 19,59 \times V_{abs} + 294,12] + [(0,564 \times V_{abs} + 4,75) \times 260,8 \times C_{kWh}] \quad (6.42)$$

6.5 Frais généraux

Ces frais sont ce que nous avons appelé précédemment M dans nos formules. Nous allons utiliser le modèle établi dans les techniques de l'ingénieur (P. Duverlie, 1999). Cette formule prend en compte plusieurs choses :

- Les frais de réparation et d'entretien de la machine : c'est le rapport de ce coût (F_{re}) par an divisé par le nombre d'heures d'utilisation par année (N_{han}) de la machine et ramené ensuite à la minute. On obtient donc le prix de ces frais lorsqu'on utilise la machine une minute.
- Les frais liés à l'occupation au sol de la machine : en effet, le bâtiment où se situe la machine engendre des frais qui doivent être répercutés sur le coût d'utilisation de la machine et donc des pièces réalisées grâce à elle. Ce coût est tout simplement le produit de la surface occupée par la machine (S_m) multiplié par les frais au mètre carré et par an. Ensuite il suffit de ramener ce coût à la minute d'utilisation de la machine.

- Les frais de consommation électrique : c'est le produit de la puissance de la machine (P_m) par le coût du kilowatt par heure (C_{kwh}) mais aussi d'un coefficient (M_{pui}) qui traduit le besoin en puissance max de la machine. En effet, pour réaliser notre pièce, nous pourrions n'avoir besoin que de 50% de la puissance maximale de la machine. Or en modélisant le coût énergétique par la puissance maximale de la machine, nous surévaluerons cette consommation.
- L'amortissement de la machine : il faut tenir compte ici du prix d'achat de la machine (P_m), des années prévues pour l'amortir (A_m) et du taux d'intérêts (i).
- Le salaire brut par heure d'un employé (S_b) fois le coefficient de charges patronales (CP).

La formule pour calculer les frais généraux de la machine est donc :

$$M = \left(\frac{F_{re} + F_{loc} \times S_m}{N_{han}} + M_{pui} \times C_{kwh} \times P_m + CP \times S_b + \frac{P_{am}}{N_{han} \times A_m} + \frac{P_{am} \times i}{2 \times N_{han}} \right) \times \frac{1}{60} \quad (6.43)$$

Pour les frais généraux liés à la programmation sous FAO, nous allons adapter la formule des frais lié à la machine. Ces frais sont liés au coût de l'employé :

$$M_{fao} = CP \times S_b \quad (6.44)$$

6.6 Modèle final

Maintenant que tous les points du modèle sont définis, il suffit de rassembler les différents coûts pour obtenir le coût final U :

$$U = \left(C_u + C_m + C_{fao} + C_{pie} + C_b \right) + \left(C_{aors} + C_{aofs} + C_{aorp} + C_{aofp} \right) + \left(C_{sys} + C_{fg} + C_{abs} + C_{shg} + C_{fpa} \right) \times T_{lub} \quad (6.45)$$

Avec :

- C_u (6.19) : coût d'usinage lorsque l'outil se déplace,
- C_m (6.20) : coût de mise en route de la machine,
- C_{fao} (6.21) et (6.44) : coût de programmation sous FAO,
- C_{pie} (6.22) : coût de mise en place de la pièce,
- C_b : coût d'achat de la pièce brute,
- C_{aors} ((6.30) ou (6.32)) et C_{aofs} ((6.31) ou (6.33)) : coût d'achat des outils en surfaçage,
- C_{aorp} (6.34) et C_{aofp} (6.35) : coût d'achat des outils en perçage,
- C_{sys} (6.37) : coût d'achat du lubrifiant,
- T_{lub} (6.38) : temps d'utilisation du fluide de coupe lors de l'usinage de notre pièce,
- C_{fg} (6.39) : coût de filtration par gravité du fluide,
- C_{shg} (6.40) : coût de séparation de l'huile par gravité,
- C_{fpa} (6.41) : coût de filtration par insufflation d'air,
- C_{abs} (6.42) : coût d'absorption du carbone.

6.7 Calcul du coût dans un cas précis

6.7.1 Simplification du modèle

Pour simplifier notre modèle, nous allons nous placer dans le cas d'un fraisage simple à réaliser en ébauche. Aucun travail de finition en fraisage, ni de perçage ne sera tenu en compte. Les outils utilisés seront à plaquettes rapportées. Nous utiliserons les modèles de durée de vie trouvée sur les matériaux étudiés dans les parties précédentes. Par conséquent, certaines parties de la formule deviennent nul comme C_{aofs} , C_{aorp} et C_{aofp} . La pièce à usiner sera un simple bloc ou aucun problème de dégagement de l'outil ne sera présent.

Le coût total (6.45) devient donc :

$$U = C_u + C_m + C_{fao} + C_{pie} + C_b + C_{aors} + (C_{sys} + C_{fg} + C_{abs} + C_{shg} + C_{fpa}) \times T_{lub} \quad (6.46)$$

De même l'équation (6.5) donnant T_{urs} , l'équation (6.16) donnant T_{ursh} , l'équation (6.19) donnant C_u , l'équation (6.18) donnant T_{cot} et l'équation (6.38) donnant T_{lub} se simplifie aussi comme cela :

$$C_u = M \times (T_{urs} + T_{ursh} + T_{cot}) \quad (6.47)$$

$$T_{lub} = \frac{1}{260,8 \times 60} \times \frac{T_{urs} + T_{ursh} + T_{cot} + T_{pie}}{T_{umj} - T_m} \quad (6.48)$$

$$T_{cot} = t_{cos} \times \frac{T_{urs}}{t_{0rs}} \quad (6.49)$$

$$T_{urs} = \frac{1}{Z_{rs} \times f_{rs} \times N_{rs}} \times L \times \frac{W_v \times H_v}{w_r \times a_{par}} \quad (6.50)$$

$$T_{ursh} = \frac{e}{v_{crs}} \times \frac{H_v}{a_{par}} + t_{dop} \times \left[1 + E \left(\frac{T_{urs}}{t_{0rs}} \right) \right] + \frac{L_{hur}}{1000 \times V_{car}} \quad (6.51)$$

D'où en remplaçant dans l'équation (6.46) :

$$\begin{aligned}
 U = & M \times \left(T_{urs} + T_{ursh} + t_{cos} \times \frac{T_{urs}}{t_{0rs}} + t_m + \frac{t_{pie}}{N_l} \right) + C_b + \frac{t_{fao} \times CP \times S_b}{N_{ser}} + \\
 & \left(\frac{Z_r \times C_{prs} \times T_{urs}}{t_{0rs} \times N_{ars}} + \frac{T_{urs} \times C_{appr}}{t_{0ppr}} \right) + \\
 & \left(C_{sys} + C_{fg} + C_{abs} + C_{shg} + C_{fpa} \right) \times \frac{T_{urs} + T_{ursh} + t_{cos} \times T_{urs} / t_{0rs} + T_{pie}}{260,8 \times 60 \times (T_{umj} - T_m)}
 \end{aligned} \tag{6.52}$$

Avec :

- M (6.43) : le taux horaires correspondant aux frais d'usinage,
- C_{sys} (6.37) : le prix de revient du lubrifiant à la minute,
- T_{urs} (6.50) : le temps d'usinage en ébauche lors du fraisage de la pièce,
- T_{ursh} (6.51) : le temps hors usinage lié aux opérations d'ébauche en fraisage,
- C_{fg} (6.39) : le coût du traitement par filtration par gravité,
- C_{shg} (6.40) : le coût de traitement par sédimentation,
- C_{fpa} (6.41) : le coût de séparation de l'huile par gravité,
- C_{abs} (6.42) : le coût d'absorption du carbone.

Ensuite pour estimer en pourcentage la différence entre le cas de l'usinage à sec et l'usinage lubrifié, nous ferons le calcul suivant :

$$\Delta_{coût} = \frac{U_{Lub} - U_{sec}}{U_{Lub}} \times 100 \tag{6.53}$$

La différence des deux coûts devient :

$$\begin{aligned}
 U_{lub} - U_{sec} = & M \times t_{cos} \times T_{urs} \times \left(\frac{1}{t_{0rs,lub}} - \frac{1}{t_{0rs,sec}} \right) + \frac{Z_r \times C_{prs} \times T_{urs}}{N_{ars}} \left(\frac{1}{t_{0rs,lub}} - \frac{1}{t_{0rs,sec}} \right) \\
 & + \left(C_{sys} + C_{fg} + C_{abs} + C_{shg} + C_{fpa} \right) \times \frac{T_{urs} + T_{ursh} + t_{cos} \times T_{urs} (1/t_{0rs,lub} - 1/t_{0rs,sec})}{260,8 \times 60 \times (T_{umj} - T_m)}
 \end{aligned} \tag{6.54}$$

6.7.2 Valeurs numériques

Il faut définir les valeurs que l'on donnera à tous nos paramètres. Pour cela nous allons utiliser les résultats et les conditions de coupe de nos essais.

Les valeurs des paramètres liés à l'usinage :

- Avance (f_{rs}) : 0,1016 mm/dent,
- Diamètre de la fraise (D_{rs}) ; 38,1 mm,
- Vitesse de coupe (V_{crs}) : 75 à 200 m/min (la durée de vie étant nulle au dessus de 200 m/min, nous ne dépasserons pas cette valeur pour la comparaison),
- Vitesse de rotation (N_{rs}) :
$$\frac{V_{crs} \times 1000}{\pi \times D_{rs}},$$
- Vitesse lors des déplacements rapide (V_{car}) : 36 m/min (vitesse maximal possible par la NEXUS),
- Profondeur de passe axiale (a_{par}) : 2,5 mm,
- Profondeur de passe radiale (w_r) : 12,7 mm,
- Durée de vie de l'outil (t_{0rs}) : voir le Tableau 4.3 et le Tableau 4.4,
- Longueur de dégagement de l'outil (e) : 40 mm (supérieure au diamètre de la fraise).

Les différents temps :

- Temps de déplacement de l'outil à sa position d'origine (t_{dop}) : 1/60 min,
- Longueur parcourue par l'outil entre les passes (L_{hur}) : 6450 mm,
- Temps de changement d'un outil (t_{cos}) : 30 s,
- Temps de préparation de la machine (t_m) : 35 min (établit approximativement lors des essais réalisé avec la Nexus),
- Temps de préparation de la pièce (t_{pie}) : 30 min,
- Temps de programmation sous FAO (t_{fao}) : 60 min,
- Temps d'utilisation de la machine par jour (T_{umj}) : 8 heures,
- Durée de vie du porte-plaquette (t_{0ppr}) : 50 000 min (soit environ 105 jours).

Les paramètres liés aux outils de coupe :

- Coûts d'achat d'une plaquette (C_{prs}) : 15 \$ 35 (pour les plaquettes utilisées lors de nos essais),
- Coûts d'achat du porte-plaquette (C_{appr}) : 300 \$,
- Nombre d'arêtes de coupe sur la plaquette (N_{ars}) : 2,
- Nombre de plaquettes sur le porte-plaquette (Z_{rs}) : 2.

Les paramètres liés au lubrifiant :

- Le volume du système de stockage du lubrifiant (V_{sys}) : 1000 L,
- La concentration en huile dans le fluide de coupe (OC) : 0,96 (le Blasocut 2000 ne contient que 4% d'eau),
- Le prix du fluide de coupe (C_{fl}) : 2053 \$ pour un fût de 207 L, soit 9,92 \$/L (Miauton),
- Le nombre de fois où l'on doit changer le fluide de coupe par an (N_{sys}) : 4 fois,
- Le volume en lubrifiant rajouté pour combler les pertes (V_{per}) : 20 L/semaine,
- La surface du système de filtration par gravité (A_{fg}) : 50 m²,
- Le débit du système de séparation de l'huile par gravité (Q_{shg}) : 4000 m³/jour,
- Le débit de filtration par insufflation d'air (Q_{fpa}) : 2000 m³/jour,
- Le volume du système d'absorption du carbone (V_{abs}) : 2000 m³.

Les dimensions de la pièce que nous allons usiner :

- La longueur à usiner totale (L) : 500 mm,
- La largeur totale (W_v) : 600 mm,
- La hauteur totale (H_v) : 20 mm.

Les autres paramètres :

- Les frais de réparations et d'entretiens (F_{re}) : ce prix évoluera avec l'âge de la machine, mais sur une moyenne de 5 ans en milieu industriel, nous pouvons dire que ce coût tourne autour de 10 000\$/an,

- Le nombre d'heures d'utilisation de la machine par an (N_{han}) : raison de 8 heures par jour, pour 5 jours par semaine, avec une moyenne de 52.176 semaines par ans, on trouve environ 2087 heures par an d'utilisation de la machine,
- La surface occupée par la machine (S_m) : 20 m²,
- Les frais liés au local (F_{loc}) : \$.m⁻².an⁻¹,
- La puissance maximale de la machine (P_m) : 18,5 kW,
- Le pourcentage d'utilisation en puissance de la machine (M_{pui}) : 0,6,
- Le coût du kilowatt heure (C_{kwh}) : pour Montréal, les prix en avril 2007 pour avoir un ordre de grandeur sont les suivant : 9,79 c\$ pour une consommation de 10 000 kWh, 12,18 c\$ pour 100 000 kWh (Hydro-Québec, 2007). Nous prendrons donc un coût de 11 c\$ environ pour nos calculs,
- Le salaire brut de l'employé (Sb) : 15 \$/h,
- Les charges patronales liées à ce salaire brut (CP) : 0,5 (soit 50% du salaire brut),
- Le prix d'achat de la machine (P_{am}) : 350 000 \$,
- Le nombre d'année nécessaire à l'amortissement de la machine (A_m) : 10 ans,
- Le taux d'intérêts (i) : 0,05,
- Nombres de pièces que l'on réalisera dans la série (N_{ser}) : 1,
- Le coût de la pièce brut (C_b) : un brut de 2m*3m*2m coute dans les 70 000 \$, donc nous allons partir sur l'achat d'un brut de 6 000 \$.

La valeur de la distance parcourue entre les passes à été calculée comme ceci :

$$\left[2 \times h + \sqrt{(48 \times w_r)^2 + (L + 2 \times e)^2} \right] \times 7 \approx 6450$$

Avec :

- h : le dégagement vertical de 40 mm,
- e : le dégagement horizontal de 40 mm,
- 48 : le nombre de passes sur la largeur à réaliser dans notre cas,
- 7 : le nombre de passes sur la hauteur à réaliser dans notre cas,

Le schéma suivant expliquera les déplacements de l'outil :

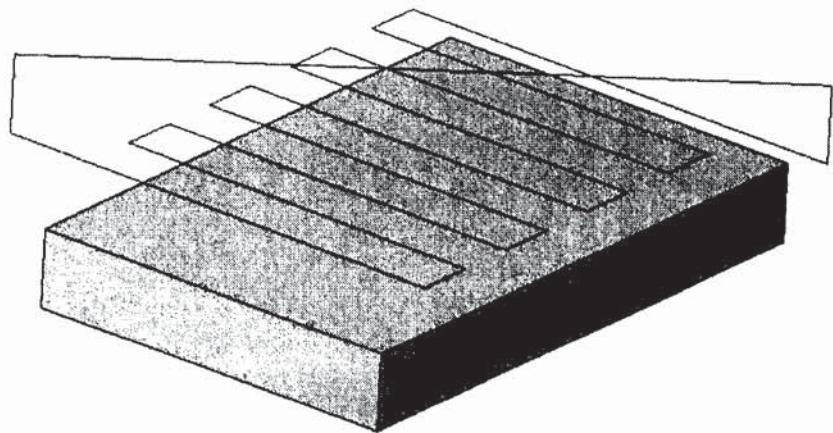


Figure 6.3 : Déplacement de l'outil pour le calcul de coût.

6.7.3 Résultats

Voici les résultats avec les données définies précédemment :

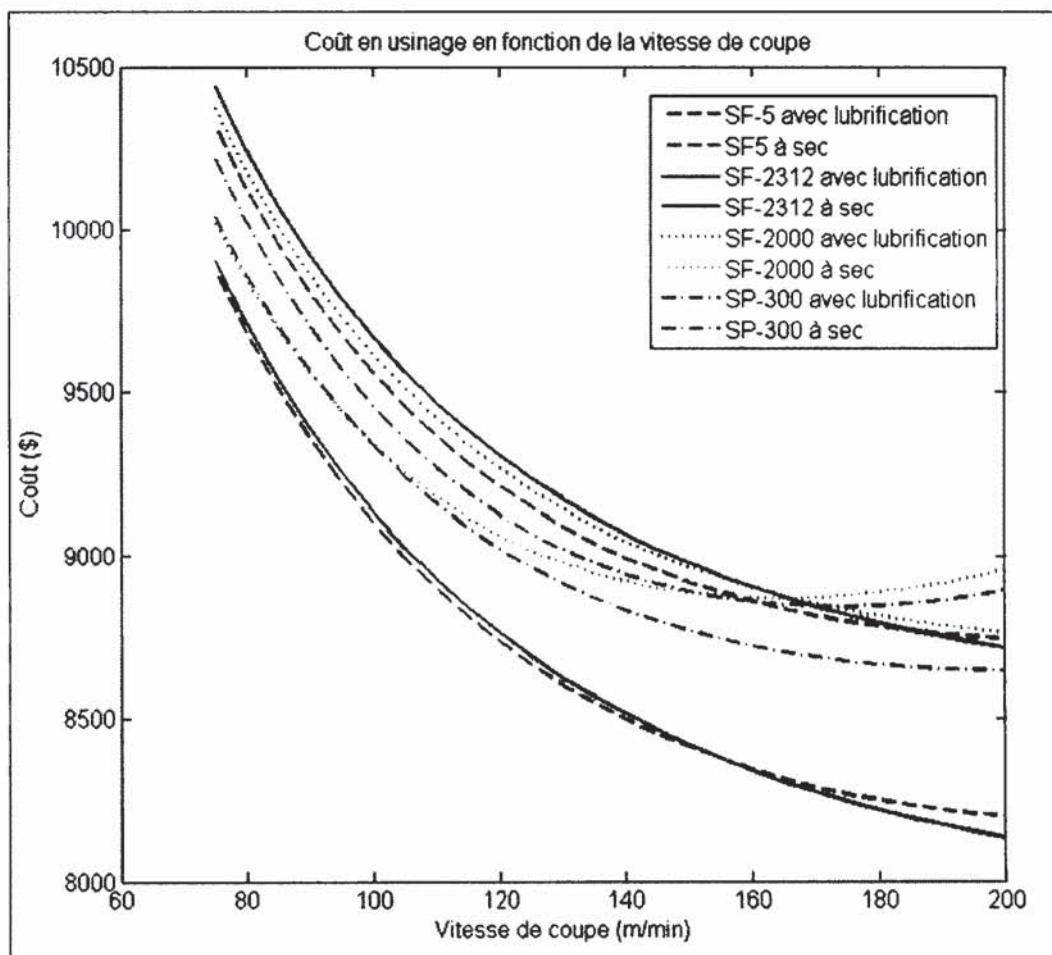


Figure 6.4 *Coût total des deux modes de lubrification.*

La différence de coût entre les deux ($\Delta_{\text{coût}}$) varie entre -2,2% dans le cas du SF-2000 à 200m/min jusqu'à 6,6% pour le SF-2312 à 200m/min. La valeur de $\Delta_{\text{coût}}$ n'est donc pas grande comparé aux 16-17% (Klocke et Eisenblaetter, 1997) et (Weinert et al., 2004)). Mais ceci peut s'expliquer dans notre cas. Nous usinons des moules, or ceci entraîne de grosse quantité de matières à enlever et une pièce brute relativement cher dû à son volume. Tout ceci entraîne une augmentation totale du coût de la pièce qui dépasse les 8000 dollars. Pour cette raison la différence de coût est plus faible, mais la valeur en dollar de cette

différence reste élevée : entre 550 et 600 dollars. Par contre si on retire la valeur de la pièce brute et que l'on se concentre uniquement sur l'usinage en lui-même, la différence de coût est comprise entre -6,9 % (pour le SF-2000 à 75 m/min) et 21,3 % (pour le SF-2312 à 200 m/min). L'impact du coût de la pièce brute apparaît donc très nettement. On retrouve aussi des valeurs approchant les résultats de Klocke (Klocke et Eisenblaetter, 1997) et Weinert (Weinert et al., 2004). Cette différence est présentée dans le Tableau 6.1 pour chaque matériau et graphiquement dans la Figure 6.5 (dans le cas où C_b n'est pas pris en compte).

Tableau 6.1

Différence de coût entre les deux modes de lubrification

Matériaux	$\Delta_{\text{coût}} (\%)$ avec $C_b = 0 \$$	$\Delta_{\text{coût}} (\%)$ avec $C_b = 6000 \$$
SF-5	10,4 à 19,7	4,3 à 6,2
SF-2312	12,1 à 21,3	5,1 à 6,6
SF-2000	8,1 à -6,9	3,4 à -2,2
SP-300	4,2 à 8,4	1,7 à 2,7

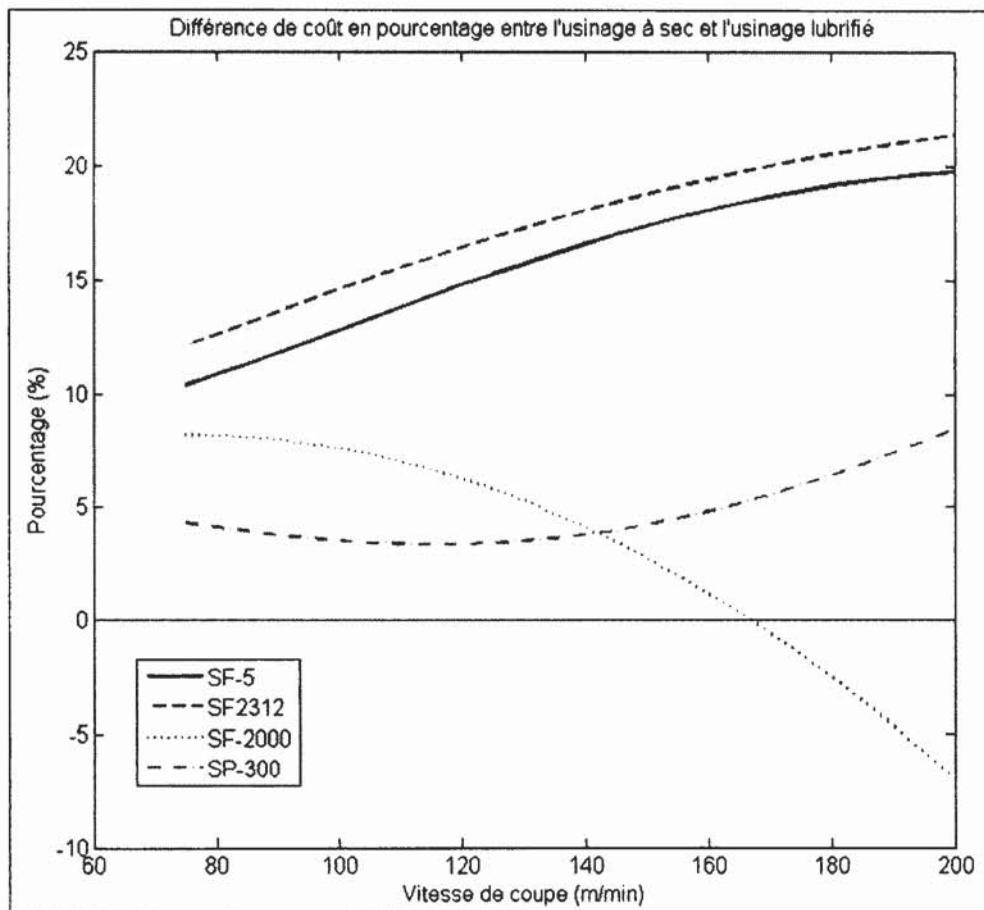


Figure 6.5 Pourcentage de la différence de coût total entre les deux modes de lubrification quand le prix du brut n'est pas pris en compte.

La Figure 6.5 présente la variation du coût entre l'usinage lubrifié et l'usinage à sec (6.54). Un pourcentage positif indique que l'usinage à sec est moins cher que l'usinage lubrifié. Pour les matériaux SF-5 et SF-2312, l'usinage à sec est préférable quelque soit la vitesse de coupe utilisée. Mais plus cette vitesse de coupe augmente, plus le coût diminue. De plus les valeurs obtenues de $\Delta_{\text{coût}}$ se situent au alentour des valeurs de Klocke (Klocke et Eisenblaetter, 1997) et Weinert (Weinert et al., 2004).

Par contre pour les deux autres matériaux l'avantage de l'usinage à sec est moins importante (SP-300) voir nul (SF-2000). Pour le SP-300, l'usinage à sec est préférable quelque soit la vitesse de coupe mais cet avantage est deux fois plus faible que pour le SF-5 et le SF-2312 et est donc loin des valeurs donné par Klocke et Weinert. Pour le SF-2000, l'avantage de l'usinage à sec se situe pour des vitesses de coupe inférieures à 160 m/min sinon au dessus l'utilisation du lubrifiant est requit d'un point de vue coût.

Dans la Figure 6.6, le coût en achat d'outils est présenté pour tous les matériaux suivant les deux modes de lubrification.

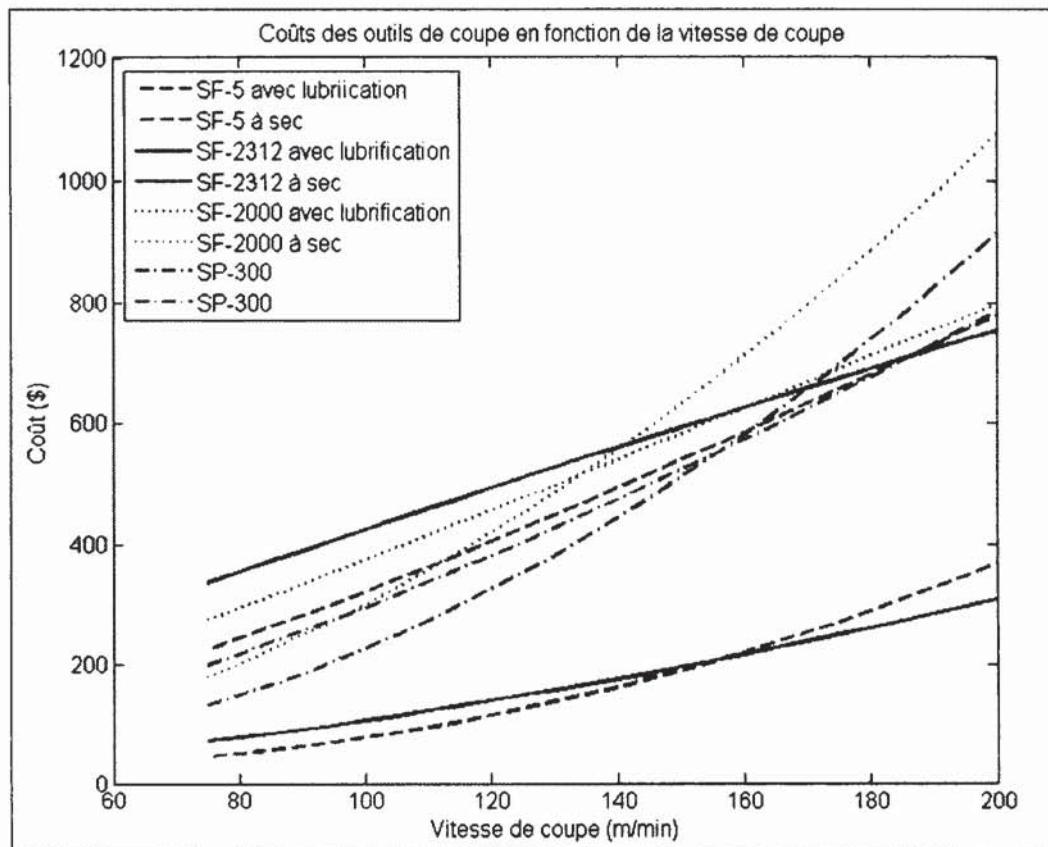


Figure 6.6 Coûts générés par les outils en fonction de la vitesse de coupe.

On voit que le coût en outil est plus faible lors de l'usinage à sec surtout pour le SF-5 et le SF-2312 et ceci quelque soit la vitesse de coupe. Pour les deux autres matériaux, au dessus d'une certaine vitesse de coupe le prix des outils est plus avantageux lorsqu'on utilise du

lubrifiant. Cette vitesse est d'environ 130 m/min pour le SF-2000 et 150 m/min pour le SP-300. Cette différence est liée à la durée de vie des outils qui est généralement plus longue à sec que lors de l'utilisation d'un fluide de coupe.

L'usinage à sec apparaît donc très compétitif par rapport à l'usinage lubrifié pour deux raisons. Premièrement, la durée de vie des outils est généralement plus faible lors de l'usinage avec fluide de coupe ce qui entraîne un surcoût en achat de plaquettes ou outils monoblocs. Deuxièmement, le lubrifiant ajoute un coût d'achat, de traitement et de recyclage.

De plus, d'autres coûts non pas été pris en compte lors de la comparaison entre l'usinage lubrifié et l'usinage à sec.

- Nous avons remarqué que les vibrations étaient plus importantes en usinage lubrifié rendant impossible de monter au dessus des vitesses de coupe de 200 m/min. Ces vibrations élevées accélèrent le vieillissement de la machine et de tous ses organes, mais aussi du porte-plaquette dans le cas de l'utilisation de plaquettes rapportées. Nous avons considéré dans notre modèle que les frais de réparations et d'entretien étaient identiques, mais ce n'est pas vrai. Le problème est que leur estimation s'avère difficile.
- Un autre coût non considéré est celui des traitements des chiffons et tenue des techniciens utilisant les machines. En effet, ces tissus sont amenés à être recouvert de fluide de coupe. D'un point de vue écologique, il faut les nettoyer de ce fluide avant de les incinérer. Par conséquent, la différence entre les deux modes de lubrification s'accentue donc encore un peu.
- Un autre coût plus direct et celui du traitement des copeaux. Il est nécessaire de les traiter pour enlever toute l'huile de coupe qui pourrait rester dessus, en vue de les refondre pour les réutiliser. Ce coût pourrait être modélisé de façon très succincte par rapport à un poids ou un volume de copeaux à traiter fois le coût du traitement (traitement dont il faudrait voir les différents moyen de réaliser ce traitement).

Nous pouvons aussi envisager le cas des émissions de poussières. L'usinage à sec ne produit peut être pas autant ou des particules de même taille que l'usinage lubrifié. Or dans un futur proche, des normes engendrerons peut être d'autres coûts d'un point de vue matériel (machine d'aspiration, protection des opérateurs, ...).

CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude est de déterminer lequel de l'usinage à sec ou lubrifié est préférable lors de l'usinage d'acières servant à la réalisation de moules. Pour déterminer ceci, deux axes d'investigations ont été entrepris : l'étude de l'usinabilité et l'étude de coût. Pour l'usinabilité nous nous sommes penchés sur les trois critères prépondérants d'un usinage : la durée de vie des outils en surfaçage, les forces de coupes générées en perçage et l'état de surface obtenus lors du surfaçage. Pour l'étude de coût, nous avons établis un modèle prenant en compte le fraisage et le perçage, puis nous avons chiffré dans un cas particuliers de surfaçage, quel sera le procédé le plus rentable : à sec ou avec un fluide de coupe.

Pour mener à bien cette recherche, cinq aciers de compositions et de duretés différentes ont été testés. Ils ont été soumis aux mêmes essais dans le cas de l'usinage à sec et dans le cas de l'usinage avec un fluide de coupe. Le paramètre principal de cette étude a été la vitesse de coupe. Nous souhaitions voir son influence sur les critères du test d'usinabilité et son influence dans les coûts générés par l'usinage. La vitesse de coupe est un paramètre important lors de l'usinage car elle influe sur la quantité de matières enlevée dans un temps donné et, par conséquent, sur le temps requis pour usiner une pièce.

En observant la durée de vie des outils lors du fraisage de ces aciers, l'usinage à sec s'avère le choix à adopter par rapport à l'usinage lubrifié. Pour les aciers testés de plus faible dureté (300 HB), l'augmentation de durée de vie des outils lors du fraisage à sec est très significative. Pour les deux autres aciers plus dur (341 HB), la suppression de lubrifiant apporte peu d'avantages en terme de durée de vie des outils, voir elle peut avoir un effet négatif. Mais ces différences demeurent faibles ce qui rend le choix de l'usinage à sec intéressant et prometteur.

Les efforts de coupe sont plus faibles lors de l'usinage à sec, mais cette différence n'est pas significative. Néanmoins, ceci apporte un léger gain en termes de consommation énergétique et aussi de temps, car il est possible d'augmenter un peu les conditions de coupe.

Un inconvénient de l'usinage à sec est la qualité de surface des pièces. Elles sont nettement moins bonnes, sauf dans le cas d'un matériau sur les cinq testés.

L'utilisation de lubrifiant entraîne des frais d'achats de ce fluide, de traitement pour prolonger sa durée de vie mais aussi de traitement final pour préserver l'environnement. Ces coûts supplémentaires liés aux lubrifiants ainsi que les coûts plus importants en achat d'outils du à une durée de vie de ceux là plus faible, permettent de réduire les dépenses.

Finalement notre travail a permis de tirer plusieurs conclusions :

- La durée de vie est généralement meilleure ou équivalente lors de l'usinage à sec.
- Les efforts de coupe sont sensiblement inférieurs dans le cas de l'usinage à sec, mais cette différence n'est pas assez significative pour être un critère de choix.
- Le fini de surface est nettement meilleur dans le cas de l'utilisation d'un fluide de coupe.
- Il est montré que la non utilisation de fluide génère des gains atteignant 20% du coût de la pièce pour des vitesses de coupe de l'ordre de 200 m/min.
- La suppression dans la plupart des cas d'un produit nocif pour l'environnement et l'opérateur.

Nous recommandons aux industriels d'utiliser l'usinage à sec lors de l'ébauche pour leur permettre de réduire les coûts mais aussi de diminuer les rejets polluants pour l'environnement et la santé de l'opérateur. Néanmoins dans le cas de la finition, si un bon état de surface est requis, le lubrifiant devient nécessaire.

RECOMMANDATIONS

L'usinage à sec a démontré un net avantage par rapport à l'usinage lubrifié. On a ainsi pu supprimer un produit nocif pour l'environnement et pour l'opérateur. Mais la santé de l'opérateur peut être affectée par un autre élément : les particules en suspension créées par la coupe du métal. Ces particules, suivant leur taille peuvent affecter le l'organisme à différent niveau : gorge, poumon et voie plus lorsque leur taille permet de rentrer dans le sang. Il est donc nécessaire de voir maintenant si la suppression du lubrifiant n'engendrerait pas des problèmes de santé plus grave de ce point de vue. Dans ce cas, il faudrait adopter des mesures de protection pour les employés. Si d'un autre côté l'usinage à sec réduit l'émission de ces particules, on aura trouvé une raison supplémentaire de passer à l'usinage à sec.

Il serait aussi intéressant d'analyser la structure cristallographique des aciers et l'impact des traitements thermiques sur ceux-ci pour mieux comprendre les résultats d'usinabilité (durée de vie des outils) et par conséquent de coûts. En effet, les différences significatives relevées entre les aciers SF-5 et SF-2312 d'une part et SF-2000 et SP-300 d'autre part ne sont pas entièrement expliquées.

ANNEXE I

FICHE TECHNIQUE DE LA TABLE DYNAMOMÉTRIQUE KISTLER MODÈLE 9255B

Force – FMD



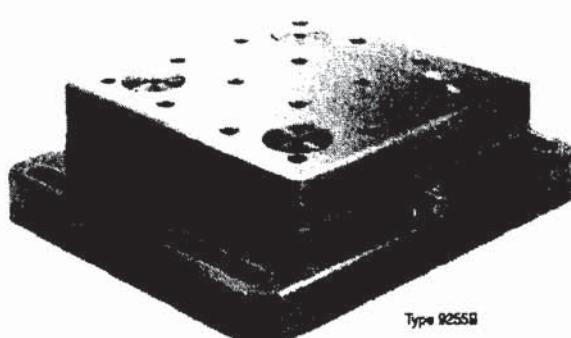
3-Komponenten-Dynamometer F_x, F_y, F_z
Dynamometre à 3 composantes F_x, F_y, F_z
3-Component Dynamometer F_x, F_y, F_z

9255B

Quarzkristall-Dreikomponenten-Dynamometer zum Messen der drei orthogonalen Komponenten einer Kraft. Das Dynamometer besitzt eine grosse Steifheit und demzufolge eine hohe Eigenfrequenz. Das grosse Auflösungsvermögen ermöglicht das Messen von kleinen dynamischen Änderungen grosser Kräfte.

Dynamometre à cristal de quartz à trois composantes pour mesurer des trois composantes orthogonales d'une force. Le dynamometre possède une grande rigidité et par conséquent une fréquence propre élevée. Sa très haute résolution permet de mesurer les moindres variations de grande forces.

Quartz three-component dynamometer for measuring the three orthogonal components of a force. The dynamometer has a great rigidity and consequently a high natural frequency. Its high resolution enables the smallest dynamic changes in large forces to be measured.



Type 9255B

Technische Daten

Données techniques

Technical Data

Bereich	Gamme	Range
Kalibrierter Teilbereich	Gamme partielle étalonnée	Calibrated partial range
Überlast	Surcharge	Overload
Ansprechschwelle	seuil de réponse	Threshold
Empfindlichkeit	sensibilité	sensitivity
Linearität, alle Bereiche	Linearité, toutes les gammes	Linearity, all ranges
bytarese, alle Bereiche	Hystérésis, toutes les gammes	Hysteresis, all ranges
Überprächen	Cross talk	Cross talk
Steifheit	Rigidity	Rigidity
Eigenfrequenz	Fréquence propre	Natural frequency
Eigenfrequenz (montiert an Flanschen)	Fréquence propre (montée sur bretelles)	Natural frequency (mounted on flanges)
Eigenfrequenz (montiert an Flanschen u. durch Deckplatte)	Fréquence propre (montée sur bretelles et à travers la plaque supérieure)	Natural frequency (mounted on flanges and through top plate)
Betriebstemperaturbereich	Gamme de température d'utilisation	Operating temperature range
Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit	Coefficient de température de la sensibilité	Temperature coefficient of sensitivity
Kapazität (pro Kanal)	Capacité (de canal)	Capacitance (of channel)
Isolationswiderstand (20 °C)	Résistance d'isolation (20 °C)	Insulation resistance (20 °C)
Masseisolations	Isolé à la masse	Ground insulation
schutzart	Classe de protection	Protection class
Gewicht	Poids	Weight

000-1484P-02.91 (1806 9255B)ne

*) Kraftangriff innerhalb und max. 100 mm oberhalb der Deckplatte.
**) Mit Anschlusskabel Typen 188788, 188988

*) Point d'application de la force au-dessous et max. 100 mm au-dessus de la plaque supérieure.
**) Avec câble de connexion types 188788, 188988

*) Kraftangriff innerhalb und max. 100 mm oberhalb der Deckplatte.
**) Mit Anschlusskabel Typen 188788, 188988

*) Application of force inside and max. 100 mm above top plate area.
**) With connecting cable Types 188788, 188988

*) Application of force inside and max. 100 mm above top plate area.
**) With connecting cable Types 188788, 188988

1 N (Newton) = 1 kg · m · s⁻² = 0,1019... kp = 0,2248... lb; 1 inch = 25,4 mm; 1 kg = 2,2046... lb; 1 Ns = 0,73756... lb·s

*) Point d'application de la force au-dessous et max. 100 mm au-dessus de la plaque supérieure.
**) Avec câble de connexion types 188788, 188988

*) Application of force inside and max. 100 mm above top plate area.
**) With connecting cable Types 188788, 188988

ANNEXE II
FICHE TECHNIQUE DU LUBRIFIANT BLASOCUT 2000

Art.No	870-12	Blasocut 2000 Universal	
Description		Blasocut 2000 Universal is a water miscible, mineral oil-based cutting fluid.	
Range of application		Universal cutting fluid for machining of cast iron, steel and aluminium alloys.	
Product properties	Benefits		
High cutting performance	→ good feeds and speeds long tool life		
Mild formulation without bactericides	→ good human and skin compatibility		
Universal	→ one cutting fluid for efficient machining of all common materials		
Good stability	→ economical because length of sump life is increased		
Physical-chemical data		Concentrate	
Color	brown	Emulsion	
Mineral oil content	55%	milky, light beige	
Water content	4%		
Density at 20°C	0.96 g/cm ³		
Viscosity at 40°C	46 mm ² /s		
Flash point	150°C/ 302°F		
pH-value	8.8-9.2		
Refractometer factor	1.0		
Note		The product does not contain: EP additives containing sulphur, zinc or phosphor, boron compounds, nitrite, nitrite releasing substances, formaldehyde, formaldehyde releasing substances, amines, diethanolamine, nitrosamines, silicone, heavy metals, triazine (HHT), PCP, PCB, PCT, TCDD or other dioxin-containing substances.	
Concentration of use		Variable concentrations from 5% to max. 25% - general machining 5-8% - heavy duty machining above 7%	
Packaging units		5/30/55 Gal.	
Information contained in this data sheet is based upon the properties and applications of use as known to us. However, generally no legal liability may be deduced from such information.			

ANNEXE III

VALEURS MESURÉES DES EFFORTS EN PERÇAGE À SEC

Efforts SF-5				
Numéro d'essais	Moyenne (N)	Maximum (N)	Minimum (N)	Écart type (N)
1	3569	3656	3483	122,4
2	3684	3558	3621	88,6
3	3565	3646	3484	114,3
4	3600	3644	3554	63,98
5	3498	3580	3415	117,02
6	3581	3685	3477	147,2
7	3687	3708	3666	30,09
8	3691	3697	3684	9,54
9	3687	3794	3579	152,7
10	3705	3741	3670	49,73
MOYENNE	3627	3671	3563	89,56
Efforts SF-2312				
Numéro d'essais	Moyenne (N)	Maximum (N)	Minimum (N)	Écart type (N)
1	3640	3892	3677	106,17
2	3770	4055	3659	106,83
3	3848	4100	3705	81,82
4	3820	4111	3779	96,14
5	3842	4035	3783	82,59
6	3886	4138	3705	72,32
7	3862	4045	3635	72,79
8	3836	4068	3675	84,53
9	3839	4176	3639	90,32
10	3866	4063	3639	91,36
MOYENNE	3821	4068	3690	88,49

Efforts SF-2000				
Numéro d'essais	Moyenne (N)	Maximum (N)	Minimum (N)	Écart type (N)
1	5194	5505	4994	95,30
2	5107	5370	4901	85,80
3	5068	5254	4994	67,79
4	5014	5226	4814	86,96
5	5007	5294	4842	90,39
6	5031	5397	4827	114,88
7	4972	5221	4814	61,93
8	4992	5225	4785	66,92
9	4901	5093	4783	54,23
10	4911	5137	4721	79,14
MOYENNE	5020	5272	4848	80,33
Efforts SP-300				
Numéro d'essais	Moyenne (N)	Maximum (N)	Minimum (N)	Écart type (N)
1	4072	4480	3871	120,49
2	3939	4198	3794	70,16
3	3921	4056	3771	57,69
4	3949	4094	3857	44,40
5	3926	4155	3754	72,44
6	3887	4169	3737	77,27
7	3889	4021	3735	58,68
8	3981	4128	3856	51,09
9	4057	4234	3904	75,02
10	3936	4076	3764	100,75
MOYENNE	3956	4161	3804	72,80

Efforts SF-2050v				
Numéro d'essais	Moyenne (N)	Maximum (N)	Minimum (N)	Écart type (N)
1	5275	5461	5085	70,26
2	5143	5319	4966	58,54
3	5153	5365	4962	64,36
4	5194	5411	5017	60,62
5	5134	5301	4903	68,08
6	5149	5378	4983	65,62
7	5145	5365	4970	69,68
8	5191	5427	5020	61,34
9	5111	5298	4955	57,59
10	5119	5281	5004	48,96
MOYENNE	5161	5360	4987	62,50

ANNEXE IV

VALEURS MESURÉES DES MOMENTS EN PERÇAGE À SEC

Moments SF-5				
Numéro d'essais	Moyenne (N.m)	Maximum (N.m)	Minimum (N.m)	Écart type (N.m)
1	14,00	14,60	13,30	0,94
2	13,76	14,26	13,26	0,71
3	15,57	15,58	15,56	0,02
4	10,38	11,09	9,66	1,01
5	9,63	9,67	9,58	0,07
6	13,1	13,49	12,70	0,55
7	11,22	11,50	10,94	0,40
8	11,26	11,81	10,71	0,78
9	14,58	15,51	13,66	1,31
10	10,36	11,42	9,31	1,49
MOYENNE	12	13	12	0,73
Moments SF-2312				
Numéro d'essais	Moyenne (N.m)	Maximum (N.m)	Minimum (N.m)	Écart type (N.m)
1	7,82	13,98	-0,46	3,01
2	6,93	11,92	-0,22	2,12
3	9,85	14,71	6,00	1,62
4	9,44	12,70	5,18	1,51
5	9,64	12,94	6,82	1,44
6	9,85	12,87	7,04	1,31
7	9,43	13,58	5,92	1,43
8	8,77	12,03	3,89	1,47
9	9,41	13,80	5,44	1,55
10	9,73	14,38	5,78	1,80
MOYENNE	9,09	13,29	4,54	1,72

Moments SF-2000				
Numéro d'essais	Moyenne (N.m)	Maximum (N.m)	Minimum (N.m)	Écart type (N.m)
1	14,01	16,14	11,93	0,69
2	13,88	15,67	12,46	0,72
3	14,08	16,28	11,93	0,67
4	13,35	15,84	12,02	0,69
5	13,97	17,84	11,98	0,90
6	14,38	18,35	12,13	1,01
7	14,31	18,57	11,57	0,94
8	13,67	16,62	12,19	0,65
9	13,91	16,28	12,56	0,64
10	13,51	15,44	12,02	0,62
MOYENNE	13,91	16,70	12,08	0,75
Moments SP-300				
Numéro d'essais	Moyenne (N.m)	Maximum (N.m)	Minimum (N.m)	Écart type (N.m)
1	10,29	12,59	8,54	0,76
2	11,20	13,25	9,82	0,44
3	10,28	11,91	9,27	0,42
4	10,75	12,29	9,78	0,52
5	10,88	12,25	9,70	0,46
6	10,97	12,70	9,88	0,58
7	11,28	13,08	8,73	0,60
8	12,53	15,19	10,91	0,73
9	11,42	13,08	10,32	0,48
10	11,56	14,07	8,27	1,59
MOYENNE	11,12	13,04	9,52	0,66

Moments SF-2050v				
Numéro d'essais	Moyenne (N.m)	Maximum (N.m)	Minimum (N.m)	Écart type (N.m)
1	14,19	16,40	12,27	0,66
2	13,29	15,66	11,64	0,63
3	12,77	15,11	9,99	0,82
4	13,45	14,99	12,27	0,50
5	12,85	14,49	11,28	0,49
6	12,97	15,07	11,78	0,54
7	12,92	14,47	11,85	0,49
8	13,32	15,74	12,13	0,56
9	13,74	16,05	12,20	0,71
10	14,08	16,52	12,20	0,63
MOYENNE	13,36	15,45	11,76	0,61

ANNEXE V

VALEURS MESURÉES DES EFFORTS EN PERÇAGE AVEC LUBRIFICATION

Efforts SF-5				
Numéro d'essais	Moyenne (N)	Maximum (N)	Minimum (N)	Écart type (N)
1	3999	1217	3739	99
2	3936	4289	3582	120
3	3944	4217	3694	104
Efforts SF-2312				
Numéro d'essais	Moyenne (N)	Maximum (N)	Minimum (N)	Écart type (N)
1	3687	3841	3423	69
2	3692	3845	3472	72
3	3699	3869	3534	69
4	3701	3753	3647	23
Efforts SF-2000				
Numéro d'essais	Moyenne (N)	Maximum (N)	Minimum (N)	Écart type (N)
1	4984	5229	4642	100
2	5299	5372	5227	103
3	5360	5461	5258	77
4	5299	5356	5241	81
5	5231	5442	5073	78
6	5177	5502	4951	112
7	5195	5560	4933	148
8	5099	5418	4848	141
9	5073	5502	4839	149
10	5077	5427	4863	132
MOYENNE	5179	5427	4988	111,87

Efforts SP-300				
Numéro d'essais	Moyenne (N)	Maximum (N)	Minimum (N)	Écart type (N)
1	4457	4797	4213	119
2	4486	4712	4218	95
3	4388	4633	4119	111
4	4428	4755	4180	120
5	4433	4718	4129	99
6	4469	4694	4287	81
7	4596	4879	4353	110
8	4594	4847	4356	111
9	4598	4998	4312	140
10	4582	4843	4298	109
MOYENNE	4503	4788	4246	109,51
Efforts SF-2050v				
Numéro d'essais	Moyenne (N)	Maximum (N)	Minimum (N)	Écart type (N)
1	5347	5615	5136	91
2	5455	5738	5220	109
3	5467	5762	5240	115
4	5599	5842	5382	94
5	5703	5958	5492	112
6	5360	5605	5134	92
7	5404	5689	5181	100
8	5383	5659	5119	118
9	5410	5731	5107	141
10	5446	5760	5201	125
MOYENNE	5457	5736	5221	109,67

ANNEXE VI

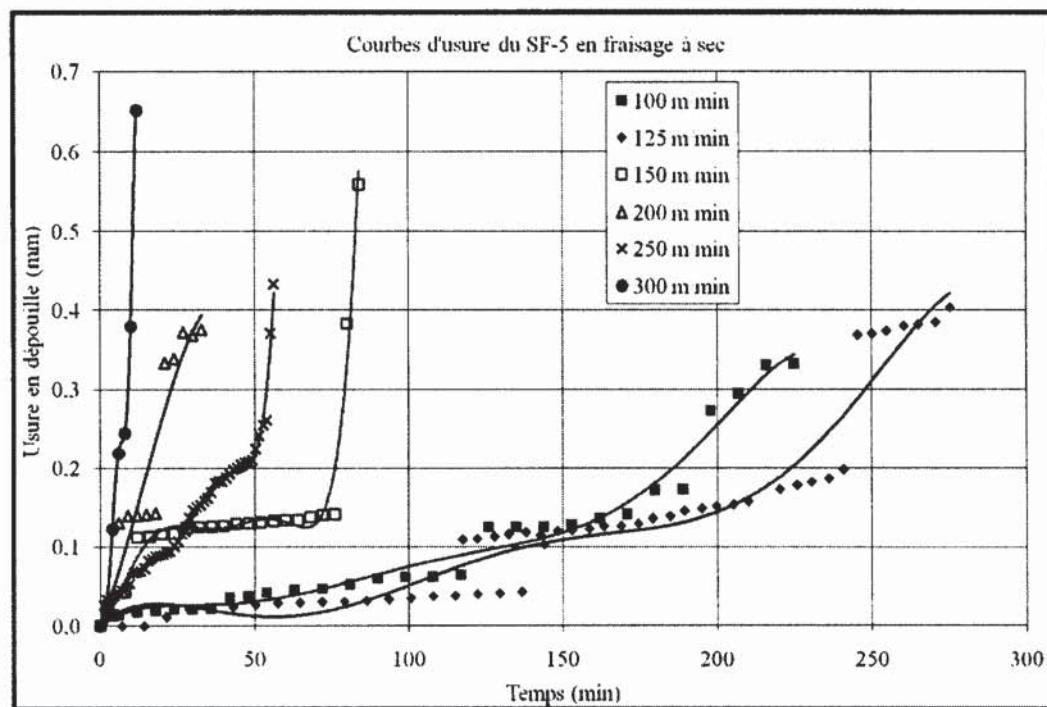
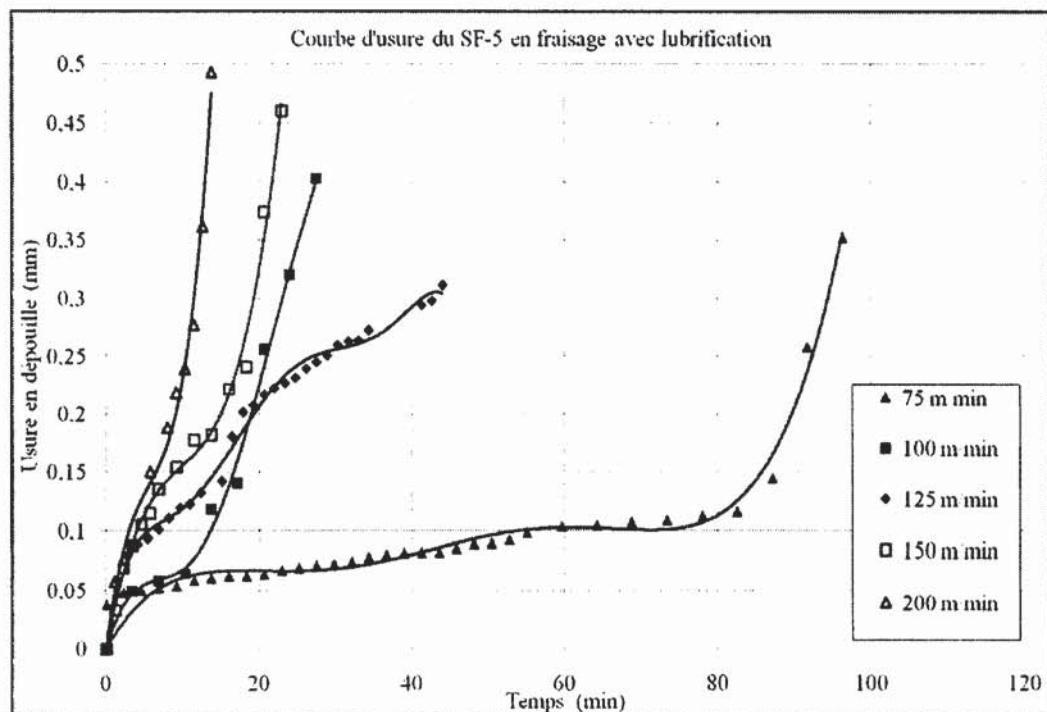
VALEURS MESURÉES DES MOMENTS EN PERÇAGE AVEC LUBRIFICATION

Moments SF-2000				
Numéro d'essais	Moyenne (N.m)	Maximum (N.m)	Minimum (N.m)	Écart type (N.m)
1	12,16	14,75	8,82	1,06
2	13,22	13,39	13,05	0,24
3	13,30	13,08	13,52	0,32
4	13,68	13,90	13,46	0,31
5	12,07	13,89	10,10	0,78
6	14,31	17,15	12,03	0,73
7	13,31	15,22	11,15	0,58
8	12,83	14,74	10,87	0,55
9	13,20	15,45	11,71	0,54
10	12,16	13,41	10,57	0,40
MOYENNE	13	14	12	0,55
Moments SP-300				
Numéro d'essais	Moyenne (N.m)	Maximum (N.m)	Minimum (N.m)	Écart type (N.m)
1	10,48	14,09	7,54	1,40
2	11,39	15,01	8,54	1,16
3	11,98	14,18	9,90	0,71
4	11,88	13,62	10,32	0,51
5	12,20	14,80	10,52	0,62
6	12,68	15,00	10,14	0,83
7	13,12	15,28	11,32	0,60
8	12,62	14,76	10,53	0,74
9	12,65	14,69	11,15	0,60
10	12,10	15,24	9,38	0,83
MOYENNE	12	15	10	0,80

Moments SF-2050v				
Numéro d'essais	Moyenne (N.m)	Maximum (N.m)	Minimum (N.m)	Écart type (N.m)
1	13,16	15,45	10,38	1,06
2	13,09	14,70	11,33	0,65
3	13,49	14,92	12,47	0,43
4	13,53	14,67	12,76	0,31
5	13,76	14,58	12,77	0,31
6	13,86	15,47	12,18	0,59
7	13,26	14,73	11,90	0,47
8	13,43	14,66	12,46	0,39
9	13,08	14,09	12,14	0,37
10	13,49	15,08	12,23	0,45
MOYENNE	13	15	12	0,50

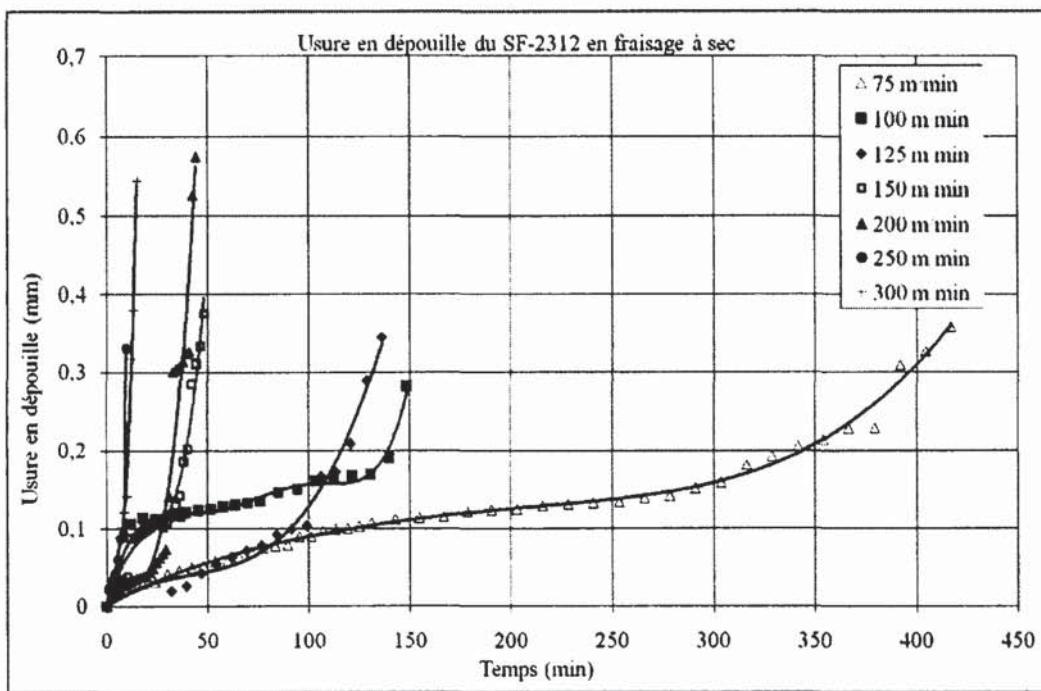
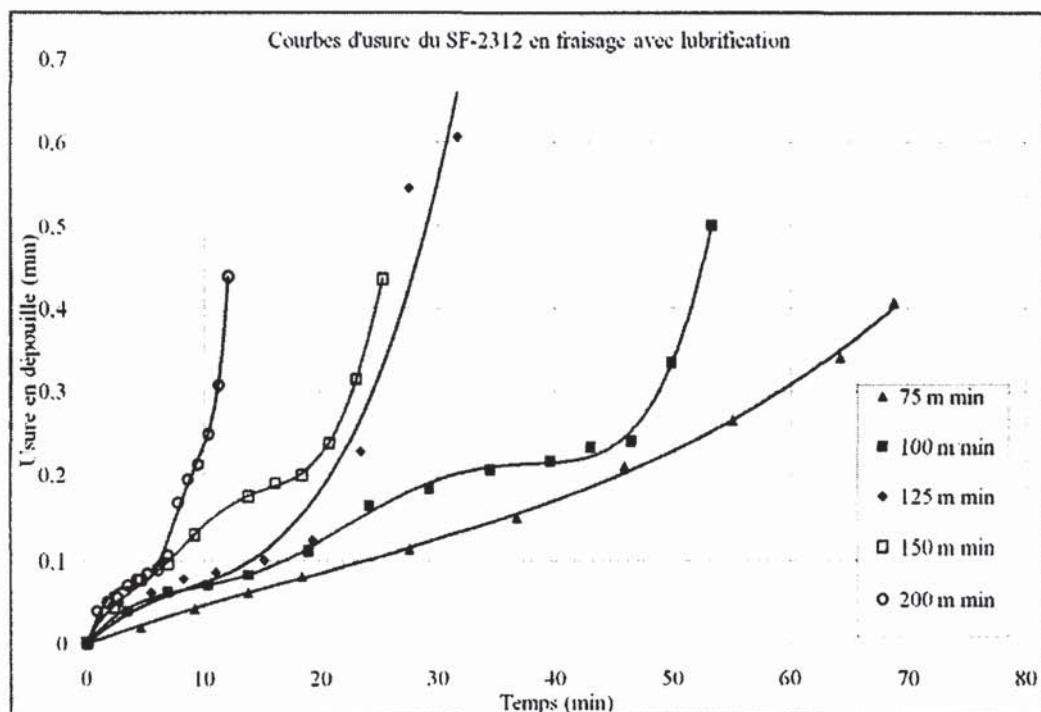
ANNEXE VII

COURBES D'USURE EN FONCTION DU TEMPS POUR LE SF-5



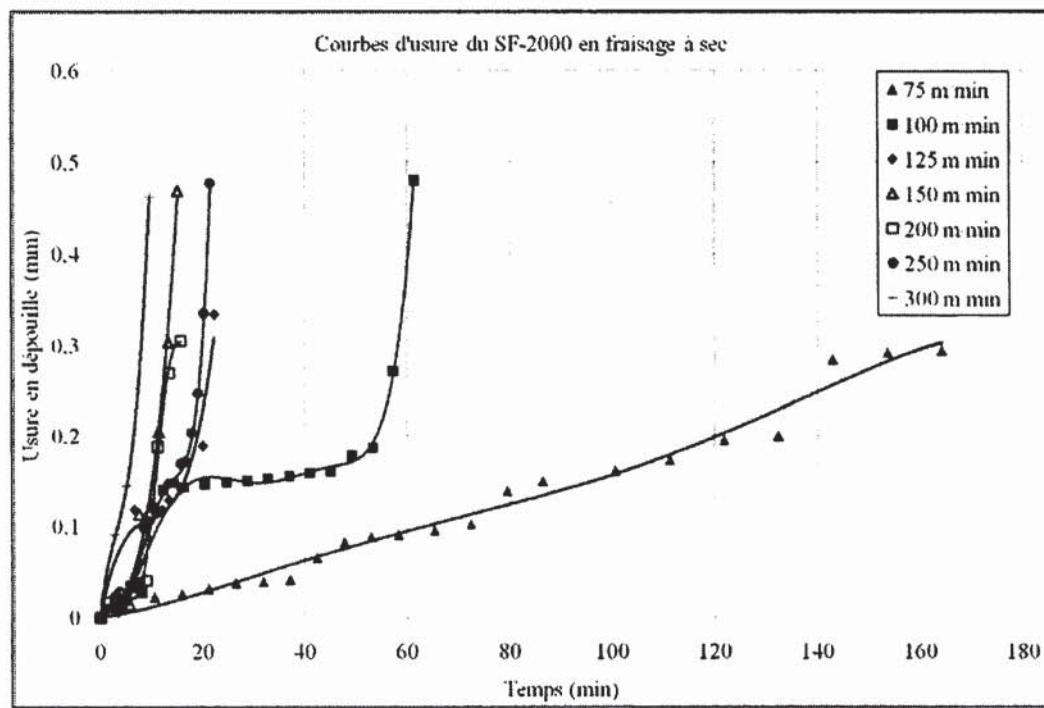
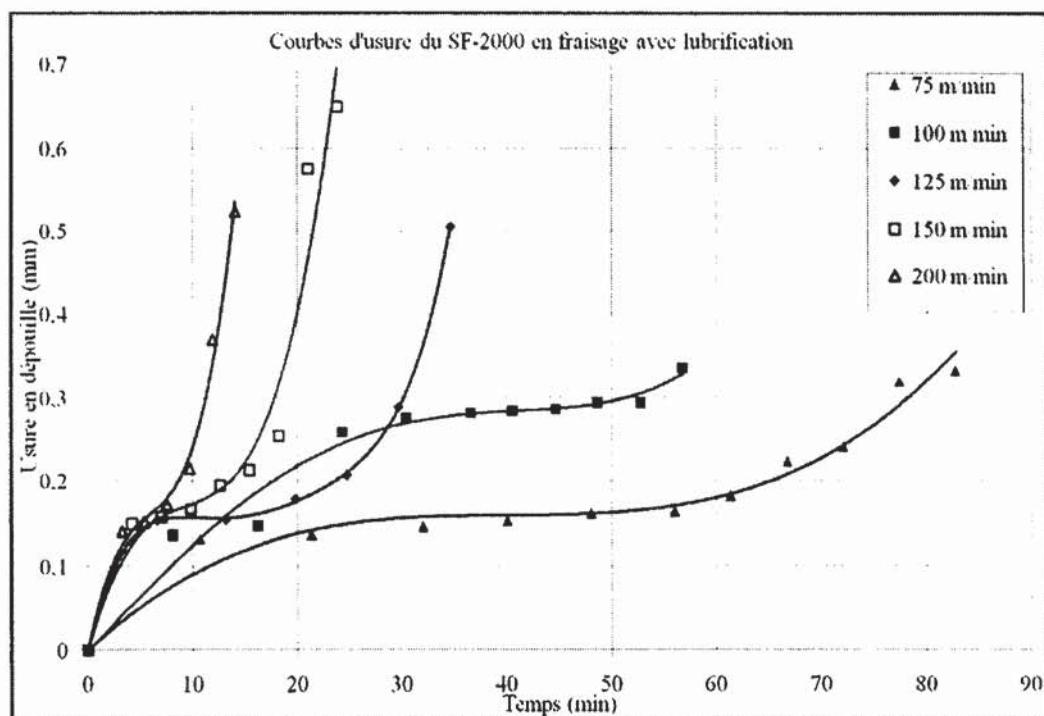
ANNEXE VIII

COURBES D'USURE EN FONCTION DU TEMPS POUR LE SF-2312



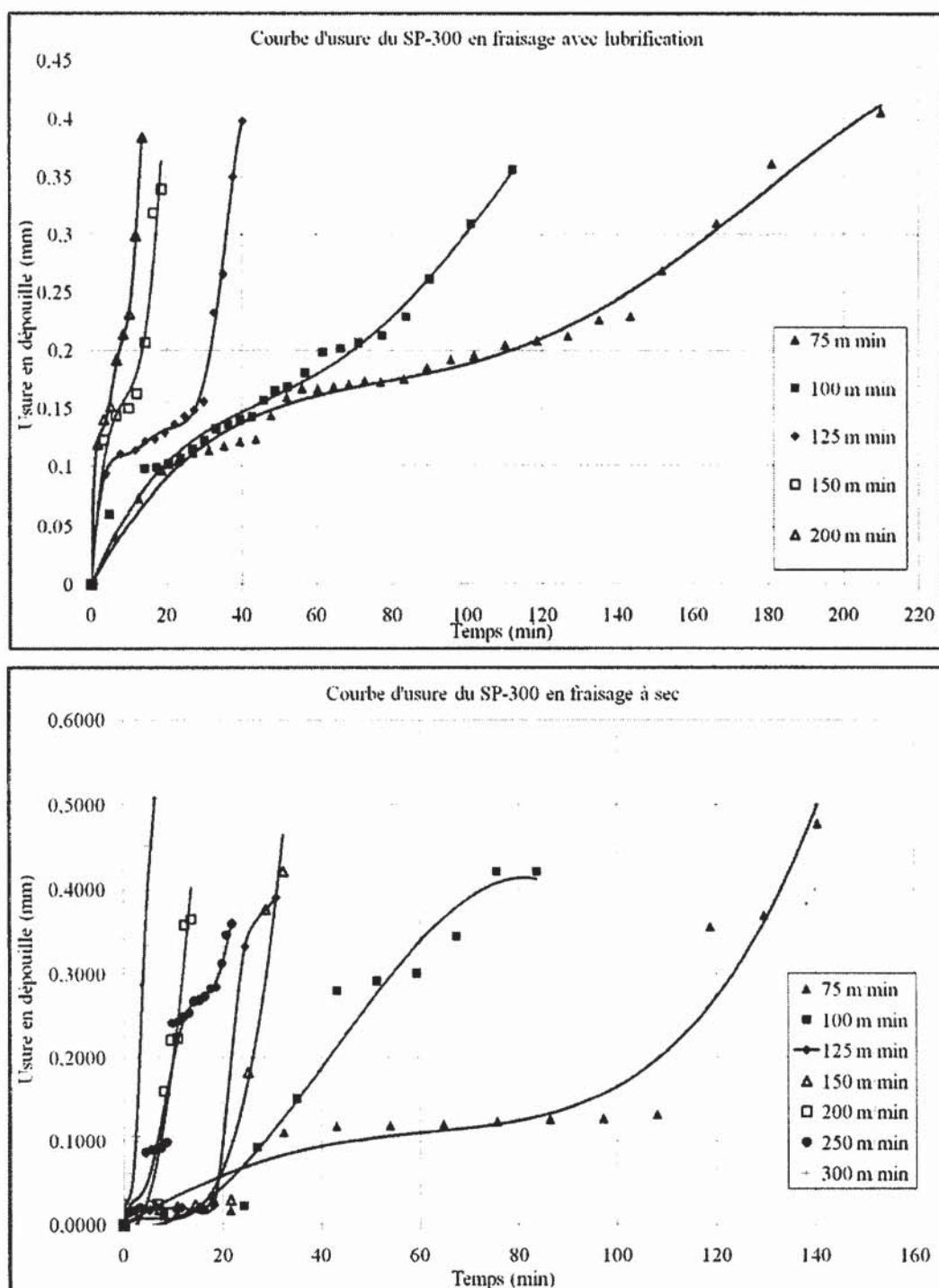
ANNEXE IX

COURBES D'USURE EN FONCTION DU TEMPS POUR LE SF-2000



ANNEXE X

COURBES D'USURE EN FONCTION DU TEMPS POUR LE SP-300



ANNEXE XI

IMAGES DE LA FACE DE DÉPOUILLE ET DE COUPE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-5 À 75 M/MIN

SF-5 Fraisage à sec $V_c=75$ m/min		
	Face de coupe	Face de dépouille
Plaquette 1 (zoom *50)		
Plaquette 1 (zoom *250)		
Plaquette 2 (zoom *50)		
Plaquette 2 (zoom *250)		

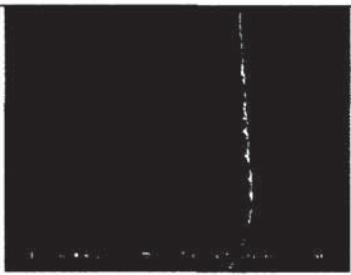
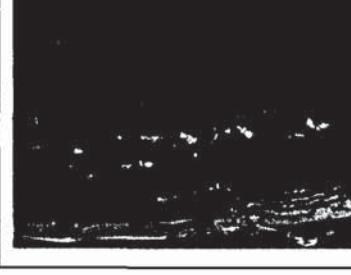
ANNEXE XII

IMAGES DE LA FACE DE DÉPOUILLE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-5 À 125 M/MIN

SF-5 Face de dépouille Vc=125 m/min		
	Fraisage avec lubrification	Fraisage à sec
Plaquette 1 (zoom *50)		
Plaquette 1 (zoom *250)		
Plaquette 2 (zoom *50)		
Plaquette 2 (zoom *250)		

ANNEXE XIII

IMAGES DE LA FACE DE COUPE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-5 À 125 M/MIN

SF-5 Face de coupe Vc=125 m/min		
	Fraisage avec lubrification	Fraisage à sec
Plaquette 1 (zoom *35)		
Plaquette 1 (zoom *250)		
Plaquette 2 (zoom *35)		
Plaquette 2 (zoom *250)		

ANNEXE XIV

IMAGES DE LA FACE DE DÉPOUILLE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2312 À 75 M/MIN

SF-2312 Face de dépouille Vc=75 m/min		
	Fraisage avec lubrification	Fraisage à sec
Plaquette 1 (zoom *50)		
Plaquette 1 (zoom *250)		
Plaquette 2 (zoom *50)		
Plaquette 2 (zoom *250)		

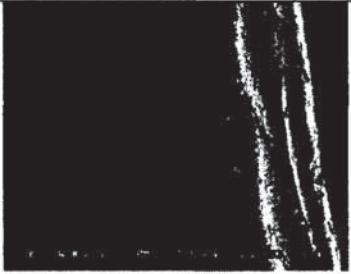
ANNEXE XV

IMAGES DE LA FACE DE DÉPOUILLE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2312 À 125 M/MIN

SF-2312 Face de dépouille $V_c=125$ m/min		
	Fraisage avec lubrification	Fraisage à sec
Plaquette 1 (zoom *50)		
Plaquette 1 (zoom *250)		
Plaquette 2 (zoom *50)		
Plaquette 2 (zoom *250)		

ANNEXE XVI

IMAGES DE LA FACE DE COUPE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2312 À 75 M/MIN

SF-2312 Face de coupe Vc=75 m/min		
	Fraisage avec lubrification	Fraisage à sec
Plaquette 1 (zoom *35)		
Plaquette 1 (zoom *250)		
Plaquette 2 (zoom *35)		
Plaquette 2 (zoom *250)		

ANNEXE XVII

IMAGES DE LA FACE DE COUPE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2312 À 125 M/MIN

SF-2312 Face de coupe Vc=125 m/min		
	Fraisage avec lubrification	Fraisage à sec
Plaquette 1 (zoom *35)		
Plaquette 1 (zoom *250)		
Plaquette 2 (zoom *35)		
Plaquette 2 (zoom *250)		

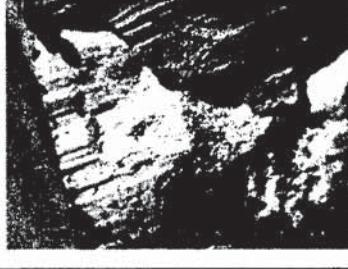
ANNEXE XVIII

IMAGES DE LA FACE DE DÉPOUILLE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2000 ET SP-300 À 75 M/MIN

		Fraisage à sec Face de dépouille Vc=75 m/min	
		SP-300	SF-2000
Plaquette 1 (zoom *50)			
Plaquette 1 (zoom *250)			
Plaquette 2 (zoom *50)			
Plaquette 2 (zoom *250)			

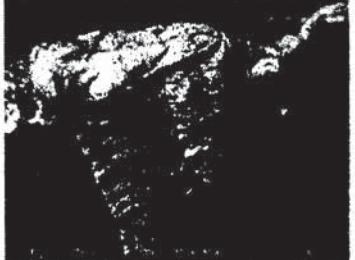
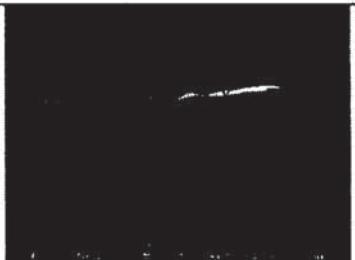
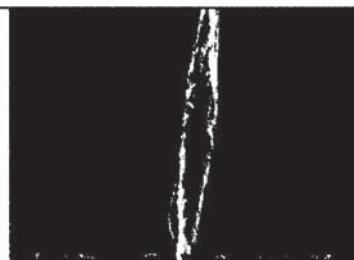
ANNEXE XIX

IMAGES DE LA FACE DE DÉPOUILLE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2000 ET SP-300 À 125 M/MIN

		Fraisage à sec Face de dépouille $V_c=125$ m/min	
		SP-300	SF-2000
Plaquette 1 (zoom *50)			
Plaquette 1 (zoom *250)			
Plaquette 2 (zoom *50)			
Plaquette 2 (zoom *250)			

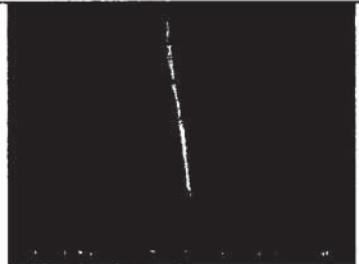
ANNEXE XX

IMAGES DE LA FACE DE COUPE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2000 ET SP-300 À 75 M/MIN

Fraisage à sec Face de coupe $V_c=75$ m/min		
	SP-300	SF-2000
Plaquette 1 (zoom *35)		
Plaquette 1 (zoom *250)		
Plaquette 2 (zoom *35)		
Plaquette 2 (zoom *250)		

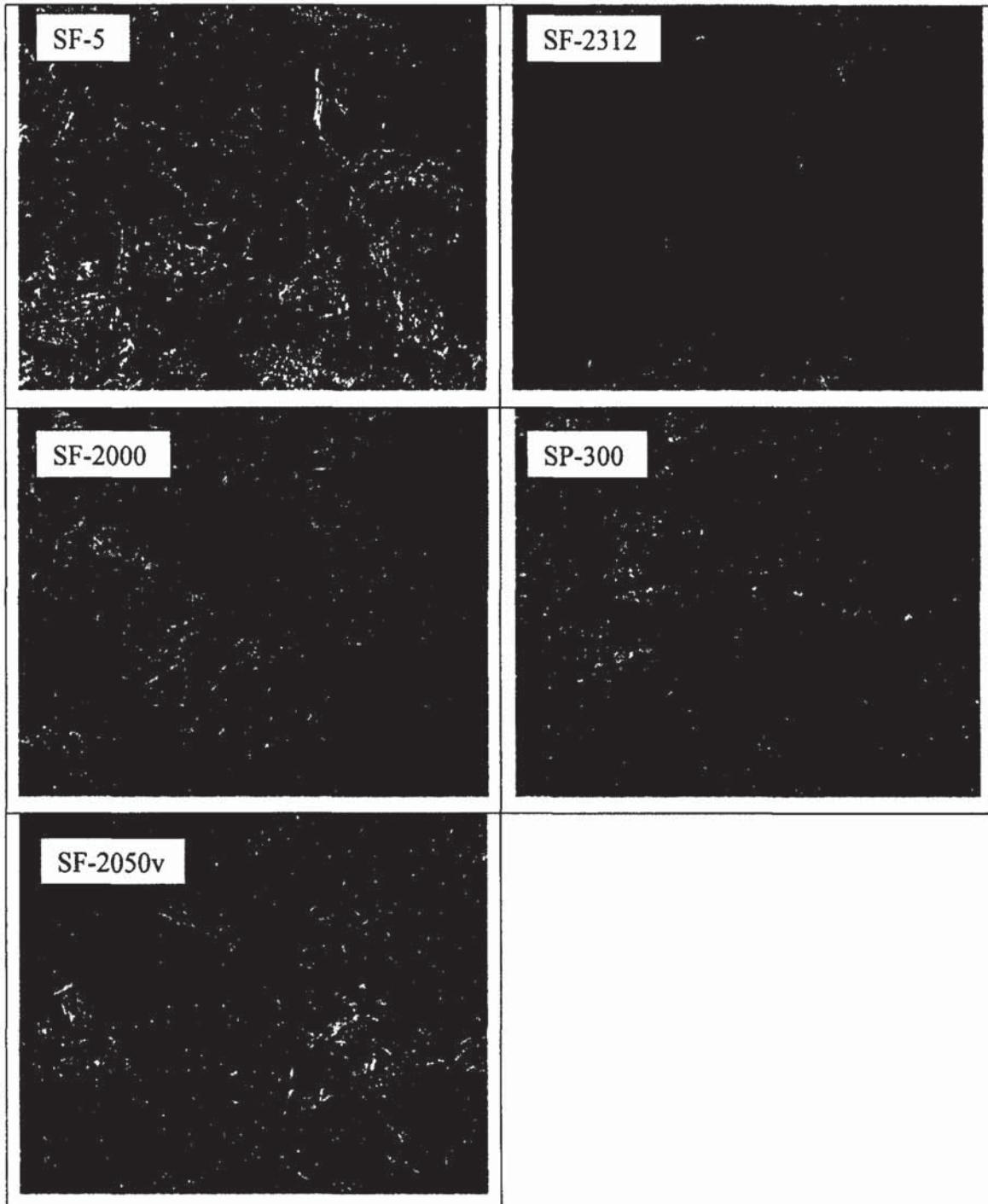
ANNEXE XXI

IMAGES DE LA FACE DE COUPE DES PLAQUETTES PAR MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE DU SF-2000 ET SP-300 À 125 M/MIN

Fraisage à sec Face de coupe Vc=125 m/min		
	SP-300	SF-2000
Plaquette 1 (zoom *35)		
Plaquette 1 (zoom *250)		
Plaquette 2 (zoom *35)		
Plaquette 2 (zoom *250)		

ANNEXE XXII
STRUCTURE CRISTALLOGRAPHIQUE

Les surfaces des matériaux ont été attaquées au Vilella.



ANNEXE XXIII

VALEURS RELEVÉES DES TESTS DE RUGOSITÉ À SEC

		Essai	Ra (µm)	Rq (µm)	Rvk (µm)	Rsk (µm)
SF-5	SF-2312	1	0,516	0,663	1,295	-0,187
		2	0,622	0,779	1,203	-0,107
		3	0,403	0,496	0,92	-0,897
		4	0,383	0,462	0,69	-0,289
		5	0,201	0,257	0,508	-0,882
SF-2000	SP-300	1	0,302	0,395	0,622	-0,677
		2	0,545	0,669	0,968	-0,541
		3	0,223	0,278	0,499	-0,679
		4	0,27	0,308	0,281	0,179
		5	0,187	0,226	0,345	-0,273
SF-2050v	SF-2050v	1	0,619	0,77	1,601	-0,912
		2	0,638	0,83	1,966	-0,989
		3	0,37	0,492	2,498	-0,875
		4	0,247	0,294	0,499	-0,391
		5	0,166	0,2	0,264	-0,114
		1	0,34	0,403	1,051	0,026
		2	0,229	0,281	0,556	-0,946
		3	0,223	0,275	0,5	-0,126
		4	0,305	0,369	0,504	-0,223
		5	0,283	0,337	0,502	-0,074
		1	0,319	0,397	0,738	-0,843
		2	0,359	0,451	0,658	-0,806
		3	0,409	0,525	1,326	-0,131
		4	0,326	0,432	1,039	-0,284
		5	0,233	0,271	0,326	0,109

ANNEXE XXIV

VALEURS RELEVÉES DES TESTS DE RUGOSITÉ AVEC LUBRIFICATION

		Essai	Ra (µm)	Rq (µm)	Rvk (µm)	Rsk (µm)
SF-5	SF-2312	1	0,188	0,211	0,116	-0,042
		2	0,109	0,128	0,111	-0,282
		3	0,132	0,152	0,094	-0,197
		4	0,115	0,131	0,058	0,035
		5	0,085	0,098	0,054	-0,077
SF-2000	SP-300	1	0,27	0,31	0,111	-0,11
		2	0,155	0,178	0,087	0,114
		3	0,148	0,176	0,28	-0,546
		4	0,151	0,175	0,149	-0,206
		5	0,083	0,097	0,13	-0,338
SF-2050v	SF-2050v	1	0,069	0,085	0,098	-0,26
		2	0,074	0,092	0,155	-0,611
		3	0,076	0,09	0,078	-0,175
		4	0,12	0,138	0,071	-0,12
		5	0,12	0,143	0,112	-0,348
SF-2050v	SF-2050v	1	0,287	0,337	0,688	-0,703
		2	0,183	0,226	0,435	-0,505
		3	0,168	0,212	0,423	-0,871
		4	0,318	0,389	0,752	-0,074
		5	0,248	0,308	0,872	-0,001
SF-2050v	SF-2050v	1	0,073	0,087	0,104	-0,164
		2	0,066	0,078	0,073	-0,236
		3	0,1	0,116	0,075	-0,151
		4	0,098	0,116	0,118	-0,391
		5	0,156	0,185	0,211	-0,394

LISTE DE RÉFÉRENCES

- ANSI/ASME. 1985. *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay)*. B46.1-1985.
- Baillon, Jean-Paul, et Jean-Marie Dorlot. 2002. *Des matériaux*. 3rd ed. Presses Internationales Polytechnique, 756 p.
- Balazinski, Marek. 2007. *Cours MEC4530 de Polytechnique Montréal : Fabrication Mécanique avancé*.
- Chandrasekaran, H., et R. M'Saoubi. 2006. « Improved machinability in hard milling and strategies for steel development ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 55, n° 1, p. 93-96.
- Diniz, A. E., J. R. Ferreira et J. F. Silveira. 2004. « Toroidal Milling of Hardened SAE H13 Steel ». *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 26, n° 1, p. 17-21.
- El-Hofy Hassan, Helmi A. Youssef. 2007. *Fundamentals of machining processes : conventionnal and unconventional processes*. Boca Raton, FL : CRC/Taylor & Francis.
- Graham, Don. 2007. « Tournage : quels outils et précautions avec les alliages. ». In. En ligne. <<http://www.magazinemci.com/supmetal/articles/2007/06/tournage.htm>>. Consulté le 18 mars 2008.
- Hubbard, Kevin, Richard Callahan et Shawn Strong. 2006. « A standardized model for the evaluation of machining coolant/lubricant costs ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Hydro-Québec. 2007. « Comparaison des prix de l'électricité dans les grandes villes nord-américaines. ». In. En ligne. <http://www.hydroquebec.com/publications/fr/comparaison_prix/2007/pdf/comp_2007_fr.pdf>. Consulté le 18 mars 2008.
- International Organization for Standardization. 1993. *Tool-life testing with single-point turning tools*. 2nd ed. ISO 3685:1993,.
- Kennametal. « Mill 1 - Application Parameters ». In. En ligne <<http://www.kennametal.com/images/pdf/techRef/milling/mill1AppParams.pdf;jsessionid=YOAV55AMN20K3LAUBIOCFEVMCQFB0IV0>>. Consulté le 02 juillet 2008.

- Kennametal. « Milling inserts XPMT-R/L ». In. En ligne. <http://www.kennametal.com/en/e-catalog/ProductDisplay.jhtml?XMLArg=6592.xml>. Consulté le 18 mars 2008.
- Kennametal. « Porte-plaquette KISZR150XP253L905 ». In. En ligne. <http://www.kennametal.com/e-catalog/ProductDetail.jhtml?XMLArg=7602.xml&MMNumber=1024825&fromloc=srch&parentID=1024825>. Consulté le 18 mars 2008.
- Kennametal. « Technical data ». In. En ligne. <http://www.kennametal.com/images/pdf/techRef/milling/millingTechInfoTroublesHooting.pdf>. consulté le 18 mars 2008.
- Klocke, F., et G. Eisenblaetter. 1997. « Dry cutting ». CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 46, n° 2, p. 519-526.
- Liao, Y. S., et H. M. Lin. 2007. « Mechanism of minimum quantity lubrication in high-speed milling of hardened steel ». International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 47, n° 11, p. 1660-1666.
- Machinability Data, Center. 1980. *Machining data handbook*. Cincinnati, Ohio: MDC.
- Mamalis, A. G., J. Kundrak et M. Horvath. 2005. « On a novel tool life relation for precision cutting tools ». *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 127, n° 2, p. 328-332.
- Marksberry, P.W. 2004. « An assesment of tool-life performance in NDM (near dry machining) of automotive steel ». United States - Kentucky, University of Kentucky.
- Miauton. In. En ligne. <http://www.1outil.ch/index.php/catalog2/22120>. Consulté le 18 mars 2008.
- Nee, John G., et Engineers Society of Manufacturing. 1998. *Fundamentals of tool design*. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers.
- Nicolaou, Panicos, Deborah L. Thurston et James V. Carnahan. 2002. « Machining quality and cost: Estimation and tradeoffs ». *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 124, n° 4, p. 840-851.
- NIOSH. 1998. « What do you know about occupational exposure to metalworking fluids ». <http://www.cdc.gov/niosh/pdfs/98-116.pdf>. Consulté le 18 mars 2008.
- P. Duverlie, J.M. Castelain, T. Farineau. 1999. « Estimation des coûts en production mécanique ». *Techniques de l'ingénieur*. Vol. BM7076 (06/03/2008).

- Parent, L., V. Songmene et J. P. Kenne. 2007. « A generalised model for optimising an end milling operation ». *Production Planning and Control*, vol. 18, n° 4, p. 319-337.
- Rahman, M., A. Senthil Kumar, U. I. Salem Manzoor et U. I. Salem Manzoor. 2001. « Evaluation of Minimal of Lubricant in End Milling ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 18, n° 4, p. 235-241.
- Rahman, M., A. Senthil Kumar et M. U. Salam. 2002. « Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, n° 5, p. 539-547.
- Rech, J., C. Le Calvez et M. Dessoly. 2004. « A new approach for the characterization of machinability - application to steels for plastic injection molds ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 152, n° 1, p. 66-70.
- Sandvik-Coromant. 2007. « Metalworking Products ». Vol. Metacutting Technical Guide - (D) Milling p. D35.
[<http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/catalogue2007/tech_d.pdf>](http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/catalogue2007/tech_d.pdf). Consulté le 18 mars 2008.
- Shaw, Milton Clayton. 2005b. *Metal cutting principles*. Coll. « Oxford series on advanced manufacturing ». New York: Oxford University Press.
- Shunmugam, M. S., S. V. Bhaskara Reddy et T. T. Narendran. 2000. « Selection of optimal conditions in multi-pass face-milling using a genetic algorithm ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, n° 3, p. 401-414.
- Sokovic, M., et K. Mijanovic. 2001. « Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 109, n° 1-2, p. 181-189.
- Sreeram, Sonti, A. Kumar, M. Rahman et M. Zaman. 2006. « Optimization of cutting parameters in micro end milling operations in dry cutting condition using genetic algorithms ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 30, n° 11, p. 1030-1039.
- Stephenson, David A., John S. Agapiou et Inc NetLibrary. 1997. *Metal cutting theory and practice*. New York: Marcel Dekker.
- Taylor, F. W. 1907. « On the Art of Cutting Metals ». ASME, vol. 28.
- Techniques de l'Ingénieur. 2001. « Perçage ». Vol. BM-7088.

- Urbanski, J. P., P. Koshy, R. C. Dewes et D. K. Aspinwall. 2000. « High speed machining of moulds and dies for net shape manufacture ». *Materials and Design*, vol. 21, n° 4, p. 395-402.
- Vieira, J. M., A. R. Machado et E. O. Ezugwu. 2001. « Performance of cutting fluids during face milling of steels ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 116, n° 2-3, p. 244-251.
- Weinert, K., I. Inasaki, J. W. Sutherland et T. Wakabayashi. 2004. « Dry machining and minimum quantity lubrication ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 53, n° 2, p. 511-537.