



Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité “Procédés de fabrication”

*présentée et soutenue publiquement
par*

Arnaud KREMER

le 11 mai 2009

**ÉTUDE DU CHOIX STRUCTUREL D'OUTILS COUPANTS EN
DIAMANT REVETU OU POLYCRISTALLIN MASSIF POUR
L'USINAGE COMPETITIF ET ENVIRONNEMENTAL DES
COMPOSITES A MATRICE METALLIQUE ET RENFORT
CERAMIQUE PARTICULAIRE (CMM_p Al/SiC).**

Directeur de thèse : Mohamed EL MANSORI

Jury :

Pierre LAGARRIGUE, Professeur, CUFR Champollion, Université Sabatier de Toulouse..... Rapporteur
Mohammed NOUARI, Professeur, INSIC, Ecole des Mines de Nancy Rapporteur
Mohamed EL MANSORI, Professeur, LMPF, Arts et Métiers ParisTech de Châlons..... Examineur
Franck GIROT, Professeur, LAMEFIP, Arts et Métiers ParisTech de Bordeaux..... Examineur
Jacques MASOUNAVE, Professeur, ETS de Montréal, Université du Québec..... Examineur
Jacques TSCHOFEN, Responsable R&D Forges de Bologne, Groupe Manoir Industrie Invité
Thierry GARNIER, Cutting Tools Product Manager, Asahi Diamond Industrial Europe Invité

Laboratoire de Mécanique et Procédés de Fabrication
Arts et Métiers ParisTech, centre de Châlons-en-Champagne

*Arts et Métiers ParisTech (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers) est un Grand Etablissement
dépendant du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, composé de huit centres :
AIX-EN-PROVENCE ANGERS BORDEAUX CHÂLONS-EN-CHAMPAGNE CLUNY LILLE METZ PARIS*

Remerciements

Le travail effectué pour réaliser ce mémoire a nécessité plusieurs années d'investissement personnel. Celui-ci n'a été possible qu'avec le concours de Cécile, mon épouse, ainsi que de nos trois enfants, Amandine, Quentin et Mathis. Je les remercie pour leur patience et leur soutien.

Je tiens aussi à remercier Daniel Dudzinski et Arnaud Devillez du Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux de Metz (LPMM) qui ont été présents au début du projet et qui m'ont initié à la recherche, au sein d'une collaboration entre les deux laboratoires (LMPF - LPMM).

Je tiens également à remercier Mohamed El Mansori qui m'a accompagné jusqu'à l'aboutissement de cette thèse et a orienté cette étude vers des axes novateurs.

Bien entendu, l'ensemble des personnels d'Arts et Métiers Paristech du centre de Châlons-en-Champagne sont associés à ce travail. Je remercie plus particulièrement Régine GEOFFROY, qui m'a apporté son expertise concernant les analyses de cette étude, et Philippe Seitier pour son soutien et sa disponibilité.

Table des matières

Nomenclature	XI
Introduction	1
1 Étude bibliographique	3
1.1 Les Composites à Matrice Métallique	4
1.1.1 Leurs applications	5
1.1.1.1 L'allégement	5
1.1.1.2 Modification des Caractéristiques mécaniques	6
1.1.1.3 Performances particulières des CMM	7
1.1.2 Leur mise en forme	9
1.1.2.1 Les procédés de fonderie	10
<i>a)</i> Le brassage	10
<i>b)</i> Le squeeze casting	11
<i>c)</i> L'infiltration	12
1.1.2.2 La métallurgie des poudres	12
1.1.2.3 État semi-solide	13
1.1.3 L'usinabilité des CMM à renfort particulaire	14
1.1.3.1 La résistance à l'usure	14
1.1.3.2 L'arrosage par un fluide de coupe	16
1.1.3.3 Intégrité de surface	17
1.2 Les outils diamants	21
1.3 Émission de poussières et usinage	24
1.3.1 Cadre législatif	24
1.3.2 Terminologie technique	24
1.3.3 Exposition et impact sanitaire	26
1.3.4 Génération de poussière par enlèvement de matière dans le cas des <i>CMM_P</i>	27
1.4 Conclusion	38

2	Méthodologie expérimentale	39
2.1	Matériaux Utilisés	39
2.2	Les outils	41
2.2.1	Outils CVD	41
2.2.2	Outils PCD	44
2.3	Optimisation des conditions de coupe	44
2.3.1	Définition de la campagne d'essais	46
2.3.2	Métrologie associée	47
2.3.2.1	Mesure des efforts de coupe	47
2.3.2.2	Mesure d'état de surface	47
	<i>a)</i> Analyse conventionnelle de la rugosité	47
	<i>b)</i> Analyse multi-échelle	49
2.3.2.3	Mesure de l'usure en dépouille	50
2.3.2.4	Mesure de l'usure en cratère	51
2.3.2.5	Mesure des températures moyennes	52
2.4	Usinage compétitif - Faisabilité industrielle	54
2.4.1	Définition de la campagne d'essais	54
2.4.2	Analyse physique associée	55
2.4.2.1	Mesure de la puissance, Tracé de la courbe de puissance	55
2.4.2.2	Mesure des contraintes résiduelles	57
2.5	Émission de poussières en usinage des CMM_P	58
2.5.1	Définition de la campagne d'essais	58
2.5.2	Métrologie associée	59
2.5.2.1	Mesure de la concentration de particules instantanée	59
2.5.2.2	Collecte des particules par impaction	62
2.5.2.3	Calcul du Dust Unit (D_U)	62
2.6	Conclusion	64
3	Résultat expérimentaux	67
3.1	Optimisation des conditions de coupe	67
3.1.1	Performances comparées en terme d'efforts de coupe	68
3.1.2	Performances comparées en terme d'usure	70
3.1.3	Performances thermiques comparées en coupe	72
3.1.4	Performance en terme d'état de surface	75
3.1.5	Conclusion	76

3.2	Usinage compétitif - Faisabilité industrielle	79
3.2.1	Performances énergétiques (CMM_5 , CMM_{15} et CMM_{25})	79
3.2.2	Performances tribologiques : usure	84
3.2.3	Qualité et intégrité de surface	87
3.2.4	Conclusion	91
3.3	Performances écologiques : émission de poussières	93
3.3.1	Performances comparées en terme de génération de poussières . . .	93
3.3.1.1	Répartition des particules par tailles	94
3.3.1.2	Durée d'exposition au risque	95
3.3.1.3	Analyse des copeaux et calcul du Dust Unit (D_U)	96
3.3.2	Conclusion	100
3.4	Conclusion	100
4	Émission de poussières	103
4.1	Influence du traitement thermique	103
4.1.1	Évolution du Dust Unit (D_U)	104
4.1.2	Répartition par tailles de particules	105
4.1.3	Conclusion	107
4.2	Influence du taux de renfort	107
4.2.1	Répartition par tailles de particules	107
4.2.1.1	Répartition pour les outils CVD	108
4.2.1.2	Répartition pour les outils PCD	111
4.2.2	Evolution du Dust Unit (D_U)	113
4.2.2.1	pour les outils CVD	113
4.2.2.2	pour les outils PCD	115
	<i>a)</i> Influence de l'angle de coupe	115
	<i>b)</i> Influence du contact outil / copeau	116
4.2.3	Conclusion	117
4.3	Emission de poussière et durée de vie	118
4.3.1	Comportement des outils <i>CVD</i>	118
4.3.2	Comportement des outils <i>PCD</i>	120
4.3.3	Conclusion	124
4.4	Conclusion	124
	Conclusion générale et perspectives	126

Annexe 1 : Production scientifique	129
Annexes	129
Annexe 2 : Analyse économique	131
Bibliographie	133

Liste des tableaux

1.1	Modification des caractéristiques mécaniques par ajout de particules	7
1.2	Vitesse de déposition des particules	25
1.3	Comparaison des pics de concentration massique des brouillards	34
2.1	Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2009	40
2.2	Propriétés géométriques des outils CVD	42
2.3	Morphologie et structure des revêtements CVD	43
2.4	Propriétés géométriques des outils PCD	44
2.5	Morphologie et structure des revêtements PCD	45
2.6	Définition des essais d'optimisation des conditions de coupe (outils CVD) .	46
2.7	Règles de choix de la longueur de base	48
2.8	Définition des essais de durée de vie	55
2.9	Définition des essais de qualification de l'émissivité de poussière des CMM_P en usinage.	59
2.10	Caractéristiques du spectromètre d'aérosol Grimm 1108	60
3.1	Valeurs de la longueur d'onde de coupure λ_c lors des mesures de rugosité .	76
3.2	Durée de vie pour les outils CVD, temps de coupe pour les outils PCD et mode d'endommagement	86
3.3	Valeurs des rugosités Ra (entre parenthèses) mesurées à l'issue des essais d'usure avec les outils PCD sur le CMM_{25}	91
3.4	Proportion de particules inférieures respectivement à 1 et à $3\mu m$	96
3.5	Comparaison entre temps de coupe et temps de présence de particules dans l'air	98
4.1	Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2124	109

Table des figures

1.1	Evolution du module d'Young en fonction de la densité par ajout de renforts	5
1.2	Manchon de pale de rotor d'hélicoptère	6
1.3	Evolution du coefficient d'expansion thermique en fonction du taux de chargement d'un CMM	8
1.4	Mât d'antenne du satellite Hubble	9
1.5	Squeeze casting direct	11
1.6	Squeeze casting indirect avec préforme	12
1.7	Procédé de Métallurgie des Poudres	13
1.8	Observation de l'usure d'un outil diamant PCD	16
1.9	Influence de l'arrosage lors de la coupe sur la durée de vie et la rugosité . .	17
1.10	Défauts de surface engendrés par l'usinage	18
1.11	Évolution de la microdureté en sub-surface	19
1.12	Indice d'endommagement en fonction de la profondeur de passe et du rayon de pointe de l'outil	21
1.13	Performances comparées des outils CBN et diamant PCD	23
1.14	Inhalation et pénétration des particules chez l'homme	26
1.15	Lieux de génération de poussières	29
1.16	Morphologie de copeaux à différentes températures	30
1.17	Représentation schématique des copeaux ductiles et fragiles	31
1.18	Influence de la lubrification sur la quantité d'aérosol	32
1.19	Influence de la lubrification sur la taille des particules	33
1.20	Évolution de l'émission de poussière en fonction de l'angle d'inclinaison et de la vitesse de coupe	36
1.21	Courbe d'émission de poussière en perçage	37
2.1	Traitement thermique T4 du CMM	40
2.2	Micrographie du CMM Al 15% SiC T4	41
2.3	Mesure des efforts de coupe	47

2.4	Application de l'analyse par ondelettes sur un profil	50
2.5	Représentation de l'usure en dépouille V_B	51
2.6	Mesure par microscopie interférométrique de l'usure V_B	52
2.7	Représentation de l'usure en cratère K_T	52
2.8	Mesure par microscopie interférométrique de l'usure K_T	53
2.9	Mesure de température par infrarouge	54
2.10	Relevé typique de la courbe de puissance consommée à la broche	56
2.11	Reconstruction de la courbe de puissance de coupe en fonction du temps .	56
2.12	Modifications des pics de diffraction	58
2.13	Spectromètre d'aérosol	60
2.14	Dispositif d'essai pour la mesure d'émissivité de poussière des CMM_P . . .	61
2.15	Principe de mesure du spectromètre d'aérosol	61
2.16	Principe de fonctionnement d'un impacteur	63
2.17	Courbe de concentration instantanée de particules	64
3.1	Efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe et du CMM (Outils CVD, $f = 0,1mm.tr^{-1}$)	68
3.2	Efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe et du CMM (Outils CVD, $f = 0,3mm.tr^{-1}$)	69
3.3	Évolution de l'effort d'avance au cours de l'essai	70
3.4	Evolution des critères d'usures K_T et V_B après 5 secondes d'usinage du CMM_{25}	71
3.5	Corrélation entre usure en cratère et variation temporelle de l'effort d'avance	72
3.6	Évolution des températures enregistrées en sortie de matière sur les outils CVD	73
3.7	Épaisseur de matériau adhérent au niveau du bec de l'outil (essais d'opti- misation des conditions de coupe sur CMM_{25})	73
3.8	Épaisseur de matériau adhérent au niveau du bec de l'outil (essais d'opti- misation des conditions de coupe sur CMM_{25})	74
3.9	Ra mesurés à l'issue des essais sur le CMM_{25}	77
3.10	Spectre de micro-rugosité établi à partir des essais d'optimisation des condi- tions de coupe sur le CMM_{25}	78
3.11	Courbe de puissance consommée à la broche lors des essais de durée de vie sur le CMM_5	80
3.12	Observation des arêtes de coupe à l'issue des essais d'usure sur le CMM_5 .	80

3.13	Courbe équivalente à la puissance consommée sur l'axe d'avance lors des essais de durée de vie sur le CMM_5	81
3.14	Courbe de puissance consommée à la broche lors des essais de durée de vie sur le CMM_{15} avec l'outil C_{1810}	82
3.15	Observation des arêtes de coupe à l'issue des essais d'usure sur le CMM_{15}	83
3.16	Puissance consommée à la broche lors d'essais de durée de vie sur le CMM_{25}	83
3.17	Observation des arêtes de coupe à l'issue des essais d'usure sur le CMM_{25}	84
3.18	Puissance consommée à la broche lors d'essais de durée de vie sur le CMM_{25} avec les outils CVD et PCD	85
3.19	Observations de l'outil C_2 après l'essais de durée de vie sur le CMM_{25} . . .	85
3.20	Observation de l'évolution de la face de coupe lors des essais de durée de vie sur le CMM_{15}	87
3.21	Observation de l'évolution de la face en dépouille lors des essais de durée de vie sur le CMM_{15}	88
3.22	Évolution de l'usure V_B lors des essais de durée de vie sur le CMM_5 et le CMM_{15}	88
3.23	Évolution des rugosités Ra et Rt lors des essais de durée de vie sur le CMM_{15}	89
3.24	Observation des surfaces usinées à l'issue des essais d'usure sur le CMM_5 .	90
3.25	Observation des surfaces usinées à l'issue des essais d'usure sur le CMM_{15}	91
3.26	Contraintes résiduelles mesurées sur le CMM_{15}	92
3.27	Répartition par taille des particules émises en cours d'usinage	95
3.28	Concentration de particules inférieures à $3\mu m$ et puissance consommée à la broche	97
3.29	Calcul du Dust Unit lors de l'usinage du CMM_{25}	98
3.30	Morphologie du copeau festonné et surface observée	98
3.31	Observation des copeaux et morphologie des plans de cisaillement	99
4.1	Dust Unit (D_U) pour le CMM_{25} avec et sans traitement thermique T4 . .	104
4.2	Observation des copeaux obtenus lors de la coupe du CMM_{25} et du CMM_{25ST} par l'outil C_1	104
4.3	Répartition par taille des particules émises lors de l'usinage du CMM_{25} et du CMM_{25ST}	106
4.4	Répartition par taille des particules émises lors de l'usinage des CMM_p par l'outil C_1	108
4.5	Processus d'extraction et de bris de particule de SiC lors de la coupe . . .	110

4.6	Répartition par taille des particules émises lors de l'usinage des CMM_p par les outils PCD_{A10} et PCD_{B0}	111
4.7	Observation des copeaux obtenus avec l'outil PCD_{A0}	112
4.8	Dust Unit (D_U) pour différents niveaux de chargement	113
4.9	Observation des arêtes de coupe après usinage du CMM_{35}	114
4.10	Observation des copeaux obtenus lors de la coupe avec l'outil C_2 pour les différents niveaux de chargement	114
4.11	Observation de la surface du copeau frottant sur la face de coupe des outils PCD	115
4.12	Observation des outils PCD après les essais sur le CMM_{35}	116
4.13	Observation de la couche adhérente et de la longueur de contact outil / copeau sur l'outil PCD_{A0} à l'issue des essais sur le CMM_{15} et CMM_{35} . . .	117
4.14	Dust Unit (D_U) et puissance de coupe lors des essais de durée de vie avec le C_{1810} pour différents niveaux de chargement	119
4.15	Observation de la face de coupe de l'outil C_{1810} en fonction du temps lors des essais de durée de vie sur le CMM_{15}	120
4.16	Evolution du Dust Unit (D_U) lors des essais de coupe du CMM_{15} avec les outils PCD	121
4.17	Morphologie des copeaux obtenus avec le PCD_{A10} lors des essais sur le CMM_{15}	122
4.18	Corrélation D_U et rayon de courbure du copeau	122
4.19	Champs de lignes de glissement et formation du copeau	122
4.20	Corrélation entre courbure du copeau et contrainte de friction à l'interface outil / copeau en fonction de l'angle de coupe	123
1	Coût d'une minute d'usinage et durée de vie lors de l'usinage du CMM_{25} .	132

Nomenclature

a_p	(mm)	Profondeur de passe
CBN		Nitrure de Bore Cubique
C	($J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)	Capacité thermique du matériau
C_i	($\mu g.m^{-3}$)	Concentration instantanée de poussière à la mesure i
C_{dust}	($\mu g.m^{-3}$)	Concentration totale de poussière
CMC		Composite à Matrice Céramique
CMM		Composite à Matrice Métallique
CMO		Composite à Matrice Organique
CTE	(K^{-1})	Coefficient d'expansion thermique
CVD		Dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition)
D_U		Indicateur d'émission de poussière (Dust Unit)
f	($mm.tr^{-1}$)	Avance
F_c	(N)	Effort de coupe
F_f	(N)	Effort d'avance
γ	(degré)	Angle de coupe
G_s		Degré de segmentation du copeau
GF	($m^6.m^{-1}.mg^{-1}$)	Indicateur d'émission de poussière (Green Factor)
K	($W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)	Conductivité thermique du matériau usiné
K_T	(mm)	Profondeur de l'usure en cratère
κ_r	(degré)	Angle d'inclinaison d'arête
λ_c	(mm)	Longueur d'onde de coupure (ou longueur de base) pour la séparation des écarts géométriques
V_{Pmax}	($m.min^{-1}$)	Vitesse de coupe pour laquelle la production de poussière est maximale
V_{air}	(m^3)	Volume d'air contrôlé par le spectromètre d'aérosol

V_B	(mm)	Usure en dépouille
V_C	(m.min ⁻¹)	Vitesse de coupe
Ra	(μm)	Écart moyen arithmétique de la rugosité
Rt	(μm)	Rugosité totale
Rsm	(mm)	Écart moyen arithmétique des irrégularité du profil de rugosité, ou écart moyen des sillons
PCD		Diamant Polycristallin
Sma	(μm)	Spectre de rugosité (écart absolu moyen à chaque échelle)
ρ	(kg.m ⁻³)	Masse volumique
$\theta_{calculé}$	(°C)	Température moyenne sur la face de coupe

Introduction générale

Le secteur industriel a vu l'émergence du phénomène de mondialisation depuis quelques décennies. Cet accroissement des flux de biens et services au niveau international conduit au transfert de certaines activités dans des zones économiquement plus intéressantes. Une grande part des activités de production des pays industrialisés a été délocalisée vers des pays émergents pour de multiples raisons :

- l'accès à une main d'oeuvre moins chère et plus flexible : la protection sociale des pays industriels constitue une part importante de la masse salariale, de l'ordre de 30 à 60% ;
- s'affranchir des contraintes législatives et financières des pays occidentaux ;
- bénéficier d'avantages offerts à l'implantation (exonération d'impôts sur les bénéfices, cession de terrains ...).

Les délocalisations vers les pays émergents sont en grandes parties constituées de productions nécessitant uniquement de la main d'œuvre faiblement qualifiée. Afin de conserver une activité de production forte dans les pays industriels, il est donc nécessaire de privilégier et de développer la production de produits de haute technicité.

Les Composites à Matrice Métallique (*CMM*) font partie des matériaux à fort potentiel mécanique, à forte valeur ajoutée et dont la mise en forme nécessite des compétences spécifiques. Bien que présents depuis les années 1960, les Composites à Matrice Métallique connaissent une diffusion limitée malgré leurs aptitudes.

La maîtrise des différents stades de mise en forme de ces matériaux est impérative pour assurer une plus large diffusion et pérenniser une activité industrielle et économique techniquement innovante. Cette diffusion peut s'effectuer par substitution de matériaux énergivores.

Le cadre social et législatif des pays industriels ainsi que les contraintes économiques de toute activité nécessitent :

- d'optimiser les coûts par l'assurance d'une bonne productivité ;

- de veiller à la protection des personnels au sein de l’entreprise.

Le présent travail se propose de traiter ces deux points dans le cas de l’usinage à sec de composites à matrice aluminium à renfort céramiques au cours d’opérations de tournage. Il s’agit de conduire une recherche capable de mettre en évidence les paramètres process répondant aux exigences de qualité et de productivité, tout en préservant une qualité environnementale de bon niveau afin d’assurer des conditions de travail saines et humainement compatibles.

Le contenu du présent mémoire s’articule de la façon suivante :

1. Le premier chapitre est composé de trois parties. La première présente les Composites à Matrice Métallique, leurs applications ainsi que les difficultés liées à leur mise en forme. Le potentiel des outils diamants pour l’usinage des composites est décrit en seconde partie. Le chapitre conclut par les connaissances actuelles en terme d’émission de poussières lors de la coupe de matériaux autres que les composites à matrice métallique ;
2. La description des différents matériaux composites et des outils de coupe utilisés précède la définition des campagnes d’essais d’optimisation des conditions de coupe, de faisabilité industrielle et d’émission de poussières et constitue le second chapitre ;
3. Les résultats expérimentaux des premières campagnes d’essais servant à définir les paramètres de coupes adéquats lors d’essais de courte durée et à valider leur pertinence industrielle, sont présentés et discutés dans le troisième chapitre ;
4. L’objet du quatrième chapitre est l’analyse de l’émission de poussière lors de la coupe de Composites à Matrice Métallique en fonction de paramètres matériaux, outils et temporels.

Ce travail de thèse a été réalisé en plus de mon emploi de professeur agrégé (PRAG) à l’École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers (Arts et Métiers Paristech) de Châlons-en-Champagne et à généré des travaux de valorisation scientifique. La liste de ces travaux est fournie en annexe de ce mémoire.

Chapitre 1

Étude bibliographique

Un matériau composite est constitué de plusieurs matériaux différents non miscibles mais ayant une forte capacité d'adhésion. Il possède des propriétés mécaniques meilleures que celles de chacun de ses constituants pris séparément. Sa structure peut être schématisée par une matrice (organique, métallique, céramique) recevant des renforts de formes diverses (fibres longues ou courtes, particules fines ...) et de nature variable (matériau organique, métallique, céramique ou végétal).

Certains composites existent à l'état naturel, tel que le bois (matrice de lignine associée à des fibres de cellulose) ou les os (matrice d'apatite et fibres de collagène) [1]. Ce type de matériau est utilisé couramment pour la réalisation de bâtiments (béton, béton armé, contre-plaqué ...), et depuis longtemps (torchis ...).

Comme la plupart des matériaux, les performances mécaniques des composites sont fortement liées à leur structure. Celle ci peut être modifiée facilement en changeant soit :

- l'association matrice - renfort en nature (passer d'une fibre de carbone à une fibre de verre, ou d'une matrice aluminium à une matrice titane) ;
- la forme ou la structure du renfort (mat, tissus, textures multidirectionnelles, particules, fibres).

Les matériaux composites permettent donc d'obtenir une adéquation entre les exigences fonctionnelles d'une pièce et les caractéristiques mécaniques réelles de cette pièce réalisée en composite.

Les matériaux composites à matrice organique sont les plus développés et les plus utilisés à l'heure actuelle. Ils trouvent leur utilité dans des applications très variées ce qui

permet de les classer en deux sous groupes :

- composites de "Grande diffusion" ;
- composites à "Hautes performances".

Toutefois, en raison de la faible stabilité thermique de la plupart des matières plastiques, le domaine d'utilisation des composites à matrice organique se limite à des températures ne dépassant pas 200°C (exceptionnellement 300°C). Pour les plages de températures les plus élevées [2], les composites à matrice minérale (verre ou céramique) offrent une bonne réfractarité jusqu'environ 2000°C pour certains (composite carbone - carbone, par exemple). Bien sûr, pour chaque association matrice / renfort, la température limite d'utilisation varie. La plage d'utilisation en température des composites à matrice métallique se situe entre les composites à matrice organique et ceux à matrice céramique (300-400°C pour les matrices aluminium et magnésium, 500-600°C pour les matrices titane).

L'ensemble de ce travail porte sur les composites à matrice aluminium renforcée par des particules de carbure de silicium (SiC_p). La suite de ce chapitre traite donc exclusivement des CMM_p , leurs applications et les technologies de leur élaboration. Un bilan des connaissances actuelles concernant l'usinage des CMM est ensuite effectué. Ce chapitre clôturera sur un volet sanitaire, en abordant les risques inhérents aux poussières, ainsi que les liens entre émission de poussières et paramètres d'usinage.

1.1 Les Composites à Matrice Métallique

Les Composites à Matrice Métalliques (CMM) sont apparus dans les années 1960, et ont connu un essor limité étant donné leur prix. Toutefois ces matériaux présentent de meilleures propriétés spécifiques que les métaux, et sont donc attrayants pour les industries en quête d'allègement de mécanismes.

Ces industries, tout en recherchant cette réduction de masse, poursuivent des objectifs propres à leurs secteurs d'activités. Ces finalités peuvent être :

- la réduction de consommation de carburant (aviation, automobile)
- l'augmentation de la charge utile (aérospatiale, transport) ;
- l'augmentation de la vitesse ou de la portée (missiles stratégiques, sports de compétition).

La figure 1.1 montre l'évolution du module d'Young en fonction de la densité de plusieurs matériaux. Lors de l'ajout de renforts à une matrice aluminium, le module d'Young

du composite égale celui de l'acier pour une densité deux fois plus faible.

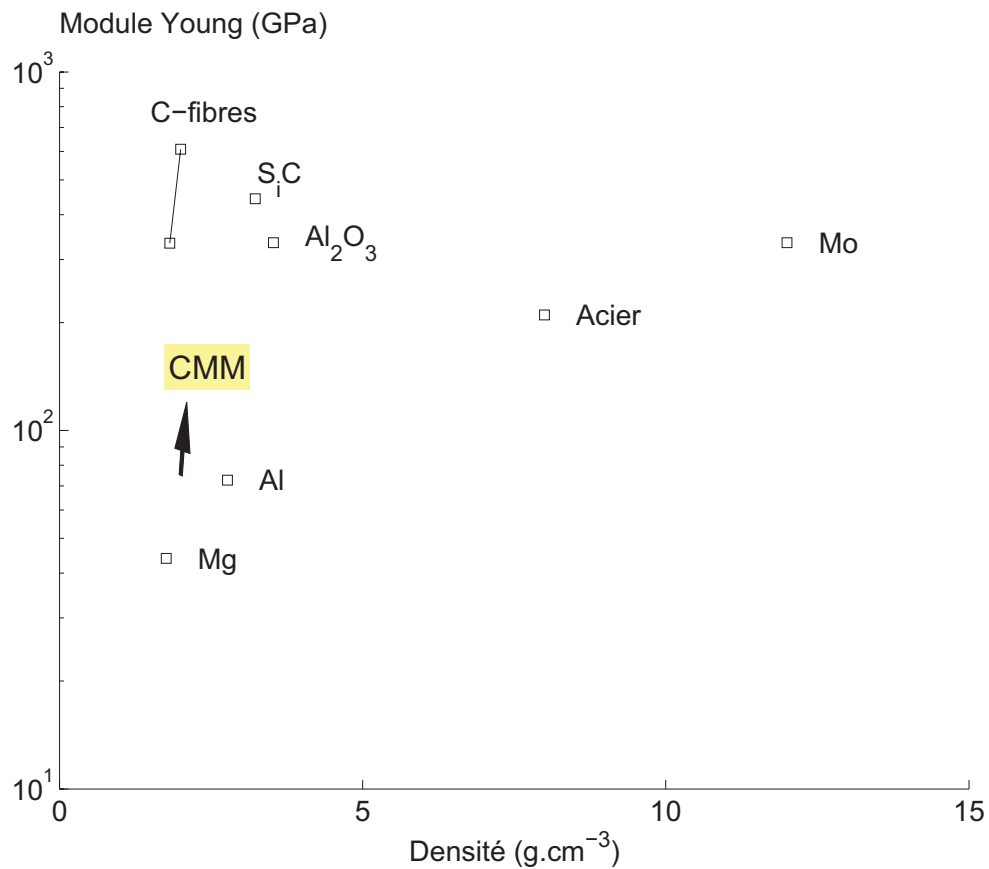


Figure 1.1 – Evolution du module d'young en fonction de la densité par ajout de renforts [3].

Bien entendu, ce paramètre n'est pas le seul à être influencé par l'addition de renforts, et ces effets divers sur le matériau se déclinent en autant d'applications différentes pouvant intéresser plusieurs domaines industriels.

1.1.1 Leurs applications

1.1.1.1 L'allégement

Ce critère étant important pour l'industrie aéronautique, il n'est pas étonnant de constater qu'EADS, qui se situe sur plusieurs secteurs fortement consommateurs de matériaux composites (l'aéronautique avec les avions et les hélicoptères, l'aérospatial, la défense ...), utilise des pièces en CMM sur ses hélicoptères (Eurocopter). La figure 1.2

représente une pièce en composite réalisée par les Forges de Bologne (Groupe Manoir Industrie) qui a permis à EADS de remplacer une pièce en titane par du CMM et de réaliser un gain de 14 kilogrammes.

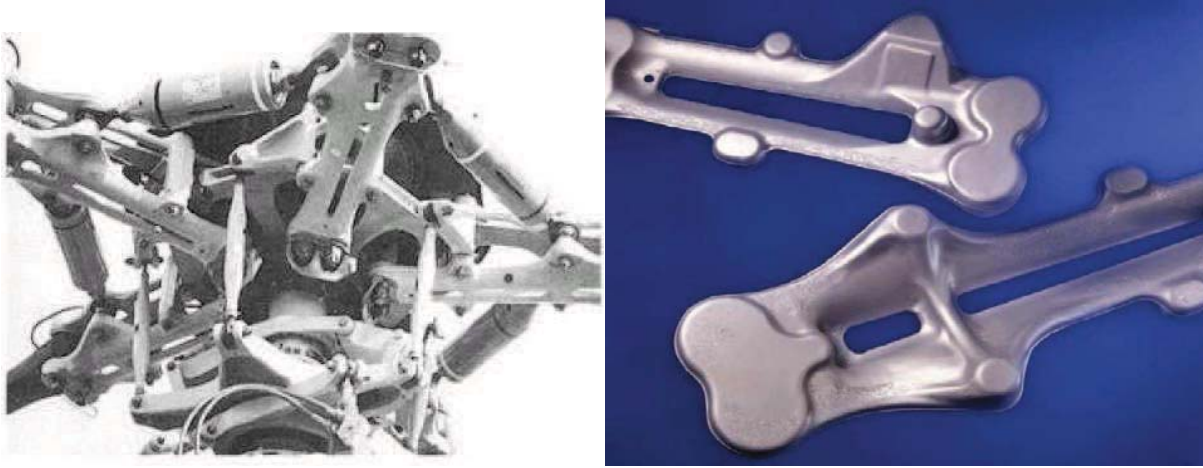


Figure 1.2 – Manchon de pale de rotor d'hélicoptère (Eurocopter N4 et EC120) : pièce en situation et pièce brute de forgeage [4].

La substitution des matériaux dit "classiques" par ces matériaux technologiquement avancés n'est possible qu'en raison des bonnes performances mécaniques des composites. Étant donné l'utilisation des CMM sur des pièces pouvant aussi être fortement sollicitées (figure 1.2), il est clair que pour des raisons de sécurité, leurs performances doivent être homologuées par une certification industrielle.

1.1.1.2 Modification des Caractéristiques mécaniques

C'est l'association d'une matrice de faible densité (comme l'aluminium) à des éléments de renforts modifiant les performances mécaniques, qui constitue le principal intérêt des composites. Les modifications apportées par l'ajout du renfort sur les caractéristiques mécaniques comparées à celles du matériau de la matrice sont :

- une augmentation de la dureté [5,6] ;
- une augmentation de la limite élastique ;
- une augmentation de la limite à la rupture ;
- une augmentation du module d'Young [5,6].

Ces caractéristiques correspondent aux paramètres de référence utilisés lorsqu'il s'agit de classer des matériaux entre eux, mais ce ne sont pas les seules propriétés modifiées.

Une des déclinaisons commerciales des composites à matrice métallique la plus connue est le Duralcan. Le tableau 1.1 indique la limite élastique (Re), la limite à la rupture (Rm), l'allongement et la dureté pour différentes valeurs de renforcement en particules de carbure de silicium. Pour une matrice donnée (aluminium A356, qui est un alliage d'aluminium avec 7% de silicium et du magnésium), l'ajout de 10% de SiC modifie considérablement les propriétés du matériau tandis que l'ajout de 20% de SiC fait toujours évoluer ces propriétés mais avec un ralentissement de la tendance.

Matériau		A356	A356 + 10% SiC	A356 + 20% SiC
Re	en MPa	170-230	270-300	310-340
	comparé à A356		+42,5%	+65,2%
Rm	en MPa	260-300	300-340	320-360
	comparé à A356		+14,3%	+21,5%
Allongement	en %	3-6	0,5-1,2	0,3-0,6
	comparé à A356		-81%	-90%
Dureté	HRB	55	65-70	70-74
	comparé à A356		+22,7%	+30,9%

Tableau 1.1 – Évolution des performances mécaniques de l'aluminium A356 par ajout de particules de SiC, Notice technique Duralcan [7].

Même si le renfort initial est critique, les CMM avec des chargements plus importants ont des performances supérieures et s'utilisent pour des applications spécifiques. Le tableau 1.1 ne donne des indications que pour un couple matrice / renfort avec quelques niveaux du taux de renfort. Il est évident que la multiplication des matériaux de matrice, du type et de la nature du renfort permet d'adapter au mieux les performances à l'utilisation. Par exemple, le développement de CMM à matrice Titane présente l'avantage d'un usage possible à très haute température pour les organes de propulsion.

1.1.1.3 Performances particulières des CMM

En plus des paramètres "classiques" vus précédemment, d'autres caractéristiques permettent d'améliorer la qualité de pièces existantes. La liste suivante n'est pas exhaustive mais présente certaines spécificités exploitées dans des applications industrielles :

- Amélioration de la tenue à chaud [7] ;
- Dilatation thermique ajustable [8] ;

- Augmentation de la résistance à l'usure (extrémité des cannes de golf, pistons, chemises, pièces de freinage [9, 10]).

Ces différentes caractéristiques ainsi que leur niveau de performance (plus ou moins grande résistance à l'usure ...) sont étroitement liés à la teneur en renforts. La figure 1.3 met en évidence la proportionnalité entre le Coefficient d'Expansion Thermique (CTE) et le taux de renforts. L'utilisation fine de la quantité de renforts au sein du CMM trouve donc une application particulière dans l'obtention d'un CTE spécifiquement adapté aux besoins. L'équivalence du Coefficient d'Expansion Thermique entre le CMM et les matériaux dits classiques (Acier, bronze ...) représentée figure 1.3, montre le fort potentiel des CMM. La prise en compte globale du matériau nécessite aussi de comparer les densités respectives, ce qui confère au CMM un avantage certain.

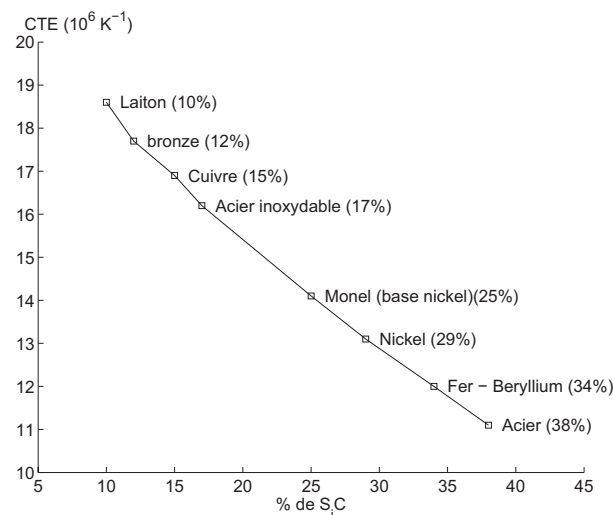


Figure 1.3 – Evolution du CTE en fonction du taux de chargement des CMM à matrice aluminium [8].

La faible densité des CMM combinée à l'ajustement du Coefficient d'Expansion Thermique afin d'obtenir une bonne stabilité dimensionnelle, présente un intérêt certain pour l'industrie aérospatiale. Le mât d'antenne du télescope spatial Hubble (figure 1.4) a été réalisé en CMM à base aluminium 6061 renforcée par 40% de fibres de carbones [4]. Les gains sont multiples :

- Réduction de masse de 40% ;
- Bonne stabilité dimensionnelle (faible CTE) ;
- Grande conductivité thermique et électrique.



Figure 1.4 – Mât d’antenne du satellite Hubble 6061 / 40% fibres de carbone [4].

En plus d’un coefficient d’expansion thermique faible, les supports de composants électroniques utilisent d’autres propriétés intéressantes des CMM [11] :

- Forte conductivité thermique permettant de dissiper la chaleur ;
- Faible densité ;
- Grande rigidité afin de réduire les déformations.

Enfin, la capacité d’amortissement des ondes sonores par les CMM est intéressante pour des applications militaires (réalisation des coques et des hélices des torpilles et des sous-marins).

Les quelques exemples d’applications présentés ne sauraient être exhaustifs, et il en est de même pour les propriétés mécaniques de ces matériaux. L’objet de ce paragraphe est de mieux appréhender le potentiel de ces matériaux.

1.1.2 Leur mise en forme

Comme cela a été vu au début de ce chapitre, un composite est une association de deux matériaux non miscibles dont l’utilisation se justifie par l’obtention de caractéristiques mécaniques congrues. Sa réalisation est donc rendue difficile par cette non miscibilité et par l’exigence d’obtention de performances mécaniques. En effet, la zone de transition matrice / renfort, appelée interface est l’élément clé qui assure le transfert des sollicitations mécaniques appliquées sur le matériau vers le renfort. A cette difficulté s’ajoute le souci de répartition du renfort. Celle ci peut être homogène ou, pour certaines applications, certaines zones peuvent nécessiter un renforcement plus important. L’hétérogénéité du

composite doit donc être maîtrisée et le procédé de mise en forme doit être adapté à ces contraintes.

Les défauts de mise en œuvre généralement constatés au sein de ces matériaux sont :

- des couches d’oxydes formées à la surface et entraînées au cœur du matériau ;
- la formation d’intermétalliques ;
- des porosités ;
- la mauvaise répartition des éléments de renforts.

Ces défauts ne sont généralement pas détectables lors du processus de fabrication mais sont constatés par l’intermédiaire de mauvaises performances mécaniques.

Les différents procédés permettant la réalisation de CMM peuvent se décliner suivant trois catégories en fonction de l’état du matériau lors de la fabrication :

- sous forme liquide (Fonderie) ;
- sous forme de poudre (Frittage) ;
- sous forme pâteuse (état semi-solide, Thixoformage).

1.1.2.1 Les procédés de fonderie

La facilité de mise en œuvre des procédés de fonderie les rends intéressants en terme de productivité. Ils permettent l’obtention de CMM sous forme de lopins (ou billettes) ou de pièces moulées présentant leur forme quasi-définitive. Toutefois, ces procédés rencontrent certaines difficultés lors de l’introduction du renfort dans la matrice en fusion. En effet, la différence de densité entre le renfort et la matrice peut poser des problèmes de flottaison ou de sédimentation, ces deux phénomènes augmentent la difficulté à obtenir une répartition homogène du renfort au sein de la matrice. Les technologies utilisées pour contourner ces difficultés se déclinent ainsi :

a) Le brassage

Une des solutions apportées consiste à brasser l’ensemble lors du mélange. Au cours du brassage, le mouillage du renfort va permettre une meilleure répartition de celui-ci. Afin de ne pas entraîner de gaz ou des peaux d’oxydes au cœur du matériau, le brassage s’effectue sous atmosphère protectrice (vide ou gaz neutre). Il existe plusieurs technologies de brassage :

- Le brassage mécanique (développé par Alcan) ;

- Le brassage électromagnétique (utilisation d'un four à induction) ;
- Le brassage électromagnétique assisté par ultrasons.

En plus des défauts de répartition du renfort générés par le manque de mouillabilité et des inclusions de bulles de gaz, le front de solidification a tendance à repousser les particules vers le dernier liquide.

b) Le squeeze casting

Le Squeeze casting (appelé aussi "forgeage liquide" ou "moulage - forgeage") consiste à effectuer la solidification de l'alliage sous pression. Cette technique permet de réduire les porosités et d'obtenir des pièces possédant des propriétés mécaniques élevées (tenue en fatigue par exemple). Ce procédé permet ainsi d'imprégner une préforme de renfort qui est préchauffée, introduite dans le moule et infiltrée par l'alliage liquide. La solidification est ensuite réalisée sous une pression supérieure à 30 MPa.

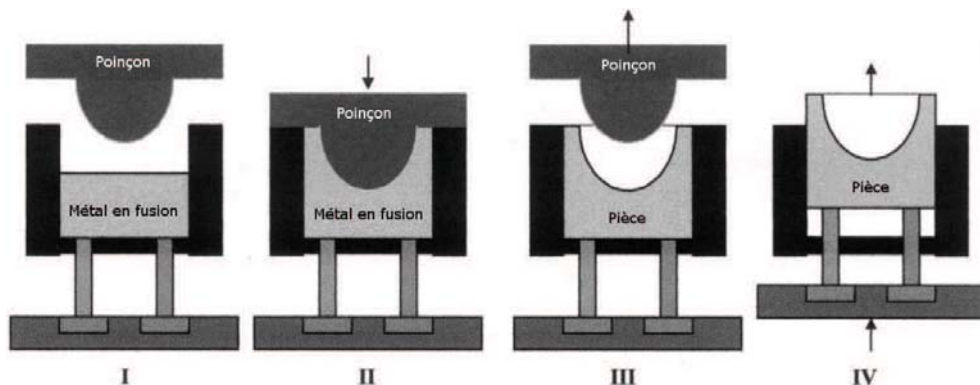


Figure 1.5 – Squeeze casting direct [12].

Ce procédé se décline de deux façons :

- Le squeeze casting direct (figure 1.5), qui consiste à déposer l'alliage dans le moule, et le moule supérieur assure la mise sous pression de l'ensemble. Le dosage de la quantité d'alliage est important afin de permettre un remplissage correcte.
- Le squeeze casting indirect (figure 1.6), dont le principe est assez proche de la fonderie sous pression. Dans ce procédé l'alliage est injecté dans le moule par un piston, et la mise sous pression peut être effectuée par ce même piston ou un autre. Ce mode d'introduction de l'alliage est plus turbulent en comparaison avec le squeeze casting direct, c'est pourquoi cela s'effectue généralement sous atmosphère neutre.

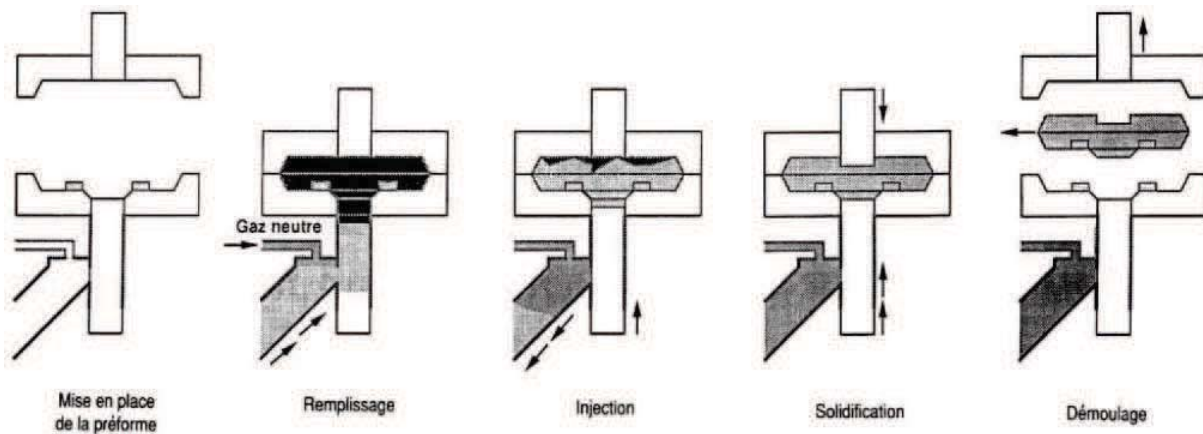


Figure 1.6 – Squeeze casting indirect avec préforme [9].

En plus de la réduction des porosités et des bonnes propriétés mécaniques, ce procédé permet d'obtenir des pièces proches de la pièce finie (Near Net Shape) avec une bonne qualité de surface. La réalisation de pièces complexes n'est toutefois pas possible.

c) L'infiltration

Comme cela peut être le cas pour le squeeze casting, une préforme est réalisée afin de correspondre au mieux à la localisation des renforts, et est ensuite positionnée dans le moule. L'infiltration de la préforme par l'alliage peut s'effectuer sous atmosphère gazeuse. Au cours de l'imprégnation, le liant servant à maintenir les renforts de la préforme est détruit. Ce procédé ne nécessite pas d'outillage particulier et peut s'effectuer par moulage au sable, en moule métallique ou en cire perdue. Il permet de réaliser des pièces avec des renforts localisés ou de formes complexes.

1.1.2.2 La métallurgie des poudres

Ce procédé est particulièrement adapté pour la réalisation de pièces dont les constituants présentent une forte hétérogénéité et une non miscibilité. En effet, le mélange s'effectue lorsque les éléments sont sous forme de poudres, ce qui facilite la répartition des différents constituants.

Les différentes étapes de la métallurgie des poudres représentées sur la figure 1.7 sont :

- le mélange des constituants (matrice + renforts), dont l'homogénéité de répartition peut être obtenue par une adéquation entre les diamètres des éléments ;

- le dégazage, permet de limiter la formation de porosités ;
- le compactage (ou frittage). Cette étape peut être réalisée à chaud ou à froid.

A l'issue de ces étapes, il est possible de réaliser une opération de déformation plastique (filage, laminage, ...) qui a l'avantage de supprimer les porosités résiduelles. Malgré la lenteur du procédé ainsi que son coût élevé, la métallurgie des poudres présente l'avantage de pouvoir s'appliquer sur l'ensemble des matériaux et quelle que soit la taille des particules de renfort.

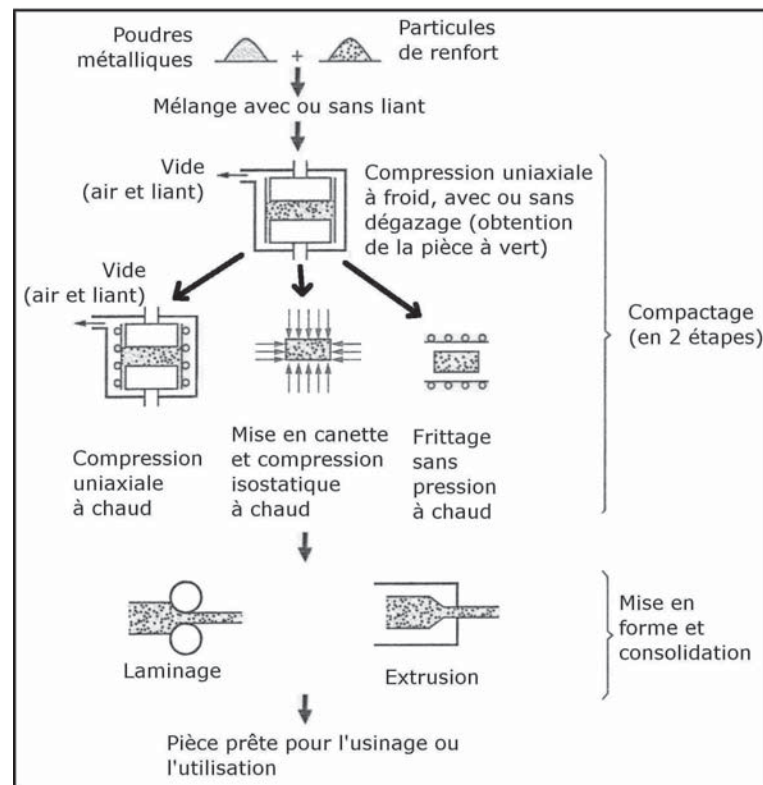


Figure 1.7 – Procédé de Métallurgie des Poudres [13].

1.1.2.3 État semi-solide

Le thixoformage désigne l'ensemble des procédés de mise en forme appliqués aux alliages dans l'état semi-solide obtenu au cours d'une refusion partielle.

Au même titre que le squeeze casting, le thixoformage combine les avantages de la fonderie et de la déformation plastique :

- obtention de pièces de précision ;
- réalisation de parois minces ;

- bonnes performances mécaniques.

En plus de ces propriétés intéressantes, le thixoformage conduit à l'obtention d'une structure globulaire plutôt que dendritique lors d'une solidification traditionnelle. L'incorporation des éléments de renforts au sein de l'alliage semi-solide facilite leur dispersion et leur répartition.

1.1.3 L'usinabilité des CMM à renfort particulaire

La section précédente a décrit les différents procédés d'obtention de lopins, de billettes ou de pièces semi-finies, mais la réalisation des surfaces fonctionnelles (portées de roulements, surfaces d'appui ...) nécessite des opérations d'usinage. Lors de ces opérations, les renforts qui ont permis d'améliorer les caractéristiques mécaniques vont poser des difficultés lors de la coupe.

1.1.3.1 La résistance à l'usure

Plusieurs études ont portées sur l'usinage des Composites à Matrice Métallique, et l'observation des surfaces usinées et des outils fait apparaître des stries, des sillons. Ces marques sont orientées suivant la direction d'avance pour la pièce, et dans le sens d'écoulement du copeau en ce qui concerne l'outil. Ce phénomène s'explique par le frottement copeau / face de coupe et surface usinée / face en dépouille, ainsi que par l'action abrasive du troisième corps. Celui ci est composé de plusieurs éléments :

- des particules extraites du matériau lors de la coupe ou du copeau ;
- des grains de l'outils (grains de carbure ou de diamants, fonction de la nature de l'outil).

Cette action abrasive des particules s'explique par la grande dureté des particules. Lorsque l'on compare la dureté du carbure de tungstène (dureté Knoop WC 1 500 $kg.mm^{-2}$ [14]) avec celle des particules de carbure de silicium (dureté Knoop SiC 2 400 kg/mm^{-2} [14]). La différence de dureté étant en faveur des particules de renfort (+60% de dureté), la présence d'une usure abrasive est triviale.

La plupart des études ont montré que l'usure abrasive est le mode principal d'usure des outils lors de l'usinage des CMM_P [14–17]. Li et al. [14] ont mis en place un indicateur prenant en compte les caractéristiques du composite (taille et densité des particules) et de l'outil (rayon de raccordement face de coupe / face en dépouille). A partir d'une certaine valeur de cet indicateur, l'usure est considérée comme très importante voire critique. Cela

signifie que les différents paramètres pris en compte (rayon d'outil, pourcentage et taille de particules) ne permettent pas aux particules qui se trouvent en contact de l'outil de s'enfoncer au sein de la matrice et d'avoir un faible impact sur l'usure de l'outil. En effet, selon ces auteurs, la particule se situant au niveau de la pointe de l'outil trouverait appui sur une autre particule, et cet empilement de particules augmenterait le pouvoir abrasif du renfort.

El Gallab et al. [15] ont aussi mis en évidence cette usure abrasive par l'apparition de stries au niveau de l'outil. L'observation de la face de coupe a aussi permis de constater la présence d'une arête rapportée ainsi que d'une couche rapportée, même à des hautes vitesses de coupe de l'ordre de 900 m.min^{-1} . El Gallab et al. estiment que le matériau transféré au niveau des stries et sur la face de coupe de l'outil a plutôt une action protectrice et limite l'abrasion.

Andrewes et al. [16] considèrent par ailleurs que l'usure de l'outil favorise l'adhésion du CMM_P . Toutefois l'analyse effectuée ici sur l'influence de cette couche adhésive diffère de celle de El Gallab et al. [15]. L'usure initiale serait générée par l'action abrasive des particules sur l'outil. Cependant l'usure de la face en dépouille serait propice à l'adhésion du matériau provenant de la zone de contact à forte pression (face en dépouille / surface usinée).

Ensuite ce film se détache et est emporté sous l'action des particules. Lors de ce décollement, des grains d'outils sont emportés, et cette surface d'outil dégradée est exposée à l'adhésion d'un nouveau film. Ce processus est cyclique

- adhésion de matériau ;
- décollement du film accompagné de grain d'outil ;
- ...

Andrewes et al. considèrent donc que l'usure initiale est abrasive, et que l'usure en régime établie serait abrasive et adhésive.

La figure 1.8 présente la face en dépouille d'un outil diamant PCD après 53 minutes d'usinage d'un CMM_P Al Si 10 / 20% SiCp. Cet outil a subi une attaque chimique avant observation afin de supprimer le film de matériau CMM_P ayant adhéré sur la face de coupe. La présence de stries sur l'outil montre clairement l'action des particules et par conséquent la présence d'une usure abrasive. Au niveau de la frontière entre la zone usée et la zone non usée, la morphologie de cette limite pourrait correspondre à une décollement de la couche supérieure de l'outil et confirmerait l'analyse de Andrewes et al. [16] quant à la présence d'une usure adhésive en plus de l'usure abrasive.

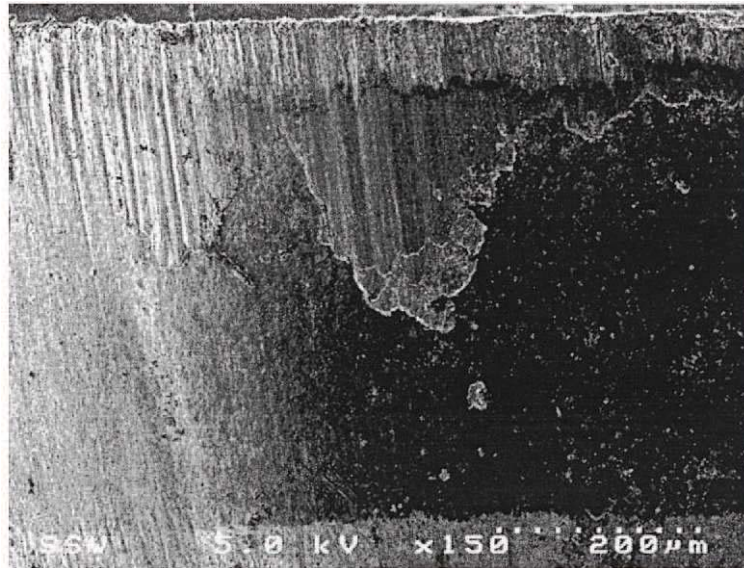


Figure 1.8 – Usure d’un outil diamant PCD (temps de coupe de 53 minutes sur un CMM_P Al Si 10 / 20% SiCp [16]).

1.1.3.2 L’arrosage par un fluide de coupe

Une des solutions envisagées généralement avec les alliages d’aluminium pour limiter l’adhésion du matériau sur l’outil, consiste à lubrifier. Hung [18] a constaté une réduction de l’arête rapportée lors de l’utilisation de lubrifiant en tournage, mais cela n’a toutefois pas permis d’améliorer la durée de vie de l’outil. A partir de cette constatation, l’hypothèse d’action protectrice de la couche adhérente de El Gallab [15], ainsi que celle de l’usure adhésive de Andrewes ne semblent plus coïncider avec les données expérimentales.

En fait, un phénomène spécifique se produit lors de la coupe des composites sans arrosage. Cronjager [21] a constaté lors d’essais de perçage et de fraisage, que l’usure augmente avec la présence de fluide de coupe, ainsi que Hung et al. [19] lors d’opérations de dressage. Cette étude, consacrée à l’arrosage lors du tournage des composites, a montré qu’un arrosage important de la zone de coupe permet d’évacuer les copeaux et les particules extraites (provenant de l’outil, du CMM_P), et n’a pas d’incidence sur la durée de vie. Dans le cas d’un arrosage ne remplissant pas ce rôle de nettoyage de la zone de coupe, l’effet est contraire à l’objectif, et il y a formation d’une boue abrasive qui augmente le taux d’usure et détériore la qualité de la surface. Les effets de l’arrosage sont montrés au niveau de la figure 1.9. Le graphique 1.9 (a) est extrait de l’article de Hung sur la lubrification [19]. Il représente le temps d’usinage en fonction de la vitesses de coupe, pour un critère d’usure limite ($V_B = 0,3$ mm). Ce graphique met en évidence l’insensibilité de

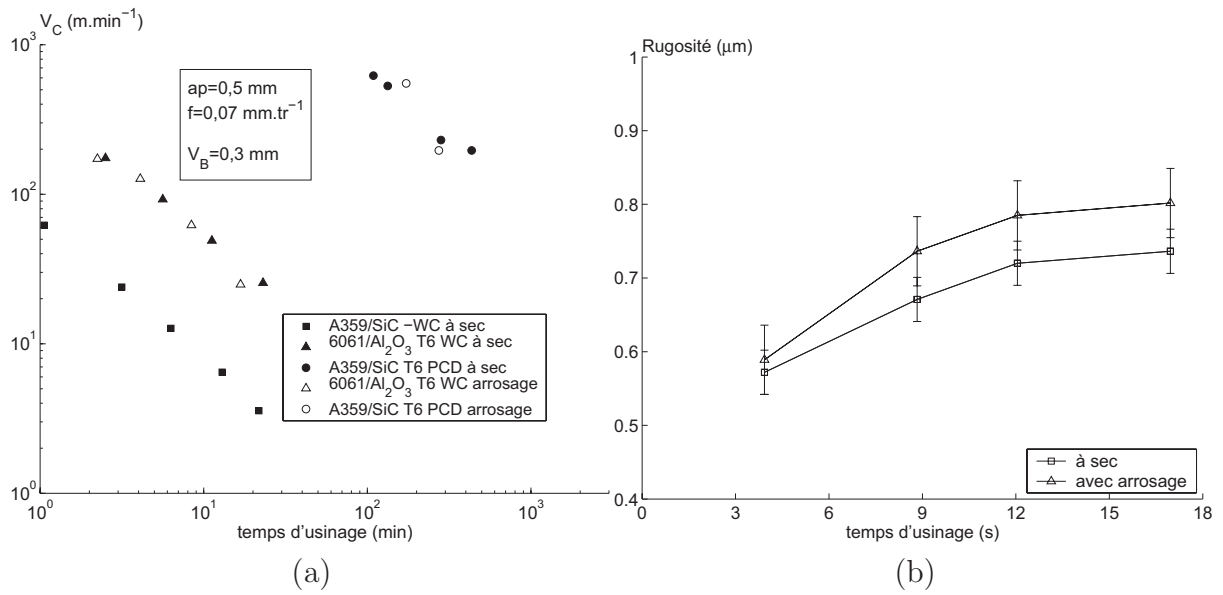


Figure 1.9 – Influence de l’arrosage sur la durée de vie (a) [19], sur la rugosité (b) [20].

l’usure en dépouille V_B à la lubrification. Le second graphique (figure 1.9 (b)) présente l’évolution de la rugosité en fonction du temps de coupe dans le cas d’un usinage à sec et d’un usinage avec lubrification d’un Al Si 7 / 20% SiCp avec un outil carbure. Il y a peu de différences sur la première mesure (au bout de 4 secondes), mais la rugosité obtenue avec lubrification devient rapidement supérieure d’environ 10% par rapport à l’usinage à sec. Cette dégradation de la rugosité par la lubrification s’explique, selon Kannan et al. [20], par l’expulsion des particules qui ont subi une décohésion partielle lors de la coupe. Cette extraction crée des porosités qui interviennent dans le calcul de la rugosité arithmétique (R_a) et augmente donc la rugosité mesurée avec lubrification.

1.1.3.3 Intégrité de surface

Le phénomène d’extraction de particules avancé en présence d’un fluide de coupe est rendu possible par l’action de l’outil sur les particules. L’arête de coupe génère des décohésions de particules, ainsi que d’autres défauts de surfaces. La coupe des CMM_P semble donc avoir une incidence sur l’intégrité de surface. Les études portant sur l’intégrité de surface sont assez peu nombreuses en dépit de l’importante incidence de ces défauts sur la tenue en fonction de la pièce. L’observation de la surface usinée révèle plusieurs défauts localisés au niveau du renfort :

- décohésion de particules de la matrice (figure 1.10 (a)) ;

- particules extraites (figure 1.10 (b)) ;
- particules fissurées (figure 1.10 (c)).

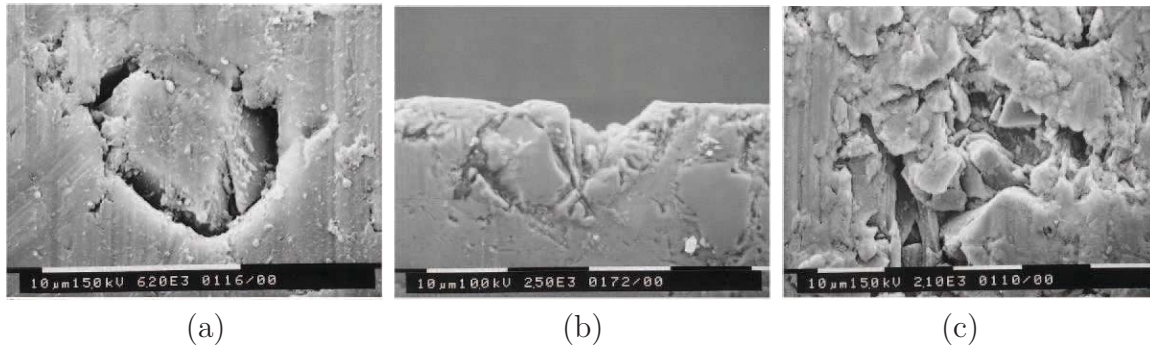


Figure 1.10 – Défauts de surface engendrés par l’usinage [22] : (a) décohésion, (b) particules fissurées, (c) particules extraites.

Mis à part la fissuration des particules qui provient du contact direct de l’outil avec le renfort, la décohésion renfort / matrice provient de l’écrouissage du matériau autour d’une particule rigide [22]. Le stade ultime de cette décohésion se traduit par l’évacuation de la particule qui va laisser la place à une porosité et amplifier le phénomène d’usure abrasive si elle reste au niveau de la zone de coupe. Ces défauts d’origine surfacique risquent de se propager au sein de la matière pour créer des dommages subsurfaciques.

Cette atteinte à l’intégrité sub-surfacique trouve son point de départ en surface par la coalescence des porosités en vue de former des micro-fissures. Ces dernières vont se propager d’un site particulière à un autre, et ce développement sera d’autant plus rapide et profond que les particules seront proches les unes des autres. Ce mécanisme de propagation est aussi présent lors de la formation du copeau et favorise sa fragmentation par un processus de fissuration. Ces fissures ont été observées en tournage [22] et en perçage [23]. L’ordre de grandeur de pénétration de ces micro fissures en tournage est d’environ $10\mu\text{m}$.

El Gallab [22] et Kannan [20] (figure 1.11) ont effectué des mesures de microdureté à différentes distances de la surface usinée et ont constaté une épaisseur affectée par la coupe de l’ordre de 60 à $100\mu\text{m}$ pour le tournage, tandis que Tosun [23] obtient des épaisseurs beaucoup plus importantes ($200\mu\text{m}$) dans le cas le plus défavorable de perçage.

La modification de la microdureté dans cette couche proviendrait de plusieurs phénomènes [22] :

- l’accroissement de la densité des dislocations, en raison des contraintes résiduelles générées par les forces de coupe, la température et la déformation plastique ;

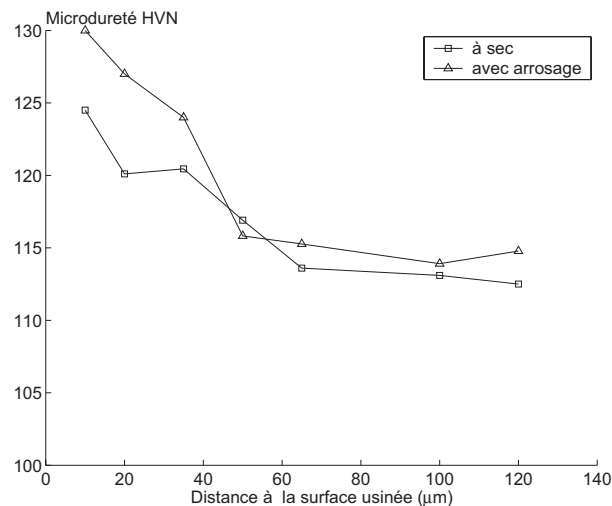


Figure 1.11 – Évolution de la microdureté en sub-surface [20].

- la formation de grains fins ;
- le présence de précipité de silicate.

L'épaisseur de cette couche affectée varie en fonction des paramètres de la coupe. Conformément aux explications précédentes, tout ce qui va augmenter la température de la zone de coupe va accroître l'épaisseur affectée :

- augmentation de la vitesse de coupe ;
- augmentation de l'avance ;
- augmentation de la profondeur de passe.

Ceci a été constaté pour le perçage et le tournage. Lors de l'analyse des essais de perçage, Tosun [23] a montré que la composition de la couche affectée est aussi modifiée par la nature du matériau de l'outil ainsi que par l'angle de pointe. Elle peut être constituée majoritairement du matériau de la matrice, ou de particules. Un foret en carbure va générer le plus souvent une couche fortement composée de renforts, contrairement aux forets en acier rapide (HSS) et en acier rapide revêtu de nitrure de titane (HSS+TiN) qui vont créer une couche à forte teneur en matériau de la matrice. Beaucoup d'autres paramètres influent sur la couche affectée :

- les conditions de coupe ;
- l'état de livraison du CMM_P ;
- la variation de l'angle de pointe, dont l'effet dépendra du matériau d'outil.

L'importance de l'analyse, de la compréhension et de la réduction des endommagements en surface et en sub-surface réside dans leurs impacts sur le comportement de la pièce mécanique en fonctionnement (tenue en fatigue ...).

Afin de compléter et de comprendre les résultats obtenues lors de leurs précédentes études [15,22], El Gallab et al. [24] ont utilisé les éléments finis au niveau de la surface usinée ainsi qu'en sub-surface. Cette modélisation a pour objet de lier les endommagements en subsurface aux paramètres de coupe, par l'analyse des différents champs de contraintes (contrainte de cisaillement, hydrostatique, résiduelle ...). Dans la zone de cisaillement primaire, la contrainte de cisaillement a été calculée à 500 MPa à la pointe de l'outil et aux alentours de 400 MPa au niveau de la surface libre du copeau. Cette forte contrainte entraîne le cisaillement du matériau de la matrice. Quant à la contrainte hydrostatique, sa forte valeur compressive (-500 MPa) va devenir positive lors du déchargement et générer des fissurations dans le matériau. Ces fissurations sont facilitées par la création de porosités. Ces porosités apparaissent au voisinage des particules et sont la conséquence de la grande déformation plastique de la matrice dans la zone de cisaillement secondaire qui n'agit pas sur les particules de renforts. Le mécanisme de formation du copeau serait une combinaison entre le cisaillement et la propagation de fissures. Cette explication fournie par El Gallab et al. [24] explique aussi la fragmentation du copeau dans la plupart des conditions de coupe. Cette étude a aussi porté sur les endommagements subsurfaciques. L'utilisation d'un indicateur d'endommagement permet de qualifier la prédisposition à l'apparition de fissures. Cet indicateur est calculé comme le rapport entre la contrainte hydrostatique et la contrainte de cisaillement. Plus cet indicateur est élevé, moins l'endommagement sera important car la contrainte hydrostatique va tendre à refermer les fissures. L'influence de plusieurs paramètres a été étudiée :

- la vitesse de coupe ;
- l'avance ;
- rayon de bec (figure 1.12 (a)) ;
- la profondeur de passe (figure 1.12 (b)).

Les simulations effectuées sur les deux derniers paramètres sont présentées figure 1.12. Afin de minimiser les endommagements subsurfaciques il est donc recommandé de minimiser le rayon de bec (0,8 plutôt que 1,6 mm) ainsi que la profondeur de passe (1,5 plutôt que 2,5 mm).

L'amélioration des performances mécaniques par l'ajout de renforts a diminué l'usabilité du matériau. En effet, ces renforts induisent un fort taux d'usure des outils, ils

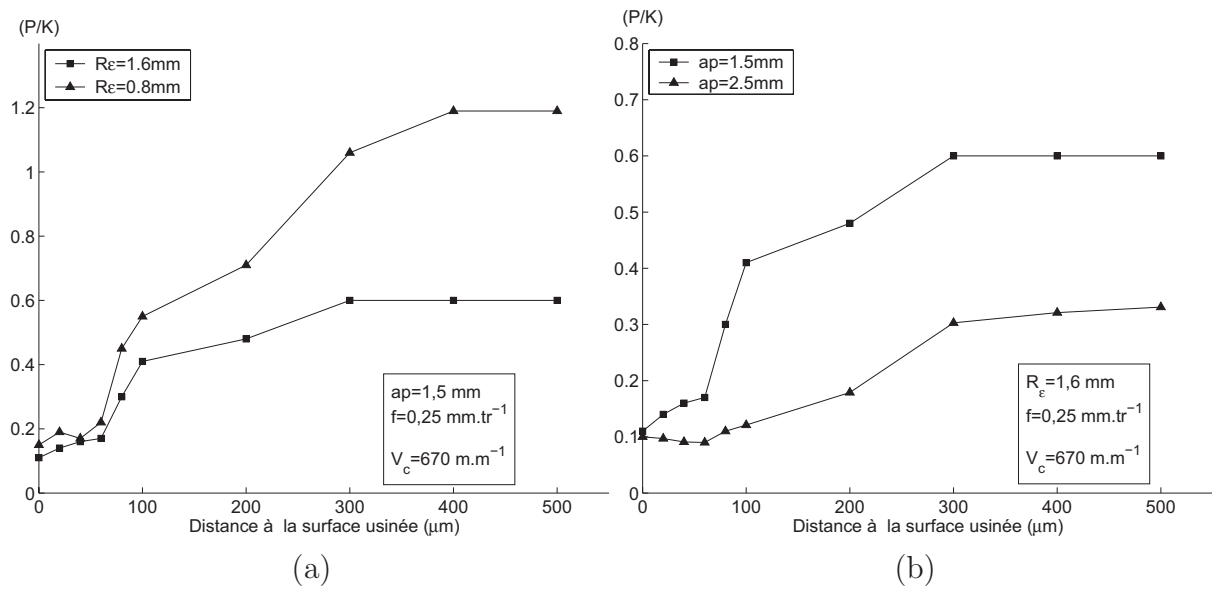


Figure 1.12 – Indice d'endommagement en fonction du rayon de pointe de l'outil (a) et de la profondeur de passe (b) [24].

conduisent à la formation d'une boue abrasive si l'arrosage est insuffisant, ce qui détériore les performances de l'outil de coupe. L'intégrité de surface de la pièce mécanique en est affectée, ainsi que ses performances. Le choix d'un outil capable de résister à ce fort taux d'usure et de présenter des durées de vies acceptables apparaît comme étant la première étape pour l'optimisation de l'usinage des CMM_P .

1.2 Les outils diamants

Dans le paragraphe 1.1.3.1, nous avons montré que l'usure abrasive est le mode dominant dans la coupe des CMM_P ([14–17]). Cette usure abrasive est le fait de l'action des particules très dures sur l'outil. Une des façons de réduire cet impact sur la face de l'outil est de minimiser le rapport dureté du renfort / dureté du matériau de l'outil.

La plus grande dureté d'outil est obtenue avec des outils diamants. Ils présentent une dureté supérieure aux carbure de silicium, tout comme les outils en Nitrure de Bore Cubique (CBN). Ces derniers ont fait l'objet de quelques études, Cifti et al. [25] ont analysés l'impact des conditions de coupe et de la taille des particules de renfort sur l'usure d'un outil CBN, tandis que Ding et al. [26] ont comparé plusieurs outils CBN avec un outil diamant PCD. Cifti et al. ont constaté un fort endommagement de l'outil CBN par les particules de forte taille ($110 \mu\text{m}$). Les mécanismes d'usure sont principalement

l'abrasion et l'adhésion, sauf pour les grosses particules qui entaillent l'arête de coupe et le bec de l'outil et les fragilisent. L'observation par Ding et al. des outils CBN a montré des fissurations intergranulaires sur la face de coupe et la face en dépouille ainsi qu'un collage important. Quant à l'outil diamant PCD, celui-ci présente peu d'adhésion et l'usure en dépouille V_B est deux fois plus faible qu'avec le CBN (figure 1.13 (b)). L'autre paramètre important est la rugosité de la surface usinée qui reste constante quelque soit la longueur usinée avec le PCD, tandis qu'il y a une forte dégradation de la rugosité avec les outils CBN (figure 1.13 (a)).

Étant donné que lors de l'usinage des CMM_P l'outil est soumis à une usure abrasive, et au vu des duretés respectives des outils (de 7 000 à 11 000 HV pour le diamant PCD, et de 3 000 à 5 600 HV pour les outils CBN [26]), il n'y a rien d'étonnant à ce que l'outil diamant présente des performances nettement meilleures. Cette comparaison CBN / diamant PCD a permis de montrer les différents avantages des outils diamants pour l'usinage des CMM :

- bonne résistance à l'usure abrasive ;
- bonne résistance à la fissuration ;
- faible potentiel d'adhésion du matériau sur l'outil.

Les outils diamants semblent donc être les meilleurs outils pour l'usinage des composites à matrice métallique. Néanmoins dans les outils de coupe le diamant est principalement utilisé de deux façons :

- Diamant polycrystallin brasé sur un substrat tel que plaquette ou corps d'outil (PCD) ;
- Revêtement déposé chimiquement (CVD).

Les outils diamants PCD sont constitués d'un agglomérat de particules de diamants enchevêtrées et orientées arbitrairement dans un liant métallique. Cet agglomérat est réalisé par frittage afin de constituer un insert, qui est ensuite brasé sur le support. Dans le cas du tournage, le support est généralement une plaquette en carbure de tungstène.

Les outils CVD sont plus récents et présentent de grande dureté. Le principe consiste à déposer une fine couche de particules de diamants. Le substrat est revêtu d'un film de diamant pur, car sans liant (contrairement au PCD). Le substrat nécessite souvent une préparation de surface, afin d'assurer une bonne adhésion du revêtement sur le support. Cette cohésion substrat / revêtement est importante et va conditionner les performances de l'outil. En effet, L'épaisseur de l'insert pour le PCD est de plusieurs millimètres, tandis que l'épaisseur du revêtement CVD se mesure généralement en microns. L'association

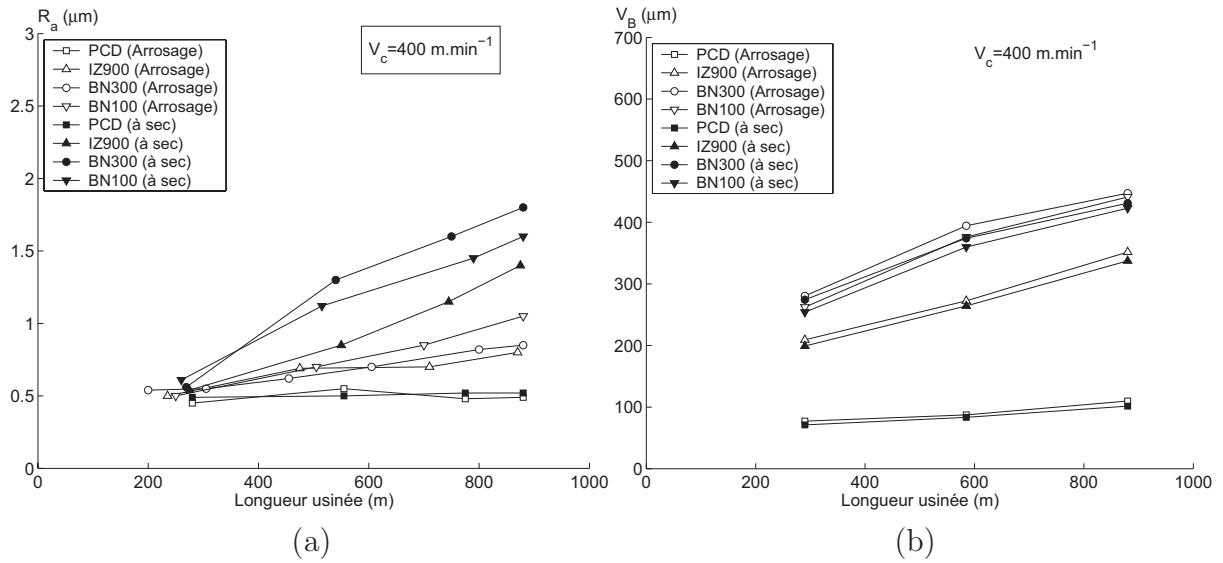


Figure 1.13 – Performances comparées des outils CBN et diamant PCD en terme (a) de rugosité (b) d'usure en dépouille V_B [26].

substrat / revêtement ainsi que l'interface sont donc des paramètres importants. Andrewes et al. [16] ont utilisé les deux types d'outils et ont observé une couche adhérente de plus forte épaisseur sur les outils CVD. L'explication proviendrait de la morphologie de l'arête de coupe. Contrairement aux outils PCD, la face de coupe des outils CVD n'est pas polie et l'arête de coupe présente une faible acuité. Une fois que le matériau a adhéré sur la face en dépouille, il est comprimé et déformé par les fortes pressions de la coupe. Cela amplifie considérablement les forces d'adhésion entre le matériau de la matrice et le revêtement. Ce collage peut devenir plus important que l'adhésion entre le substrat et le revêtement, et provoquer le délaminage du revêtement lorsque la couche adhérente est décollée sous l'action des particules. Ce phénomène d'usure adhésive est d'autant plus critique qu'une fois le revêtement décollé, il ne reste plus que le substrat pour résister à l'usure.

L'outil PCD possède à l'heure actuelle les meilleurs résultats, mais étant donné son coût élevé, son utilisation reste limitée à des applications à fortes valeurs ajoutées (produits haute gamme). L'utilisation d'outil CVD semble prometteuse, et l'amélioration de l'adhésion du revêtement sur le substrat est un des facteurs clés pour une plus grande diffusion des outils revêtus diamant.

1.3 Émission de poussières et usinage

1.3.1 Cadre législatif

Même si la première directive européenne ayant trait aux poussières date de 1980 (Directive 80/779/CEE du Conseil, du 15 juillet 1980), ce n'est qu'en 1999 que l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) émet un rapport sur les risques liés aux émissions de poussière sur les lieux de travail [27]. Ce rapport évoque différents risques auxquels sont exposés les personnels au sein des ateliers d'usinage :

- les brouillards d'huile ;
- les aérosols avec un large spectre de taille de particules ;
- une grande diversité de métaux présents au niveau des outils ou en tant qu'éléments d'addition dans les matériaux.

Les personnels exposés ne sont pas seulement les opérateurs, mais toutes les personnes présentes dans l'environnement pollué.

La suite de ce chapitre va traiter de généralités concernant les poussières ainsi que les risques sur la santé, et s'inspirera largement de ce rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé.

1.3.2 Terminologie technique

Au terme de "poussière" est souvent substitué le mot "Aérosol" dont la définition suivante permet de constater que cette notion est plus globale :

Aérosol : Désigne toute suspension dans un milieu gazeux de particules solides et/ou liquides présentant une vitesse de chute négligeable (norme ISO).

Les particules qui composent un aérosol sont de dimensions très variables, et leur comportement est influencé par leur taille. La classification des particules s'effectue par leur diamètre aérodynamique. En effet cette mesure est la plus appropriée car elle rend bien compte du comportement de la particule dans le milieu gazeux. Ce diamètre aérodynamique correspond au diamètre d'une particule sphérique de densité égale à 1 g.cm^{-3} ayant la même vitesse de déposition que la particule mesurée. Il est calculé indépendamment des dimensions réelles, de la forme et de la densité de la particule. Cette nouvelle représentation de la particule permet de décrire facilement certaines de ses propriétés. La vitesse de déposition d'une particule est en corrélation avec son diamètre aérodynamique. Cette

vitesse correspond à celle de la particule lorsqu'elle n'est soumise à aucune autre force (tableau 1.2).

Taille de la particule	Vitesse de déposition
$>50 \mu\text{m}$	70 mm.s^{-1}
$1 \mu\text{m}$	0,03 mm.s^{-1}

Tableau 1.2 – Vitesse de déposition des particules en fonction de leur taille [27].

Le tableau 1.2 montre l'importance de la classification des particules par leur diamètre aérodynamique, et permet d'établir qu'a priori les particules de grand diamètre ($>50 \mu\text{m}$) ont peu de chance de se trouver en suspension, si ce n'est pendant un temps très court ou dans des conditions de milieu ambiant perturbé. Quant aux particules de petites dimensions, elles sont plus sensibles aux perturbations de l'air ambiant. Elle se déposent en effet très difficilement et sont donc très facilement remises en suspension dans l'air.

Leur présence quasi-constante dans l'air ambiant fait qu'elles sont aisément inhalables. Une fois les particules aspirées par le nez ou la bouche, leur évolution va dépendre en grande partie de leur dimension. Les plus grandes (diamètre aérodynamique supérieur à $30 \mu\text{m}$) vont se déposer dans les voies aériennes, ce qui correspond à la zone entre le larynx et les orifices d'entrée (nez et bouche). Pour les particules restantes, les plus grosses resteront au niveau de la trachée et des bronches tandis que les plus fines atteindront la région alvéolaire. Bien entendu, cette pénétration des particules en corrélation avec leur taille va être modifiée par :

- l'intensité de la respiration (fonction de l'activité) ;
- le mode de respiration (nasale ou orale).

Afin de mieux percevoir le niveau de pénétration des particules dans l'organisme et de permettre d'évaluer le risque pour l'homme, diverses fractions ont été définies par la norme (EN 481, ISO 7708 : 1995). Ces fractions sont au nombre de trois, et sont toujours en rapport avec le diamètre aérodynamique. On dénombre :

1. la fraction inhalable ;
2. la fraction thoracique ;
3. la fraction alvéolaire.

L'ensemble de ces fractions est représenté sur la figure 1.14 (a). La zone 1 correspond à la fraction alvéolaire qui comporte les particules de plus faibles dimensions. Les particules de cette fraction pénétreront jusque dans la voie alvéolaire (figure 1.14 (b)). Concernant la fraction thoracique, elle est composée des zones 1 et 2 dont les particules se logeront au niveau des voies aériennes inférieures (trachée, bronches). Ce sont les particules de la zone 2 qui s'y déposeront principalement, les particules 1 continueront vers la région alvéolaire. Pour ce qui est de la dernière fraction, la fraction inhalable, elle comprends les particules des zones 1, 2 et 3, mais les particules de la zone 3 resteront au niveau des voies aériennes supérieures (pharynx, larynx). Sur la figure 1.14 (b) sont indiquées les champs d'actions des particules issues des zones définies sur la figure (a).

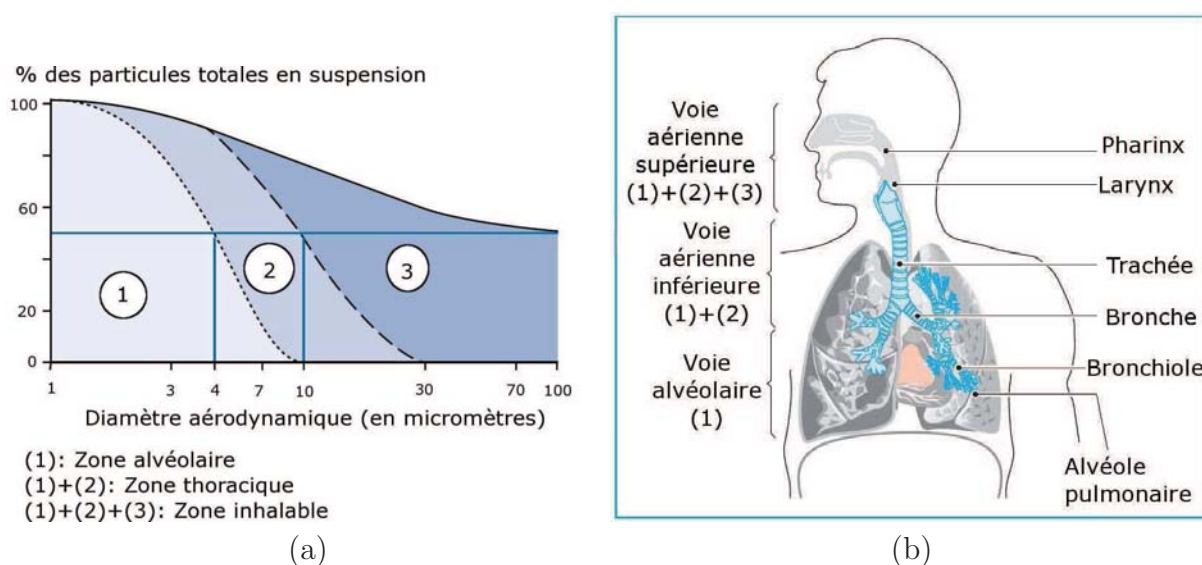


Figure 1.14 – Inhalation et pénétration des particules chez l'homme. (a) classement des particules en 3 fractions (b) zones d'action des différentes fractions [28].

1.3.3 Exposition et impact sanitaire

Les aérosols peuvent avoir des effets sur l'homme de diverses façons :

- par action sur la peau, qui se traduit fréquemment par une réaction allergique, des démangeaisons (comme la dermatose ou gale du ciment) ;
- par ingestion, les particules se déposent dans des zones où les personnes mangent et boivent, ce qui contamine les aliments et permet aux particules d'être ingérées ;
- par absorption cutanée, cela concerne le plus souvent des éléments solubles (comme les pesticides) ;

- par inhalation.

Contrairement à l'inhalation, les autres voies d'exposition peuvent être limitées par le port d'éléments de protection, par des mesures d'hygiène ... Les risques sur la santé de l'inhalation d'aérosols dépendent de la toxicité des particules (caractéristiques physiques, chimiques) ainsi que de l'exposition de la personne à l'aérosol. Cette exposition est la combinaison de la concentration des particules, du diamètre des particules ainsi que de la durée d'exposition. La taille des particules (au sens aérodynamique) influence la durée pendant laquelle l'aérosol sera en suspension dans l'air (tableau 1.2) et leur lieu de déposition (figure 1.14). La concentration conditionnera la quantité absorbée et aura donc un impact fort sur la santé. La mesure de l'exposition à l'aérosol ne doit pas se limiter à la proximité de la zone de travail, mais doit être contrôlée à des endroits très éloignés aussi, car la dispersion des particules varie avec leur taille et les flux d'air de l'environnement de travail.

De par leur action mécanique à niveau énergétique élevé sur la matière, l'ensemble des opérations d'usinage est générateur de poussières ainsi que de brouillards d'huile de coupe en cas de lubrification. La dangerosité de ces aérosols provient généralement de la nature du matériau usiné. Ce sont souvent les éléments d'alliage qui présentent le plus de risque, comme le nickel, le cobalt, le chrome, le vanadium, le tungsten. Malheureusement, ces éléments se retrouvent aussi dans les outils de coupe, et par le processus d'usure des outils il est fort probable que des grains d'outil soient présents en suspension. Ces particules de métaux durs peuvent conduire à une fibrose pulmonaire diffuse (inflammation et cicatrisation des alvéoles et des tissus interstitiels des poumons) ou à une dyspnée (difficulté respiratoire). De manière générale, l'ensemble des maladies pulmonaires (toxiques) qui sont définies par des altérations causées par l'inhalation et la fixation dans le poumon de particules solides sont regroupées sous la dénomination de pneumoconiose.

1.3.4 Génération de poussière par enlèvement de matière dans le cas des CMM_P

Au cours de l'usinage des Composites à Matrice Métallique à renfort SiC, la propagation de fissures par coalescence de porosité induit des endommagements subsurfaciques et fragmente aussi le copeau de façon importante. La présence de ces débris ainsi que les éléments extraits lors de la coupe (particules de renfort et grains d'outil) permet de s'interroger sur la qualité de l'air au voisinage de la zone de travail.

Les études traitant de l'incidence de l'usinage sur la qualité de l'air sont assez peu nombreuses et sont confinées à quelques équipes de recherche au niveau mondial. Quant aux matériaux étudiés au cours de ces travaux, on retrouve essentiellement des aciers, des alliages d'aluminium et du bronze, mais pas de composite à matrice métallique.

La poussière générée au cours de l'usinage semble provenir de sources multiples. Arumugam et al. [29] ont étudié les performances relatives d'outils diamants PCD et CVD lors de la coupe d'alliage Al Si, et ont mis en relation le type de copeau généré et la production de poussière. Pour des conditions de coupe identiques, l'usinage de l'alliage d'aluminium-silicium (Al-Si 18) par l'outil PCD a généré des copeaux long tandis que l'outils diamant revêtu a engendré des copeau courts. La fragmentation de ces copeaux proviendrait de la fissuration, et c'est ce mécanisme qui serait, selon les auteurs, à l'origine du surplus de production de poussière lors de l'usinage avec des outils CVD.

Khettabi et al. [30] ont déterminé que la poussière serait générée par les phénomènes de friction. Contrairement au constat d'Arumugam [29], l'obtention de copeaux fractionnés par fissuration et rupture correspond à une minimisation de la quantité de poussière produite. L'analyse de Khettabi et al. consiste à considérer le caractère ductile ou fragile du matériau lors de la formation du copeau. Lorsque le copeau a un comportement ductile, la déformation plastique est plus importante, ce qui accroît le nombre de zones de friction ainsi que la quantité de poussières. A l'opposée, la fragmentation du copeau par fissuration réduit la friction et la poussière générée.

L'explication de la production de poussière par le phénomène de friction semble confirmée par l'étude de Songmene et al. [31]. Des essais de perçage ont été menés sur différents matériaux :

- Alliage d'aluminium de fonderie (A356) ;
- Alliage d'aluminium pour corroyage (6061 T6) ;
- Alliage de magnésium de fonderie (AZ91E) ;
- Bronze.

Quelles que soient les conditions de coupes (vitesse d'avance et vitesse de coupe), le bronze génère toujours la plus faible quantité de poussière. Cette faible émissivité, en terme de poussière, est à rapprocher des propriétés du matériau. La présence de plomb (moins de 1%) permet de fragmenter le copeau et agit aussi en tant que lubrifiant. Son action diminue les frottements à l'interface outil / copeau lors de la coupe et limite la mise en suspension de particules.

Les zones de friction génératrices de poussières sont décrites dans les études citées

précédemment [30,31]. La figure 1.15 représente les zones de frottement dans le cas d'une opération de perçage [32]. La poussière totale constituant l'aérosol est donc issue des sources suivantes :

- Q1 : la zone de cisaillement primaire. Cela correspond à l'action mécanique de la coupe ;
- Q2 : la surface externe du copeau qui, lors de la déformation du copeau, génère des particules par des frictions internes ;
- Q3 : la zone de cisaillement secondaire, lors du frottement de la face interne du copeau sur la face de coupe ;
- Q4 : la zone de cisaillement tertiaire, lors du frottement entre la surface usinée et la face en dépouille de l'outil ;
- Q5 : la goujure hélicoïdale, provoque des frictions similaires à Q2 lors de l'évacuation du copeau.

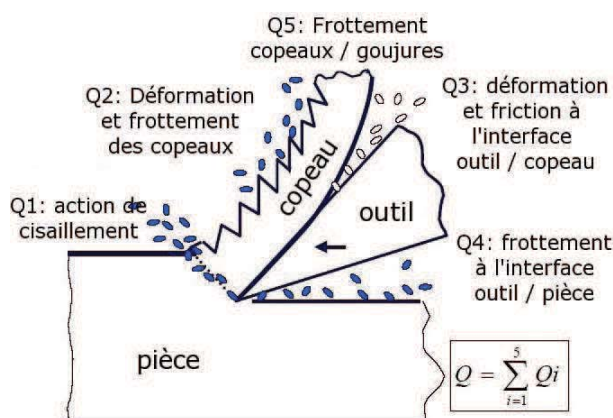


Figure 1.15 – Zones de production de poussières [32].

Parmi les différentes sources d'émission de particules définies par Balout et al. [32] (les Q_i de la figure 1.15), certaines sont propres au perçage (zone Q5) et d'autres ne semblent pas être significatives. Les auteurs ne quantifient pas la poussière émise par chaque source alors que leur contribution ne semble pas identique au regard des différentes énergies mises en jeu. Bien qu'il y ait des déformations en zone Q2 qui engendrent des frottements et donc de la poussière, le contact se déroulant sous chargement faible, l'apport en particules doit être limité.

Ce commentaire ne remet pas en cause la corrélation longueur du copeau / quantité de particules. Mais ce lien de causalité n'est pas évident et ces deux variables semblent plutôt mettre en évidence la présence d'un mécanisme spécifique lors de la coupe. Nous avons

succinctement évoqué ce mécanisme précédemment et discuté largement dans plusieurs études [30–32]. Il prend en compte la notion de ductilité / fragilité du matériau lors de la coupe. Les auteurs cités précédemment ont bien montré l'incidence de cette différence de comportement pour des matériaux assez diverses, mais Balout et al. [32] ont parfaitement illustré ce phénomène dans leur étude. En plus de la comparaison des différents matériaux, ils ont analysé la morphologie des copeaux pour différentes températures du matériau.

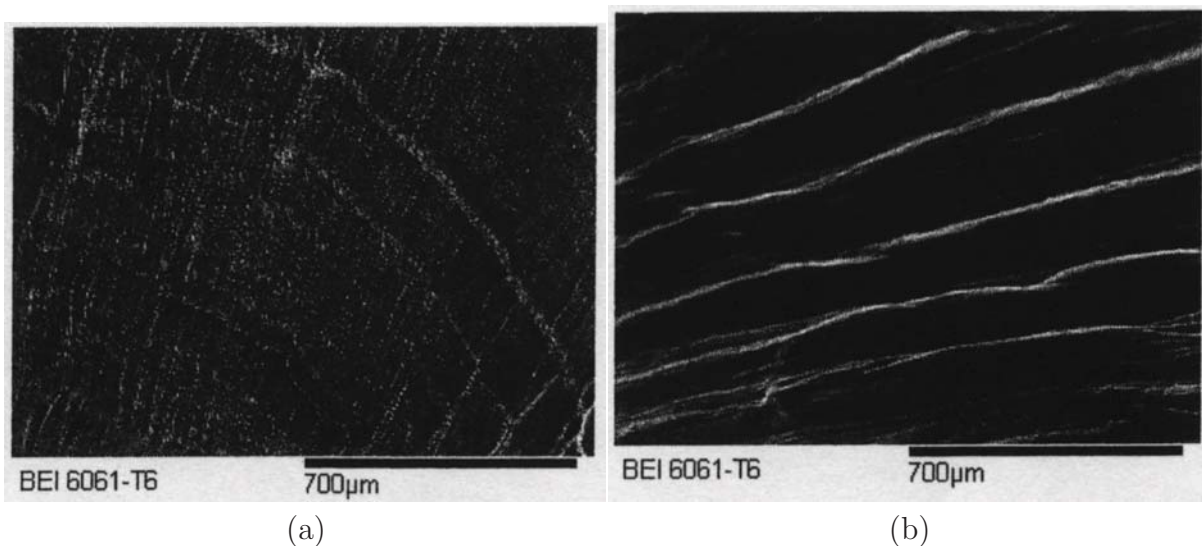


Figure 1.16 – Morphologie de copeaux à différentes températures (Aluminium 6061 T6) [32] (a) à -40°C , (b) à 22°C .

La figure 1.16 montre la morphologie de la surface libre du copeau. Lors de la coupe à température ambiante (figure 1.16 b). Celle-ci présente des stries qui apparaissent sous l'effet de l'effort de cisaillement. Le processus de formation du copeau à cette température étant de nature ductile, il y a déformation plastique au niveau du plan de cisaillement, et donc micro friction qui va générer de la poussière. Quant au processus de formation du copeau à température négative (figure 1.16 a), le mécanisme de rupture est de type fragile. Ceci signifie qu'il n'y a pas ou peu de déformation plastique. La surface extérieure du copeau est lisse, elle ne présente pas les stries consécutives au cisaillement. En plus de la réduction de la friction lors de la rupture fragile, le contact face de coupe de l'outil avec le copeau est réduit car la cohésion au sein du copeau est plus faible. Cette zone de contact correspond à une des zones de frottements décrites précédemment et source de génération de poussière (C.f. figure 1.15 zone Q3). Donc, lorsque le copeau se forme selon un mode de rupture fragile, il y a réduction de production de poussière.

Comme nous venons de le voir, la production de poussière est étroitement liée aux

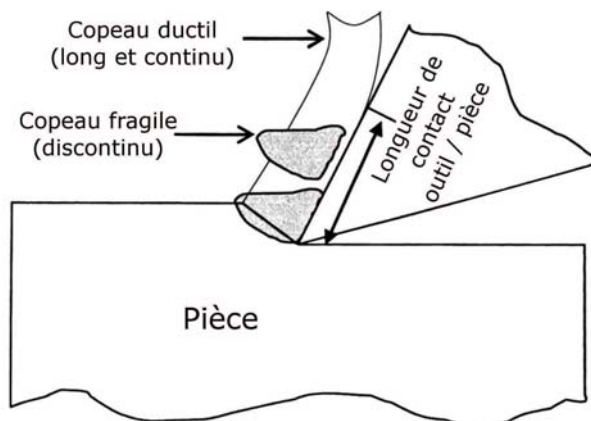


Figure 1.17 – Représentation schématique des copeaux ductiles et fragiles [32].

frottements matériau usiné / pièce. L'arrosage par un fluide spécial de la zone de coupe pourrait permettre de lutter contre cette poussière ambiante, en ayant plusieurs actions :

- la réduction des frottements qui sont sources d'émission (zones Q3, Q4 de la figure 1.15) ;
- la captation des particules en suspension par le liquide.

Ainsi Sutherland et al. [33] ont comparé les caractéristiques des aérosols obtenus lors de l'usinage à sec et avec lubrifiant d'une fonte à graphite. Dans chaque cas, il y a formation d'un aérosol qui sera considéré comme de la poussière lors de l'usinage à sec et comme un brouillard lors de l'ajout d'un lubrifiant. La différence importante entre ces deux éléments est que la poussière est un aérosol constitué de particules solides, tandis que le brouillard est composé d'éléments liquides en plus des particules solides.

La mise en suspension de liquide peut se faire suivant deux mécanismes :

- l'atomisation : mise en suspension de gouttelettes par la rotation de la pièce ;
- la vaporisation. Ce mécanisme est présent lorsque le liquide se trouve à proximité d'une source de chaleur qui va le transformer en vapeur pouvant être inhalée.

La mesure de la quantité d'aérosol produit a été réalisée dans les deux cas (avec ou sans lubrifiant). Cette mesure est homogène à une concentration et est exprimée en $mg.m^{-3}$. La figure 1.18 montre l'évolution de cette concentration de particules dans l'air en fonction du temps. Le premier constat est que même après 10 minutes, la quantité de particules dans l'air n'a toujours pas retrouvé son niveau initial. Un autre constat est la grande différence de niveau de concentration entre les deux types d'usinage.

Même si les évolutions en fonction du temps paraissent identiques, l'échelle des concen-

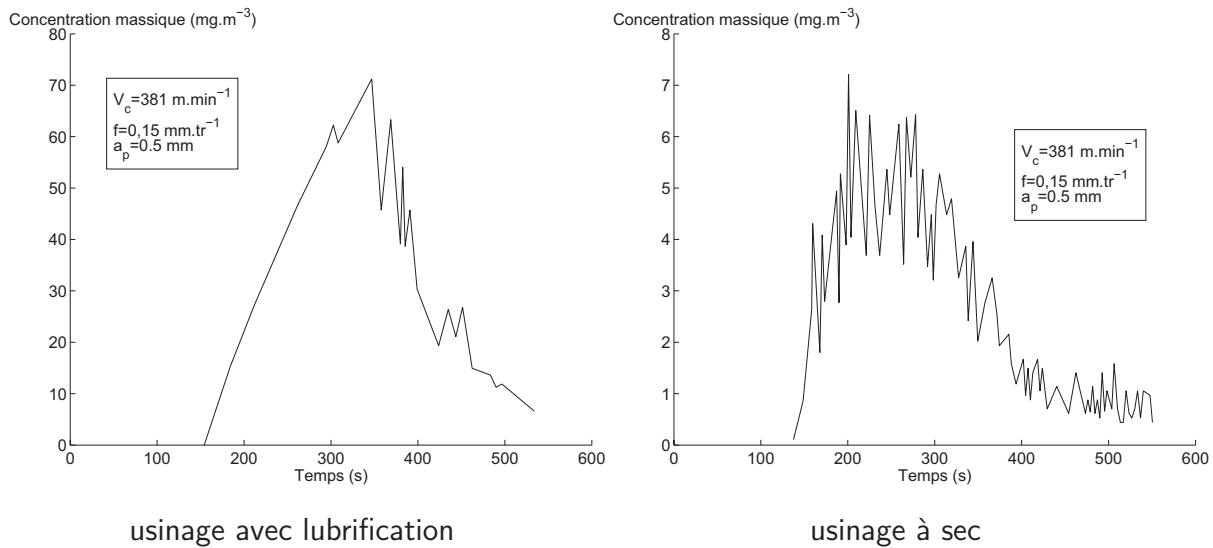


Figure 1.18 – Influence de la lubrification sur la quantité d'aérosol [33].

trations est différente (figure 1.18). En fait, pour ces conditions de coupe, l'usinage à sec produit 12 fois moins d'aérosol qu'en présence d'un fluide de coupe. D'autres essais ont montré un écart encore plus grand. En effet, pour une plus grande section de copeau ($a_p = 2,5 \text{ mm}$ et $f = 0,38 \text{ mm.tr}^{-1}$) et à faible vitesse de coupe ($V_C = 152 \text{ m.min}^{-1}$), le rapport de concentration entre usinage lubrifié et à sec passe de 12 à 80. L'allure des courbes de concentration dans le temps est similaire, seul les échelles vont changer. Le pic de concentration lors de l'usinage à sec passe de 7 mg.m^{-3} à 8 mg.m^{-3} , tandis qu'en présence de fluide de coupe, ce pic passe de 75 mg.m^{-3} à 450 mg.m^{-3} . L'arrosage a donc un impact fort et négatif sur la production d'aérosol en terme de quantité. La toxicité des aérosols ne pouvant être dissociée de la taille des particules, Sutherland et al. [33] ont aussi observés la répartition par taille des aérosols. La figure 1.19 présente l'histogramme de répartition des particules par taille en fonction de l'arrosage et ce pour deux vitesses de coupe. Cette figure indique aussi la concentration exprimée en nombre de particules par unité de volume. Lors de l'usinage avec arrosage, les particules sont de faible dimension, principalement entre $0,5$ et $1 \mu\text{m}$.

L'augmentation de la vitesse de coupe (de 152 à 381 m.min^{-1}) augmente la quantité de particules pour un spectre de répartition similaire avec arrosage. Selon Sutherland et al., cette différence de concentration de particules au sein du brouillard provient de la conjugaison des 2 phénomènes décrit précédemment :

- l'atomisation : l'accroissement de la vitesse de coupe va augmenter le pourcentage d'éléments mis en suspension, mais ce sont surtout les particules de plus de $1 \mu\text{m}$;
- la vaporisation : lorsque la vitesse de coupe diminue, la température de la zone de

coupe décroît aussi, et il y a réduction de la quantité vaporisée.

Toutefois, lors de l'usinage à sec l'étendue des tailles des particules émises s'est accrue avec la vitesse de coupe, ainsi que la quantité totale des particules. La présence de particules de plus de $1\text{ }\mu\text{m}$ n'est constatée que lors de l'usinage à sec à forte vitesse de coupe. Les auteurs n'expliquent pas cette particularité, mais il est probable ces particules proviennent de l'usure de l'outil.

A faible vitesse de coupe, l'usinage à sec a une répartition similaire en proportion mais nettement plus faible en nombre. En effet, la comparaison des diagrammes (c) et (d) de la figure 1.19 montre un pic de 200 cm^{-3} à sec pour $30\,000\text{ cm}^{-3}$ avec arrosage.

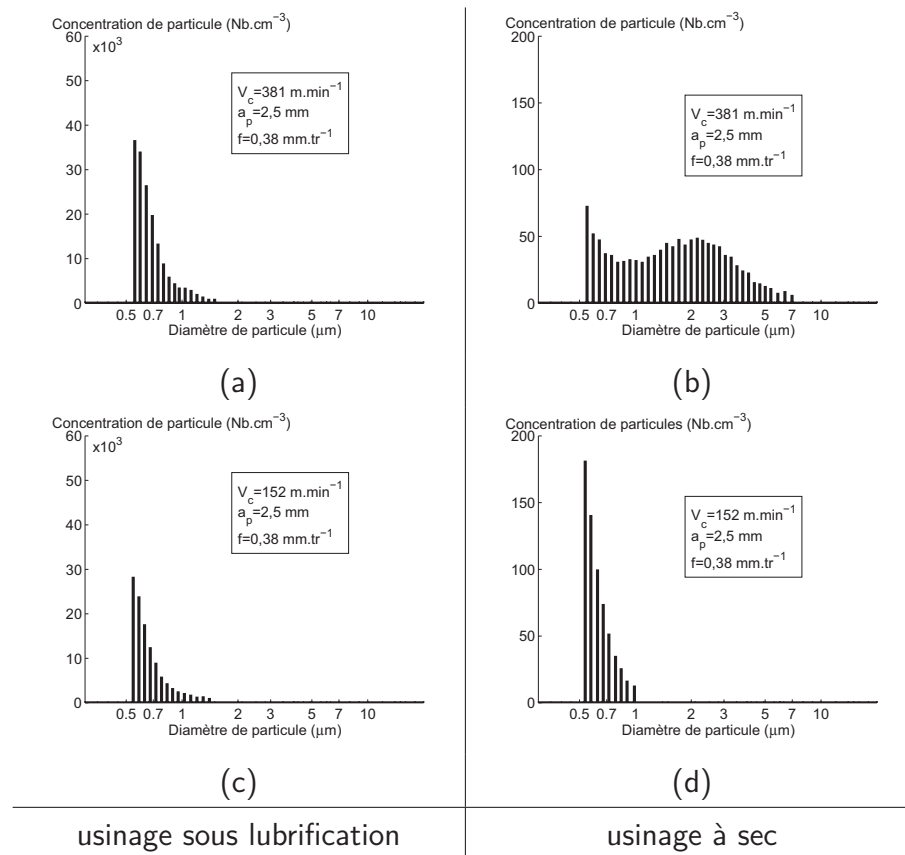


Figure 1.19 – Influence de la lubrification sur la taille des particules [33]. Usinage avec lubrifiant (a et c), à sec (b et d).

Afin de comprendre quel est le mécanisme prépondérant dans la formation du brouillard, Sutherland et al. [33] ont mesuré la concentration massique du brouillard en cours d'usinage avec arrosage en pleine matière et à vide (broche en rotation). Ces mesures ont été effectuées pour les vitesses de coupe précédentes et conduisent à penser que le processus d'atomisation est négligeable au regard de la vaporisation.

Vitesse de coupe ($m.min^{-1}$)	pic de concentration massique ($mg.m^{-3}$)		$\frac{pic\ atomisation}{pic\ total}$
	par atomisation	total en usinage	
381	2,4	1 000	0.2 %
152	2,2	28	8 %

Tableau 1.3 – Comparaison des pics de concentration massique des brouillards.

Le tableau 1.3 permet de constater que, pour des vitesses de cet ordre de grandeur, la quantité atomisée est constante (environ $2\ mg.m^{-3}$) et faible (représente de 8 à 0,2% de la quantité totale). Le processus de vaporisation semble donc prépondérant.

En plus de cette analyse de l'impact d'arrosage sur les aérosols, l'incidence d'autres paramètres de coupe peut être esquissée. Celle ci peut être déclinée ainsi :

- l'accroissement de la section du copeau d'un facteur 13 entraîne une hausse de la concentration massique de brouillard d'un facteur 15 ;
- lorsque la vitesse de coupe augmente (de 150 à $380\ m.min^{-1}$), la quantité d'aérosol est multipliée par 2.

Balout et al. [32] ont aussi analysé l'impact de divers paramètres sur la production de poussières lors de la coupe (vitesse de coupe, température de la pièce). L'analyse de cette influence exploite comme dans l'étude de Sutherland et al., la courbe de la concentration massique des particules dans l'air ambiant. Alors que Arumugam [29] exploite le lien entre le débit d'enlèvement de matière et la production de poussière mis en évidence par Sutherland et al. [33]. Ceci lui a permis aussi de proposer un nouvel indicateur qui rend l'exploitation des résultats plus aisée. Ce facteur appelé GREEN FACTOR (GF), afin de bien mettre en évidence l'incidence des poussières sur l'environnement de travail et la qualité de l'air, est calculé par la formule suivante :

$$GF = \frac{a_p * f * V_c}{Concentration\ massique}$$

Le Green Factor prend en compte la valeur de la concentration massique qui n'est pas clairement définie, et qui doit être la valeur du pic de concentration ou la moyenne. Cet indicateur est donc exprimé en $m^6.s^{-1}.mg^{-1}$, ce qui le rend assez difficile à appréhender et à relier à un phénomène physique. Ce facteur permet cependant de hiérarchiser l'influence de paramètres tels que les conditions de coupe ou les matériaux d'outils ou de pièces. En terme de qualité de l'air, un Green factor élevé est synonyme d'un faible impact environnemental. Cependant, si le débit augmente plus que la concentration de poussière,

le Green Factor augmentera alors que la qualité de l'air sera moins bonne.

Afin de palier aux inconvénients du Green Factor cités précédemment, Khettabi et al. [30] ont mis en place un autre marqueur appelé Dust Unit (D_U) qui est sans dimension car il est calculé de la façon suivante :

$$D_U = \frac{\text{masse de poussière totale}}{\text{masse de matière enlevée}}$$

Cette équation est donnée comme étant un rapport de masse, mais elle est encore valable en considérant le rapport des volumes. Ce nouvel indicateur permet de comparer des mesures lorsque beaucoup de paramètres changent ou évoluent en cours de l'essai (modulation de la vitesse de coupe ...) et pourrait être assimilé à un pourcentage. La seule contrainte qu'impose ce calcul de la poussière totale est la continuité de la mesure de la concentration de poussière jusqu'au retour au niveau de qualité de l'air initial (antérieur à l'essai d'usinage). Ce temps de mesure dépendra bien sûr de la taille des particules générées (c.f. tableau 1.2), et sera aussi étroitement lié à la matière et au procédé utilisé.

L'utilisation des indicateurs permet donc l'analyse de l'influence des différents paramètres. Toutefois, la "portabilité" de ces indicateurs n'est pas encore connue, c'est à dire qu'il faut prendre en compte leur évolution et non leur valeur absolue. En effet le résultat des mesures de poussières peut être sensible à la chaîne de mesure, à l'environnement de mesure, ce qui signifie qu'un D_U obtenu au cour d'un essai n'est pas forcément comparable à celui obtenue dans une autre configuration de mesure (éloignement, appareillage ...).

Les études utilisant la concentration massique comme marqueur d'émissivité de poussière [32, 33], ainsi que celles utilisant l'indicateur D_U ont constaté les mêmes évolutions en terme de qualité de l'air. Celle-ci diminue en :

- augmentant l'avance ;
- en augmentant la ductilité du matériau soit par changement de matériau ou par chauffage de la pièce.

Pour ce qui est de la vitesse de coupe, l'évolution de l'émission de poussière croit avec la vitesse jusqu'à atteindre un maximum (caractérisé par la vitesse V_{Pmax}), puis elle décroît pour les grandes vitesses de coupe. La figure 1.20 représente l'évolution de l'indicateur D_U en fonction de la vitesse de coupe pour différents angles de direction d'arête en tournage.

L'observation microscopique des copeaux pour ces différentes conditions de coupe permet de constater une modification de leur morphologie. A faible vitesse de coupe, les bandes formées sur la surface libre sont plus large que pour la vitesse V_{Pmax} (production de poussière maximum). Plus les bandes sont larges, plus les plans de cisaillement sont

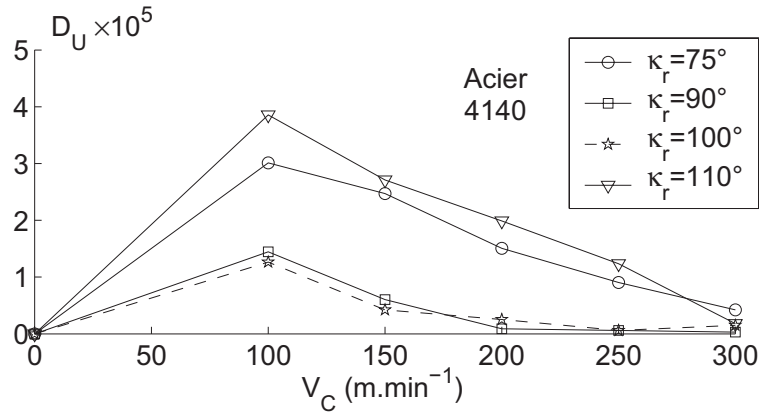


Figure 1.20 – Évolution de l'émission de poussière en fonction de l'angle d'inclinaison et de la vitesse de coupe [30].

denses et les frottements générateurs de poussières plus nombreux. En ce qui concerne les grandes vitesses de coupe, l'observation des copeaux montre que le mécanisme est plus ou moins fragile, avec la formation de bandes moins denses que dans le cas de la vitesse V_{Pmax} .

Pour ce qui est de l'angle de direction d'arête, son impact sur l'émission de poussière est exactement l'inverse de celui de la vitesse de coupe, car au lieu de présenter un maximum avec répartition symétrique, l'indicateur D_U passe par un minimum. Ce minimum ne varie pas en fonction du matériau comme pour la vitesse de coupe, mais il est atteint pour un angle de 90 degrés. Cette valeur d'angle d'inclinaison d'arête (κ_r) correspond à une largeur de copeau minimale et égale à la profondeur de passe (a_p), tandis qu'une modification de cette angle multiplie cette largeur par $(\sin(\kappa_r))^{-1}$. L'épaisseur du copeau évolue de façon inversement proportionnelle à sa largeur. Lorsque l'on s'écarte de l'angle $\kappa_r = 90^\circ$, deux phénomènes ayant des effets contraires sur la génération de poussières entrent en jeu :

- la largeur du copeau augmente, ce qui augmente aussi la zone de contact outil pièce. Cette zone de contact est source d'émission de poussières (Q3 sur la figure 1.15) ;
- l'épaisseur du copeau diminue, ce qui le rend plus fragile et pourrai faciliter la fissuration et diminuer la production de poussières.

L'observation de la morphologie des copeaux en fonction de l'angle κ_r , montre aussi des bandes plus larges dans les conditions de productions de poussières minimales. Cette observation ajoutée à l'augmentation de la zone de contact outil / copeau semble expliquer le processus principal de génération de poussière.

La compréhension de l'influence des différents paramètres étudiés précédemment per-

met d'adapter la stratégie d'usinage en vue de minimiser les émissions de poussières. Cet optimisation des paramètres de coupe a été analysée par Songmene et al. [34] au cours d'essais de perçage. Ce procédé d'enlèvement de matière présente un courbe d'émission de poussière spécifique.

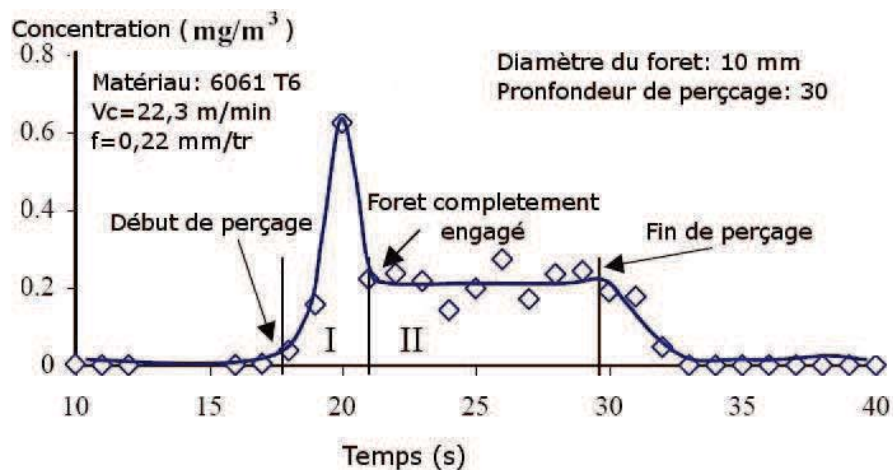


Figure 1.21 – Courbe d'émission de poussière en perçage [34].

Comme l'indique la figure 1.21, le pic d'émission correspond à la phase de pénétration du cône du foret dans la matière. Au vu des résultats précédents (figure 1.20), la diminution de la vitesse de coupe au cours de cette phase et le retour à une valeur normale une fois le foret engagé a été testé et permet de réduire considérablement la quantité de poussière émise. D'autres méthodes ont été explorées, la réalisation d'un avant trou permet de réduire la quantité de poussière lors de chaque perçage, mais la quantité totale reste supérieure au perçage direct. De plus, des vibrations peuvent apparaître et augmenter l'émission de poussières. Une autre possibilité réside dans la réalisation d'une amorce de perçage dès la réalisation du brut en fonderie ou en forge.

L'exposition des opérateurs aux émissions de poussière doit donc être prise en compte dès la conception des pièces mécaniques, mais aussi à tous les niveaux de responsabilité de l'entreprise. La réduction des émissions de particules sur les lieux de travail est une préoccupation croissante et de santé publique. Beaucoup de travail reste à faire afin de maîtriser la chaîne de mesure et de mieux identifier la toxicité et les risques. L'ensemble des matériaux est concerné :

- les matériaux traditionnels, étant donné leur grande diffusion ;
- les matériaux innovants, puisqu'ils utilisent des éléments de forme ou de taille par-

ticulières (nano-composites, fibre de carbone, ...).

1.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'appréhender les difficultés de la coupe des CMM_P :

- un taux d'usure élevé, lié à l'action du renfort particulaire ;
- la nécessité d'utiliser des outils diamants (CVD ou PCD), qui présentent un coût important ;
- la nécessité de maîtriser l'incidence des paramètres de coupe sur l'intégrité de surface.

En plus de ces problèmes, la fragmentation fine des copeaux de CMM_P pose le problème de l'émission de poussière et des risques sanitaires associés à l'usinage de ces matériaux.

Afin de permettre une plus large diffusion des CMM_P , l'obtention de pièces mécaniques présentant les performances requises sans occasionner de coûts supplémentaires est primordial. La recherche d'un outil de coupe pour l'usinage à sec des CMM_P s'effectuera dans la suite de l'étude en tenant compte des paramètres suivants :

- la durée de vie, afin de réduire l'impact du coût d'achat sur le coût d'obtention global ;
- l'intégrité de la surface usinée pour préserver les caractéristiques mécaniques ;
- la réduction des émissions de poussières lors de la coupe.

Chapitre 2

Méthodologie expérimentale

L’objet de ce chapitre est de présenter la démarche expérimentale utilisée afin d’appréhender le comportement des Composites à Matrice Métallique à renfort particulaire lors de la coupe. Pour ce faire, la présente étude s’appuie sur quatre approches différentes :

- une approche mécanique, qui prend en compte l’ensemble de efforts de coupe afin de définir la plage d’utilisation des paramètres de coupe approprié ;
- une approche économique et industriel, qui a pour objet de valider des choix pour une utilisation rentable en production ;
- une approche qualité d’usinage, pour laquelle la pièce mécanique et son emploi sont les principales préoccupations. L’intégrité de surface constitue le cœur de cette approche ;
- une approche environnementale, qui porte sur les émissions de poussière en cours d’usinage.

Ces différents angles de travail sont traités au sein de plusieurs campagnes d’essais. Celles-ci sont détaillées tout au long du chapitre, ainsi que les mesures associées.

2.1 Matériaux Utilisés

Cette étude a été effectuée dans le cadre d’un partenariat avec les Forges de Bologne, entreprise qui fait partie du groupe Manoir Industries. Le matériau provient donc de cette société qui réalise la transformation des métaux de haute technologie, notamment des pièces aéronautiques forgées en CMM_P (figure 1.2). La matrice du composite utilisé est un alliage d’aluminium / cuivre dont la désignation numérique est EN AW 2009 (Norme NF EN 573-1). La composition de ce matériau est fournie dans le tableau 2.1

Le renfort est constitué de particules des carbures de Silicium (SiC_p) dont la plus

grande dimension varie de 4 à 12 μm environ. La gamme de fabrication des lopins de CMM_P servant pour l'étude est composé des étapes suivantes :

- Elaboration d'un premier composite par métallurgie des poudres ;
- Opération de filage ;
- Traitement thermique T4 (figure 2.1) ;
 - Mise en solution à 498°C pendant 4 heures ;
 - Trempe à l'eau ;
 - Maturation. Cette étape correspond à un durcissement structural spontané à température ordinaire (les caractéristiques mécaniques deviennent stables après une maturation de quelques jours).

Cu	Mg	Fe	O	Zn	Si	Al
3,2-4,4	1-1,6	$\leq 0,2$	$\leq 0,1$	0,1	$\leq 0,25$	reste

Tableau 2.1 – Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2009 (en % massique).

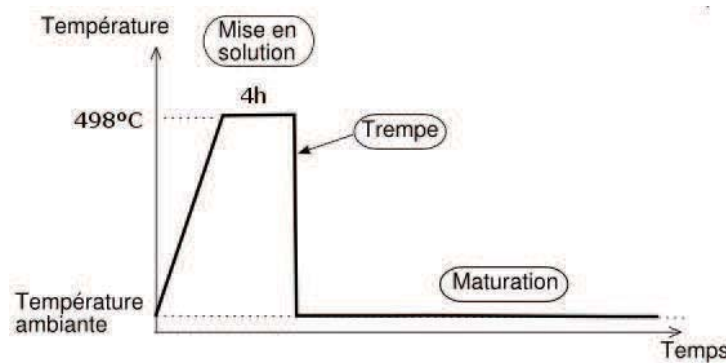


Figure 2.1 – Traitement thermique T4 du CMM.

L'ensemble de ce processus est effectué quelque soit la quantité de renforts ajouté à la matrice aluminium. Les opérations de forgeage peuvent générer cependant des défauts au sein du matériau. La figure 2.2 montre la répartition des particules au sein de la matrice aluminium pour un taux de renforcement de 15% de SiC. En plus des particules qui correspondent aux parallélépipède gris de la figure 2.2, il y a des éléments blancs qui sont des précipités formés lors du processus de fabrication du brut. Ce précipité blanc est constitué d'aluminium, de cuivre et de fer, dont la composition est Al_7Cu_2Fe . Dans ce travail de thèse, plusieurs niveaux de renforts ont été étudiés et le matériau correspond sera défini par cette convention : CMM_{15} signifie que le composite est renforcé par 15% de

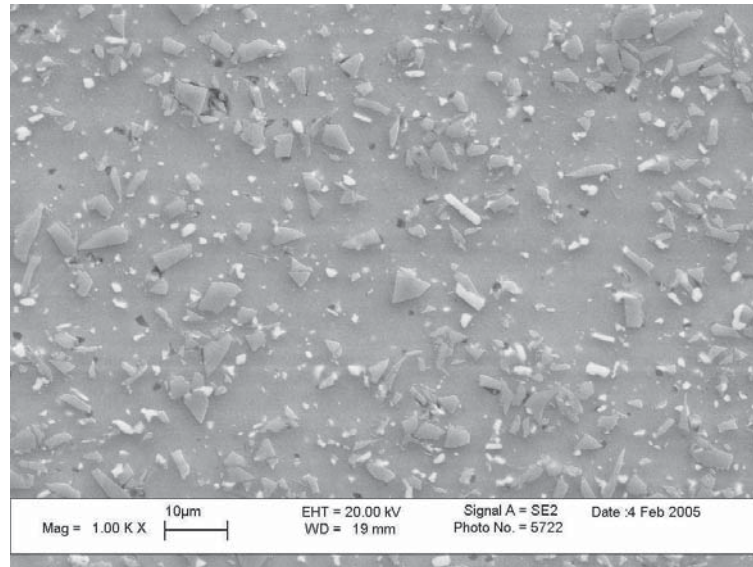


Figure 2.2 – Micrographie du CMM Al 15% SiC T4.

carbure de silicium et a subi un traitement thermique T4. Il n'y a qu'au chapitre 4 qu'un matériau sans traitement thermique est utilisé, il est défini comme suit : CMM_{25ST} .

2.2 Les outils

L'étude bibliographique a montré que les outils diamants (section 1.2) sont les plus à même de résister à l'usure abrasive, qui est le mode dominant d'usure. Pour ce travail, les outils diamants utilisés sont

- des outils carbure revêtus en diamant nanostructuré ;
- des outils PCD.

2.2.1 Outils CVD

La géométrie de l'outil de coupe est donnée par le substrat, qui est une plaquette triangulaire Sandvik Coromant (référence : TCMW 16 T3 04 H13A), dont les caractéristiques sont données au tableau 2.2.

Ce substrat sert de support pour 3 revêtements en diamants CVD déposés par l'entreprise Balzers Luxembourg. Leur différence réside dans la structure spécifique du dépôt diamant :

1. le revêtement C_1 est un revêtement monocouche de $6\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur, avec des grains

Angle de coupe (γ)	Angle de dépouille (α)	Rayon de pointe (R_e)	Longueur d'arête (l)	Angle de direction d'arête (κ_r)
0 ° et +20 °	7 °	0,4 mm	16 mm	90 °

Tableau 2.2 – Propriétés géométriques des outils CVD.

de diamant présentant des arêtes vives ;

2. le revêtement C_2 , comme le revêtement C_1 , est monocouche, d'une épaisseur de 6 μm , mais la surface est plus lisse. La structure de ce revêtement est qualifiée de structure en "choux fleur" ;
3. le revêtement C_3 , est une combinaison des deux premiers. D'une épaisseur totale de 6 μm , il est composé d'une première couche de 3 μm de revêtement C_1 attenante au substrat, suivie par une couche de 3 μm de revêtement C_2 . C_3 est donc un revêtement bi-couche présentant des caractéristiques hybrides de surface comprises entre celles de C_1 et de C_2 .

Un quatrième revêtement diamant CVD est utilisé au cours de cette étude. Il s'agit d'un revêtement commercial provenant de chez Sandvik Coromant et présentant la même géométrie que les revêtements C_1 , C_2 et C_3 (tableau 2.2), si ce n'est un angle de coupe de 20 degrés (angle nul pour les autres revêtements). La dénomination Sandvik de ce matériau d'outil est "1810", afin d'assurer une certaine cohérence d'appellation avec les autres revêtements CVD nous le désignerons C_{1810} . Ce dernier va servir de référence pour les trois revêtements en diamants nanostructurés.

Le tableau 2.3 présente la morphologie des différents revêtements. Les profils de rugosité sont donnés pour des échelles d'observation identiques et sont représentatifs de la surface observée au microscope électronique à balayage (MEB). La morphologie du revêtement C_3 apparaît bien comme une combinaison des deux précédents. Cela peut être constater aussi au niveau des valeurs des rugosités, ainsi que sur les images MEB ou la surface C_3 apparaît beaucoup moins plane que celle de C_2 , mais avec des formes de grains de diamants similaires et de type sphérique. Cette différence de planéité provient du dépôt des grains de type C_2 sur un support similaire au revêtement C_1 . Ce dépôt de 3 μm va lisser légèrement les pics et les vallées du support et donner un profil intermédiaire à C_1 et C_2 . Quant au revêtement C_{1810} , il ressemble fortement au revêtement C_1 . La structure

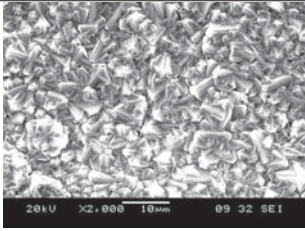
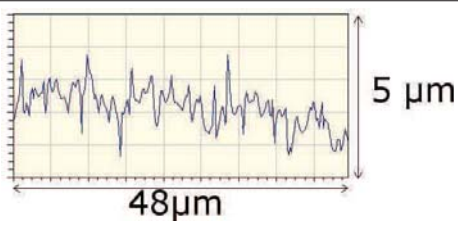
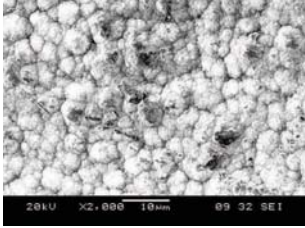
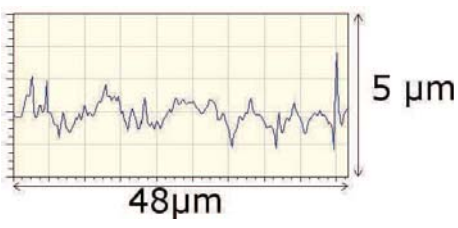
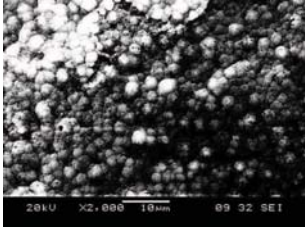
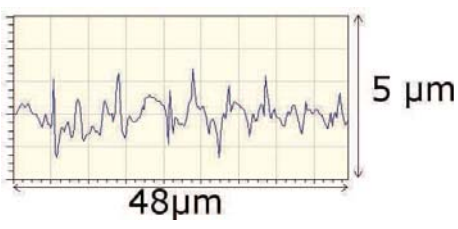
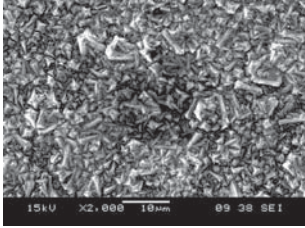
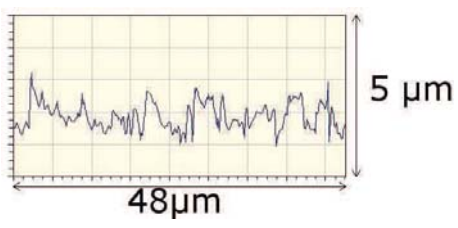
C_1		
C_2		
C_3		
C_{1810}		
Revêtement	(a)	(b)

Tableau 2.3 – Morphologie et structure des revêtements CVD. (a) Images MEB, (b) Profils de rugosité par interférométrie optique.

et la morphologie du revêtement sont similaires, mais la taille des grains de diamant est plus petite pour le revêtement C_{1810} . Le nombre d'entreprise réalisant des revêtements diamants est assez restreint, et les carburiers tels que Sandvik Coromant sous-traitent ces opérations. Il est fort possible que ces 2 revêtements soient identiques, il faudra vérifier leur comportement lors de la coupe.

2.2.2 Outils PCD

Pour les outils diamants PCD, la plaquette carbure sert d'appui pour la mise en position dans le porte plaquette et l'insert en diamant est brasé sur la plaquette. Le logement de l'insert est donc modifié afin d'obtenir les angles désirés, et en l'occurrence deux angles de coupe différents.

La société Asahi Diamond Industrial Europe a fournit les outils PCD dont les caractéristiques sont données tableau 2.4.

Deux géométries d'outils sont donc utilisées lors de ce travail, ainsi que deux types d'inserts diamants. La désignation de ces outils se fera de la manière suivante : l'outil PCD_{A10} (ou PCD_{B0}) correspond à l'insert diamant de type A (ou B) et à l'angle de coupe de 10 degrés (ou 0 degré). Quatre outils PCD sont donc utilisés pour cette étude :

- PCD_{A0}
- PCD_{A10}
- PCD_{B0}
- PCD_{B10}

Angle de coupe (γ)	Angle de dépouille (α)	Rayon de pointe (R_ϵ)	Longueur d'arête (I)	Angle de direction d'arête (κ_r)
0 ° et +10 °	7 °	0,4 mm	16 mm	90 °

Tableau 2.4 – Propriétés géométriques des outils PCD.

Les outils PCD de type A et B (PCD_A et PCD_B) sont présentés à la figure 2.5.

En comparaison aux outils revêtus (tableau 2.3), les outil PCD utilisés présentent une surface moins rugueuse où les grains de diamant ne se distinguent pas de leur liant. Cet aspect est encore plus marqué pour les outils PCD_B qui sont les moins rugueux.

2.3 Optimisation des conditions de coupe

Afin de connaître le domaine d'utilisation de chaque matériau d'outil en fonction du composite étudié, un suivi in situ des variables physiques mesurées lors de la coupe a été effectué. Les effets de la coupe ont été également analysés par des essais post-mortem et

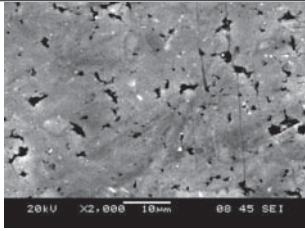
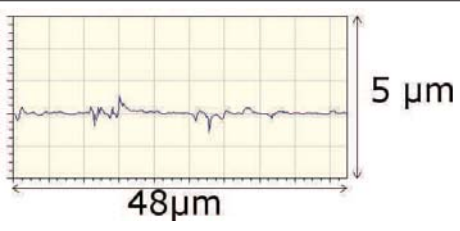
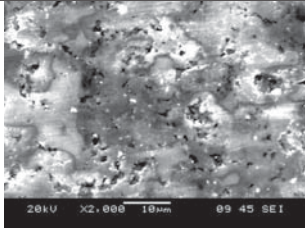
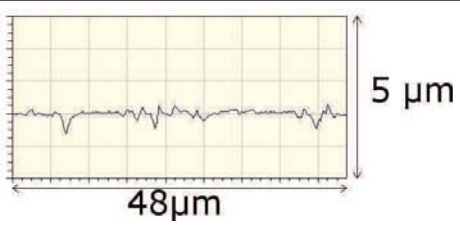
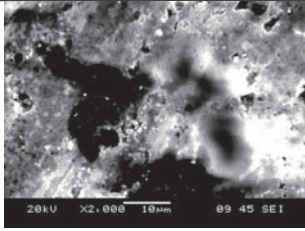
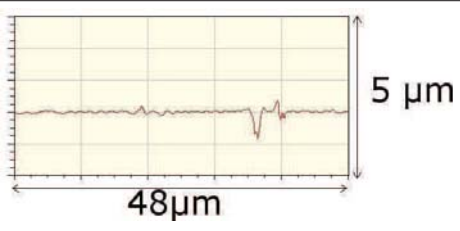
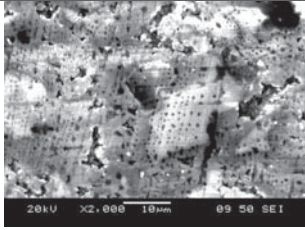
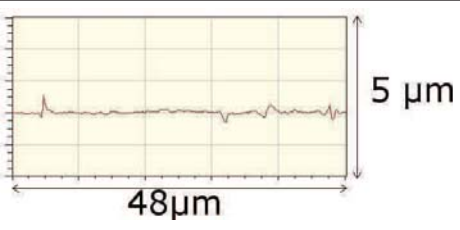
PCD_{A0}		
PCD_{A10}		
PCD_{B0}		
PCD_{B10}		
Insert	(a)	(b)

Tableau 2.5 – Morphologie et structure des revêtements PCD. (a) Images MEB, (b) Images d'interférométrie optique.

permettent également de cerner ce domaine.

Cette campagne d'essais a été effectuée sur 2 tours à commande numérique :

- le tour RAMO RTN30 (fréquence de rotation maximum de $3\,800\ tr.min^{-1}$, puissance de 38kW, équipé de contrôleurs de puissance Wattpilote d'axes et de broche intégrés) ;
- le tour SOMAB Transmab 500 (fréquence de rotation maximum de $3\,500\ tr.min^{-1}$, puissance de 32kW, équipé d'un contrôleur de puissance de broche Wattpilote).

Dans le cadre de cette étude, l'utilisation d'un tour plutôt qu'un autre n'a de réelle

incidence que sur la possibilité de mesurer la puissance consommée sur les axes (X et Z), qui n'est réalisable que sur le tour RAMO. En effet, la mesure des efforts de coupe est effectuée par l'intermédiaire d'un dynamomètre indépendant du tour utilisé. De plus pour un niveau de renfort donné, tous les essais sont effectués sur le même tour.

2.3.1 Définition de la campagne d'essais

L'étude bibliographique de l'usinabilité des Composites à Matrice Métallique a montré que la plage des vitesses de coupe étudiées, sur l'ensemble des publications, est très vaste. Pour les outils diamants CVD, cette plage varie de 50 m.min^{-1} [35] à $1\,200 \text{ m.min}^{-1}$ [17]. Quant aux outils PCD, la gamme des vitesses de coupe se situe entre 50 m.min^{-1} [36] et $1\,000 \text{ m.min}^{-1}$ [19]. Toutefois, en l'absence d'une dénomination commerciale standardisée de CMM_P , le composite étudié dans la littérature diffère souvent d'une étude à l'autre :

- par la nature de la matrice ;
- par le taux de renfort ;
- par le type de renfort ;
- par la taille du renfort.

Le matériau étant propre aux Forges de Bologne et les outils spécialement conçus pour cette étude (structure, taille de grains), la détermination de la plage d'utilisation correcte de ces outils pour ce matériau est nécessaire. La qualification de cette zone a été effectuée à partir des paramètres d'essais fournis dans le tableau 2.6.

Matériau	$V_c \text{ (m.min}^{-1}\text{)}$							Avance (mm.tr ⁻¹)
	400	500	600	700	800	900	1 000	
CMM_5	X	X	X	X	X	X	X	0,1 / 0,3
CMM_{15}		X	X	X	X	X		0,1 / 0,3
CMM_{25}	X			X		X	X	0,1

Tableau 2.6 – Définition des essais d'optimisation des conditions de coupe pour les outils CVD C_1 C_2 et C_3 , profondeur de passe constante $a_p = 1\text{mm}$

2.3.2 Métrologie associée

2.3.2.1 Mesure des efforts de coupe

La mesure des efforts de coupe en cours d'usinage est effectuée via une chaîne d'acquisition composée d'un dynamomètre Kistler 9121 et d'un amplificateur de charge Kistler 5019 à trois canaux. Le dynamomètre à quartz trois composantes peut ainsi mesurer les composantes F_X , F_Y et F_Z de la résultante des efforts de coupe exercée sur la pièce usinée et ce dans le repère fixe du capteur. L'acquisition et le traitement des signaux correspondant à chaque composante F_X , F_Y et F_Z de la résultante de l'effort de coupe sont effectués sous Labview.

Un relevé typique d'efforts correspondant à une opération de chariotage est donné figure 2.3. La valeur moyenne des efforts est calculée lors de la phase d'usinage qui est représentée par la zone située entre les flèches (palier de quelques secondes).

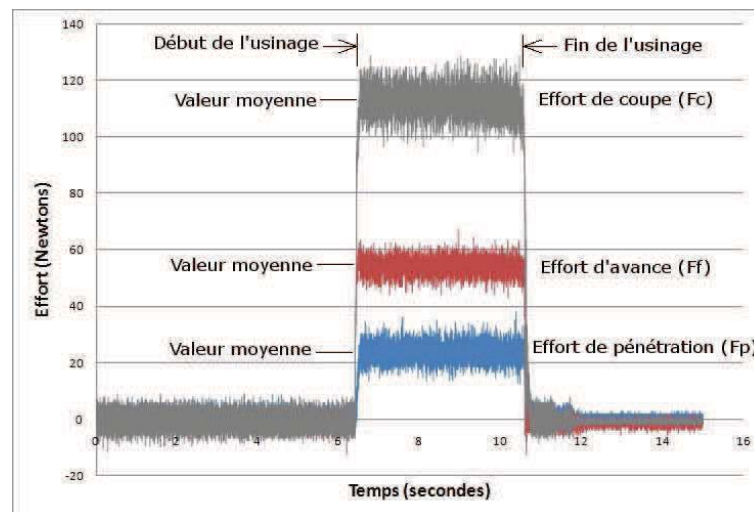


Figure 2.3 – Mesure des efforts de coupe.

2.3.2.2 Mesure d'état de surface

a) Analyse conventionnelle de la rugosité

La caractérisation de la surface usinée est fondamentale. L'incidence de la coupe sur l'intégrité de surface ne peut pas être négligée étant donné la haute technicité des matériaux composites et donc leur emploi comme matériaux de structure.

L'état de surface ne permet de qualifier, à lui seul, l'impact de l'usinage sur l'intégrité de surface, mais c'est un critère qui peut être facilement lié à la tenue en fatigue, et il correspond à une exigence industrielle.

L'état de surface peut être caractérisé à partir de relevé de surface (3D) ou de profil (2D). Lors du traitement de ces relevés, deux niveaux de défauts vont être séparés :

- l'ondulation
- la rugosité

Les variables d'état de surface considérées ici sont :

- l'écart moyen arithmétique de la rugosité (Ra) ;
- la rugosité totale (Rt).

Ces variables sont couramment utilisées industriellement pour la cotation fonctionnelle des pièces mécaniques. Ces paramètres d'état de surface sont définis par rapport à la ligne moyenne du profil de rugosité (Norme ISO 4287) qui s'obtient par filtrage. Le filtre est caractérisé par sa longueur d'onde de coupure (λ_c appelé aussi "cutt-off" ou "longueur de base") dont les valeurs sont normalisées (0,08mm ; 0,25mm ; 0,8mm ; 2,5mm ; 8mm). Afin de séparer au mieux la rugosité de l'ondulation, et afin d'obtenir un profil et des mesures représentatifs de la rugosité, la valeur de λ_c dépend de la valeur de l'écart moyen des sillons Rsm . Le tableau 2.7 indique pour un Rsm mesuré, la valeur de la longueur d'onde de coupure du filtre à utiliser.

Ce tableau fournit aussi la "longueur d'évaluation" préconisée, qui correspond à cinq fois la longueur de base et doit correspondre à la longueur de mesure. Ce tableau est applicable pour les profils de type périodique, tels que ceux obtenus par tournage.

Valeur du paramètre de référence Rsm	Conditions de mesure à appliquer	
	Longueur de base λ_c (mm)	Longueur d'évaluation (mm)
$0,013 < Rsm < 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < Rsm < 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < Rsm < 0,4$	0,8	4
$0,4 < Rsm < 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < Rsm < 4$	8	40

Tableau 2.7 – Règles de choix de la longueur de base λ_c pour l'obtention du profil de rugosité.

Les profils de surface ont été effectués par un profilomètre SURFASCAN (constructeur Hommel-Somicronic), constitué d'un capteur équipé d'une pointe de diamant avec un

rayon d'extrémité de $2\ \mu\text{m}$. Ce capteur est déplacé linéairement suivant l'axe du cylindre mesuré. Pour chaque chariotage contrôlé, trois profils répartis à 120° sont enregistrés, avec les paramètres de mesure vérifiant les préconisations du tableau 2.7. Les variables d'état de surface considérées ici (Ra , Rt) résultent des moyennes des valeurs correspondantes des trois profils mesurés.

b) Analyse multi-échelle

Cette seconde approche de caractérisation de la qualité de surface a pour objectif de s'affranchir des contraintes définies au tableau 2.7. Le principe de cette analyse est décrite succinctement ci-dessous, et des informations plus détaillées sont données dans le travail de thèse effectué par S. Mezghani [37].

L'analyse multi-échelle de surface nécessite de définir quelles échelles utiliser afin de caractériser au mieux sa qualité. Cette méthode de caractérisation est composée de plusieurs étapes :

1. Recherche de la description du profil. La topographie des surfaces usinées conduit à l'obtention d'un profil non stationnaire, qui requiert l'utilisation de l'analyse par ondelettes afin d'obtenir une représentation "temps - fréquence". Le principe est basé sur l'utilisation des fenêtres d'analyse de tailles variables, ce qui permet d'effectuer une étude multi résolution des données de la surface, et quantifier localement les différentes composantes fréquentielles de l'image topographique de la surface. On examine ces données à résolution grossière à l'aide d'ondelettes larges et avec un petit nombre de coefficients. Par contre, à une grande résolution, on utilise un grand nombre de petites ondelettes qui permettent une analyse plus fine. Par analogie, l'analyse par ondelettes est équivalente à l'observation par un microscope optique, dont les grossissements des objectifs sont les ondelettes analysantes à différentes largeurs ou échelles. Cette représentation du profil comprends deux phases :
 - la détermination des coefficients d'ondelettes par application de la transformée en ondelettes continue ;
 - l'obtention d'une décomposition du profil en plusieurs échelles par application de la transformée en ondelettes continue inverse (figure 2.4).
2. Calcul des paramètres de profil à chaque échelle d'analyse. Pour cette étude, le paramètre utilisé est le spectre de rugosité Sma . Ce paramètre est assez proche du Ra , si ce n'est que le Ra prend en compte toutes les échelles inférieures à la longueur de base λ_c , tandis que le Sma ne s'intéresse qu'à une échelle donnée. Le paramètre

Ra correspond donc à la somme des Sma pour les échelles inférieures à λ_c . Toutefois, afin d'éviter toute confusion entre ces deux paramètres, la sommation des Sma s'appellera micro-rugosité.

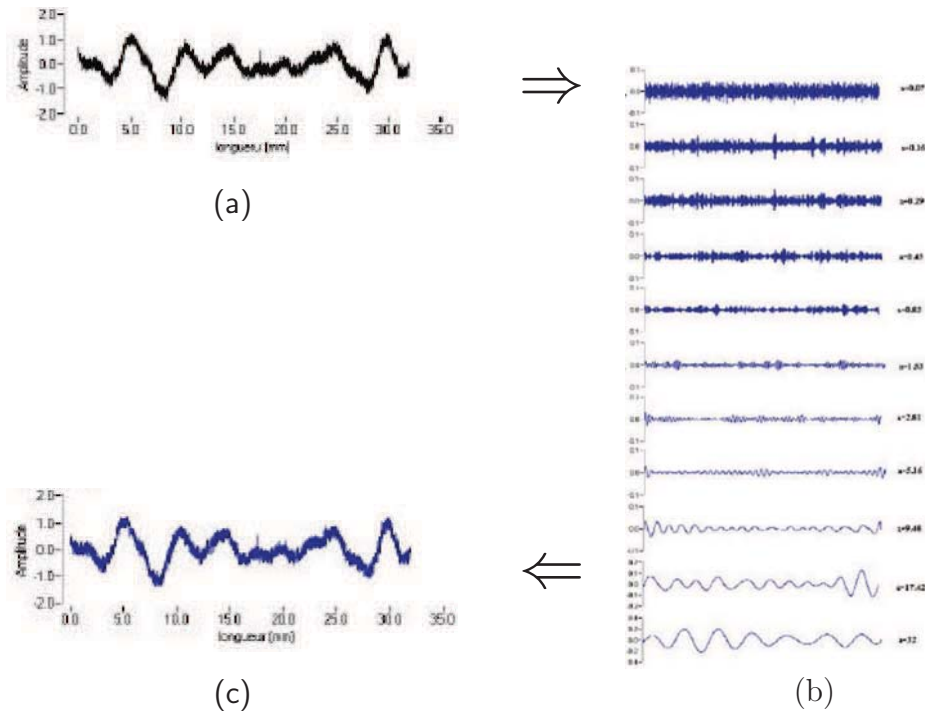


Figure 2.4 – Application de l'analyse par ondelettes sur un profil. Profil analysé (a), profil pour des échelles différentes (b), profil reconstitués (c).

2.3.2.3 Mesure de l'usure en dépouille

La nature des Composites à Matrice Métallique et à renfort particulaire étant fortement abrasive, la faculté de l'outil à résister à l'action du renfort est importante d'un point de vue technologique et économique. Cette résistance peut être évaluée par la mesure de l'usure en dépouille V_B (figures 2.5), qui se manifeste sur la face en dépouille de l'outil (notée A_α sur la figure 2.5).

La mesure de V_B est réalisée simultanément par microscopie optique et par microscopie interférométrique en lumière blanche.

Les microscopes interférométriques [38] sont constitués d'un microscope optique associé à un interféromètre à deux faisceaux pour lequel le chemin optique de l'un d'eux peut être ajusté précisément. La recombinaison du faisceau de référence réfléchi par le miroir

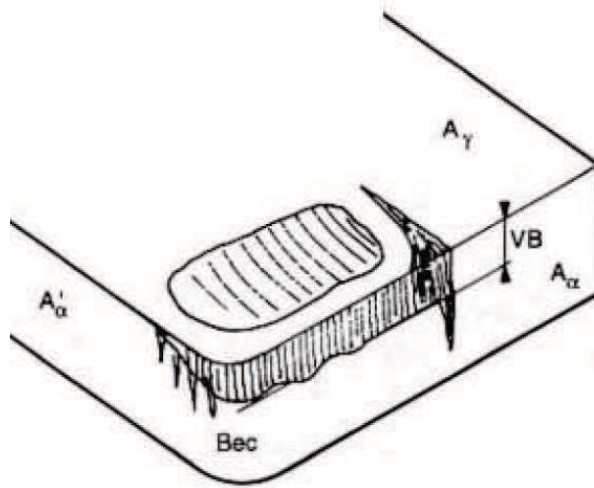


Figure 2.5 – Représentation de l'usure en dépouille V_B .

interne de l'interféromètre et du faisceau réfléchi par la surface à mesurer produit un interférogramme. La microscopie interférométrique en lumière blanche est aussi appelée VSI (Vertical Scanning Interferometry) car l'objectif balaie la surface verticalement. Pour chaque pixel, la succession des intensités lumineuses décelées est enregistrée simultanément à l'historique des cotes z . Au voisinage de la focalisation, des franges d'interférences apparaissent au niveau des pixels. Pour chaque pixel est déterminé le maximum d'amplitude des franges, ce qui correspond à une différence de chemin optique nulle. La cote z correspondant à ce maximum est l'altitude du point considéré de la surface (pixel). La résolution en altitude de cette méthode de mesure est d'environ 0,5 nm [39]. Le microscope interférométrique Veeco WYKO NT 3300 a été utilisé en lumière blanche afin de quantifier l'usure en dépouille V_B . La figure 2.6 (a) représente le relevé topographique de la face en dépouille (a). La figure 2.6 (b) est un profil extrait de ce relevé. Le logiciel de traitement associé à l'interféromètre permet de mesurer des distances sur ces profils, tel que l'usure V_B représentée en partie (b).

2.3.2.4 Mesure de l'usure en cratère

En plus de l'usure en dépouille décrite précédemment, qui est présente sur la face de coupe, une forte usure apparaît aussi sur la face de coupe. Il s'agit de l'usure en cratère, mais elle ne correspond pas exactement à celle qui est décrite classiquement par la figure 2.7.

La morphologie de l'usure de la face de coupe constatée lors de l'usinage des CMM_P peut être observée sur la figure 2.8. Elle correspond à une usure en cratère qui engloberait

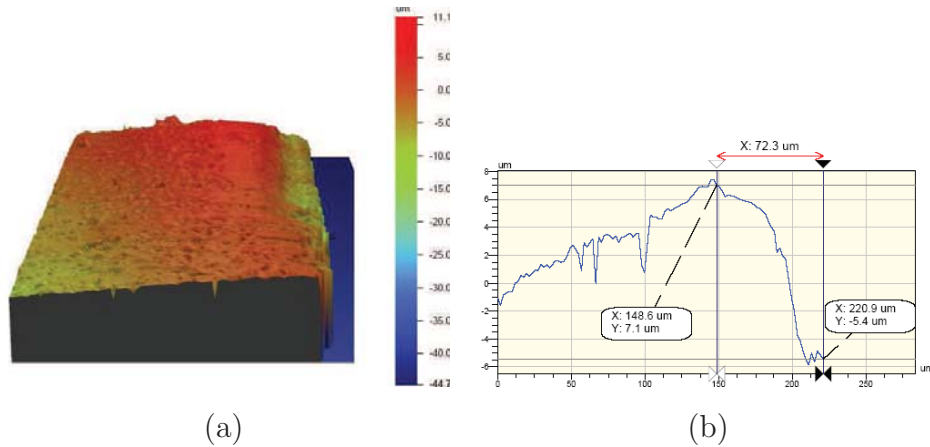


Figure 2.6 – Mesure par microscopie interférométrique de l'usure V_B (a) face en dépouille, (b) profil de la face en dépouille et mesure de l'usure V_B .

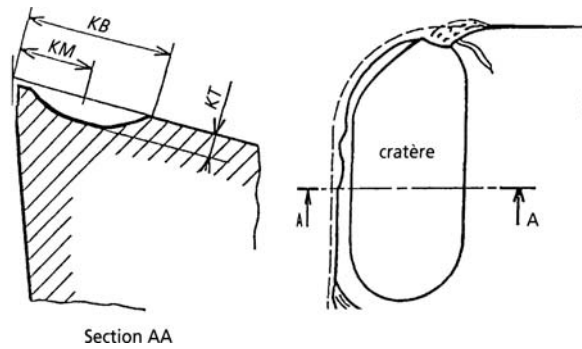


Figure 2.7 – Représentation de l'usure en cratère K_T .

l'arête de coupe. Au vue de cette morphologie, le seul paramètre qui est pris en compte au sein de cette étude est la profondeur K_T (figure 2.7). La valeur de l'usure K_T observée à titre d'exemple sur la figure 2.8 est donc de $4,4\mu\text{m}$.

2.3.2.5 Mesure des températures moyennes

L'évaluation de la température générée lors de la coupe est effectuée par thermographie infrarouge. Cette technique permet la mesure à distance de températures de surface et de ses variations temporelles et spatiales. Le chaîne de mesure effectue l'acquisition d'une séquence vidéo et permet le traitement et l'analyse de cette séquence par l'intermédiaire du logiciel associé.

La valeur de la température est obtenue grâce à la loi de Planck et un coefficient d'émissivité, qui correspond au rapport entre la luminance du corps étudié et celle du corps noir. Cette émissivité dépend de nombreux paramètres liés à l'environnement de la

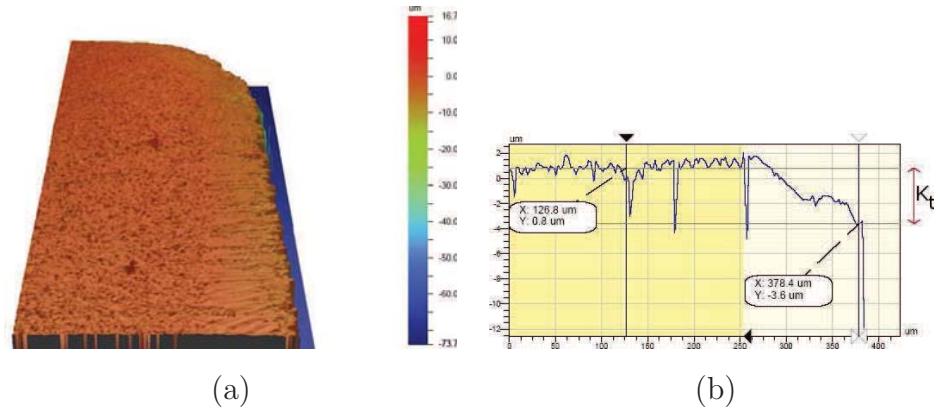


Figure 2.8 – Mesure par microscopie interférométrique de l'usure K_T (a) face de coupe, (b) profil de la face de coupe et mesure de l'usure K_T .

mesure (température ambiante, ...), ainsi qu'à la pièce étudiée :

- le matériau ;
- l'état de surface ;
- la température lors de la mesure.

Pour chaque matériau d'outil, ce coefficient a donc été déterminé expérimentalement. Les outils ont été placés pendant 4 heures dans un four à une température de consigne de 200°C. Le système d'acquisition enregistre la séquence dès la sortie du four alors que les différents échantillons se trouvent à la température de consigne. Le coefficient d'émissivité est ensuite ajusté afin de faire coïncider la température des échantillons à la sortie (température de consigne) et la température obtenue via la chaîne de mesure. Le système de mesure de température est constitué d'une caméra infrarouge de marque AGEMA (modèle THV 900 LW ST) et d'un logiciel de visualisation et d'analyse des champs thermiques. La caméra thermique est disposée perpendiculairement à la face de coupe de l'outil. La chaîne d'acquisition enregistre une séquence vidéo à la vitesse de 30 images par seconde. Cette séquence vidéo inclue l'ensemble de l'usinage ainsi que plusieurs secondes après la fin de la coupe. Une gorge a été réalisée à la fin du palier d'usinage de l'éprouvette, afin d'extraire une image claire de l'outil à l'issue de l'usinage (figure 2.9). La température moyenne est ainsi mesurée sur la face de coupe.

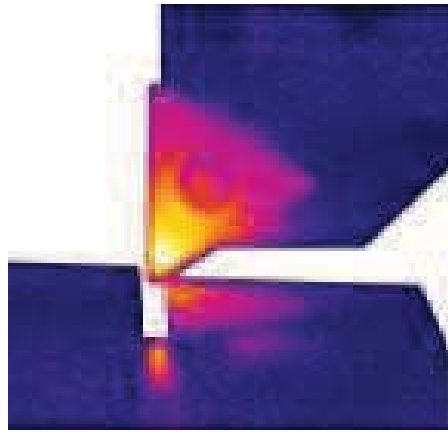


Figure 2.9 – Mesure de température par infrarouge, outil positionné au niveau de la gorge à la fin de l'usinage.

2.4 Usinage compétitif - Faisabilité industrielle

La définition d'un domaine de fonctionnement des outils diamants pour la coupe des CMM_P ne permet pas implicitement une utilisation industrielle. Afin d'avoir une maîtrise économique de l'usinage des CMM_P , la connaissance de la durée de vie est primordiale pour le coût de l'opération, et le contrôle des conséquences subsurfaciques de la coupe est nécessaire pour la durabilité d'une pièce en CMM_P .

2.4.1 Définition de la campagne d'essais

La campagne d'essais précédente (paragraphe 2.3.1) a permis de définir des conditions de coupe adaptées au couple outil / matériau étudié pour des temps d'usinage courts, de l'ordre de quelques secondes.

Cette campagne vise à déterminer la durée de vie des outils pour des matériaux composites avec différents taux de renforcement. Pour ce faire, à moins d'une défaillance brutale de l'arête, le critère d'usure est celui d'usure en dépouille V_B , avec une valeur limite de 0,2 mm.

Le tableau 2.8 récapitule les différents paramètres de coupe pour les différents essais effectués :

- le composite usiné ;
- l'outil utilisé ;
- les conditions de coupe (Vitesse de coupe, avance, profondeur de passe).

Les mesures réalisés ne sont pas identiques pour tous les essais, c'est pourquoi elles sont indiquées dans ce tableau.

	CMM_5	CMM_{15}	CMM_{25}
Outils	C_1, C_2, C_3, C_{1810}		
			PCD_A et PCD_B
Vitesse de coupe	700 m.min ⁻¹		
Avance	0,1 mm.tr ⁻¹		
ap	1 mm		
Critère de durée de vie	V_B (valeur maximale : 0,2 mm)		
Mesures <i>insitu</i>	Puissance de coupe		Puissance de coupe
Mesures <i>exsitu</i>	Usure frontale V_B		
	États de surface		
	Contraintes résiduelles		

Tableau 2.8 – Définition des essais de durée de vie.

2.4.2 Analyse physique associée

2.4.2.1 Mesure de la puissance, Tracé de la courbe de puissance

L'acquisition de la courbe de puissance est effectuée par un contrôleur de puissance Wattpilot. Le système d'acquisition permet d'obtenir un tracé de l'évolution de la courbe de puissance au cours de l'essai (figure 2.10). A partir de cette courbe, la puissance à vide est déterminée par les paliers de puissance situés de part et d'autre de la phase de coupe. La puissance de coupe correspond ensuite à la différence entre la puissance en charge et la puissance à vide.

Une fois la puissance de coupe définie pour chaque essai et chaque axe (axe des avances (X), axe de broche (Z)), il est nécessaire de superposer l'ensemble des enregistrements afin de pouvoir observer l'évolution de la puissance dans son ensemble. La figure 2.11 présente l'enchaînement des courbes de puissance consommée à la broche pour l'outil C_1 lors de l'usinage du CMM_5 . A cette succession de courbes de puissance correspondant à chaque essai, est associée une courbe de tendance de forme polynômial (courbe noire), afin d'appréhender le comportement global en cours d'usinage.

Le recollement des courbes issues des différents essais n'est pas parfait, car à chaque nouvel essai :

- la zone de coupe revient à température ambiante (refroidissement naturel de l'outil

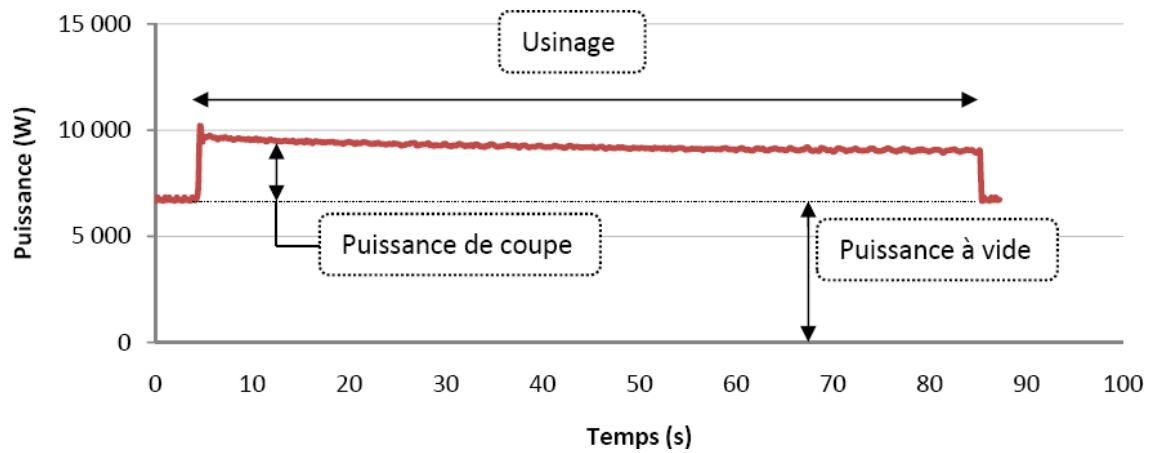


Figure 2.10 – Relevé typique de la courbe de puissance de broche.

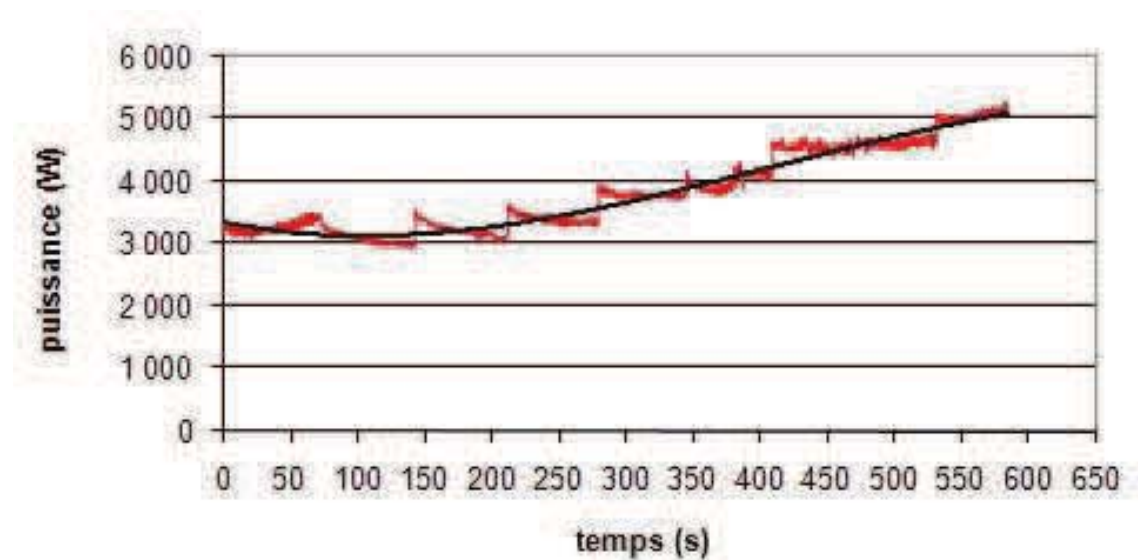


Figure 2.11 – Reconstruction de la courbe de puissance de coupe en fonction du temps.

- et de la pièce) ;
- l'outil attaque sur une surface nouvelle (nouveau lopin ou usinage à un diamètre différent).

Cet écart lors du recollement limite donc l'utilisation de la courbe de puissance à des essais suffisamment longs afin de minimiser ces variations. Pour cette raison, lors des essais de durée de vie sur les lopins de faible longueur (CMM_{15}) la mesure de puissance n'est pas utilisée.

2.4.2.2 Mesure des contraintes résiduelles

La mesure des contraintes résiduelles est primordiale étant donné les défauts subsurfaciques générés par la coupe.

Le principe de la détermination des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X repose sur la loi de Bragg. Un faisceau de rayons X incident de longueur d'onde λ ne sera réfléchi par une famille de plans (h,k,l) que dans la mesure où il rencontre ces plans sous un certain angle θ dit angle de Bragg tel que :

$$\sin\theta_{h,k,l} = \frac{\lambda}{2d_{(h,k,l)}}$$

La mesure de la variation de l'angle θ donne la déformation des plans, de par le lien avec la distance interréticulaire ($d_{h,k,l}$). Le relevé et l'analyse des pics de diffraction va permettre de quantifier l'écrouissage et les contraintes latentes.

La mesure des contraintes résiduelles a été effectuée par diffraction X, avec les paramètres de mesure et d'analyse suivants :

1. Conditions de diffraction :
 - Rayonnement K-alpha du cuivre sous 25kV, 4mA ;
 - Aluminium : plans {422}, $2\theta = 137^\circ$;
 - Surface irradiée limitée par un collimateur de diamètre 3mm.
2. Conditions d'acquisition :
 - Utilisation de 14 angles ψ variant de $+41.5^\circ$ à -41.5° ;
 - Temps d'acquisition : 5 x 10 secondes pour 2 angles ψ .
3. Conditions de traitement des raies (cf figure 2.12) :
 - Niveau de la corde située à 30 % de la hauteur nette de la raie de diffraction ;
 - 2θ utilisés pour le calcul des contraintes : gaussienne.
4. Calcul de contraintes
 - Traitement elliptique (méthode des $\sin^2\psi$)
 - Constantes Élastiques Radiocristallographiques de l'aluminium :
 $\frac{1}{2}S_2\{422\} = 19,02 * 10^{-6} MPa^{-1}$; $S_1\{422\} = -4,94 * 10^{-6} MPa^{-1}$

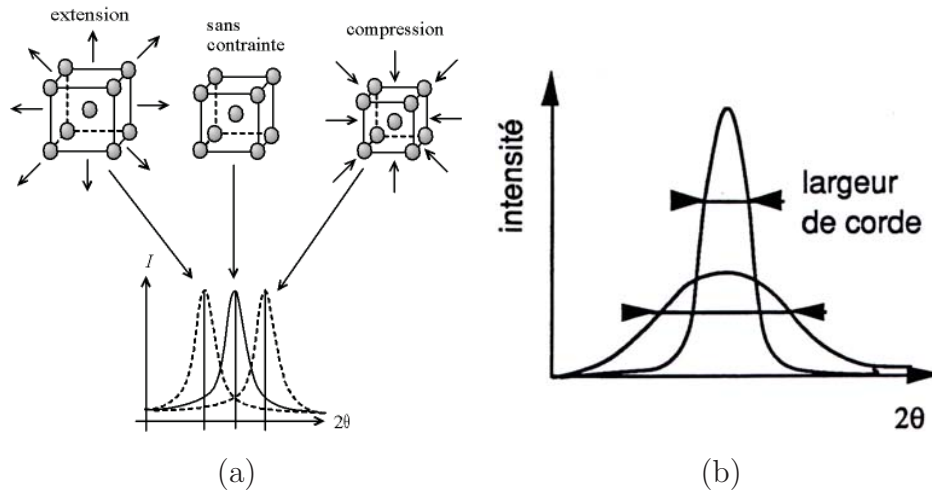


Figure 2.12 – Modifications des pics de diffraction (a) effet des macro-contraintes, (b) effet de l'écrouissage [40].

2.5 Émission de poussières en usinage des CMM_P

Les campagnes d'essais décrites précédemment (cf paragraphes 2.6 et 2.8) ne tiennent compte que de critères technico-économiques tels que :

- la durée de vie de l'outil qu'il faut mettre en liaison avec le coût d'achat afin de satisfaire à une production économique (coût de fabrication minimum) ;
- l'état de contraintes internes du matériau qui permet d'appréhender la qualité de la pièce finie et sa tenue en service ;
- l'état de surface qui correspond souvent à des exigences de fonctionnalité suivant l'application considérée.

Toutefois, la demande croissante de prise en compte des risques sanitaires sur les lieux de travail implique la nécessité d'intégrer un critère d'éco-usinabilité lié à la qualité de l'air.

2.5.1 Définition de la campagne d'essais

L'émission de particules en cours d'usinage est peu connue, et seuls des matériaux classiques ont été étudiés. La forte segmentation des copeaux de CMM_P par propagation de fissures laisse supposer une importante production de poussière, mais aucune étude d'émission de poussière n'a été effectuée sur les CMM_P .

Les essais définis au tableau 2.9 vont permettre de comprendre l'effet des particules

sur la génération des poussières. Les différents niveaux de renforts associés aux différents outils (divers matériaux d'outils, angles de coupe) vont permettre la création d'une base de données importante liant la métrologie des aérosols avec les paramètres process de la coupe des CMM_P (matériaux et outils).

2.5.2 Métrologie associée

2.5.2.1 Mesure de la concentration de particules instantanée

Les essais d'émission de poussières sont effectués au sein d'un atelier qui ne correspond en rien à une salle blanche, cela signifie qu'il est nécessaire :

- de posséder un appareil capable de mesurer des concentrations de particules importantes (fonctionnement en atmosphère non contrôlée, donc "pré-chargée" en particules ambiantes) ;
- d'éviter le décompte des particules provenant d'opérations d'usinage précédentes ou voisines ;
- de limiter les flux d'air pouvant perturber le prélèvement d'échantillon d'air, et donc la validité de la mesure.

	CMM_0	CMM_5	CMM_{15}	CMM_{25}	CMM_{25ST}	CMM_{35}
Outils	C_{1810}, C_1, C_2, C_3					
	PCD_A et PCD_B , (0 et 10°)					
Vitesse de coupe	700 m.min ⁻¹					
Avance	0,1 mm.tr ⁻¹					
ap	1 mm					
Mesures <i>insitu</i>	Concentration massique des particules instantanée et globale					
	Puissance de coupe					
Mesures <i>exsitu</i>	Usure frontale V_B					
	États de surface					

Tableau 2.9 – Définition des essais de qualification de l'émissivité de poussière des CMM_P en usinage.

Pour ce faire, le système de mesure retenue est un spectromètre d'aérosol en temps réel GRIMM 1108 (figure 2.13). Cet appareil mesure en temps réel la concentration en nombre



Figure 2.13 – spectromètre d'aérosol Grimm 1108.

de particules et en taille par un système optique. Les résultats peuvent être exprimés en concentration massique ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) ou en nombre (Particules / litre) par classe de taille de particules. Les spécifications du Grimm 1108 sont données au tableau 2.10.

Tailles de particules (en μm)	>0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,65 - 0,8 - 1 - 1,6 2 - 3 - 4 - 5 - 7,5 - 10 - 15 - >20
Capacité de comptage	jusque 2 000 000 de comptage par litre
Plage de mesure de concentration massique	de 0,1 à 100 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Débit d'échantillonnage	1,2 l/min
Sensibilité	1 particule / litre
Reproductibilité	$\pm 2\%$

Tableau 2.10 – Caractéristiques du spectromètre d'aérosol Grimm 1108.

Cet appareil fonctionne en temps réel et l'intervalle entre deux mesures est de 6 secondes. Ce dernier peut être réduit à 1 seconde à condition de restreindre le nombre de classes de taille de particules de 15 à 8. Afin de mieux appréhender la répartition par taille des particules émises, le choix est de rester à des intervalles de temps de 6 secondes. Ceci conduit à réaliser des éprouvettes longues afin d'obtenir suffisamment de points pour établir une courbe représentative. La longueur de l'éprouvette est de 300 mm avec une longueur utile de 275 mm (le reste étant utilisé pour la prise de mors). Étant donnée la taille de l'éprouvette et afin de limiter les vibrations génératrices de poussières (cf paragraphe 1.3), les essais sont réalisés en montage mixtes (prise par mandrin 3 mors associé à une contre-pointe). L'ensemble éprouvette - outil - buses d'aspiration est présenté figure

2.14. Les canaux d'aspiration sont au nombre de deux : un pour le prélèvement pour le spectromètre Grimm et le second pour l'impacteur (cf paragraphe ci-après). Le principe

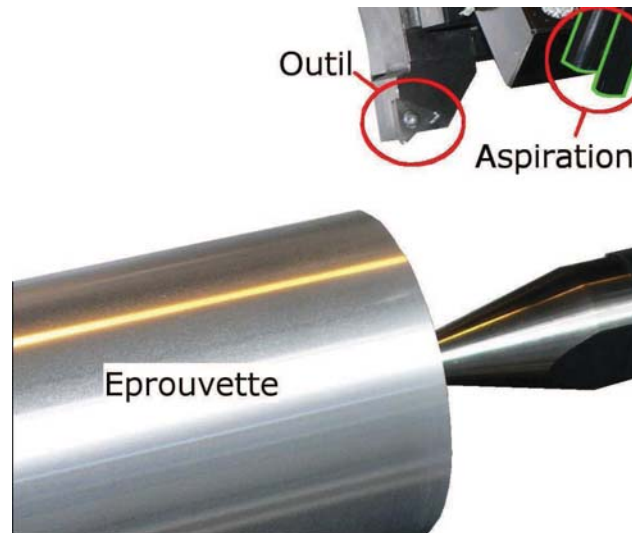


Figure 2.14 – Dispositif d'essai pour la mesure d'émissivité de poussière des CMM_P .

de mesure du spectromètre d'aérosol est le suivant : l'air est prélevé à un débit constant de $1,2 \text{ l.min}^{-1}$, garanti par un contrôleur de flux, et passe à travers un faisceau de lumière généré par une diode laser focalisée (figure 2.15). Chaque coupure du faisceau est détectée par une photo-diode grande vitesse positionnée à 90° , ce qui permet de négliger la couleur ou la différence de composition de la particule. Le signal électrique émis par la diode est examiné par un analyseur d'amplitude intégré, puis classé. Un filtre total positionné à proximité de la pompe permet de recueillir l'ensemble des particules qui ont été aspirées.

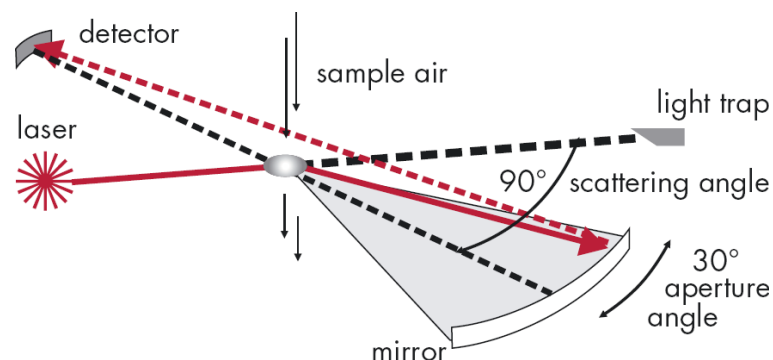


Figure 2.15 – Principe de mesure du spectromètre d'aérosol Grimm 1108.

2.5.2.2 Collecte des particules par impaction

En plus du spectromètre d'aérosol, l'utilisation d'un impacteur permet de collecter une plus grande quantité de particules que l'appareil de mesure Grimm. En effet, le débit de cet impacteur est calibré à 10 litres par minute (comparé au $1,2 \text{ l.min}^{-1}$ du Grimm). Un impacteur est constitué de plusieurs étages, et chacun d'eux recueille les particules de taille pré-définie.

Le principe de l'impacteur est simple et est présenté en figure 2.16 (a). Une pompe d'aspiration prélève l'air à analyser, il transite par plusieurs étages jusqu'à un filtre total se situant juste avant la pompe. L'appareil est conçu pour un débit spécifique (10 l.min^{-1} pour cette étude) qui doit être respecté afin que chaque étage fonctionne correctement. Les étages sont définis pour retenir les particules supérieures à une certaine taille, qui vont venir "s'impacter" tandis que les particules plus petites vont pouvoir suivre le flux d'air, et le processus se reproduit à l'étage inférieur qui retiendra les particules encore plus petites. Cette sélection par taille est similaire à la désignation des particules couramment utilisée : PM10 qui correspond à l'ensemble des particules en suspension dans l'air de diamètre aérodynamique inférieur ou égal à $10\mu\text{m}$ (les lettres proviennent de l'anglais "Particulate Matter").

Pour cette étude, l'impacteur utilisé comprends 4 étages qui sont définis dans l'ordre de passage du flux d'air :

- le premier étage pour les particules supérieures à $10\mu\text{m}$ (laisse passer les PM10) ;
- le second retiendra les particules supérieures à $2,5\mu\text{m}$ (idem pour les PM2,5) ;
- le troisième étage retiendra les particules supérieures à $1\mu\text{m}$ (idem pour PM1) ;
- le dernier étage est un filtre total qui recueillera le reste des particules.

La figure 2.16 (b) montre le contenu d'un étage d'impacteur après usinage. Les parties grisées correspondent aux particules collectées

2.5.2.3 Calcul du Dust Unit (D_U)

Une fois la mesure en temps réel de la concentration massique en aérosol effectuée par l'appareil Grimm, le calcul du "Dust Unit" (D_U) peut être effectué. Cet indicateur a été défini comme étant :

$$(2.1) \quad D_U = \frac{\text{Masse de poussière émise}}{\text{Masse de matière enlevée}}$$

Le calcul de la masse de la matière enlevée se calcul aisément à partir des paramètres de coupe (débit et durée d'usinage) et de la densité du matériau.

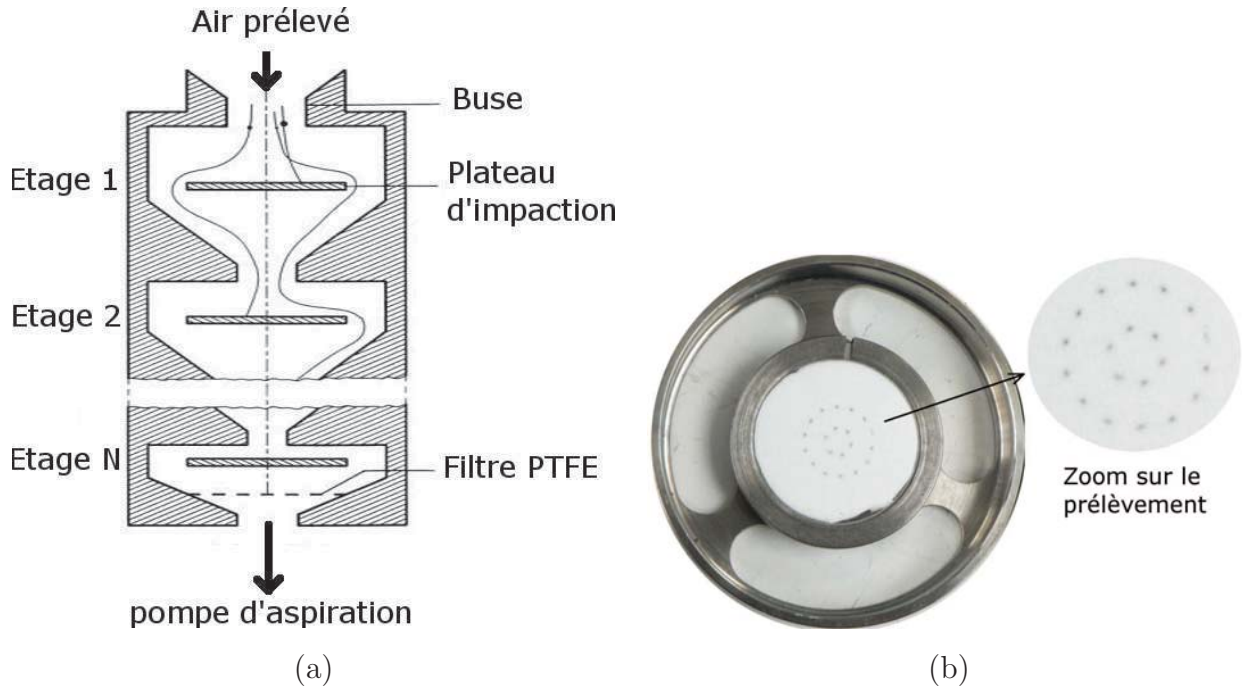


Figure 2.16 – Principe de l'impacteur (a) et exemple de prélèvement sur un étage (b).

Concernant la masse de poussière générée en cours d'usinage, le spectromètre d'aérosol donne une courbe d'émission pour chaque classe de particules (figure 2.17) avec la concentration instantanée (C_i pour la mesure i sur un nombre n de mesures) toutes les 6 secondes. L'aire située sous cette courbe correspond donc à la concentration totale (C_{dust}). L'utilisation de la méthode Simpson pour le calcul de cette aire, donne l'équation suivante :

$$(2.2) \quad C_{dust} = \sum_{i=0}^n \frac{C_i + C_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$$

Les mesures s'effectuant à intervalle de temps constant (toutes les 6 secondes, comme le montre la figure 2.17), cette équation devient :

$$(2.3) \quad C_{dust} = \frac{6 \times n}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (C_i + C_{i+1})$$

La prise en compte du volume de l'air échantillonné (V_{air}), qui est fonction du débit du spectromètre ($1,2 \text{ l.min}^{-1}$ pour le Grimm 1108) et de la durée de la mesure, permet de calculer la masse de poussière émise.

Celle-ci est donnée par la formule suivante :

$$(2.4) \quad \text{Masse de poussière émise} = V_{air} \times C_{dust}$$

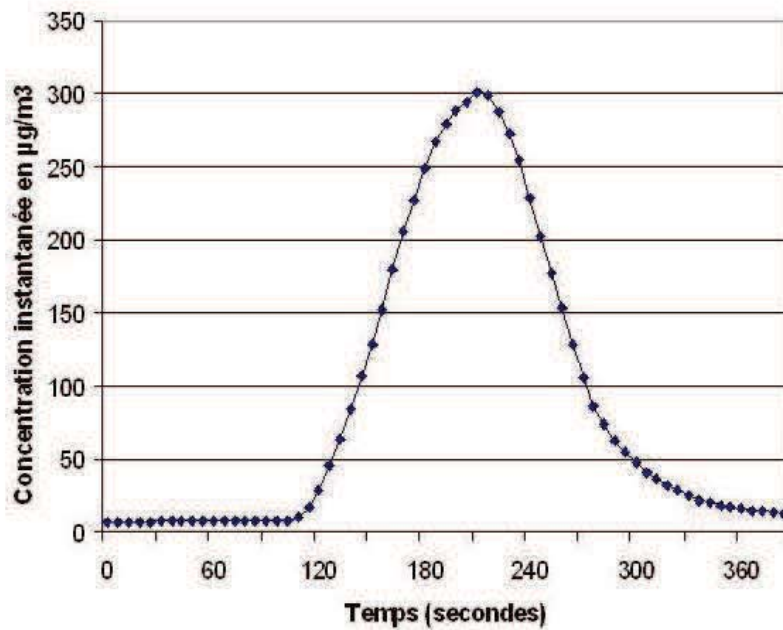


Figure 2.17 – Courbe de concentration instantanée de particules de diamètre aérodynamique compris entre $0,3$ et $0,4\mu\text{m}$ lors d'un essai de chariotage.

2.6 Conclusion

L'utilisation de matériaux composites à matrice métallique et à renfort particulaire implique un coût important à l'achat du matériau ainsi que lors de la réalisation de la pièce mécanique, de par l'utilisation d'outils diamants. La minimisation de ces coûts passe par une optimisation des paramètres process :

- la nature de l'outil et la morphologie de la surface de coupe afin de résister au mieux à l'usure ;
- les conditions de coupe, qui doivent conserver l'intégrité de surface de la pièce afin de préserver ses performances mécaniques.

L'ensemble de ces paramètres est analysé par l'intermédiaire de plusieurs campagnes d'essais. Chacune d'elles nécessite la mise en œuvre de différents moyens afin d'atteindre leur objectif :

- l'optimisation des conditions de coupe consiste à la réalisation d'essais courts permettant d'appréhender les mécanismes présents lors de la coupe des CMM_P ;
- l'exploitation industrielle de ces matériaux est analysée lors d'essais en continu. L'incidence de la coupe sur la pièce mécanique ainsi que son évolution sont étudiées afin de valider économiquement les choix techniques ;

- la caractérisation des émissions de particules lors de la coupe des CMM_P relève tant d'une préoccupation sanitaire qu'économique. Les investissements liés à la réduction d'émission et à la protection des personnels permettent en effet de limiter les coûts d'ordre curatif à plus long terme.

Chapitre 3

Résultat expérimentaux

La démarche expérimentale a été définie au chapitre précédent, ainsi que les outils de coupe et les matériaux usinés. Les résultats expérimentaux obtenus au cours de ces essais sont donc présentés ici en suivant le même cheminement que celui de l'étude. Cette progression est constituée de trois grandes parties :

1. Optimisation des conditions de coupe : La recherche du domaine d'utilisation des outils de coupe est nécessaire de par la spécificité des outils sélectionnés. Le suivi des efforts, de l'usure et de la qualité de la surface usinée sont les marqueurs permettant de définir ce domaine ;
2. Usinage compétitif et Faisabilité Industrielle : La connaissance des durées de vie ainsi que des incidences de la coupe sur la surface usinée permet de maîtriser l'aspect économique ainsi que l'adéquation avec les performances mécaniques requises ;
3. Usinage et Émission de particules : Le suivi de la quantité de particules en suspension dans l'air ainsi que la taille de celles-ci permet de minimiser l'exposition aux risques des personnels.

3.1 Optimisation des conditions de coupe

Les essais composant cette partie sont définis au paragraphe 2.3.1. Pour mémoire, il s'agit d'essais de courte durée afin de comparer le niveau des efforts et la qualité de la surface obtenue. Ceci va permettre de définir les conditions de coupe stables pour un couple Outil / Matériau Composite.

3.1.1 Performances comparées en terme d'efforts de coupe

Lors de la coupe, l'action de la pièce sur l'outil est décomposée en trois composantes qui sont, pour le tournage :

- l'effort de coupe, qui est parallèle à la vitesse de coupe ;
- l'effort d'avance qui est confondu à la vitesse d'avance ;
- l'effort de pénétration.

Parmi ces trois efforts, l'effort de coupe est le plus important en valeur absolue, et est représentatif de la difficulté d'usiner le matériau. Le relevé des efforts présenté en figure 3.1

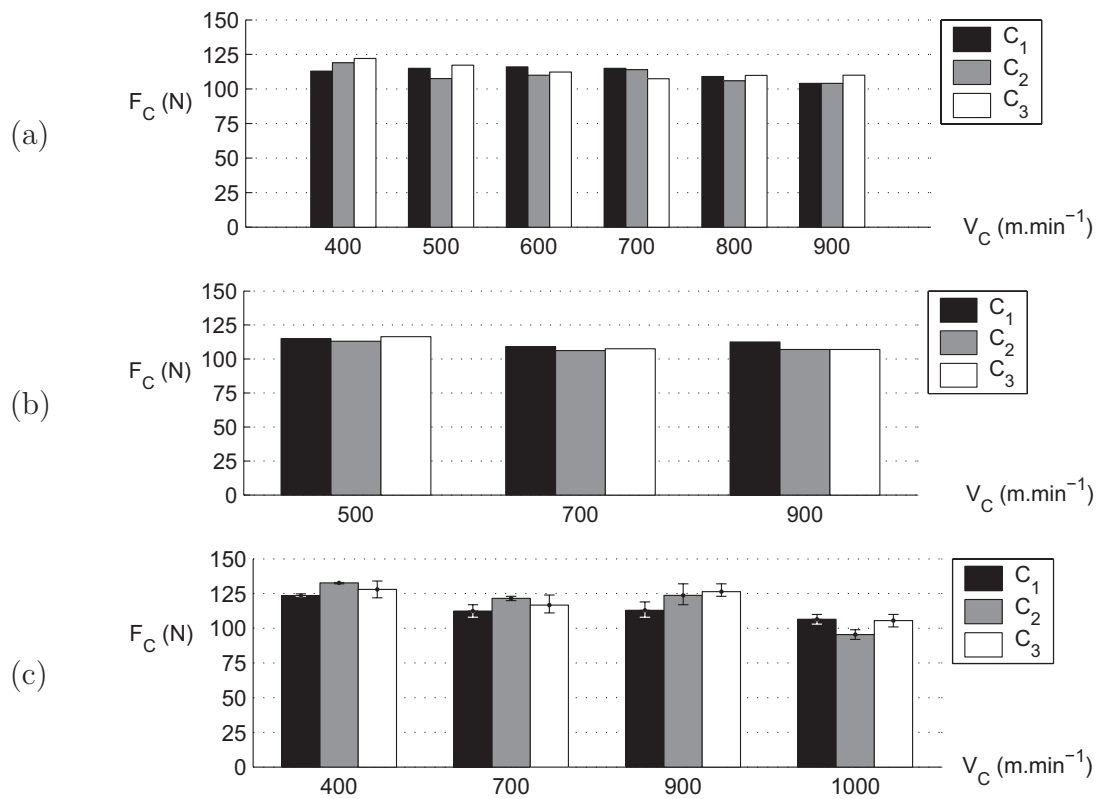


Figure 3.1 – Evolution de l'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe, pour une avance $f = 0,1 \text{ mm.tr}^{-1}$ et différents matériaux (a) CMM₅, (b) CMM₁₅, (c) CMM₂₅.

permet d'effectuer plusieurs constats :

- l'augmentation du chargement en carbure de silicium du composite à matrice métallique (de 5 à 25%) se traduit par un léger accroissement de l'effort. Cette évolution est visible en comparant les résultats des essais sur les composites CMM₅ et CMM₂₅, et principalement pour les revêtements C₂ et C₃ (pour les vitesses de coupe communes : 400, 700 et 900 m.min⁻¹) ;

- il y a peu de différence exprimée en terme de variation d'effort de coupe entre les revêtements C_1 , C_2 et C_3 , et les écarts qui peuvent être observés ne sont pas significatifs.

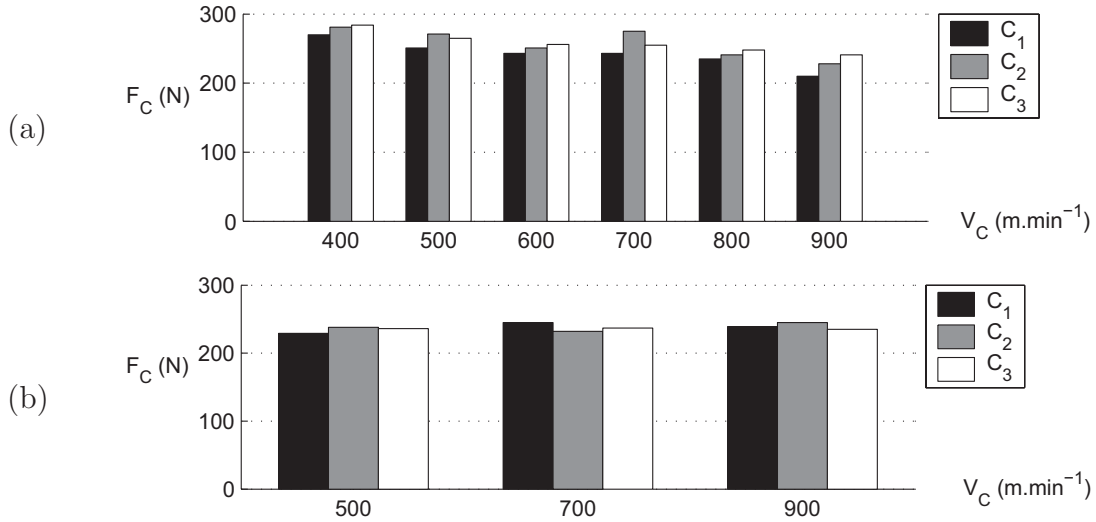


Figure 3.2 – Evolution de l'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe, pour une avance $f = 0,3 \text{ mm.tr}^{-1}$ et différents matériaux (a) CMM_5 , (b) CMM_{15} .

L'augmentation du niveau de l'effort de coupe en triplant la vitesse d'avance (figure 3.1 pour $f = 0,1 \text{ mm.tr}^{-1}$, et figure 3.2 pour $f = 0,3 \text{ mm.tr}^{-1}$) est conforme à l'ensemble des modélisations des efforts de coupe.

Les figures 3.1 et 3.2 ne permettent de discriminer les revêtements ou les vitesses de coupe par l'effort de coupe. Toutefois, lors du traitement des efforts d'avance, au lieu d'obtenir un palier comme présenté en figure 2.3, d'importantes variations apparaissent. La figure 3.3 est caractéristique de cette évolution. Le fort accroissement de l'effort d'avance (environ 28%) lors de l'utilisation du revêtement C_2 laisse supposer une usure rapide. Cet essai est effectué sur le matériau le plus chargé en particules de carbure de silicium (25%), et génère donc une usure abrasive importante (cf paragraphe 1.1). L'effort d'avance est stable avec l'outil C_1 , tandis que l'outil C_3 engendre une courbe avec la même évolution initiale que celle enregistrée pour C_2 et une stabilisation dans les derniers instants de l'essai. Comme décrit au paragraphe 2.2, le revêtement C_3 est composé en surface par une couche de type C_2 , déposée sur une épaisseur de type C_1 . Cette structure bi-couche semble lui octroyer un comportement intermédiaire à C_1 et C_2 . Dans un premier temps ce comportement est similaire à C_2 car cela correspond à la structure de diamant présents en surface de l'outil neuf. La stabilisation de l'effort d'avance correspondrait à priori à l'influence de la sous-couche C_1 .

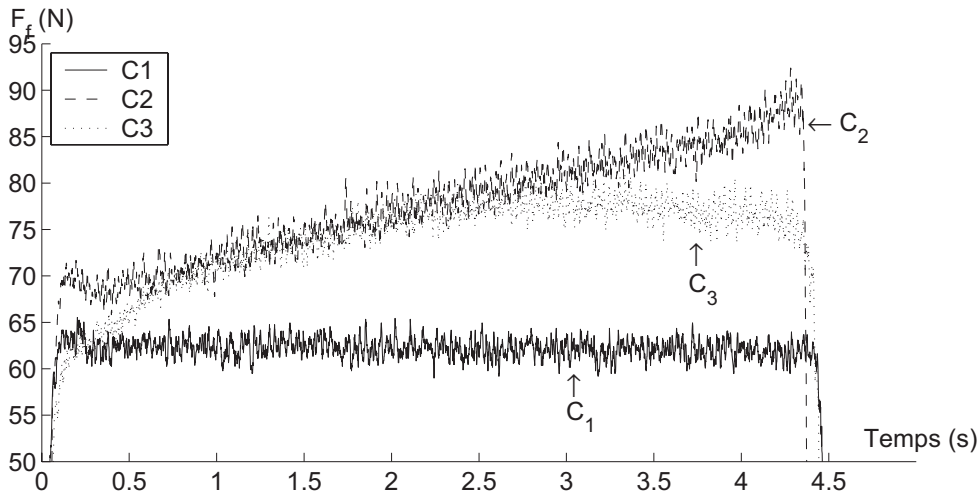


Figure 3.3 – Évolution de l'effort d'avance au cours de l'essai. CMM_{25} ,
 $V_c = 700 m.min^{-1}$, $f = 0.1 mm.tr^{-1}$, $a_p = 1 mm$.

Afin d'expliquer quantitativement ce phénomène, la qualification et la quantification de l'usure sont nécessaires.

3.1.2 Performances comparées en terme d'usure

Chaque essai d'usinage sur le CMM_{25} ayant été répété trois fois, les courbes reportées sur la figure 3.4 résultent de l'analyse de trois plaquettes pour une vitesse de coupe V_C donnée et par revêtement étudié. Ces mesures ont été effectuées après attaque chimique de la matière adhérente à la plaquette.

De cette figure, l'évolution des différents critères d'usures (V_B et K_T) et la similitude de progression de l'usure frontale (V_B) et de l'usure en cratère (K_T) apparaît clairement quelque soit le revêtement utilisé. L'analyse de cette figure confirme le résultat de la variation de l'effort d'avance en cours d'usinage. Le revêtement C_1 présente une usure assez faible en comparaison avec les autres revêtements. A faible vitesse de coupe, l'usure est semblable entre C_2 et C_3 et l'usure K_T avoisine une profondeur de $3\mu m$, ce qui correspond à l'épaisseur de la première couche du revêtement C_3 . Lorsque la vitesse augmente, l'usure varie dans le même sens, mais plus faiblement pour C_3 . Cette diminution s'explique par l'entrée en action de la sous-couche de type C_1 du revêtement C_3 . Pour le revêtement C_2 , la valeur maximale de l'usure en cratère (figure 3.4 (a)) est de $6\mu m$, cela correspond à l'épaisseur du revêtement. Toutefois, comme le montre la figure 2.8, cette usure maximale se situe au niveau de la pointe de l'outil, à l'intersection du revêtement déposé sur la face de coupe et celui déposé sur la face en dépouille. Le substrat en carbure de tungstène

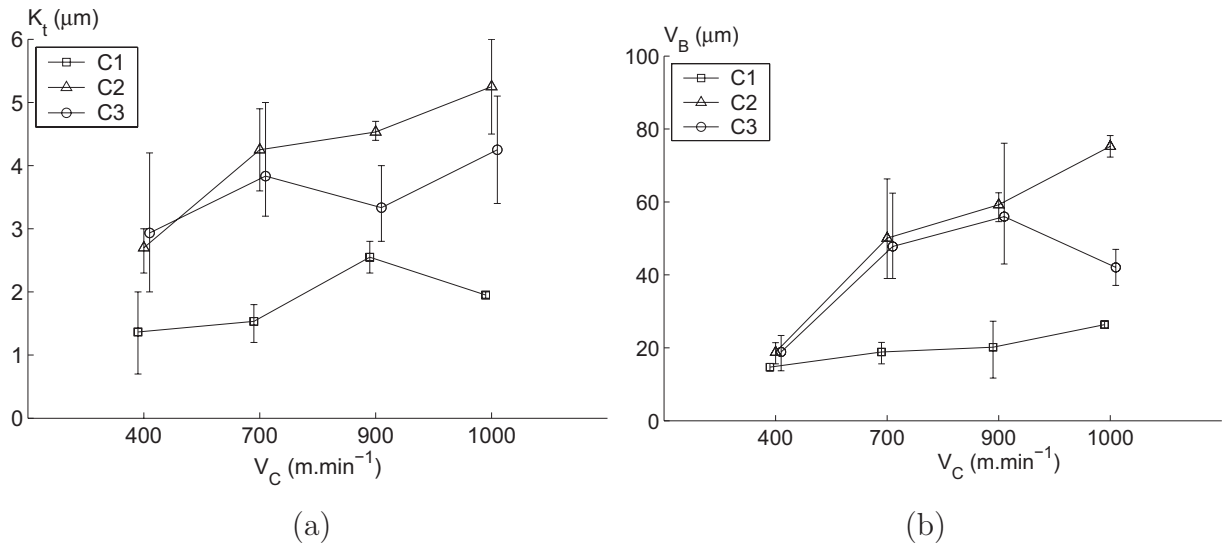


Figure 3.4 – Evolution des critères d'usures K_T (a) et V_B (b) en fonction de la vitesse de coupe pour les revêtements CVD après 5 secondes d'usinage du CMM_{25} .

n'est donc pas mis à nu.

La corrélation entre usure et variation de l'effort d'avance décrite précédemment, apparaît plus clairement sur la figure 3.5. En abscisse sont reportées les valeurs des pentes des courbes des efforts d'avance pour les différents essais. Le calcul de la pente s'effectue sur la totalité de l'essai et correspond donc à une pente moyenne (comparaison entre valeur finale et initiale de l'effort d'avance). Les vitesses de coupe utilisées au cours des essais sont indiquées à côté des marqueurs. Les zones d'apparition des couples "pente / usure" en cratère sont spécifiques à chaque revêtement d'outils. L'outil C_1 se situe dans une zone de moindre usure et de faible évolution de l'effort d'avance. Le revêtement C_2 présente la zone la plus étendue, et l'incidence de la vitesse de coupe sur l'usure K_T apparaît comme étant linéaire. Il en est de même pour la relation vitesse de coupe et gradient d'effort d'avance. Les essais sur le revêtement C_2 à la vitesse de coupe de 1000 $m.min^{-1}$ présentent la plus forte usure et le plus fort gradient. Pour ce qui est du revêtement C_3 , il se situe en position médiane, dans une zone d'usure moyenne (de 2 à 5 μm) et de valeur de gradient moyenne. Malgré de courtes durées d'essais (moins de cinq secondes), une usure équivalente à l'épaisseur du revêtement est observée. A vitesse de coupe identique, les usures les plus importantes sont obtenues avec le revêtement C_2 . Quant au revêtement C_1 , il semble le plus apte à résister à l'usure initiale.

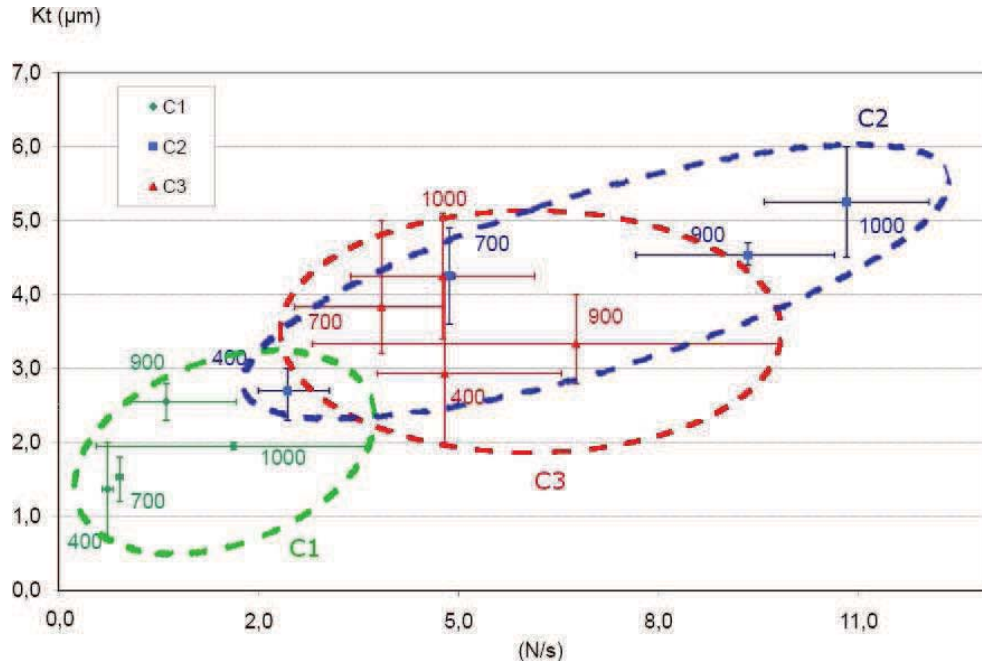


Figure 3.5 – Corrélation entre usure en cratère K_T et variation temporelle de l'effort d'avance.

3.1.3 Performances thermiques comparées en coupe

Comme pour les mesures d'usure (paragraphe précédent), les mesures par thermographie infrarouge sont issues de trois essais identiques.

La figure 3.6 indique pour chaque essai la valeur moyenne ainsi que l'étendue des mesures de températures effectuées. Comme pour les résultats présentés précédemment, les valeurs des essais avec le revêtement bi-couche C_3 correspondent à peu près, à une moyenne entre celles de C_1 et de C_2 . Le revêtement C_1 est celui pour lequel la température après usinage est la plus importante, quelle que soit la vitesse de coupe. Le revêtement C_2 présente les températures les plus faibles. L'écart relatif de température est d'environ 10% entre chaque revêtement (donc 20% environ entre C_1 et C_2 , qui correspondent respectivement aux maximum et minimum).

Cette température ayant été mesurée sur la face de coupe immédiatement à la sortie d'outil, il est intéressant de la mettre en relation avec l'épaisseur de la couche adhérente sur cette face de coupe. La figure 3.7 indique l'épaisseur du matériau adhérent à la face de coupe au niveau du bec de l'outil. Comme précédemment, ces mesures ont été effectuées au microscope interférométrique, avant attaque chimique. Un fort collage est observé au niveau du revêtement C_1 , tandis que C_2 et C_3 présentent un collage nettement plus faible. Le collage est généralement lié aux caractéristiques de la surface (rugosité, courbe de

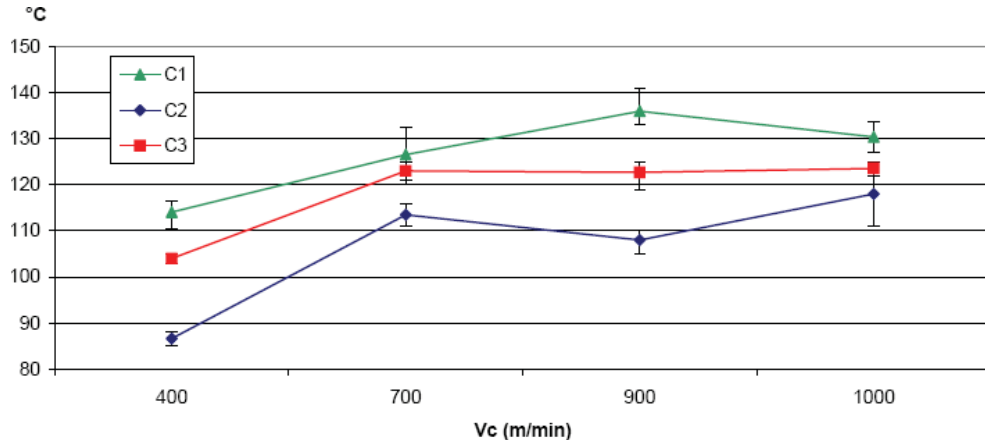


Figure 3.6 – Évolution des températures enregistrées en sortie de matière sur les outils CVD.

abbot ...) et les revêtements C_2 et C_3 ont des caractéristiques similaires puisque la couche de surface de C_3 est de type C_2 . Ces structures de surface identiques expliquent que ces deux revêtements présentent des épaisseurs de collage assez proches.

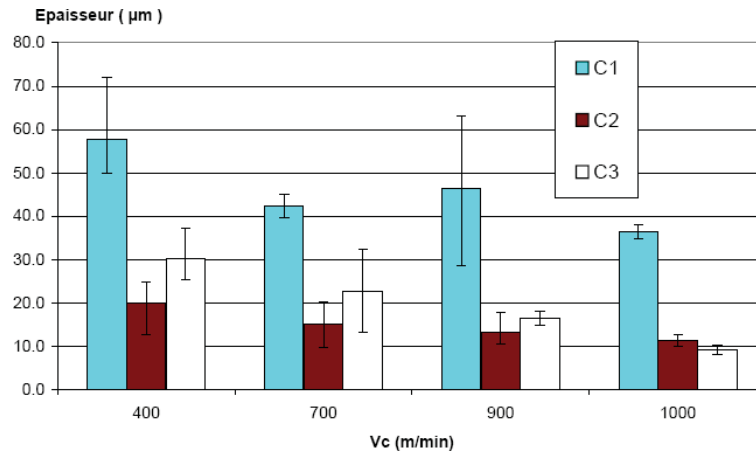


Figure 3.7 – Épaisseur de matériau adhérent au niveau du bec de l'outil (essais d'optimisation des conditions de coupe sur CMM_{25}).

Les températures enregistrées (cf. figure 3.6) sont à comparer avec les températures évaluées par Shaw [41] et reprises par El Mansori et al. [42]. Cette évaluation est basée sur la réponse thermophysique du matériau usiné et les phénomènes thermiques du frottement lors de la coupe. Son calcul s'effectue à partir de l'équation 3.1.

$$(3.1) \quad \frac{\theta_{calculé}}{u_c} \left(\frac{K \times \rho \times C}{V_C \times f} \right)^{\frac{1}{2}} = const.$$

Les différents paramètres de cette équation sont déterminés comme suit :

- l'énergie spécifique de coupe (u_c) est calculée à partir des relevés d'efforts effectués sur le CMM_{25} ;
- la capacité thermique (C) est extraite de l'article de Ilie et al. [43] ($C = 827,5 J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$) ;
- la conductivité thermique (K) provient de données de fabricant de CMM_P ($K = 150 W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)

Donc, seule la constante reste à déterminer. Pour ce faire, la température calculée sera ajustée à la température mesurée moyenne pour la vitesse de coupe de $400 m.min^{-1}$. Cet ajustement permet de comparer ces deux températures pour les vitesses de coupe supérieures (700, 900 et $1\,000 m.min^{-1}$).

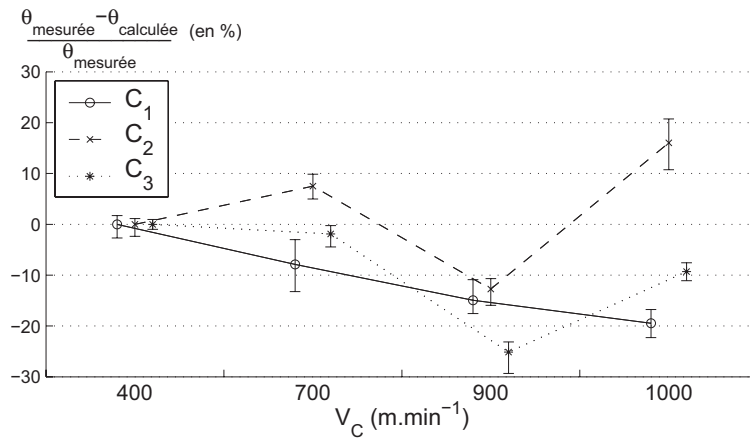


Figure 3.8 – Épaisseur de matériau adhérent au niveau du bec de l'outil (essais d'optimisation des conditions de coupe sur CMM_{25}).

La figure 3.8 permet de visualiser ces écarts. Pour les revêtements C_1 et C_3 , la température mesurée est systématiquement inférieure à celle calculée. Le revêtement C_1 étant aussi celui dont la topographie de surface est la plus "accidentée" (figure 2.3), l'hypothèse d'un collage d'origine mécanique semble correcte. Pour ce qui est du revêtement C_2 , les écarts fluctuent de -10 à +20% de façon discontinue. L'important écart observé à $V_c=1\,000 m.min^{-1}$ provient de la forte baisse de la température calculée due à une énergie spécifique de coupe diminuant de 23% entre 900 et $1\,000 m.min^{-1}$. Une évolution similaire mais de moins grande importance se produit avec le revêtement C_3 . Le comportement de la couche de diamant à structure C_2 (revêtement C_2 et couche de surface du revêtement C_3) semble donc plus sensible au collage d'origine thermique pour les hautes vitesses de coupe. Toutefois l'épaisseur de matériau adhérent n'évolue pas en concordance avec ce comportement. L'adhésion d'une couche initiale sur la surface est peut être rendue plus ardue étant donné la topographie plus "lisse" de ce revêtement. Bien entendu, l'épaisseur

de collage ayant été mesurée à l'issue d'essais d'usinage de courte durée, le comportement revêtement / matériau usiné doit aussi être analysé dans le temps (paragraphe 3.2), afin de stabiliser les paramètres de la zone de coupe et de prendre en compte les effets de l'usure de l'outil.

3.1.4 Performance en terme d'état de surface

La mesure des états de surface n'a rien de complexe dans sa réalisation, mais le choix de paramètres représentatifs n'est pas chose aisée. Dans cette étude, la mesure de la rugosité a porté sur les critères les plus fréquemment utilisés industriellement :

- l'écart moyen arithmétique Ra ;
- la rugosité totale Rt .

Le protocole de mesure a été effectué conformément à la description donné au paragraphe 2.3.2.2. Ce qui implique donc une corrélation entre la valeur de Ra et de Rsm (tableau 2.7).

Seules les mesures effectuées à l'issue de l'usinage du CMM_{25} sont présentées, car elles sont constituées de trois usinages identiques, ainsi que de trois mesures par usinage. Les seuls paramètres process ayant été modifiés sont

- la nature du revêtement CVD ;
- la vitesse de coupe (variant de 400 à 1 000 $m.min^{-1}$).

La forme de l'outil et l'avance ne variant pas au cours des essais, le profil mésoscopique de la surface usinée ne devrait pas évoluer. C'est pourquoi la modification de la longueur de base λ_c est d'autant plus surprenante (cf tableau 3.1) qu'elle intervient dans certains cas lors des différentes mesures d'une même surface (essais avec C_1 : 700 b, 400 a). Une solution pour s'affranchir de ce paramètre est d'utiliser l'analyse multi-échelle.

Cette analyse a été menée sur les essais portant sur le CMM_{25} . Les valeurs issues de l'analyse multi-échelle proviennent de l'analyse de neuf profils extraits de trois surfaces usinées dans les mêmes conditions. Contrairement à C_1 (figure 3.10 (a)), le spectre de micro-rugosité de C_3 est peu sensible à la vitesse de coupe, et il en est de même pour les profils générés par le revêtement C_2 . Concernant les vitesses de coupe, les faibles vitesses (400 et 700 $m.min^{-1}$) ne présentent pas de différences marquées entre les revêtements, tandis que les grandes vitesses (900 et 1 000 $m.min^{-1}$) montrent un spectre plus élevé pour le revêtement C_1 . Cette analyse multi-échelle permet de montrer l'influence de la vitesse de coupe en fonction des échelles de rugosité.

Essai		C_1			C_2			C_3		
V_C	n°	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1000	a	0,25			0,25			0,25		
	b									
	c									
900	a									
	b									
	c									
700	a									
	b	0,25		0,08						
	c	0,25								
400	a	0,25	0,08							
	b	0,25								
	c	0,08								

Tableau 3.1 – Valeurs de λ_c lors des mesures des rugosités, Essais sur le CMM_{25} répétés 3 fois (a, b, c), rugosité mesurée 3 fois (1, 2, 3).

3.1.5 Conclusion

De cette analyse des performances d'outils de coupe lors de l'usinage du matériau le plus abrasif qu'est le CMM_{25} découle :

- l'importance du contrôle de l'évolution de l'effort d'avance pour différencier le comportement des revêtements d'outils. L'accroissement de l'effort d'avance en cours d'essai a été mis en relation avec le niveau d'usure constaté sur les plaquettes (figures 3.4 et 3.5). Le revêtement C_2 est celui dont l'effort d'avance croît le plus fortement, et dont l'usure en cratère K_T et l'usure en dépouille V_B sont les plus importantes. Le revêtement C_3 présente des performances en concordance avec sa structure. Constitué d'une première couche de type C_1 sur laquelle est déposée une couche C_2 , l'effort d'avance croît comme pour le revêtement C_2 au début de l'essai et fini pas se stabiliser comme le revêtement C_1 . Il en est de même pour l'usure, qui est la plus forte pour C_2 , la moins forte pour C_1 , et de valeur moyenne pour le revêtement C_3 ;
- les températures mesurées en surface suivent aussi cette règle empirique (figure 3.6), tandis que le collage observé sur la plaquette est presque équivalent entre C_2 et

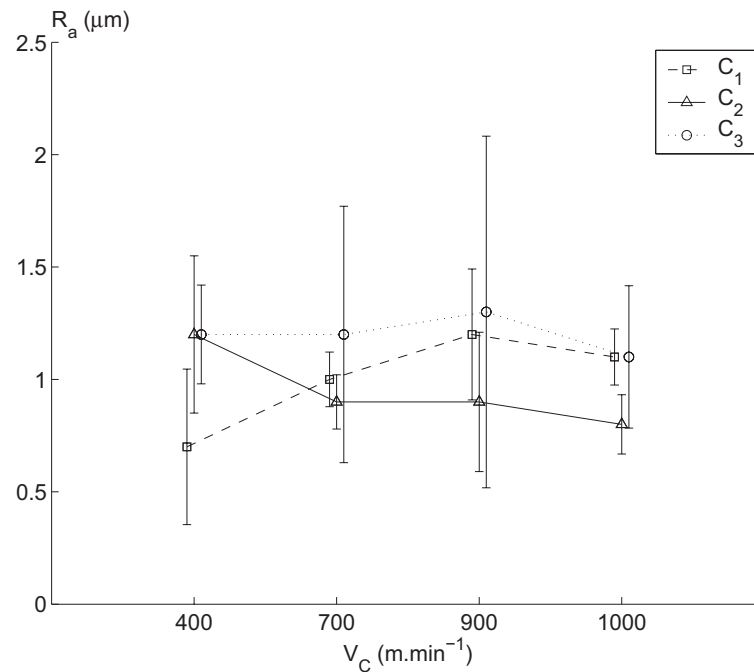


Figure 3.9 – R_a mesurés à l'issue des essais sur le CMM_{25} (les barres d'erreurs représente 80% des résultats).

C_3 . Cela peut signifier que l'aptitude à l'adhésion d'un revêtement est liée à la morphologie de sa surface initiale. La forte adhésion observée sur le revêtement C_1 est d'origine mécanique et peut expliquer la plus forte température en surface par la non répartition et la non évacuation de l'énergie thermique générée lors de la coupe. Quant au revêtement C_2 , un phénomène thermique risque probablement de s'ajouter au collage mécanique dès qu'une épaisseur de matière adhérente initiale est suffisante (à haute vitesse de coupe, $1\,000\,m.min^{-1}$);

- L'analyse des états de surface conduit aux constats suivants :
 - C_2 donne les moins bon résultats et C_3 les meilleurs ;
 - la qualité de surface est homogène pour C_2 quelque soit la vitesse ;
 - il y a une réelle influence de l'échelle d'analyse du spectre de micro-rugosité à partir de $65\,\mu m$;
 - les meilleurs états de surface sont obtenus pour les vitesses de coupe de 400 et $700\,m.min^{-1}$.

Ces essais de courte durée permettent donc d'appréhender les performances des différents revêtements lors de la coupe des CMM_P :

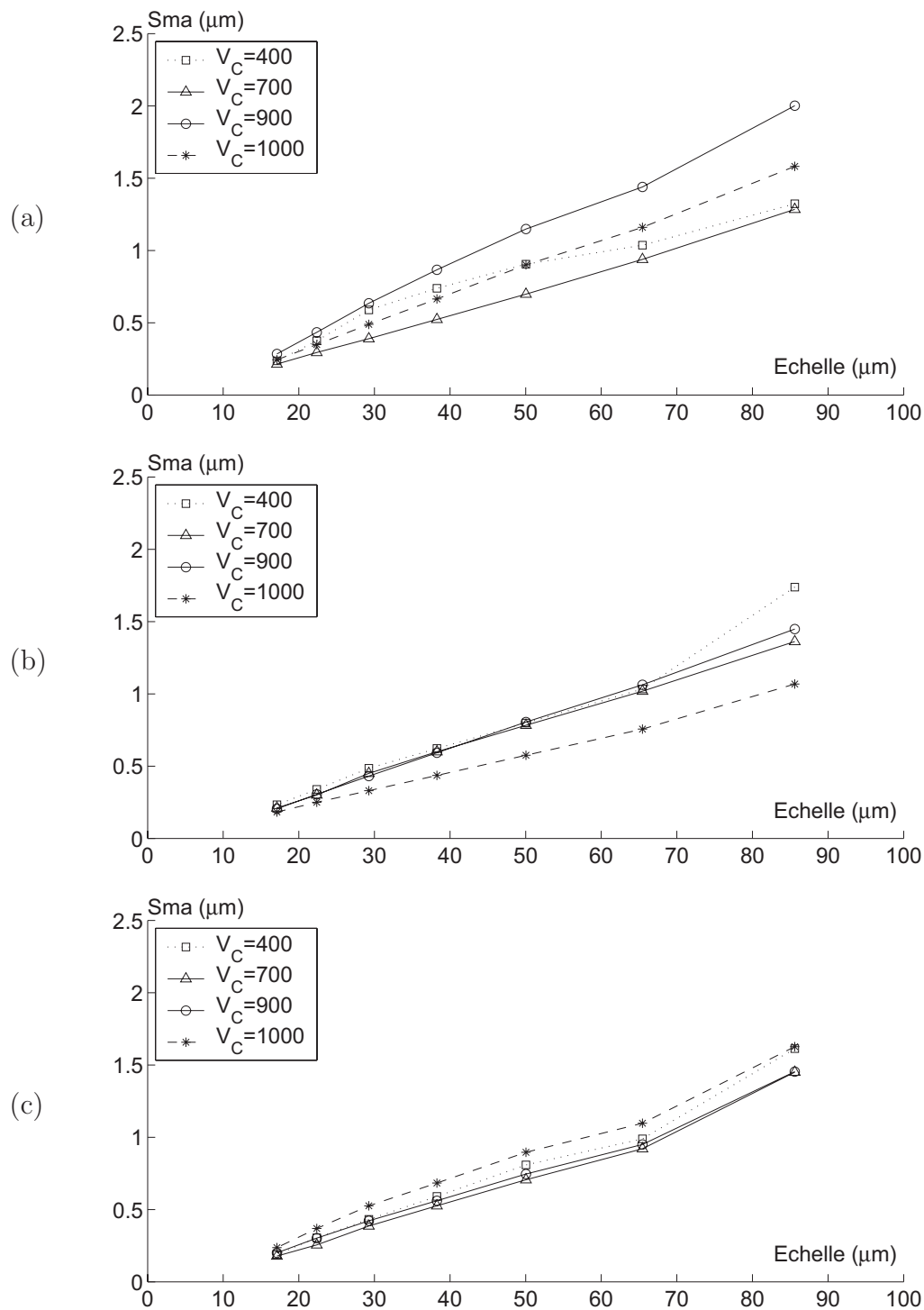


Figure 3.10 – Spectre de micro-rugosité établi à partir des essais d'optimisation des conditions de coupe sur le CMM_{25} . Valeurs pour C_1 (a), C_2 (b) et C_3 (c).

- usure importante et état de surface de faible qualité avec C_2 ;
- meilleure résistance à l'usure de C_1 ;

- bon état de surface avec le revêtement C_3 ;
- la vitesse de coupe de 700 m.min^{-1} semble réaliser un bon compromis entre productivité et qualité de surface.

Ces premières conclusions sont à confirmer lors d'essais en conditions industrielles, pour des temps de coupe importants, afin de voir comment évoluent les performances des outils au fur et à mesure de l'usure, en conditions stabilisées.

3.2 Usinage compétitif - Faisabilité industrielle

La campagne d'essais précédente ayant permis de définir des performances de coupe des outils, il est nécessaire à présent de tester ces outils en conditions d'utilisation normales.

Comme décrit au paragraphe 2.4.1, les essais s'effectuent jusqu'à la fin de vie de l'outil (bris d'outil ou usure frontale V_B supérieure à 0,2 mm). Les temps d'usinage étant suffisamment long pour caractériser la durée de vie des outils, les conditions d'usinage au niveau de la zone de coupe (température locale ...) seront stabilisées et l'impact de l'usure sur le comportement des outils sera pris en compte.

3.2.1 Performances énergétiques (CMM_5 , CMM_{15} et CMM_{25})

Pour des essais de courte durée, l'utilisation d'une platine Kistler (voir paragraphe 2.3) est possible tandis que pour des usinages plus long, l'utilisation de capteurs de puissance est recommandée. Ces appareils sont spécialement conçus pour effectuer un contrôle en continu du process afin de détecter des anomalies.

La mesure de la puissance est effectuée sur la broche ainsi que sur l'axe d'avance. Pour les raisons de recollement des mesures expliquées au paragraphe 2.4.2.1, le tracé des courbes de puissance n'a été effectué que pour les essais sur le CMM_5 et le CMM_{25} , et partiellement sur le CMM_{15} (uniquement le revêtement C_{1810}). La fin de chaque essai présenté sur les figures 3.11 et 3.13 est signalé par un marqueur (étoile, triangle ou cercle). Le prolongement de la courbe correspond à une extrapolation par une courbe de tendance de type puissance. Les raisons pour lesquelles les essais ont été stoppés sont les suivantes :

- pour l'outil C_2 , en raison de la mauvaise qualité de surface ;
- pour l'outil C_3 , un bris d'outil est apparu au niveau du bec (figure 3.12 (c)).

Comme cela a été constaté précédemment au niveau des efforts de coupe (paragraphe 3.1.1),

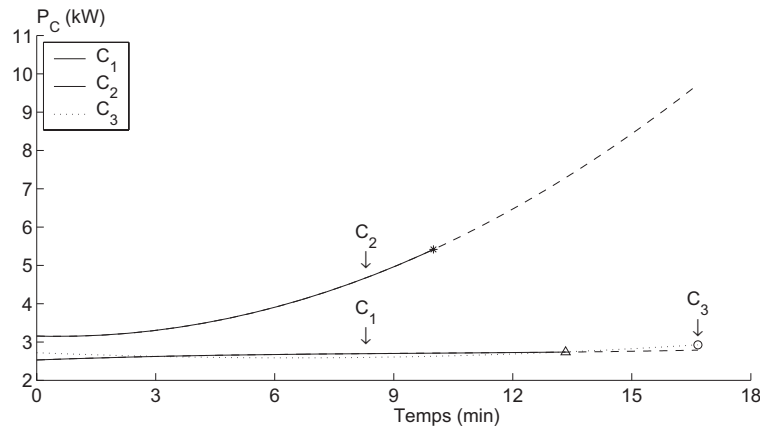


Figure 3.11 – Courbe de puissance consommée à la broche lors des essais de durée de vie sur le CMM_5 ($V_C = 700m.min^{-1}$, $f = 0.1mm.tr^{-1}$, $a_p = 1mm$).

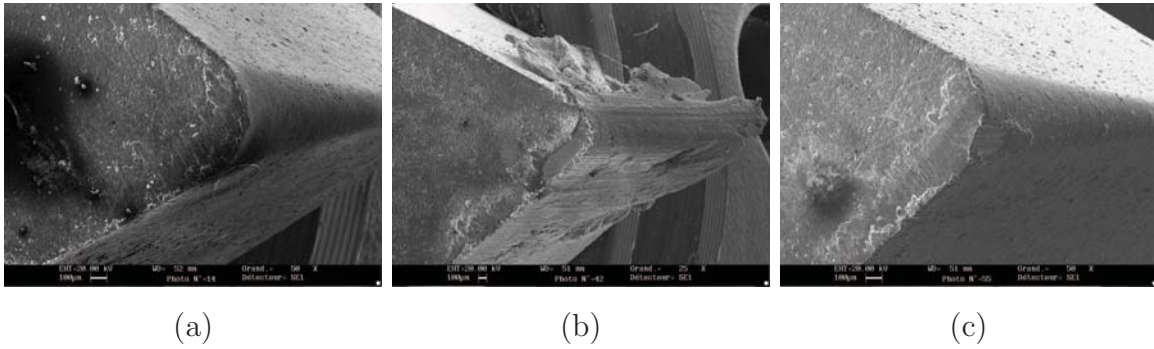


Figure 3.12 – Observation des arêtes de coupe à l'issue des essais d'usure sur le CMM_5 : C_1 (a), C_2 (b), C_3 (c).

les informations recueillies au niveau des avances permettent une comparaison plus facile car les différences sont plus marquées. La courbe d'intensité consommée au moteur d'avance (figure 3.13) montre un écart plus net entre les revêtements que la figure 3.11, avec un niveau d'intensité initial équivalent. Ces courbes confirment les observations faites au paragraphe précédent (essais d'optimisation des conditions de coupe) concernant le revêtement C_2 . Cet accroissement de puissance correspond à un accroissement de l'usure, tandis que les revêtements C_1 et C_3 présentent des courbes de puissance stables.

La mesure in situ de la puissance consommée permet par ailleurs de suivre l'usure des différents revêtements. Cette évolution peut s'effectuer de deux façons :

- la puissance consommée peut augmenter brutalement. La figure 3.14 présente un accroissement brutal aux environs de 11 minutes d'usinage, ce qui traduit une défaillance de l'arête de coupe de l'outil C_{1810} et déterminer sa durée de vie pour l'usinage du CMM_{15} . La figure 3.15 (c) montre un effondrement d'arête associé à

une très faible usure du bec de l'outil, ce qui est en adéquation avec l'évolution de la courbe de puissance consommée ;

- son évolution peut s'effectuer progressivement. Ce type de progression caractérise le comportement du revêtement C_2 . Le suivi de la puissance consommée à la broche permet de constater un fort taux d'usure du revêtement (figure 3.11 et 3.12 (b)).

Les performances énergétiques des revêtements C_1 et C_3 sont similaires lors de l'usinage du CMM_5 , même si une extrapolation des courbes d'intensité laisse supposer une dégradation de l'outil C_1 . Cette tendance est confirmée par les performances respectives de ces revêtements avec le CMM_{25} (figure 3.18 (a)). En effet, bien que les niveaux de puissances soient voisins au début de la coupe, l'accroissement brutal de la puissance révèle un effondrement de l'arête de coupe C_1 . Cette dégradation est visible sur la figure 3.17 (a) et se traduit par une usure en entaille et une décohésion du revêtement au niveau du bec. L'apparition d'usure en entaille pourrait provenir d'une accumulation de particules en surface lors de la préparation de l'éprouvette. La figure 3.17 (c) permet de constater un petit décollement du revêtement au niveau du bec de l'outil C_3 , qui n'a eu d'incidence ni sur la puissance consommée, ni sur la qualité de la surface usinée.

Les outils C_{1810} présentent aussi un décollement lors des essais d'usure sur les CMM_{15} et CMM_{25} . Dans le cas du CMM_{15} , ce décollement s'ajoute à un effondrement d'arête. Les zooms effectués au niveau du bec de l'outil (figure 3.15 (d) et figure 3.17 (e)) montrent que leur localisation est identique au décollement survenu sur le revêtement C_3 . Ceci pourrait traduire une zone à faible adhésion du revêtement diamant.

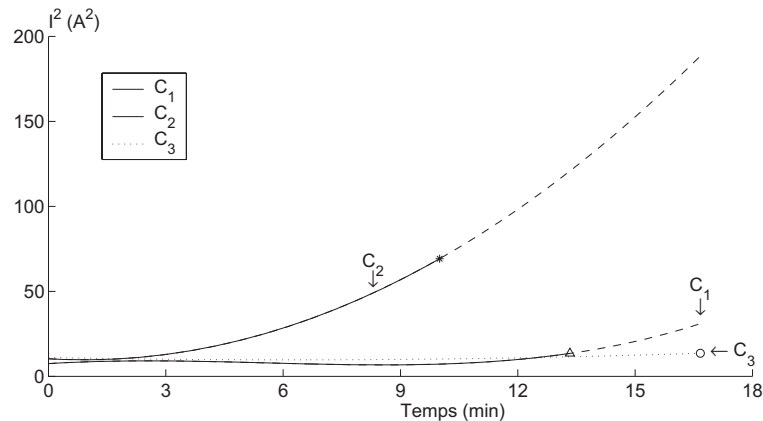


Figure 3.13 – Courbe équivalente à la puissance consommée sur l'axe d'avance lors des essais de durée de vie sur le CMM_5 ($V_C = 700 m.min^{-1}$, $f = 0.1 mm.tr^{-1}$, $a_p = 1 mm$).

La courbe de la puissance broche nécessaire à l'outil C_2 pour la coupe du CMM_{25}

(figure 3.16) regroupe les deux types d'évolutions décrits précédemment. En effet, une défaillance brutale de l'arête est décelable à l'issue de 50 secondes d'usinage. Celle-ci est précédée par une usure constante qui se traduit par un accroissement de 25% de la puissance consommée. Ce comportement se confirme lors d'un second essai d'usure sur le même matériau (figure 3.18) et l'observation de l'arête de coupe à l'issue de cet essai corrobore l'analyse de l'évolution de la puissance (figure 3.17 (b)).

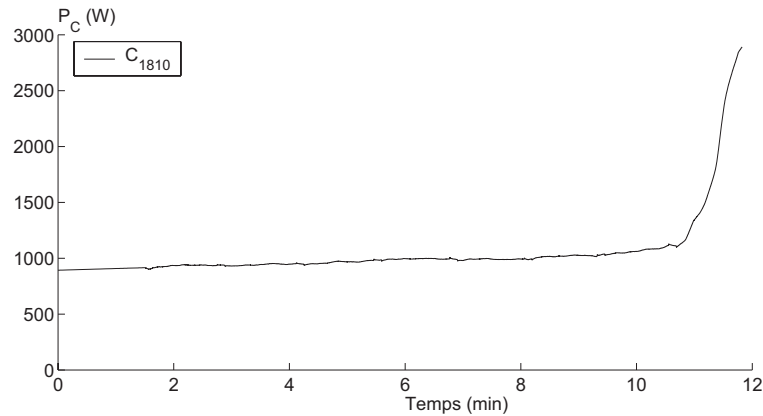


Figure 3.14 – Courbe de puissance consommée à la broche lors des essais de durée de vie sur le CMM_{15} avec l'outil C_{1810} ($V_C = 700 \text{ m.min}^{-1}$, $f = 0.1 \text{ mm.tr}^{-1}$, $a_p = 1 \text{ mm}$).

L'observation de la face de coupe et de la face en dépouille permet d'évaluer l'usure et de visualiser la zone défaillante. Sa localisation est illustrée par la figure 3.19 par les flèches. Sur la partie (a) de la figure, le contour initial de l'outil est visible, et correspond à la périphérie de l'outil située à quelques dixièmes de millimètre de la face de coupe, ce qui explique son aspect flou.

L'usure abrasive intense est clairement visible sur les deux faces de l'outil, et l'usure en dépouille V_B mesurée est supérieure au critère limite d'usure. De plus, comme indiqué précédemment, l'arête de coupe a subi une défaillance au bout de 50 secondes de coupe (localisé par les flèches).

Pour ce qui est du comportement des outils PCD, les courbes de puissances sont linéaires et croissantes (figure 3.18 (b)). L'incidence d'un angle de coupe positif sur la puissance consommée à la broche se traduit par une diminution de celle-ci. Ceci s'explique par un comportement de type brise-copeaux par les plaquettes possédant un angle de coupe nul. Lors de la formation du copeau, celui-ci se referme lors de l'appui sur la face de coupe et le copeau se fractionne. Cette fragmentation est nécessairement consommatrice d'énergie. Comme attendu, l'observation des outils PCD met en évidence une usure uniformément répartie le long de l'arête de coupe. Ce constat a aussi été effectué par P.

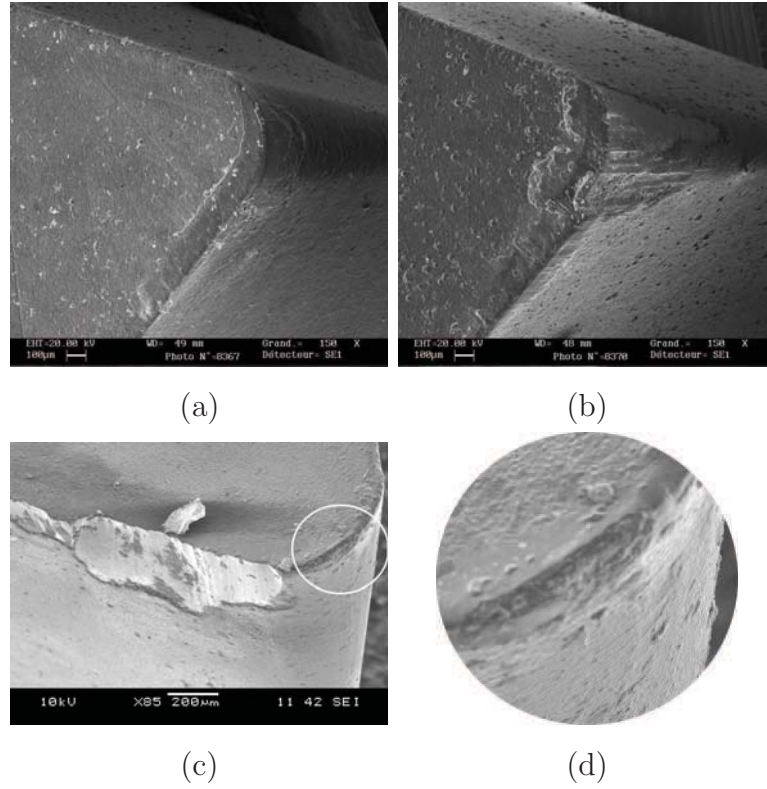


Figure 3.15 – Observation des arêtes de coupe à l'issue des essais d'usure sur le CMM_{15} : C_1 (a), C_3 (b), C_{1810} vue globale (c) et zoom (d).

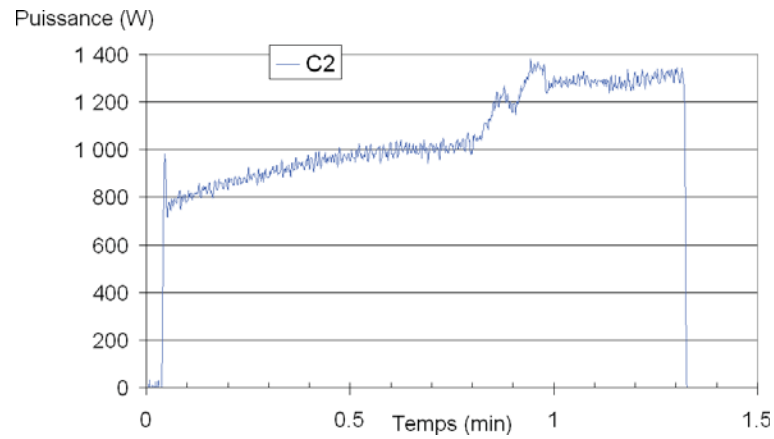


Figure 3.16 – Puissance consommée à la broche lors d'essais de durée de vie sur le CMM_{25} ($V_C = 700 m.min^{-1}$, $f = 0.1 mm.tr^{-1}$, $a_p = 1 mm$).

Davim [35] pour une plage de vitesses de coupe allant de 250 à 700 $m.min^{-1}$.

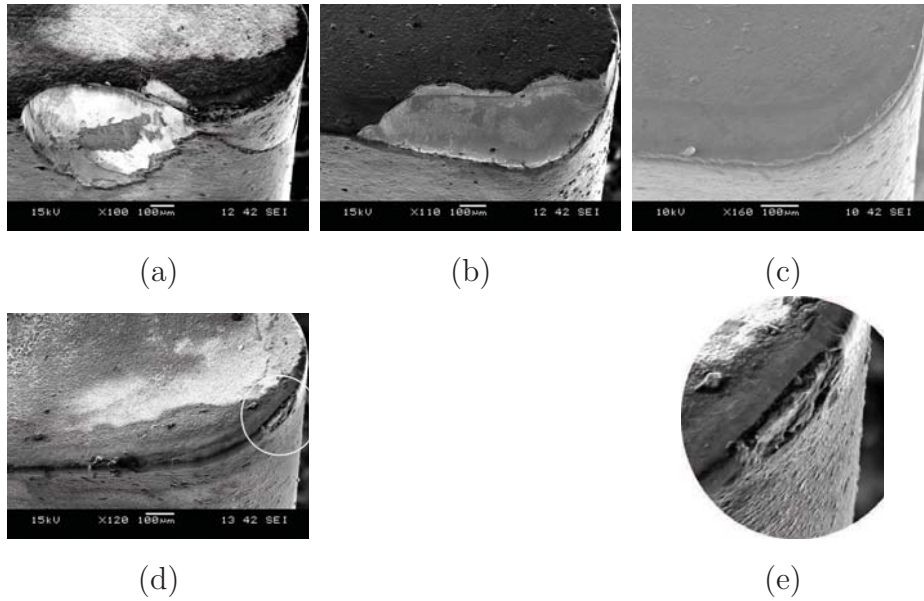


Figure 3.17 – Observation des arêtes de coupe à l'issue des essais d'usure sur le CMM_{25} : C_1 (a), C_2 (b), C_3 (c), C_{1810} vue globale (d) et zoom (e).

3.2.2 Performances tribologiques : usure

Sur la figure 3.20, la zone de frottement du copeau sur la face de coupe apparaît clairement, grâce au contraste entre la couleur du revêtement et celle de la matrice aluminium. La largeur de cette bande de frottement pour le revêtement C_2 présente un fort accroissement sur la dernière image qui correspond à une usure V_B de 0,32 mm. Cette usure abrasive sévère observée sur la face de coupe est associée à une forte adhésion de matériau sur la face en dépouille. Le mécanisme d'usure prédominant semble donc être différent entre les deux faces de l'outil :

- sur la face en dépouille, l'action abrasive des particules de renfort augmente le pouvoir d'adhésion de la matrice sur la face usée. Cela entraîne une augmentation de l'interface avec une restauration continue de couches de matériau adhérent ;
- sur la face de coupe, le comportement est sensiblement similaire à la face en dépouille, si ce n'est que le matériau adhérent est emporté sous l'action d'écoulement du copeau ainsi que des particules abrasives qui nettoient la face de coupe plus efficacement que sur la face en dépouille. Cette action des particules sur la couche adhérente augmente le taux d'usure par l'enlèvement de grains de diamants simultanément au matériau collé. La face de coupe est donc soumise à une usure abrasive et adhésive. Cette analyse rejoint celle d'Andrewes et al. [16].

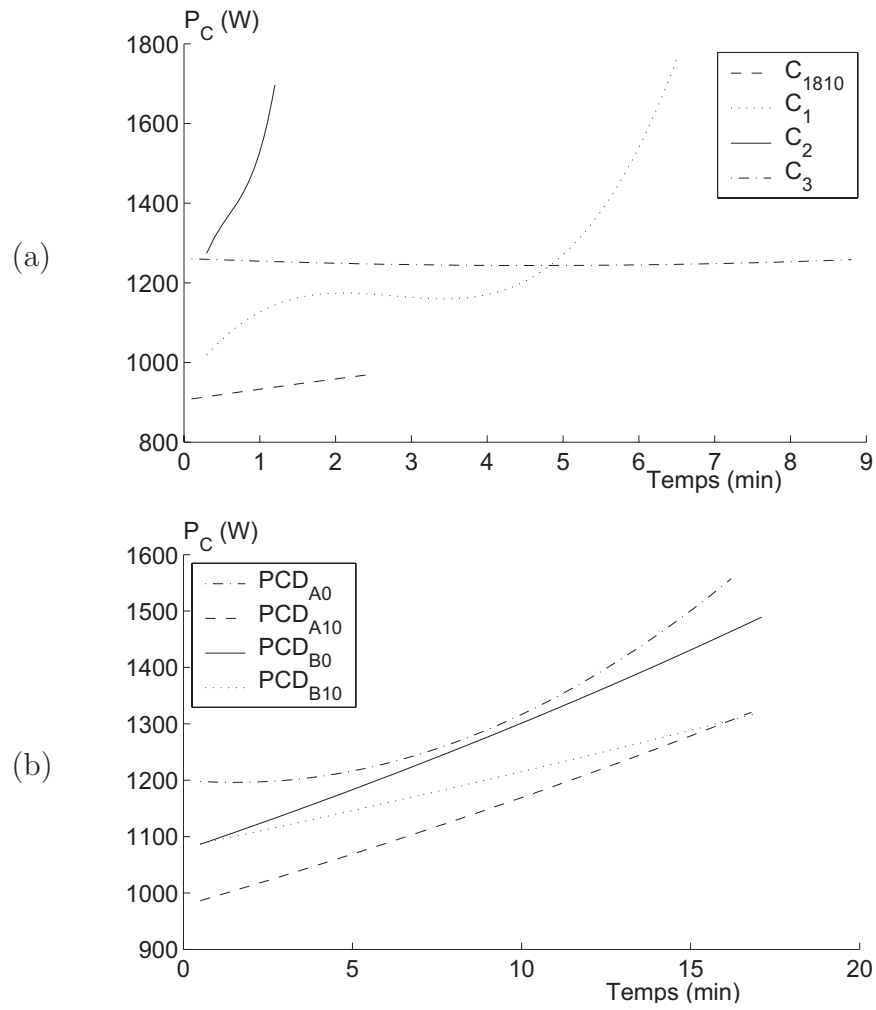


Figure 3.18 – Puissance consommée à la broche lors d’essais de durée de vie sur le CMM_{25} avec les outils CVD (a) et PCD (b)
 $(V_C = 700 m.min^{-1}, f = 0.1 mm.tr^{-1}, a_p = 1 mm)$

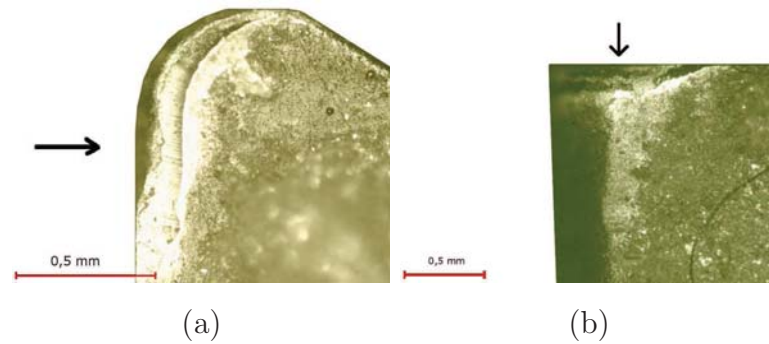


Figure 3.19 – Observations de l’outil C_2 après l’essai de durée de vie sur le CMM_{25} : face de coupe (a), face en dépouille (b).

	CMM_5	CMM_{15}	CMM_{25}
C_{1810}		11 min	2,5 min
		Effondrement d'arête et décollement du revêtement	Décollement du revêtement
C_1		7,75 min	5,9 min
		usure $V_B > 0,2$	usure en entaille et décollement
C_2	9,7 min	1,3 min	0,85 min
	usure $V_B > 0,2$	usure $V_B > 0,2$	Effondrement d'arête et usure
C_3	16,1 min	7,75 min	8,75 min
	Bris d'outil	Bris d'outil	Décollement du revêtement
PCD_{A0}			16,6 min ($V_B = 0,11\text{mm}$)
PCD_{A10}			16,6 min ($V_B = 0,11\text{mm}$)
PCD_{B0}			16,8 min ($V_B = 0,095\text{mm}$)
PCD_{B10}			16,9 min ($V_B = 0,098\text{mm}$)

Tableau 3.2 – Durée de vie pour les outils CVD, temps de coupe pour les outils PCD et mode d'endommagement.

Le critère de quantification d'usure utilisé pour cette étude est l'usure en dépouille V_B et la valeur limite considérée est de 0,2 mm. A l'issue de chaque lopin de CMM usiné, l'outil est donc observé au microscope optique ainsi qu'au microscope interférométrique. La figure 3.22 (a) confirme que la valeur limite V_B choisie pour cette étude a été atteinte. Pour les deux autres revêtements, leur usure n'atteint pas la valeur limite. Toutefois C_3 présentant un bris d'outil, seule la durée de vie de C_1 n'est pas connue pour l'usinage du CMM_5 .

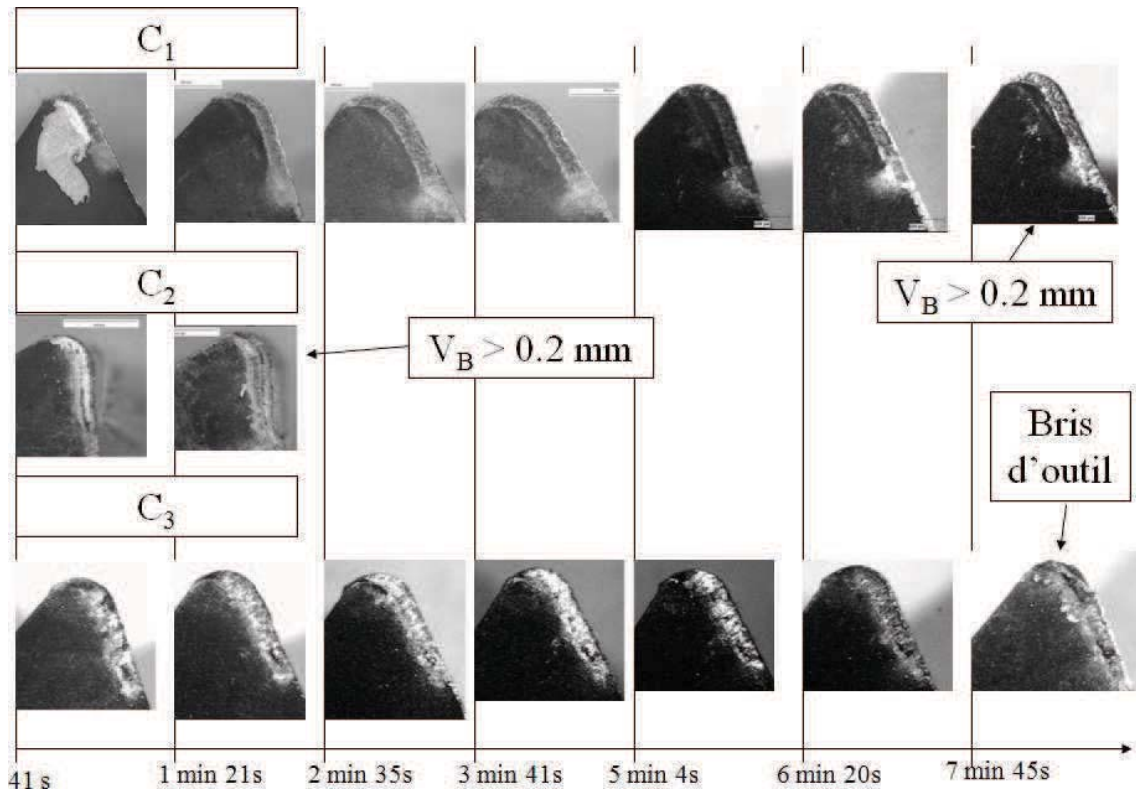


Figure 3.20 – Observation de l'évolution de la face de coupe lors des essais de durée de vie sur le CMM_{15} ($V_C = 700 m.min^{-1}$, $f = 0.1 mm.tr^{-1}$, $a_p = 1 mm$).

3.2.3 Qualité et intégrité de surface

La mesure des rugosités a été effectuée à la fin des essais de durée de vie pour le CMM_5 , et à intervalle régulier pour le CMM_{15} . Les valeurs obtenues sont données à la figure 3.23. Pour les CMM_{15} , les mesures ont été répétées 5 fois, la barre d'erreur représente l'étendue des valeurs obtenues et le marqueur correspond à la valeur moyenne. Les mesures de Ra (figure 3.23 (a)), contrairement à celle de Rt , n'ont qu'une très faible dispersion, si faible que les barres d'erreurs sont masquées par les marqueurs de données. Les mesures de Rt présentent à l'inverse d'importantes variations; cela est dû à la présence de rainures provoquées par la décohésion de particules de carbure de silicium qui sont poussées par l'outil et frottent sur la surface usinée (voir paragraphe 1.1.3). La figure 3.23 montre des valeurs de Ra (a) et de Rt (b) très proches entre les revêtements C_1 et C_3 lors de la coupe du CMM_{15} . Même si les valeurs des rugosités semblent meilleures pour C_1 , la différence est trop faible pour être significative. Pour les essais effectués sur le CMM_5 , les résultats montrent un très mauvais état de surface avec le revêtement C_2 . Ils confirment les impressions visio-tactiles ressenties lors de l'essai (température de surface importante,

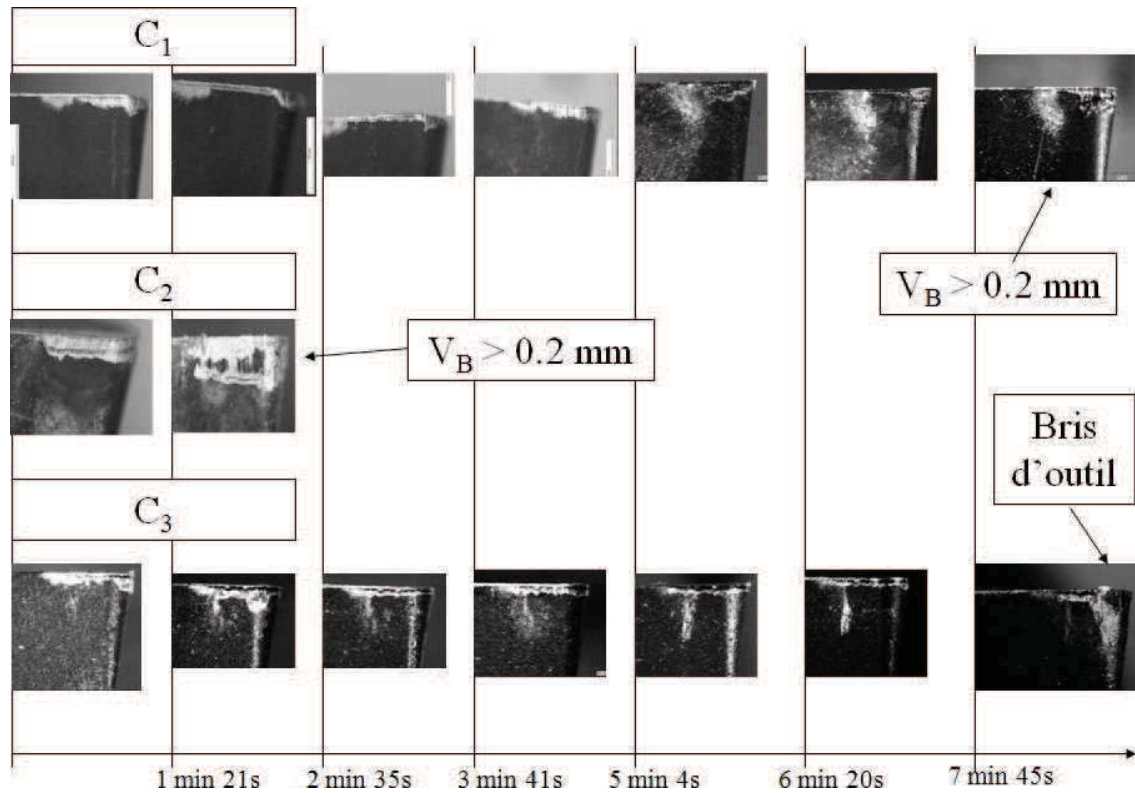


Figure 3.21 – Observation de l'évolution de la face en dépouille lors des essais de durée de vie sur le CMM_{15} ($V_C = 700m.min^{-1}$, $f = 0.1mm.tr^{-1}$, $a_p = 1mm$).

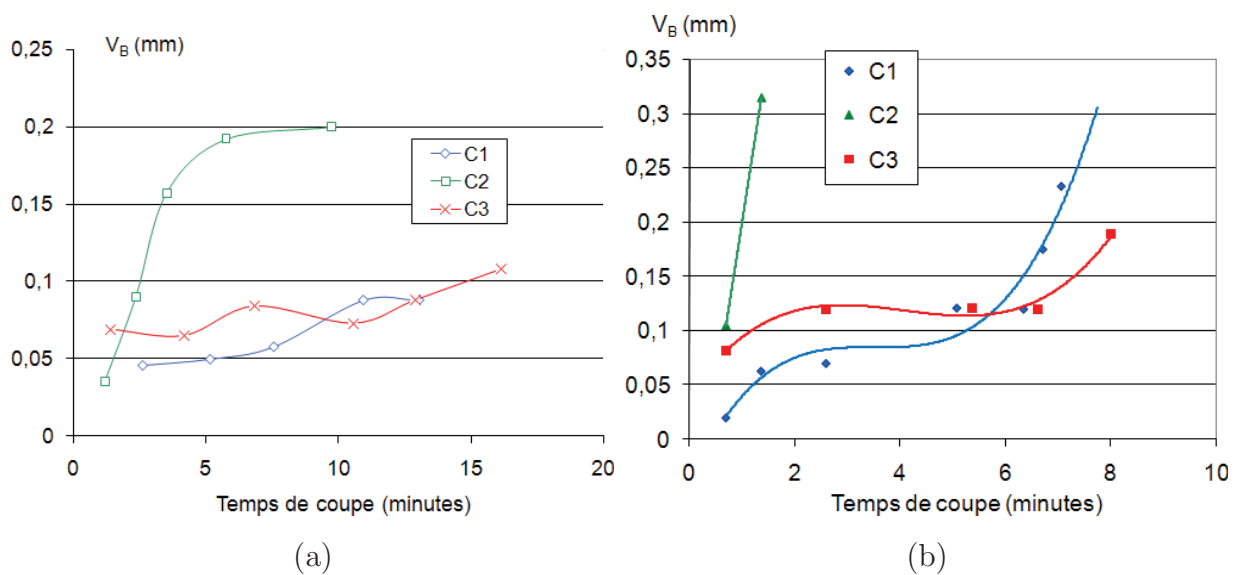


Figure 3.22 – Évolution de l'usure V_B lors des essais de durée de vie sur le CMM_5 (a) et le CMM_{15} (b).

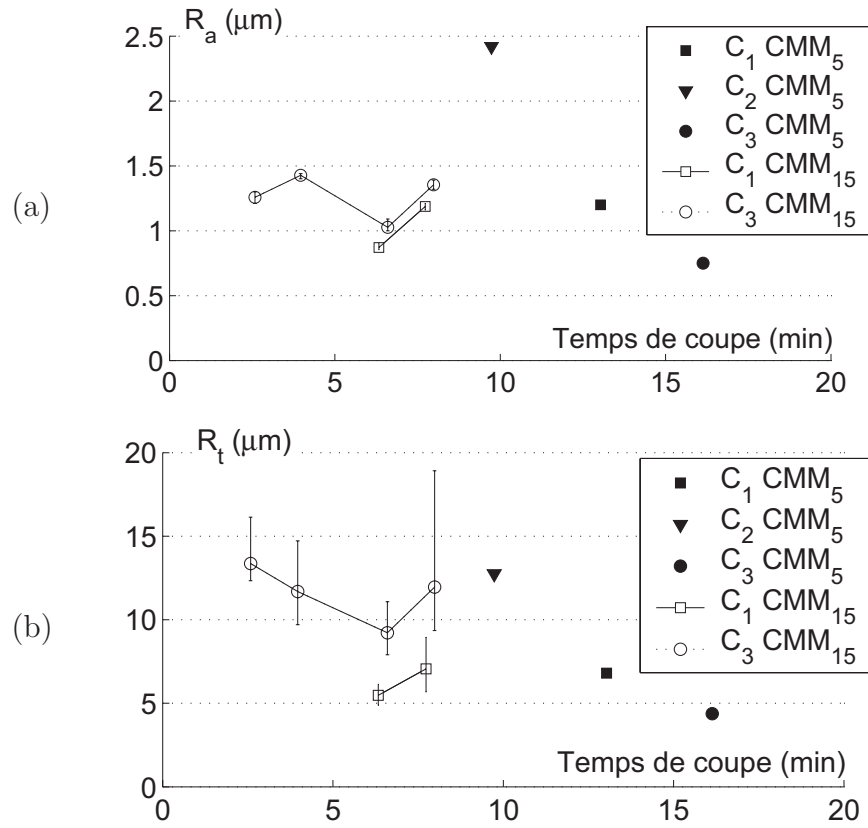


Figure 3.23 – Évolution des rugosités R_a (a) et R_t (b) lors des essais de durée de vie sur le CMM_{15} .

surface usinée rugueuse ...). Mis à part pour les essais avec le revêtement C_1 , les états de surface obtenus à l'issue des essais sur le CMM_5 sont meilleurs qu'avec le CMM_{15} , pour des temps de coupe plus importants. Cela s'explique par plusieurs facteurs :

- l'usure : elle est plus importante à la fin des essais sur le CMM_{15} (figure 3.22). Le revêtement C_2 atteint la valeur limite d'usure définie avec le CMM_5 et la dépasse sur le CMM_{15} , tandis que pour les autres revêtements, seul C_1 atteint cette limite lors de l'usinage sur le CMM_{15} . C_3 a systématiquement présenté un bris d'arête (figures 3.12 (c) et 3.15 (b)), mais pour des valeurs d'usure différentes ;
- la concentration du renfort céramique : lors de la coupe, les particules de renfort en SiC peuvent créer des défauts en surface (décohésion, porosité ...), et dégrader la rugosité de la surface usinée. Il est clair que l'augmentation du taux de renforts au sein de la matrice augmente le nombre de ces défauts et détériore la qualité de la surface.

Le mauvais état de surface consécutif à l'usinage avec l'outil C_2 est illustré par la figure 3.24 (b), où un dépôt de matière est visible sur la surface usinée. Ce dépôt se répète avec un

pas égal à l'avance ($0,1 \text{ mm.tr}^{-1}$).

Ce matériau provient de la face en dépouille ou il y a présence d'une grande quantité de matériau adhérent (figure 3.12 (b)) qui vient froter sur la surface usinée et se déposer sur celle-ci. Ce collage important se produit à la vitesse de coupe de 700 m.min^{-1} . Lors de l'analyse des performances thermiques, l'usinage du CMM_{25} a mis en lumière la présence possible d'un phénomène thermique pour les revêtements de type C_2 (cf. figure 3.8). Ce phénomène a accru l'adhésion dès lors qu'une épaisseur suffisante de matériau a adhééré sur la surface usée de l'outil. Quelques rayures sont visibles sur la figure 3.24 (a), elles

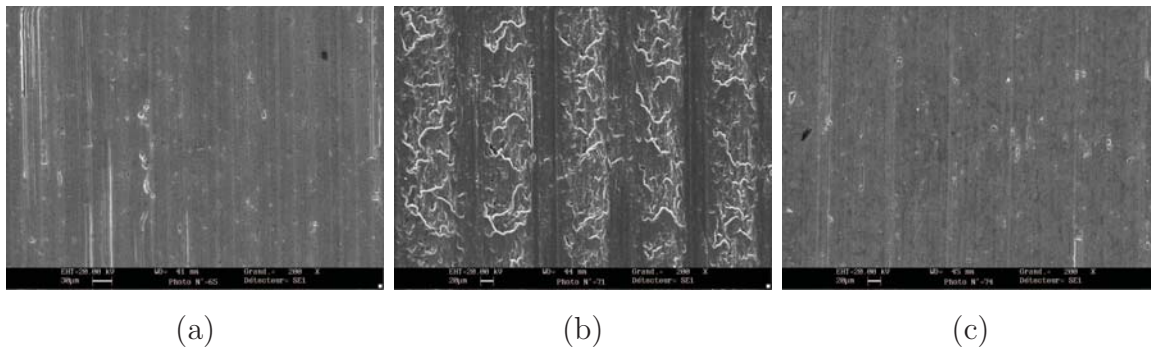


Figure 3.24 – Observation des surfaces usinées à l'issue des essais d'usure sur le CMM_5 : C_1 (a), C_2 (b), C_3 (c).

correspondent aux traces laissées par le déplacement de particules de carbure de silicium. Ces particules ont été extraites lors de la coupe, ou désolidarisées de la matrice et déplacées par l'outil.

Le défaut de surface cyclique présent sur la surface usinée en CMM_{15} avec le revêtement C_3 (figure 3.25 (b)) n'a pas la même provenance. Cette surface a été réalisée à la fin de l'essai, lors de l'apparition du bris de l'outil (figure 3.15 (c)), et correspond donc au passage de la matière par cet interstice.

Ce défaut constaté en surface n'existe pas avec les outils PCD puisque leur usure évolue continuellement sans risque de bris d'arête. La rugosité Ra est mesurée après environ 17 minutes d'usinage, avec une usure V_B de 0,1 mm. Ces valeurs (tableau 3.3) sont équivalentes à celles mesurées pour les outils CVD sur un CMM_p plus faiblement chargé pour un temps de coupe deux fois plus faible. L'angle de coupe positif induit une rugosité de la surface usinée plus importante (de l'ordre de 15%).

Ajoutée à ces critères d'aspects et d'états de surface, l'analyse des contraintes résiduelles est essentielle pour une utilisation des CMM_P en tant que pièce mécanique de sécurité. Les mesures présentées à la figure 3.26 correspondent aux contraintes axiales (a) et tangentielles (b) en fonction du temps de coupe des revêtements C_1 et C_3 , mesurées en

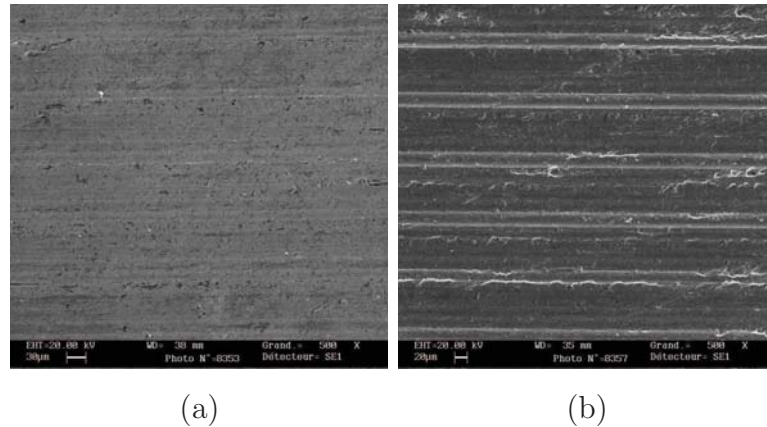


Figure 3.25 – Observation des surfaces usinées à l’issue des essais d’usure sur le CMM_{15} : C_1 (a), C_3 (b).

surface. La mesure des contraintes résiduelles n’a pas été effectuée sur les surfaces usinées par C_2 , étant donné ses performances médiocres en termes de durée de vie et de qualité de surface.

Angle γ	Type de PCD	
	PCD_A	PCD_B
0°	1,19	1,27
10°	1,42	1,44

Tableau 3.3 – Valeurs des rugosités Ra mesurées à l’issue des essais d’usure avec les outils PCD sur le CMM_{25} .

Les valeurs de ces contraintes résiduelles sont voisines. Seule la dernière mesure de contrainte tangentielle générée par le revêtement C_3 présente une différence significative par rapport à C_1 . Après un temps de coupe de près de huit minutes, la contrainte tangentielle est de -45 MPa avec C_1 et de -80 MPa avec C_3 . Toutefois, la surface analysée est celle observée en figure 3.25 (b), il faut donc considérer cette mesure avec précaution. Ces mesures permettent de vérifier que les contraintes résiduelles tangentielles sont des contraintes de compression, qui sont donc générées par la déformation plastique.

3.2.4 Conclusion

Cette campagne d’essais a permis de valider les tendances de performances de coupe observées lors de la campagne d’optimisation des conditions de coupe (paragraphe 2.3) et

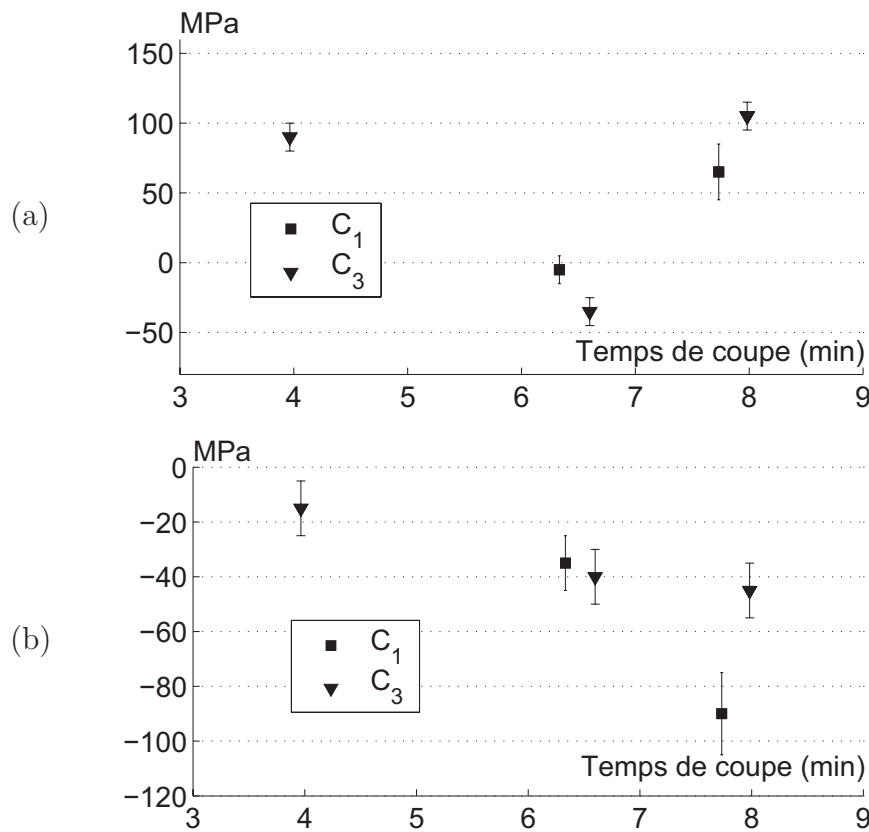


Figure 3.26 – Contraintes résiduelles mesurées sur le CMM_{15} : contrainte axiale (a), contrainte tangentielle (b).

de préciser les modes d'endommagements des différents outils diamants :

- en plus des problèmes de décohésion du revêtement, les différents outils testés ont un comportement qui leur est propre :
- le revêtement C_1 est soumis à une usure par abrasion prédominante. Il ne présente pas de bris d'outil et ne montre pas une usure de type adhésive ;
- le revêtement C_{1810} est moins performant que C_1 avec les CMM_p plus fortement chargés. Malgré une structure assez proche, l'angle de taillant plus faible du C_{1810} entraîne des décollements de revêtement plus rapides au niveau du bec de l'outil ;
- le revêtement C_2 présente les performances les plus médiocres de ces revêtements diamants. Sa durée de vie est 6 fois plus faible que les autres revêtements pour l'usinage du CMM_{15} (figure 3.22) et les états de surfaces sont mauvais. Le fort collage observé sur l'outil (figure 3.12) ainsi que les analyses effectuées au paragraphe 2.3 semblent confirmer l'importance de l'usure adhésive associée à l'usure abrasive pour ce revêtement. La couche du matériau usiné adhère sur la face de l'outil. Celle-ci est ensuite enlevée lors du processus de formation et d'évacuation

du copeau. Ceci s'effectue cycliquement et à chaque transfert de matière, l'effort de collage est tel que des grains de diamants sont extraits en même temps que cette couche adhérente. Ce mécanisme est possible car la surface du revêtement présente une structure favorisant cette forte adhésion ;

- le revêtement C_3 est celui qui résiste le mieux à l'usure abrasive, mais il est le plus sujet aux décohésions de revêtements. La multiplication des interfaces (substrat - 1^{ère} couche - 2^{nde} couche) accroît le nombre de lieux de défaillances probables.
- les outils PCD présentent un comportement homogène. L'usure en dépouille augmente progressivement et la qualité de surface est bonne. Seule la rugosité Ra de la surface usinée croît avec l'angle de coupe γ .

3.3 Performances écologiques : émission de poussières

L'analyse des émissions de poussières lors de la coupe ajoute un critère écologique à la notion d'usinabilité. Le lien entre le processus de coupe et la génération de poussières est étudié en plusieurs étapes :

- caractérisation de l'aérosol :
 - répartition par taille des particules ;
 - évolution de cette répartition au fur et à mesure de la coupe.
- quantification du temps d'exposition au risque ;
- observation des lieux de génération de poussières.

3.3.1 Performances comparées en terme de génération de poussières

Pour chacun des revêtements étudiés, des essais ont été effectués dans les conditions suivantes :

- Vitesse de coupe de 700 m.min^{-1} ;
- Avance de $0,1 \text{ mm.tr}^{-1}$;
- Profondeur de passe constante de 1 mm pour C_1 et C_2 et de 0,2 mm pour C_3 .

3.3.1.1 Répartition des particules par tailles

La figure 3.27 présente la répartition des particules émises lors de la coupe avec les différents revêtements d'outils. Les graphiques (a) et (b) ont été réalisés avec les mêmes échelles afin de faciliter la comparaison, contrairement au graphique (c) dont les concentrations massiques sont nettement supérieures. Sur cette figure sont tracées trois courbes qui sont toutes positionnées par rapport au pic de concentration massique :

- concentration massique 1 minute avant le pic ;
- concentration massique au moment du pic ;
- concentration massique 1 minute après le pic.

L'allure de la courbe de concentration massique a été donnée à la figure 2.17 où le pic correspond à une concentration d'environ $300 \mu\text{g}.m^{-3}$.

Les aérosols analysés par le spectromètre Grimm contiennent beaucoup de particules fines (inférieures à $1 \mu\text{m}$) et cette répartition par taille n'évolue pas en proportion au cours de l'usinage, mais uniquement en quantité. Pour des conditions de coupe identiques, le revêtement C_2 génère environ 50% de poussières supplémentaires. Quant à la figure 3.27 (c), elle montre des concentrations instantanées 3 à 4 fois supérieures à celles de (a) et (b). Cette importante augmentation peut provenir des deux paramètres qui ont été modifiés :

- le revêtement (usinage avec C_3) ;
- la profondeur de passe (de 1 mm à 0,2 mm).

Les figures 3.27 (a) et (b) font aussi état de la présence de fines particules de diamètre aérodynamique compris entre 2 et $3 \mu\text{m}$. Ces particules pourraient être des grains de diamants détachés ou des particules de renfort broyées.

La métrologie des aérosols fait référence aux "PM" (les PM1 : particules de diamètre aérodynamique inférieure à $1 \mu\text{m}$, les PM2,5 : particules de diamètre aérodynamique inférieure à $2,5 \mu\text{m}$...), ainsi que certains articles cités précédemment [30–32, 34]. Le tableau 3.4 indique les proportions des particules générées par la coupe du CMM_{25} pour les trois revêtements étudiés. En bonne corrélation avec les courbes de la figure 3.27, les particules de faibles dimensions sont très nombreuses. Mais l'intérêt de ce tableau est de quantifier ces particules par rapport à l'émission totale de poussière. La présence de particules de plus de $3 \mu\text{m}$ pour C_1 réduit la proportion de particules très petites, qui n'en reste pas moins très élevée.

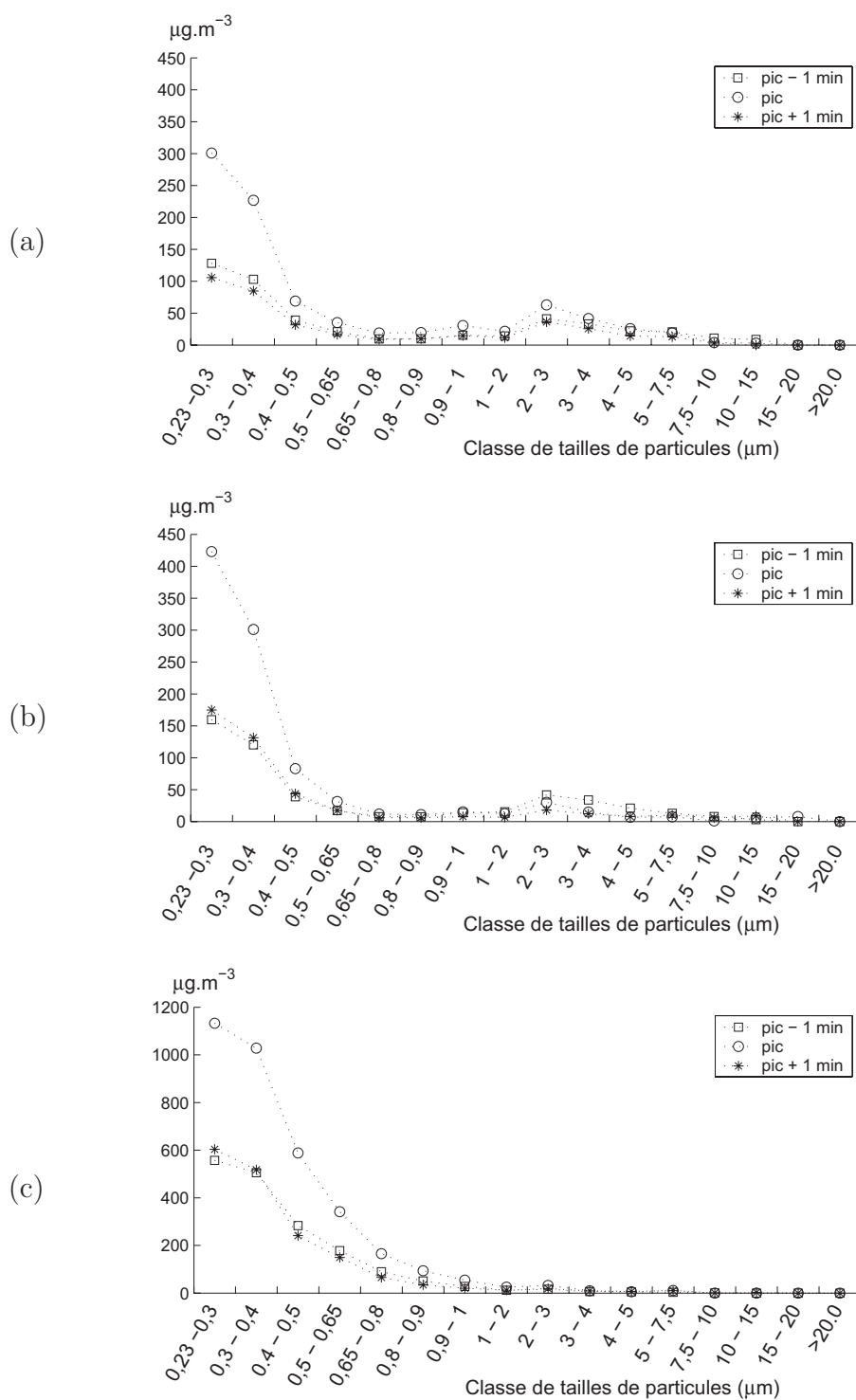


Figure 3.27 – Répartition par taille des particules émises en cours d’usinage, pour les revêtements C_1 (a), C_2 (b) et C_3 (c).

3.3.1.2 Durée d’exposition au risque

La taille des particules, qui est une des premières composantes du risque sanitaire, a été définie au paragraphe précédent (paragraphe 3.3.1.1). Un autre paramètre à connaître

Revêtement	Particules $< 1\mu\text{m}$	Particules $< 3\mu\text{m}$
C_1	70,9 %	82,8 %
C_2	81,3 %	88,7 %
C_3	93,9 %	96,4%

Tableau 3.4 – Proportion de particules inférieures respectivement à 1 et à $3\mu\text{m}$.

est la durée pendant laquelle l'espace de travail est "contaminé".

La figure 3.28 représente sur un même graphique :

- la puissance consommée à la broche ;
- la concentration de particules de diamètre aérodynamique inférieur à $3\mu\text{m}$.

La superposition de ces deux courbes permet d'appréhender la différence entre temps d'usinage (qui correspond à la courbe de puissance), et le temps d'attente nécessaire pour retrouver une qualité de l'air similaire à celle antérieure à l'usinage. L'irrégularité de la courbe de concentration de particules (figure 3.28 (b)) est à rapprocher des analyses effectuées au paragraphe 3.16. Le bris d'outil observé sur l'outil C_2 a une incidence sur la coupe mais aussi sur la production d'aérosol. La courbe de puissance rend compte d'un incident de coupe par un accroissement brutal et important, tandis que la courbe de concentration est aussi affectée par ce bris d'outil par une irrégularité sur la courbe qui apparaît avec un décalage par rapport à la courbe de puissance. Le tableau 3.5 indique les durées d'usinage ainsi que le temps nécessaire pour retrouver le niveau de pollution initial. La comparaison entre le temps d'usinage et la durée pendant laquelle l'air est pollué (tableau 3.5) permet de constater que les temps sont identiques pour tous les revêtements alors que la quantité de particules émises est presque 3 fois plus importante pour C_3 (figure 3.28), qui correspond à l'essai ayant la plus forte émission de particules.

L'environnement de mesure étant confiné (intérieur du tour à commande numérique), les particules ne sont pas soumises à des flux d'air extérieur. Leur faible dimension les rendant très sensible à ces flux (tableau 1.2), et le carter de la machine bloquant ceux-ci, la quantité de particules n'a pas d'influence sur la déposition de l'aérosol.

3.3.1.3 Analyse des copeaux et calcul du Dust Unit (D_U)

Les courbes de pollution présentées figure 3.28 indique une plus grande concentration de particules pour C_2 que pour C_1 , dans des conditions de coupe identiques. Afin de pouvoir mieux comparer ces émissions de poussières, l'utilisation de l'indicateur D_U semble

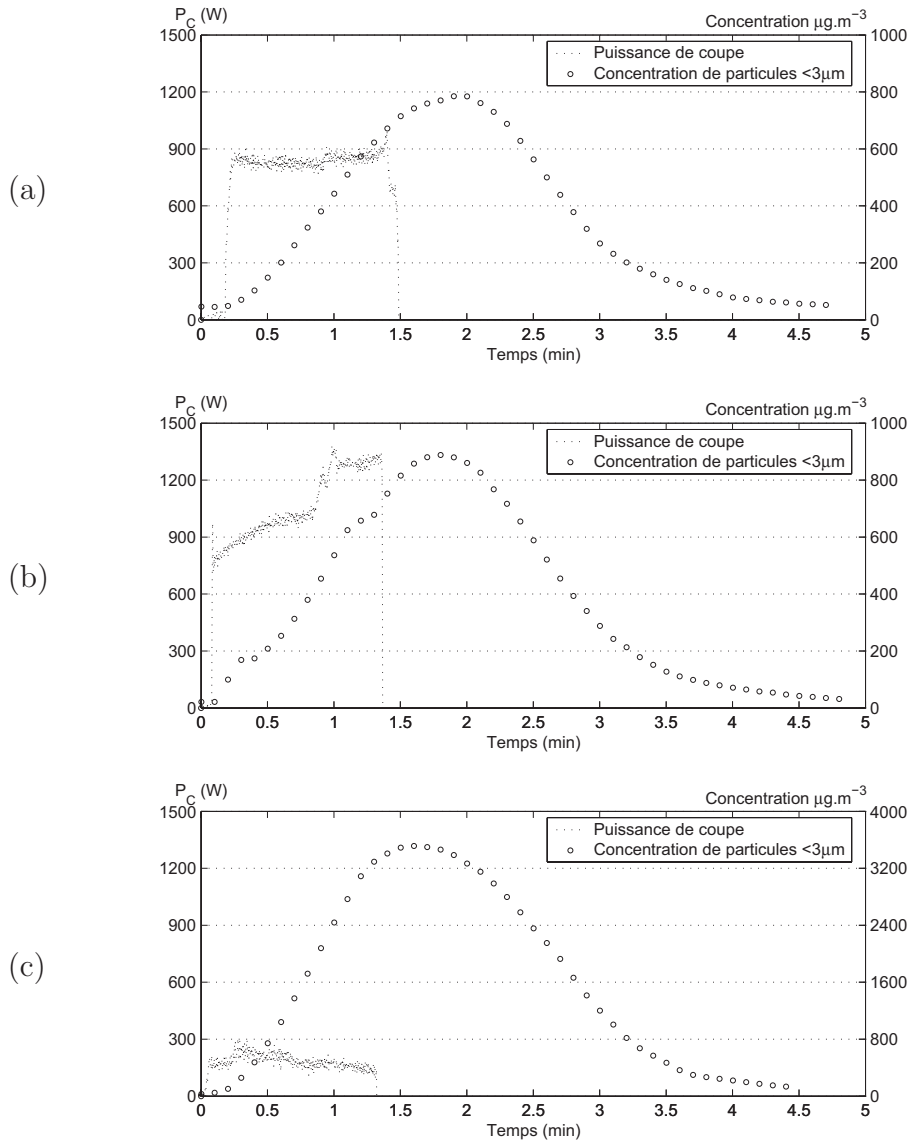


Figure 3.28 – Concentration de particules inférieures à $3\mu\text{m}$ et puissance consommée à la broche, pour les revêtements C_1 (a), C_2 (b) et C_3 (c) .

nécessaire. Sur la figure 3.29, seules les valeurs relatives aux essais des revêtements C_1 et C_2 sont représentées, car l'essai avec C_3 s'est déroulé dans des conditions de coupe différentes et la valeur du D_U de C_3 est trop importante ($D_U = 97 \times 10^{-5}$). La limitation de la taille des particules à $3\mu\text{m}$ dans le calcul du D_U a pour objectif de se rapprocher de critères classiques en mesure d'aérosol (PM2,5). De plus la répartition observée sur la figure 3.27 montre l'importance des particules de faibles dimensions.

Un écart significatif de plus de 20% est visible sur la figure 3.29. Afin de comprendre les raisons de cet écart, il est nécessaire d'aller observer les zones de production de poussières

Revêtement	Temps d'usinage (min)	Durée de pollution de l'air (min)
C_1	1,3	4,5
C_2	1,2	4,7
C_3	1,2	4,8

Tableau 3.5 – Comparaison entre temps de coupe et temps de présence de particules dans l'air (CMM_{25})

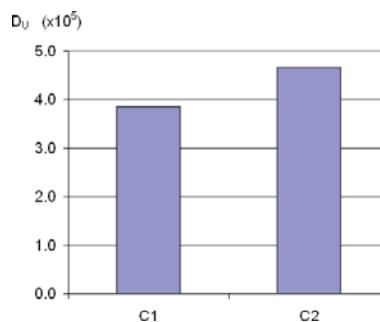


Figure 3.29 – Calcul du Dust Unit lors de l'usinage du CMM_{25} , pour des particules $< 3\mu m$.

décrites précédemment (figure 1.15, ainsi que l'étude de Ballout et al. [32]). Pour ce faire, il faut donc observer la surface du copeau correspondant au cisaillement. En effet lors de la formation du copeau, la surface B (repérée sur la figure 3.30) qui se situe initialement dans la zone d'intense déformation, va se détacher sous l'action du cisaillement [44]. L'observation de cette surface permet d'obtenir des informations sur un des lieux majeurs de génération de poussières, qu'est le plan de cisaillement. La figure 3.31 montre des

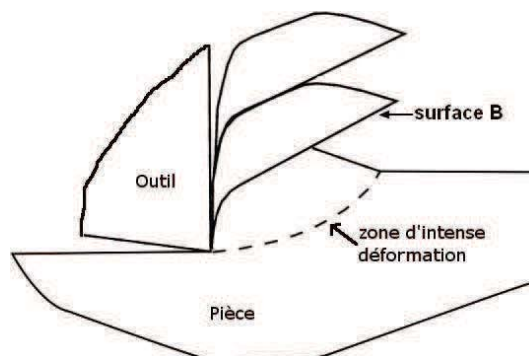


Figure 3.30 – Morphologie du copeau festonné et surface observée.

micrographies des surfaces "B" usinées par les différents revêtements réalisées au microscope électronique à balayage. Les images avec un grossissement de $\times 600$ permettent de visualiser le profil de la surface "B", tandis que celles au plus fort grossissement ($\times 2000$) montrent la surface "B" de face.

Cette surface est quasiment plane pour le revêtement C_1 , alors qu'elle est ondulée pour C_2 . Ces ondulations sont observables tant sur la vue de profil que sur la vue de face. L'explication du processus de génération d'aérosol a été développée au paragraphe 1.3.4, et le phénomène de friction en est le moteur énergétique principal. Les frottements au niveau des plans de cisaillement génère donc un grand nombre de poussières, ce qui explique qu'une augmentation de la densité des plans de cisaillement accroît la quantité de particules en suspensions [32]. En ce qui concerne le CMM_{25} , la densité de plan de cisaillement est identique quelque soit le revêtement, seule la forme du "plan" change. Les ondulations observées sur les figures 3.31 (b) et (c) conduisent à une augmentation des surfaces frottantes lors de la coupe, ce qui va générer plus de frottements et de poussières. Ces ondulations ont été observées à moyenne et grande vitesses de coupe (400

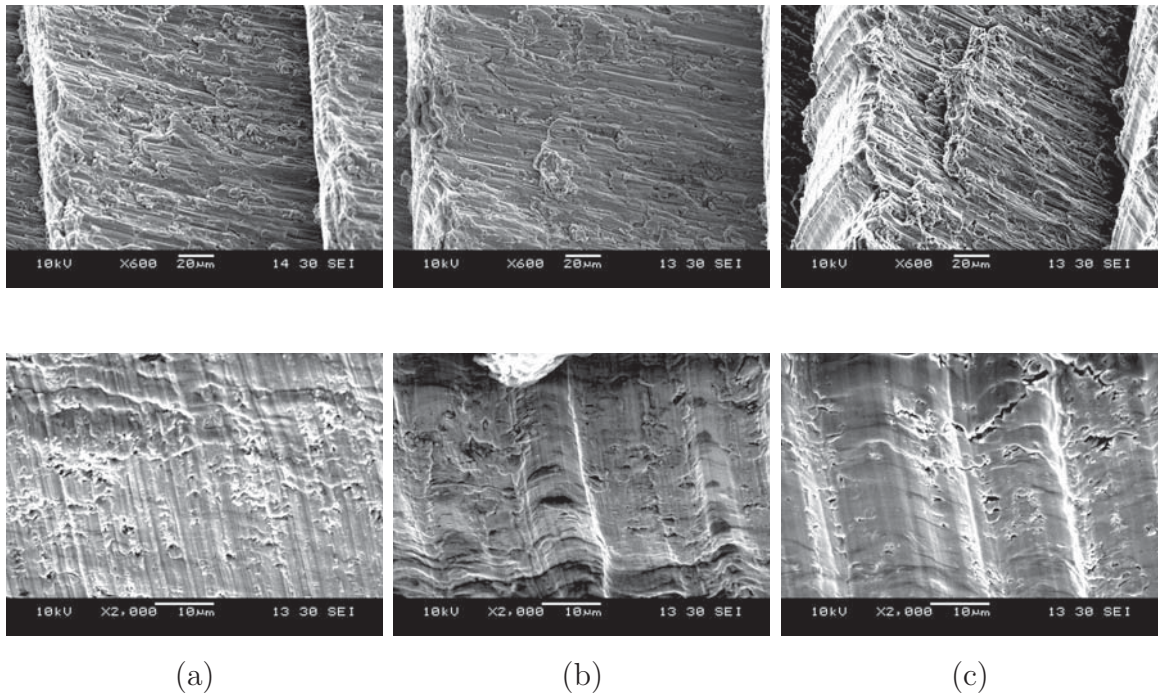


Figure 3.31 – Observation des copeaux et morphologie des plans de cisaillement : C_1 (a), C_2 (b), C_3 (c).

et 700 m.min^{-1}). Ceci signifie que la morphologie du revêtement de l'outil est aussi un paramètre de génération de poussière. Ces ondulations expliquent la différence de production de poussières entre C_1 et C_2 (figures 3.29 et 3.28) et laissent à penser que dans des

conditions de coupe identiques le revêtement C_3 doit générer beaucoup de poussières.

3.3.2 Conclusion

L'objectif de cette partie consistait à qualifier les performances des revêtements diamants dans la production de poussières lors de la coupe des CMM_P . Plusieurs informations importantes ont put être recueillies lors de l'analyse de ces essais. Elles sont de plusieurs ordres :

1. Connaître les caractéristiques des aérosols afin de pouvoir protéger les opérateurs. La répartition par taille des particules composant l'aérosol est stable et indépendante des revêtements. Seule la proportion des fines particules (inférieures à $1\mu\text{m}$) varie selon le revêtement utilisé, mais ces particules constituent la plus grande part de l'aérosol (de 70% pour C_1 à 94% pour C_3). Le temps de présence de ces particules dans l'environnement de travail correspond à 3 fois le temps d'usinage. Toutefois, les essais ayant toujours eu la même durée, il est nécessaire de savoir si ce temps est proportionnel au temps d'usinage, ou si il est constant. Le temps d'exposition au risque est donc connu, ainsi que la métrologie des particules, il est donc possible de mettre en place des équipements de filtration. Le spectromètre d'aérosol ne mesurant que les particules supérieurs à $0,23\mu\text{m}$, et étant donné la répartition des particules, il semble judicieux de mesurer la quantité de nano-particules présentent dans l'air ;
2. Permettre de réduire la production d'aérosol. L'observation des copeaux a permis de constater une incidence des structures des revêtements sur les morphologies des plans de cisaillement, et donc sur la quantité de particules émises.

3.4 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre permettent d'affirmer que le matériau constituant l'outil ne suffit pas à le caractériser, mais uniquement à lui conférer un potentiel pour la coupe. La structure de ce matériau est très importante et permet d'utiliser ou non ce potentiel afin d'avoir à disposition les outils appropriés.

L'impact de cette structure a été observé à plusieurs niveaux :

1. Comportement lors de la coupe. Les outils PCD présentent une face de coupe polie, et le caractère massif de l'insert diamant donne à ces outils une stabilité comportementale. Les outils CVD présentent des structures plus contrastées qui facilitent

dans certains cas le e pouvoir d'adhésion de la matrice aluminium :

- la topographie de la surface de l'outil est fortement accidentée et est propice à un collage mécanique (revêtement C_1) ;
- le profil de type C_2 présente une amplification du phénomène thermique pour certaines vitesses de coupe.

Les particules de renforts ayant un pouvoir abrasif élevé, tous les revêtements sont soumis à l'usure abrasive, mais certains subissent en plus une usure adhésive ;

2. Performances temporelles. Chaque outil n'étant pas soumis aux mêmes types d'usures, les durées de vie s'en ressentent. Cet écart de performance peut aller d'un rapport de 1 à 6, avec des modes d'endommagements différents :
 - usure en dépouille V_B (valeur limite atteinte pour certains CVD) ;
 - décollement du revêtement ;
 - effondrement de l'arête de coupe.
3. Caractéristiques des aérosols générés. La morphologie des plans de cisaillement est directement impactée par la structure du revêtement et donc sur la quantité de particules émises. La métrologie de ces aérosols diffère aussi, la forte présence de très fines particules doit être propre au matériau usiné, mais la proportion de celles-ci dépend de la structure du matériau d'outil.

Chapitre 4

Émission de poussières

Les législateurs français et européens portent une attention croissante à la sécurité des employés sur leur lieu de travail. Pour la qualification de l'émissivité de poussière lors de l'usinage des CMM_p , l'attention se porte sur :

- la composition du matériau. Plusieurs niveaux de renforts, ainsi que la modification de la structure par traitement thermique constituent les variables matériau de cette étude ;
- la géométrie et la structure de l'outil de coupe.

Tous les essais de cette partie sont réalisés à partir des conditions de coupe définies lors des campagnes des chapitres précédents. Ces paramètres sont les suivants :

- la vitesse de coupe $Vc = 700m.min^{-1}$;
- l'avance $f = 0,1mm.tr^{-1}$;
- la profondeur de passe $a_p = 1mm$.

4.1 Influence du traitement thermique

Parmi les différents matériaux utilisés au cours des essais, un CMM_p chargé à 25% de SiC est décliné de deux façons :

- avec traitement thermique de type T4 (cf. figure 2.1) ;
- sans traitement thermique.

La modification des caractéristiques mécaniques par le traitement thermique correspond à un objectif fonctionnel de la pièce mécanique, mais son incidence sur l'émission de poussière n'est pas connue.

4.1.1 Évolution du Dust Unit (D_U)

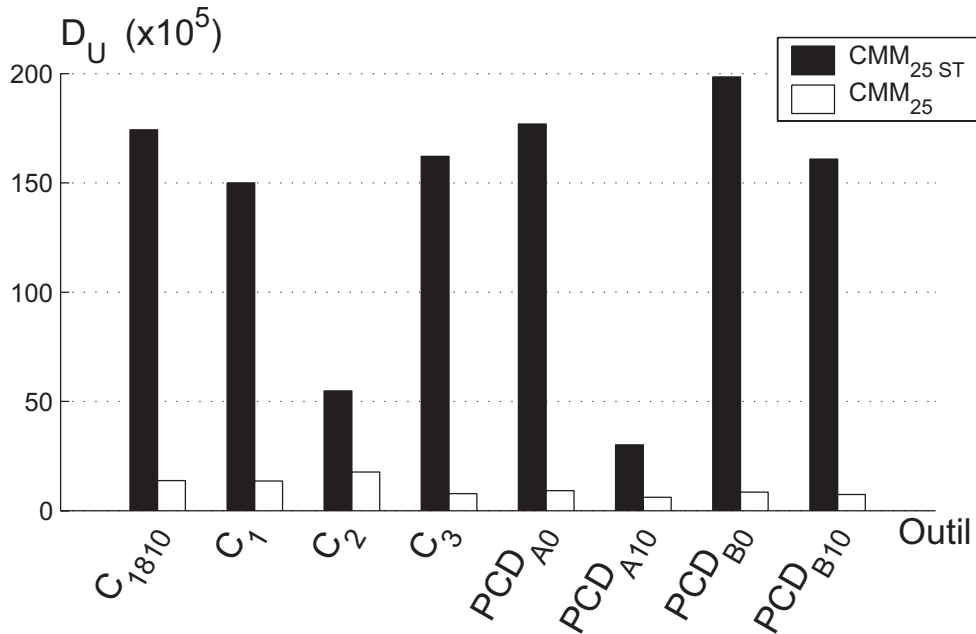


Figure 4.1 – Dust Unit (D_U) pour le CMM_{25} avec et sans traitement thermique T4.

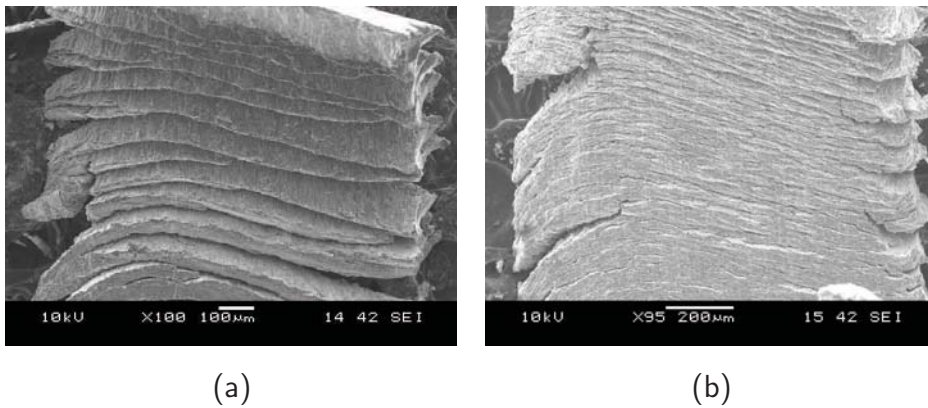


Figure 4.2 – Observation des copeaux obtenus lors de la coupe du CMM_{25} (a) et du CMM_{25ST} (b) par l'outil C_1 .

Ces deux matériaux d'essais ont pour matrice un alliage d'aluminium 2009. Le principe du traitement thermique T4 est le durcissement par précipitation [45, 46]. Il est composé de plusieurs étapes :

- la phase de mise en solution consiste à obtenir une solution solide composée des éléments d'alliage tels que le cuivre et le magnésium lors d'un chauffage à température élevée ;

- la phase de trempe permet l’obtention d’une solution solide sursaturée, en évitant la décomposition de la solution solide obtenue à la phase précédente en précipités grossiers ;
- la maturation réalise le durcissement structural. La solution solide sursaturée se trouve à l’état métastable et se décompose sous forme de précipités afin de retrouver l’équilibre. Ces précipités sont des amas d’atomes de soluté appelés zones de Guinier-Preston (zones GP) [45]. Ces zones GP sont situées aux nœuds de la matrice aluminium et s’opposent au cheminement des dislocations au travers du matériau [45, 46].

L’incidence de ce durcissement structural sur l’émission de poussière est considérable. La figure 4.1 montre une multiplication de l’indice D_U allant d’un facteur 3 à un facteur 23 (respectivement pour l’outil C_2 et l’outil PCD_{B0}). La morphologie typique des copeaux obtenus est présentée en figure 4.2. La forme festonnée du copeau sur le CMM_{25} s’explique par l’action des zones GP qui limite le phénomène de cisaillement. Celui-ci se produit de façon discontinue et génère un copeau festonné. La coupe du CMM_{25ST} conduit à l’obtention d’un copeau quasi-continu, les dislocations étant libres de se propager au sein de la matrice aluminium. Ce constat a aussi été effectué par Schulz et al. [47] lors de l’usinage à grande vitesse d’un alliage d’aluminium (7075 : Al Zn Mg Cu 1.5) ayant subi différents traitements thermiques. La formation du copeau lors de la coupe du CMM_{25ST} s’effectue donc selon un mode de rupture ductile qui génère plus de poussière [31] de par l’augmentation des zones de friction.

Au delà du niveau de poussière, il convient de se préoccuper aussi de la morphologie de l’aérosol.

4.1.2 Répartition par tailles de particules

La connaissance de la granulométrie de l’aérosol permet de pouvoir se prémunir de celui-ci par le choix d’équipements de protection adaptés. La diminution importante de poussière générée lors de la coupe grâce au durcissement structural du traitement T4 implique de comparer la taille des particules de façon relative en calculant la proportion de chaque classe de particules par rapport à l’ensemble du prélèvement. Ces proportions sont calculées à partir de la quantité totale de poussière émise pour chaque classe de mesure ($\sum C_i$).

La figure 4.3 montre des différences majeures au niveau des répartitions :

- plus de 70% de la masse de poussière générée lors de la coupe du CMM_{25ST} possède

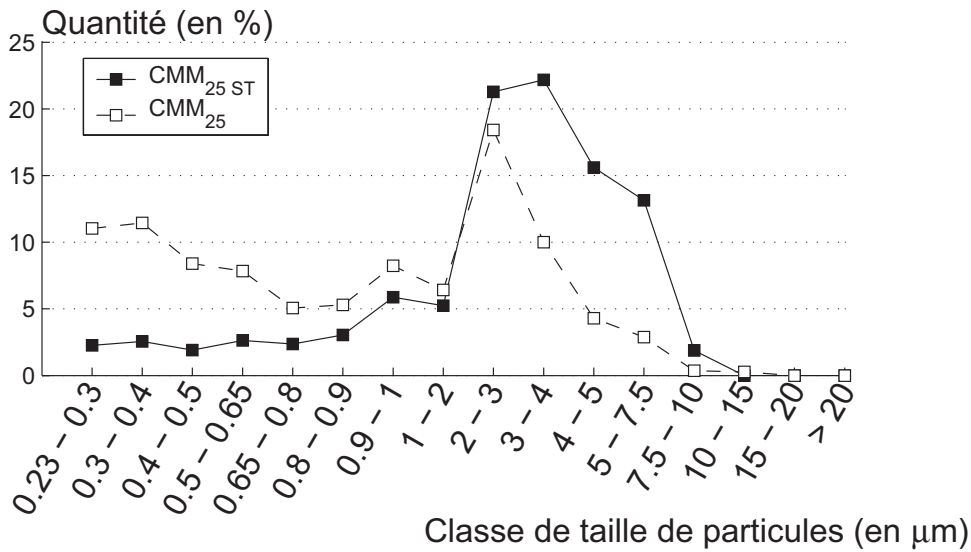


Figure 4.3 – Répartition par taille des particules émises lors de l'usinage du CMM_{25} et du CMM_{25ST} par l'outil PCD_{B10}

un diamètre aérodynamique compris entre 1 et $7,5\mu\text{m}$;

- 57% de la masse de poussière générée lors de la coupe du CMM_{25} présente un diamètre aérodynamique inférieur à $1\mu\text{m}$;
- la proportion des particules inférieures à $1\mu\text{m}$ est plus importante avec le matériau traité (57% contre 20% pour le CMM_{25ST}), mais ces particules sont deux fois plus nombreuses avec le matériau non traité.

Ce constat est semblable pour les autres outils utilisés dans cette étude. Cette présence de particules de plus de $1\mu\text{m}$ a été constatée au chapitre précédent (figure 3.27) mais dans des proportions moindres en quantité et en taille. La taille de ces poussières est du même ordre de grandeur que les particules de SiC présentes dans le matériau (voir figure 2.2). Le processus d'extraction de ces particules de la matrice aluminium semble étroitement lié au cheminement des dislocations.

La plus grande densité de plans de cisaillement constatée lors de la coupe du CMM_{25ST} , implique qu'une particule de SiC a une plus forte probabilité de se situer sur le trajet de dislocations. Ces dislocations contournent la particule de SiC, et en fonction de leur positionnement par rapport à la particule, sa cohésion avec la matrice peut être compromise jusqu'à extraction. La particule devient donc une composante de l'aérosol. Ce phénomène est aussi présent avec le CMM_{25} , mais de façon réduite étant donné l'action des zones GP sur le cisaillement. Ceci explique la présence de particules de 2 à $7,5\mu\text{m}$ de diamètre,

qui représentent un tiers de la masse de l'aérosol.

4.1.3 Conclusion

Le durcissement structural de l'alliage de la matrice s'effectue par l'apparition de zones de Guinier-Preston qui limitent la propagation des dislocations. Cela a pour effet de générer un copeau festonné par réduction de la densité des plans de cisaillement. L'émission de poussière est modifiée

- en quantité, grâce à la réduction en nombre des zones de friction génératrices de poussière ;
- en granulométrie. Moins de particules sont extraites, il y a donc une plus grande proportion de particules de moins de $1\mu\text{m}$.

4.2 Influence du taux de renfort

Au cours de cette campagne d'essais, le taux de renfort varie de 0 à 35%. La présence de particules de carbure de silicium facilite la fragmentation du copeau par propagation de fissure d'un site particulaire à l'autre. Le corollaire de ce mode de fragmentation est que lors de la coupe du CMM_0 , la fragmentation du copeau ne s'effectue pas aussi spontanément et les copeaux sont continus. A proximité des mors en rotation, le copeau long et enchevêtré peut s'enrouler et générer une grande quantité de poussière en venant frapper la vitre du tour. Cet incident ne permet donc pas de prendre en compte la mesure. Dans le cas d'outils à angle de coupe nul ($\gamma=0^\circ$), la face de coupe se comporte comme un brise copeau et limite la formation de copeaux longs. Cet effet sur le copeau réduit les risques d'enroulement et permet une mesure correcte de l'émission de poussière liée à l'usinage.

4.2.1 Répartition par tailles de particules

Comme au paragraphe 4.1.2, l'analyse de l'évolution de la morphologie de l'aérosol s'effectue à partir de la quantité relative de chaque classe de particule.

Les aérosols générés présentent certaines caractéristiques communes :

- une faible présence de grosses particules ($>7,5\mu\text{m}$) ;
- une courbe de taille de particules à deux bosses. Elles correspondent aux fortes densités d'émissions, mais leur niveau varie en fonction du niveau de renforts et des outils de coupe.

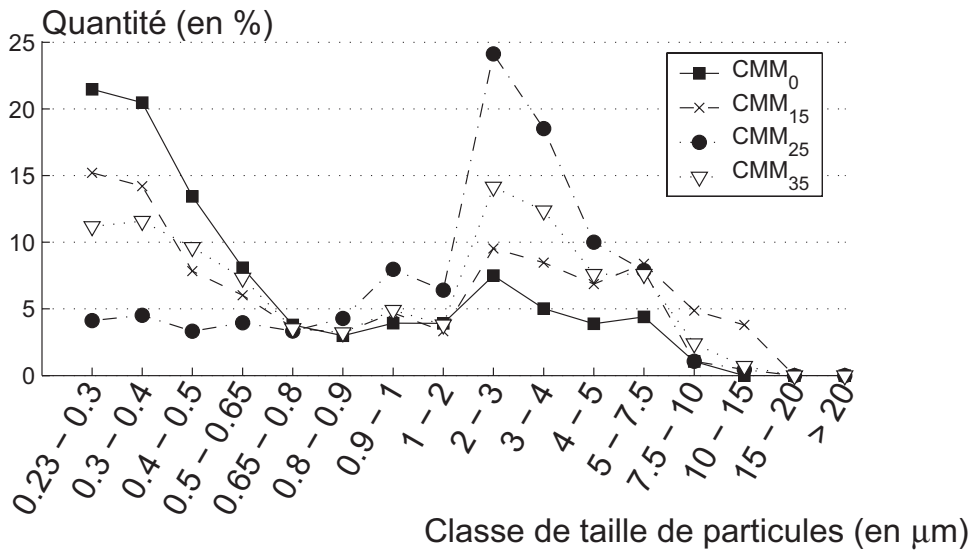


Figure 4.4 – Répartition par taille des particules émises lors de l'usinage des CMM_p par l'outil C_1

4.2.1.1 Répartition pour les outils CVD

L'allure de l'évolution d'émission décrite précédemment est représentée en figure 4.4. Ces courbes sont représentatives de celles obtenues avec les outils CVD pour les différents taux de renforts. Les deux groupes de particules principalement présent dans l'aérosol sont les petites particules (groupe 1 : diamètre compris entre 0,23 et 0,65 µm) et les particules comprises entre 1 et 4 µm (groupe 2)). La majeure partie des particules se répartie au sein de ces deux groupes, mais les proportions varient avec le taux de renforts du matériau usiné. La figure 4.4 montre plusieurs constats :

1. l'augmentation du chargement en SiC_p conduit à une plus forte proportion de particules de quelques microns, et par conséquent à la diminution des petites particules ;
2. le CMM_{35} n'obéit pas à la règle précédente, la morphologie de l'aérosol est équivalente à celle d'un CMM_p faiblement chargé (entre 15 et 25%).

En ce qui concerne le CMM_{35} , l'explication réside dans la nature du matériau. Le CMM_{35} est le seul CMM de cette étude à avoir une matrice en alliage d'aluminium 2124. Tous les autres CMM (CMM_5 , CMM_{15} , CMM_{25} , CMM_{25ST}) ont une matrice en aluminium 2009 (tableau 2.1). L'alliage 2124 est aussi un alliage à base aluminium / cuivre, mais la quantité de cuivre est plus importante, tout comme la quantité de magnésium et de manganèse (tableau 4.1). Le CMM_{35} a subi également le traitement thermique T4 que les autres CMM . Néanmoins la quantité d'éléments d'alliage qui se transforme en solution

solide est plus importante et produit ainsi des zones de Guinier-Preston plus nombreuses. La modification des performances en terme d'émission de poussière est identique à celle étudiée paragraphe 4.1, mais celle ci est tenue car les différences sont plus faibles.

Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Si	Ti	autre	Al
3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,3	0,25	0,2	0,15	0,15	reste

Tableau 4.1 – Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2124 (en % massique)

Les observations effectuées au paragraphe 4.1.2 entre le CMM_{25} et le $CMM_{25,ST}$ peuvent être transposées au CMM_{35} :

- le CMM_P présentant le plus de zones GP émet de très fines particules (moins de $0,65\mu\text{m}$) de manière plus significative ;
- le CMM_P avec peu de zones GP génère des poussières de taille équivalente à celle des particules de SiC. Cette présence de particules de SiC dans l'aérosol provient du cheminement des dislocations qui peut entraîner une décohésion des carbures de Silicium. Cet effet est limité par le durcissement structural qui est proportionnel à la quantité de zones GP.

Le comportement du CMM_{35} s'explique donc par l'effet d'un durcissement structural plus important qu'un CMM Al2009 / 35% SiCp. Il semble donc qu'en terme d'émission de poussière, l'incidence du traitement thermique soit plus forte que celle du niveau de renforts.

En ce qui concerne la plus grande proportion de particules du groupe 2 observée lors de l'accroissement du taux de renfort, cela s'explique par le plus grand nombre de particules de SiC impactées par la coupe. L'action mécanique de l'outil sur les particules a fait l'objet de plusieurs études [14, 48] qui ont montré que l'augmentation du pourcentage de particules conduit à plus de défauts de surface. Ceux-ci provenant de décohésions de particules, de bris de particules, etc.

Le processus d'extraction des particules est schématisé en figure 4.5 (a). En fonction de la position de la particule par rapport à l'outil, l'action de l'outil sur la particule peut avoir plusieurs effets :

- l'arrachement de la particule de la matrice aluminium, dont le mécanisme est représentée figure 4.5 (a). L'effort de coupe crée un moment (Ma) dont le sens varie avec les positions relatives. Un moment orienté suivant le sens trigonométrique (comme sur la figure) conduit à l'extraction de la particule vers le copeau ;
- l'enfoncement de la particule au sein de la matrice. Ceci est possible dès lors que l'effort de coupe génère un moment orienté suivant le sens horaire (inverse de la

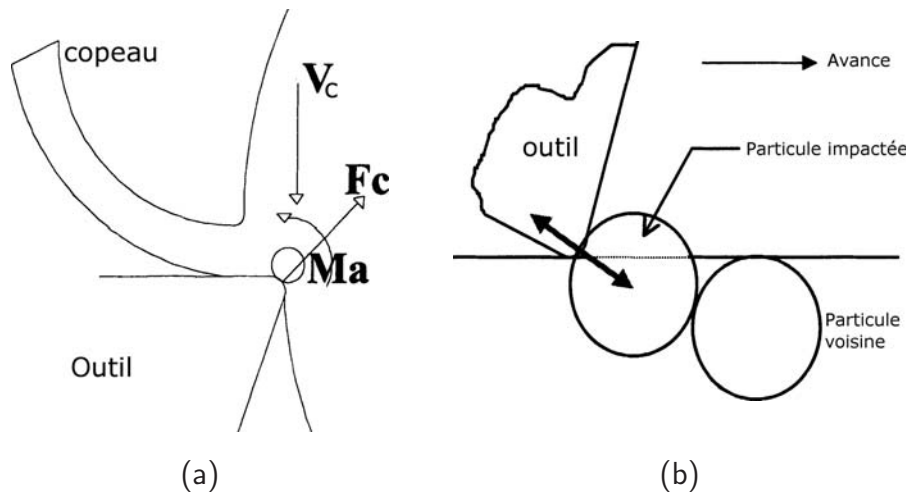


Figure 4.5 – Processus d'extraction (a) et de bris (b) de particule de SiC, représentation de l'action de l'outil [14].

figure). La particule est alors plaquée vers la surface usinée. Elle peut être déplacée le long de la surface usinée et créer un sillon. De plus, la cohésion particule / matrice est altérée ;

- le bris de la particule peut se produire lorsque celle ci ne peut se déplacer au sein de la matrice ou s'en extraire. La figure 4.5 (b) montre l'action réciproque outil / particule qui augmente car la particule impactée prend appui sur une autre. Cela a pour effet d'augmenter l'usure de l'outil et potentiellement de fissurer la particule (figure 1.10(b)).

L'accroissement du nombre de particules de SiC au sein de la matrice se traduit donc par :

1. une augmentation de particules de SiC
 - extraites ;
 - brisées.
2. une usure abrasive intense qui détache des grains de diamants de l'outil. Ces derniers viennent s'ajouter à l'aérosol.

La quantification de chaque phénomène n'est pas simple, et il est nécessaire de déterminer la taille des particules émises par chacun afin de connaître leur contribution à la composition de l'aérosol.

4.2.1.2 Répartition pour les outils PCD

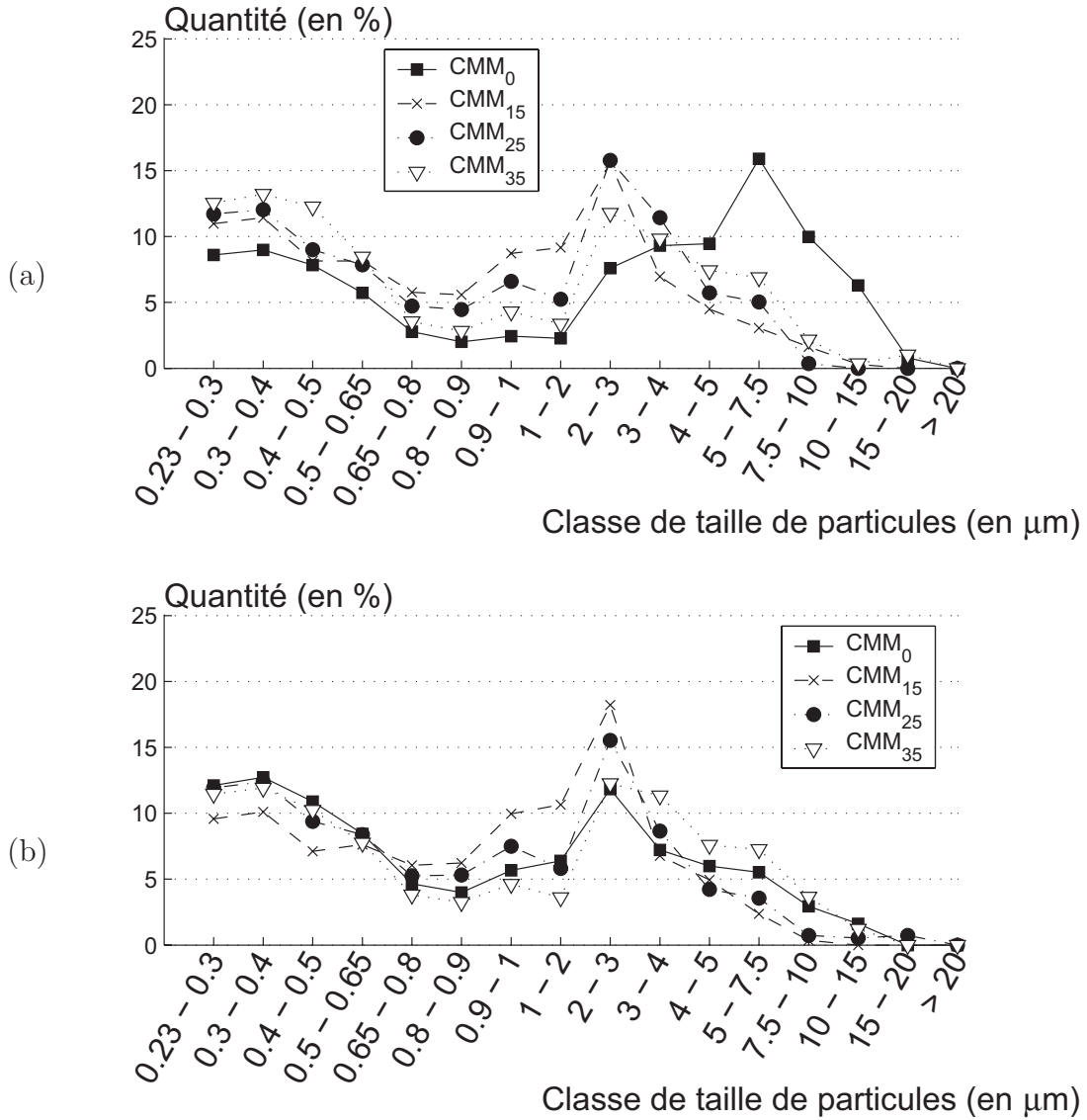


Figure 4.6 – Répartition par taille des particules émises lors de l'usinage des CMM_p par les outils PCD_{A10} (a) et PCD_{B0} (b)

Les outils PCD génèrent des aérosols dont la répartition est moins contrastée. La courbe présente encore une allure à deux bosses, mais celles-ci sont beaucoup moins marquées. La figure 4.6 donne les profils des aérosols obtenus avec deux outils PCD. Ces différents profils sont assez proches les uns des autres, les écarts n'étant que de quelques points. Il faut donc considérer ces variations avec précaution. La proportion de poussière de moins de $1\mu\text{m}$ n'évolue pas de façon significative. Toutefois la tendance consiste en une modification de la répartition des poussières du groupe 2 (diamètre compris entre 1

et $4\mu\text{m}$) lorsque le taux de renfort augmente :

- le spectre de particules de plus de $1\mu\text{m}$ s'élargi ;
- le pic des poussières comprises entre 2 et $3\mu\text{m}$ décroît.

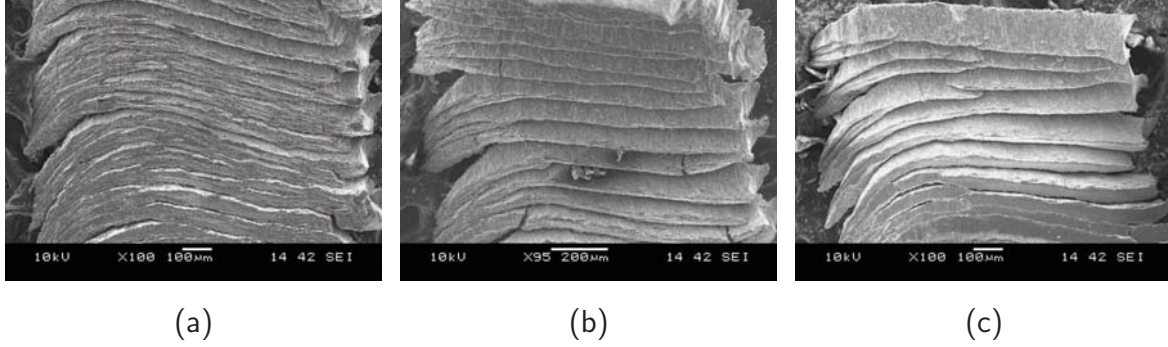


Figure 4.7 – Observation des copeaux obtenus avec l'outil PCD_{A0} : (a) CMM_{15} , (b) CMM_{25} , (c) CMM_{35} .

Les proportions des tailles de particules (groupe 1 et 2) semblent donc stables malgré la variation du niveau de chargement, et seule la répartition des plus grosses particules évolue. Une forte densité de particules de plus grande dimension est observée au sein du groupe 2. Ce phénomène est aussi présent lors de la coupe avec les outils CVD, mais son intensité au sein du groupe 2 est stable. L'observation des copeaux obtenus (figure 4.7) montre un festonnage croissant avec le taux de renfort. Schulz et al [47] ont définis le degré de segmentation (G_s) comme étant :

$$(4.1) \quad G_s = \frac{\text{hauteur festonnée}}{\text{épaisseur du copeau}}$$

L'accroissement de la quantité de renfort se traduit par un degré de segmentation croissant, tendant vers son maximum. La figure 4.7 montre un festonnage qui traverse, à certains endroits, l'épaisseur du copeau lors de la coupe des CMM fortement chargés. Cela se traduit par un copeau qui se fractionne de plus en plus et qui est quasiment assimilable à de la poudre (pour les essais portant sur le CMM_{35}). La segmentation du copeau étant facilitée par la propagation de fissures entre les sites particuliers, l'augmentation du degré de segmentation conduit à une perte de cohésion renfort / matrice le long de ces zones de cisaillement. Mais ce cisaillement ne s'effectue pas sous l'action directe de l'outil (comme à la figure 4.5), mais par propagation et coalescence de fissures. Ce phénomène peut conduire au détachement de la particule ainsi que par une partie de matrice encore solidaire.

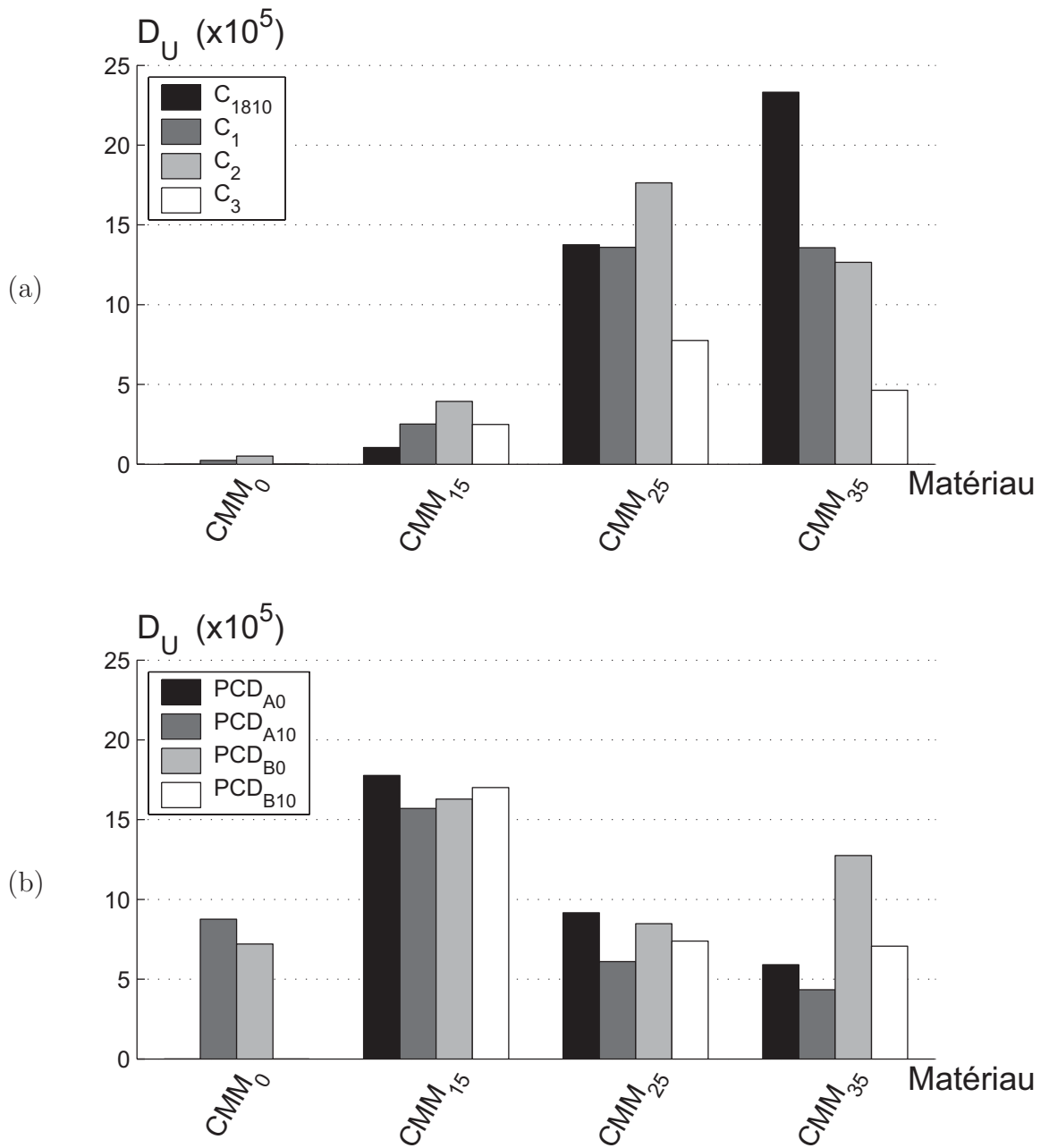


Figure 4.8 – Dust Unit (D_U) pour différents niveaux de chargement et différents types d'outils : (a) outils diamants CVD, (b) outils diamants PCD

4.2.2 Evolution du Dust Unit (D_U)

4.2.2.1 pour les outils CVD

Le calcul du Dust unit pour les outils diamants CVD (figure 4.8 (a)) montre un accroissement de la quantité de poussière émise lors de l'augmentation du taux de renfort

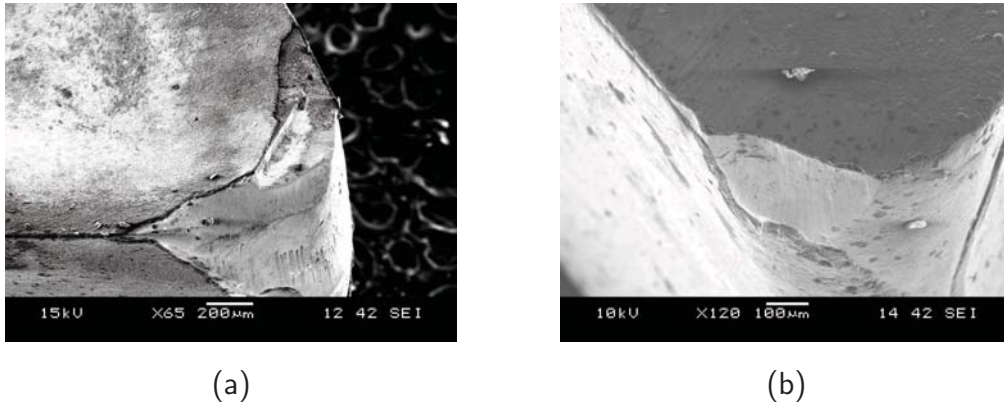


Figure 4.9 – Observation de l'arête de coupe de l'outil C_{1810} (a) et C_2 (b) à l'issue de l'usinage du CMM_{35} .

jusqu'au CMM_{25} et une diminution de l'indice D_U pour le CMM_{35} . Seul l'outil C_{1810} génère une quantité de poussière proportionnelle au taux de SiC_p . Les outils C_{1810} et C_2 sont les seuls à atteindre leur limite de durée de vie (respectivement au bout de 31 et 46 secondes).

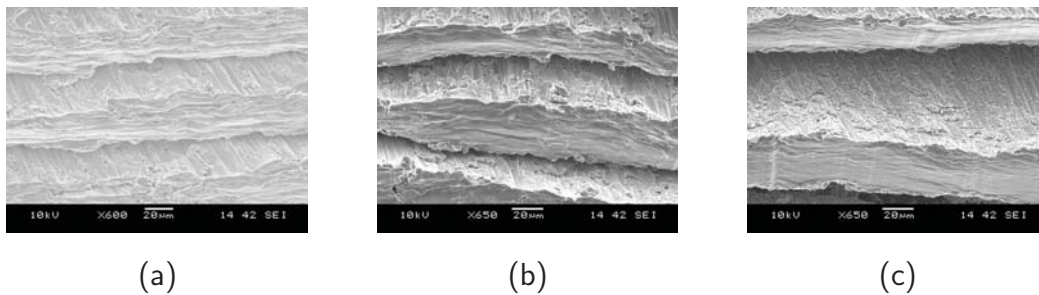


Figure 4.10 – Observation des copeaux obtenus lors de la coupe avec l'outil C_2 pour le CMM_{15} (a), le CMM_{25} (b), le CMM_{35} (c).

L'usure intense du C_{1810} (figure 4.9 (a)) a nécessité l'arrêt brutal de la vitesse d'avance avec le frottement résiduel de l'outil sur la surface usinée pendant quelques instants. Quant à l'outil C_2 , son usure est moindre bien que présentant un décollement important au niveau du bec. L'outil C_2 a donc terminé l'essai de chariotage et a effectué un dégagement identique aux autres essais, c'est à dire sans phase de frottement sur la surface générée. Cette différence dans le protocole d'essai explique la plus forte génération de poussière de l'outil C_{1810} , celle ci trouvant sa source dans la phase de frottement précédent l'arrêt de la broche.

Pour ce qui est de la diminution de D_U lors de la coupe du CMM_{35} avec les autres outils diamants, la structure du matériau induite par le traitement thermique semble le

facteur prépondérant. Comme cela a été décrit au paragraphe 4.2.1.1, le CMM_{35} présente une différence d'éléments d'alliage au sein de la matrice qui augmente son durcissement structural lors du traitement thermique. Pour les mêmes raisons que celle déterminées lors de l'analyse du traitement thermique sur l'émission de poussière (paragraphe 4.1), l'évolution de D_U lors de la coupe du CMM_{35} s'explique par l'incidence du traitement thermique.

4.2.2.2 pour les outils PCD

Contrairement aux outils CVD, les PCD présentent une diminution de l'indice D_U lorsque le taux de renforts augmente (figure 4.8 (b)).

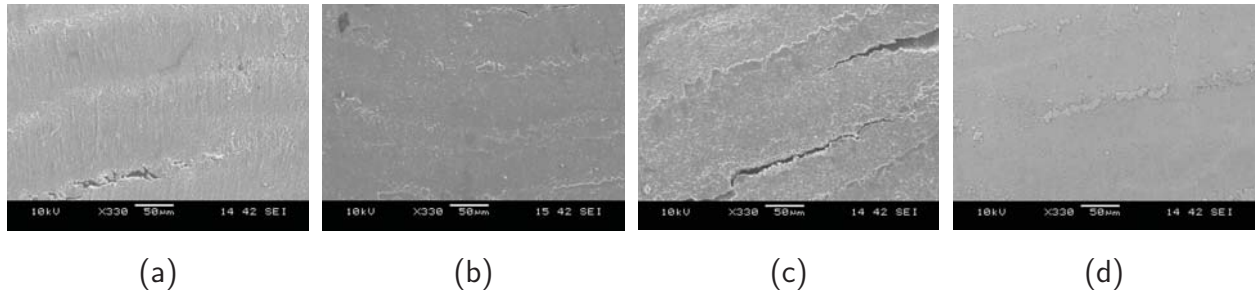


Figure 4.11 – Observation de la surface du copeau frottant sur la face de coupe des outils PCD_{A0} (a), PCD_{A10} (b), PCD_{B0} (c), PCD_{B10} (d), lors des essais sur le CMM_{35} .

Seul l'outil PCD_{B0} génère une quantité de poussière plus importante lors de la coupe du CMM_{35} . L'observation de la surface du copeau frottant sur la face de coupe (figure 4.11 (c)) montre un important collage qui apparaît aussi sur les CMM_p plus faiblement chargé, mais à un niveau moindre. Ce collage s'effectue périodiquement, à une fréquence similaire à celle du festonnage. Ce matériau adhérent peut provenir d'une partie de l'arête rapportée qui se détache sous l'action des particules de SiC, ou d'une partie de la couche rapportée.

a) Influence de l'angle de coupe

La morphologie de la couche rapportée est fortement liée à l'angle de coupe (figure 4.12). Lors de la formation du copeau sur les outils à angle de coupe positif, le transfert et le dépôt de matière s'effectue sur une grande partie de la face de coupe. Tandis que pour les outils à angle de coupe nul, il y a apparition d'une arête rapportée et d'une couche rapportée située au delà de la zone de contact du copeau sur la face de coupe. Au cours de l'usinage une couche rapportée se forme sur la face de coupe, mais sous l'action des efforts de coupe celle-ci est intégralement déplacée vers une zone où le contact copeau / outil est moins intense (cf. 4.12).

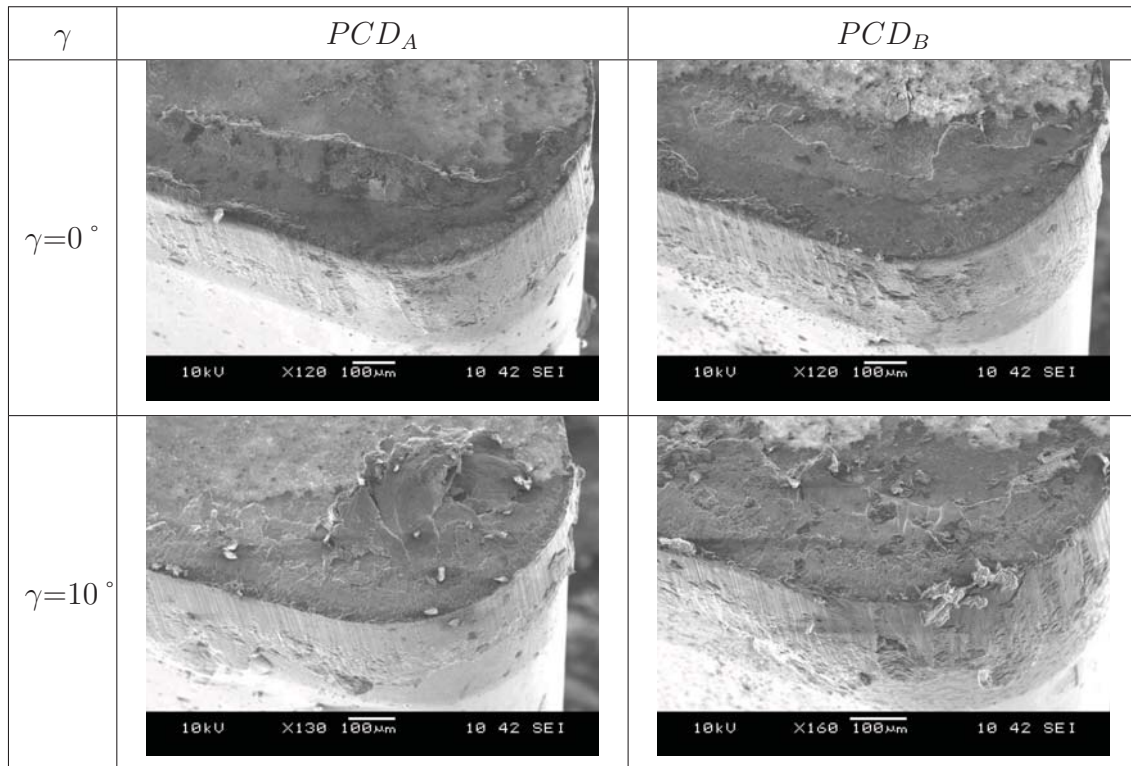


Figure 4.12 – Observation des outils PCD après les essais sur le CMM_{35} .

b) Influence du contact outil / copeau

Au même titre que pour les outils CVD, l'augmentation du chargement en carbure de silicium conduit à une augmentation de particules brisées ou extraites. Cependant la face de coupe est un lieu de génération de poussière important pour les outils PCD . Cela a été constaté précédemment avec l'outil PCD_{B0} (figure 4.12). Arumugam et al. [29] ont étudié la quantité de poussière générée lors de la coupe d'un alliage d'Aluminium Silicium (Al Si 18) par des outils diamants CVD polis ou non. Ils montrent que la concentration massique d'émission diminue lorsque la rugosité de la face de coupe diminue. Le résultat n'est pourtant pas évident à la lecture des relevés, d'autant plus que plusieurs interactions à 2 et 3 paramètres semblent agir significativement :

- avance / profondeur de passe ;
- vitesse de coupe / rugosité de l'outil ;
- vitesse de coupe / profondeur de passe / rugosité de l'outil.

Le principal élément à retenir de cette étude est que l'interface outil / copeau est un lieu de génération de poussière non négligeable et très sensible aux modifications de paramètres.

L'observation des faces de coupe permet de constater que la position de la couche adhérente évolue avec le taux de renforts (figure 4.13). La distance entre l'arête de coupe et la couche rapportée diminue lorsque le renfort augmente. Celle ci correspond à longueur de contact outil / copeau sur laquelle les efforts sont tels que le matériau est repoussé en limite de contact.

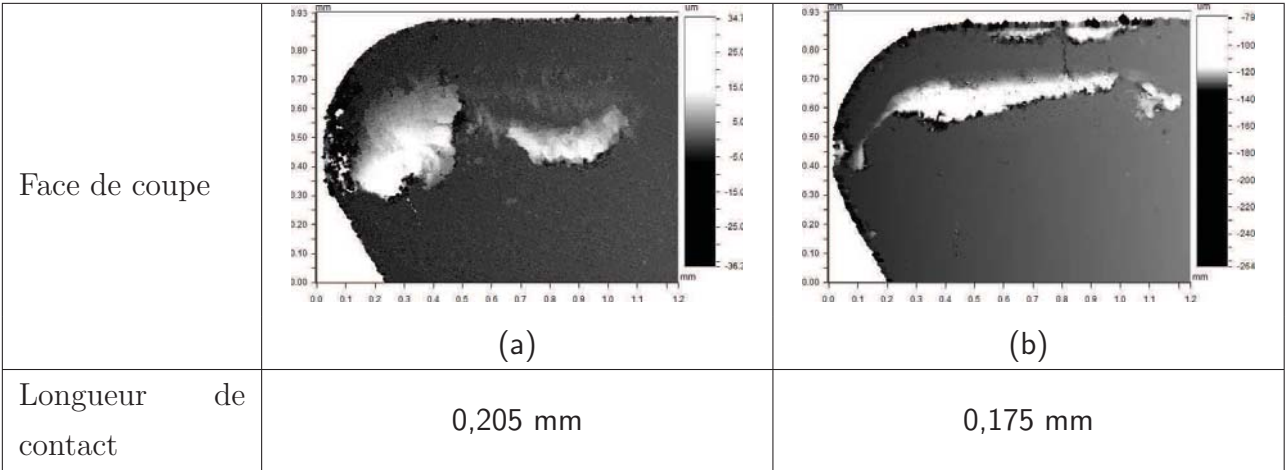


Figure 4.13 – Observation de la couche adhérente et de la longueur de contact outil / copeau sur l'outil PCD_{A0} à l'issue des essais sur le CMM_{15} (a) et CMM_{35} (b).

La diminution de ce contact outil / copeau est la conséquence d'une plus forte segmentation du copeau, qui est facilitée par la forte concentration des particules de renforts. Le constat est identique pour les outils à angle de coupe positif, mais la longueur de contact est plus faible. Le processus de formation et de déplacement de la couche adhérente décrit au paragraphe précédent diminue en même temps que la longueur de contact.

4.2.3 Conclusion

La teneur en renfort particulière a une incidence forte sur la quantité de poussière émise ainsi que sur la composition de l'aérosol. Lors de l'augmentation du niveau de chargement céramique, l'aérosol généré diffère avec les caractéristiques de l'outil :

1. les outils CVD produisent plus de poussières, la proportion de très fines particules (moins de $0,65\mu\text{m}$) diminue, tandis que les particules de quelques microns sont plus nombreuses. Ces poussières sont des particules de SiC extraites de la matrice lors de la coupe ou des grains de diamants provenant de l'usure de l'outil ;
2. les outils PCD génèrent moins de poussières et des particules de dimensions plus importantes. En effet, les particules de $2-3\mu\text{m}$ sont moins nombreuses, alors que celles de 5 à $7,5\mu\text{m}$ augmentent.

La différence de comportement des outils *CVD* / *PCD* en terme de génération de poussière est liée à plusieurs phénomènes dominés par :

- l’usure abrasive intense à laquelle les revêtement *CVD* sont moins résistants. Ce fort taux d’usure entraîne la mise en suspension de grains de diamants issus du revêtement. Cette hypothèse est corroborée par le fait que l’outil C_3 est celui qui génère le moins de poussières (figure 4.8 (a)), et aussi celui qui résiste le mieux à l’usure ;
- la faible rugosité de la face de coupe des outils *PCD* qui confère au contact outil / copeau une importance majeure en terme d’émissivité. L’accroissement de la segmentation par le chargement de SiC diminue la longueur de frottement outil / copeau conduisant à une diminution de D_U .

4.3 Emission de poussière et durée de vie

Les résultats précédents proviennent de mesures effectuées lors d’essais avec des outils neufs. Le suivi de l’émission de poussière au cours du temps permet de mettre en évidence les différents mécanismes générateurs intervenant tout au long de la durée de vie de l’arête.

4.3.1 Comportement des outils *CVD*

La figure 4.14 donne le relevé de l’évolution de D_U ainsi que de la puissance de coupe tout au long de la durée de vie de l’outil. La fin de ces courbes correspond à des endommagements d’outils qui se manifestent par :

- un effondrement d’arête pour la coupe du CMM_{15} (figure 3.15 (c)) ;
- un décollement du revêtement au niveau du bec lors de la coupe du CMM_{25} (figure 3.17 (c)).

Bien que la dégradation de l’outil C_{1810} ne soit détectable qu’après 10 minutes par l’accroissement de la puissance de coupe, la quantité de poussière émise augmente significativement et continuellement à partir de 7 minutes de temps de coupe. L’observation au microscope interférométrique permet de constater un défaut croissant à la jonction du rayon de bec et de l’arête de coupe principale. Celui-ci est indiqué par une flèche sur les différentes vues de la face de coupe (figure 4.15).

Jusqu’à 6,8 minutes de coupe, le défaut n’apparaît pas et l’indice D_U reste faible. Après 8 minutes d’usinage le défaut apparaît légèrement mais son incidence sur D_U est grande. La seconde grande variation de D_U correspond à l’effondrement de l’arête de

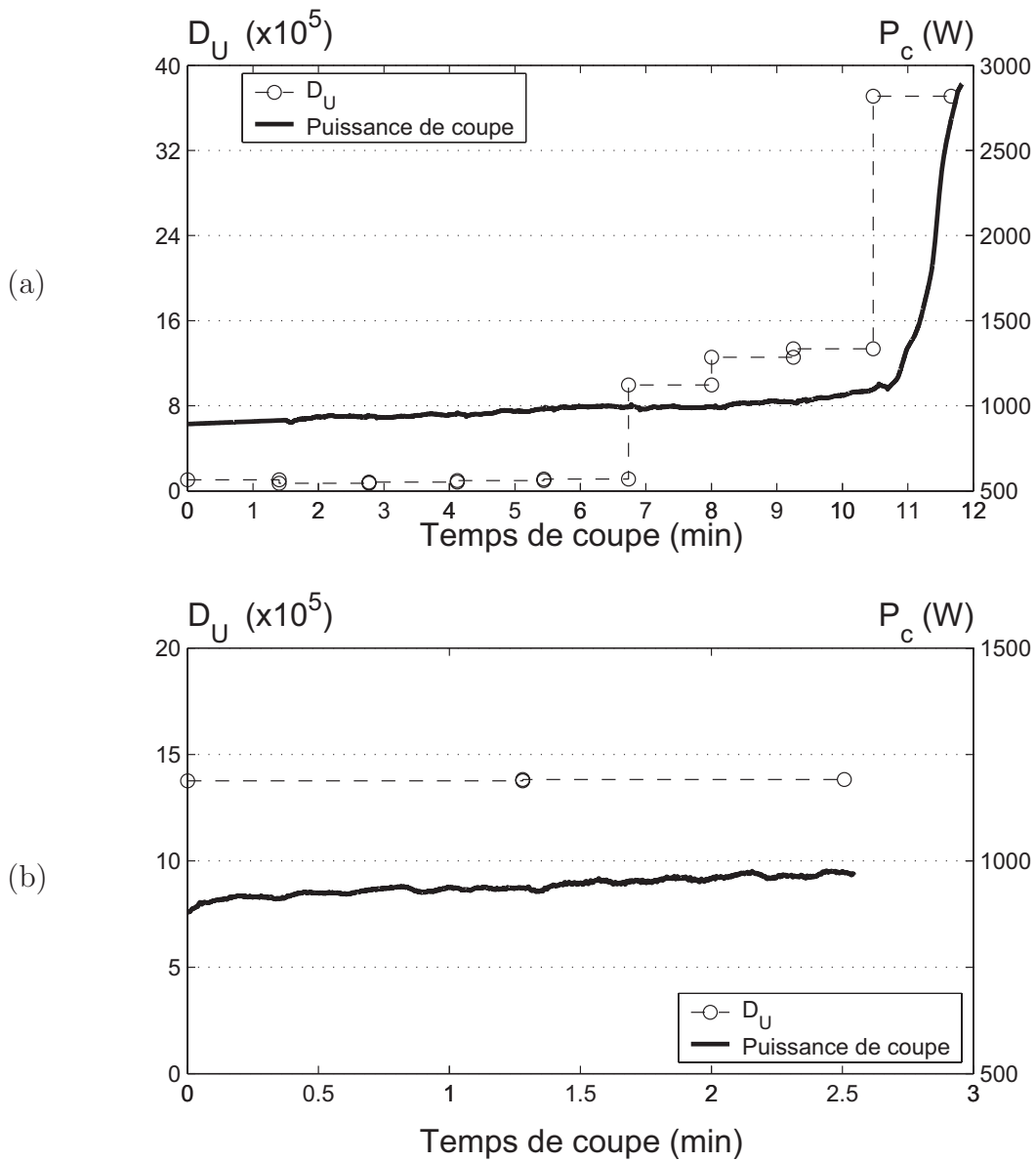


Figure 4.14 – Dust Unit (D_U) et puissance de coupe lors des essais de durée de vie avec le C_{1810} lors de la coupe du CMM_{15} (a) et du CMM_{25} (b).

coupe (figure 3.15 (c)). Ces deux endommagements modifient l'écoulement du copeau ainsi que l'acuité d'arête en zone de cisaillement primaire et cela conduit à une importante génération de poussière. Le décollement du revêtement lors des l'essais sur le CMM_{25} n'impact ni le niveau de puissance, ni le niveau de poussières. Cette faible incidence laisse supposer que ce défaut est apparu à la fin de l'usinage, et détermine à posteriori la limite de durée de vie. Lors du dégagement de l'outil une partie du matériau adhérent s'est décollée en emportant un peu de revêtement.

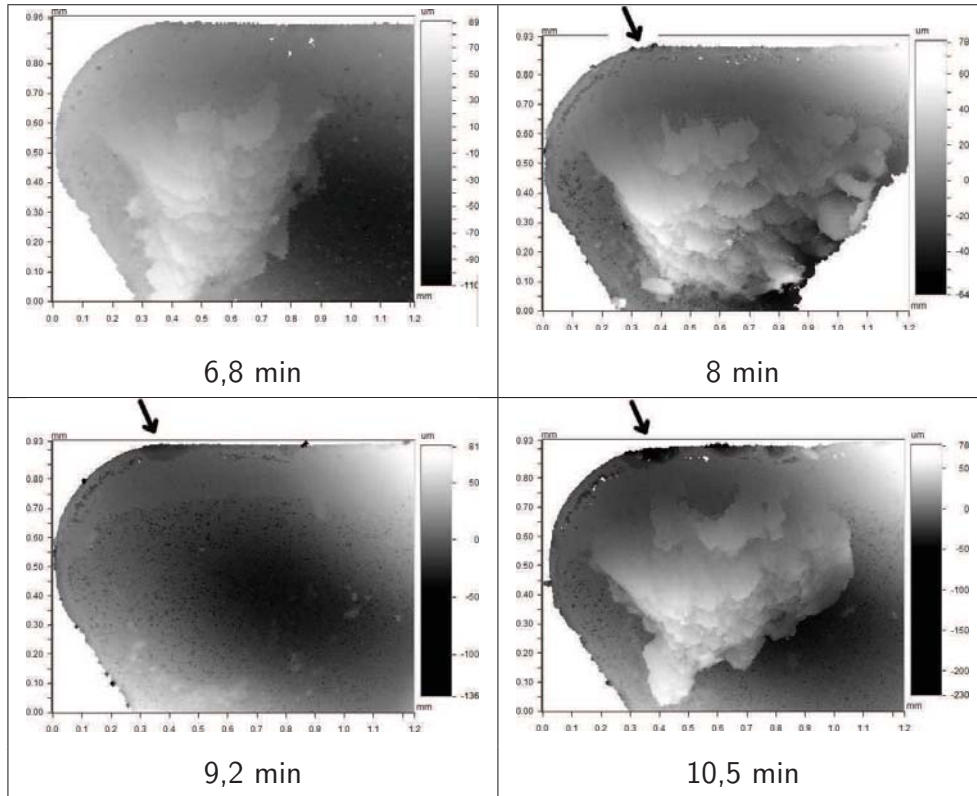


Figure 4.15 – Observation de la face de coupe de l’outil C_{1810} en fonction du temps lors des essais de durée de vie sur le CMM_{15} .

4.3.2 Comportement des outils PCD

L’évolution de D_U pour les outils PCD (figure 4.16) ne ressemble en rien à celle constatée pour les outils CVD , pour laquelle l’usure est le paramètre influant. Une modification macroscopique des copeaux est constatée lors des essais, et un exemple est donné à la figure 4.17. Le rayon de courbure des copeaux semble avoir la même évolution que l’indice D_U . La mesure des rayons de courbure des copeaux obtenus permet d’établir le lien entre émission de poussière et géométrie du copeau.

La figure 4.18 met en évidence ce lien. Les courbes de régression tracées correspondent à des régressions linéaires. A un accroissement du rayon de courbure peut être associé une augmentation de l’indice D_U . L’évolution du rayon de courbure dépend cependant de plusieurs paramètres :

- des propriétés thermo-mécaniques du matériau usiné ;
- de phénomènes physiques à l’interface outil / copeau.

L’ensemble de ces essais ayant été effectué sur un seul matériau (CMM_{15}), il est nécessaire de s’intéresser à cette interface. Childs [49] reprend la théorie des lignes de

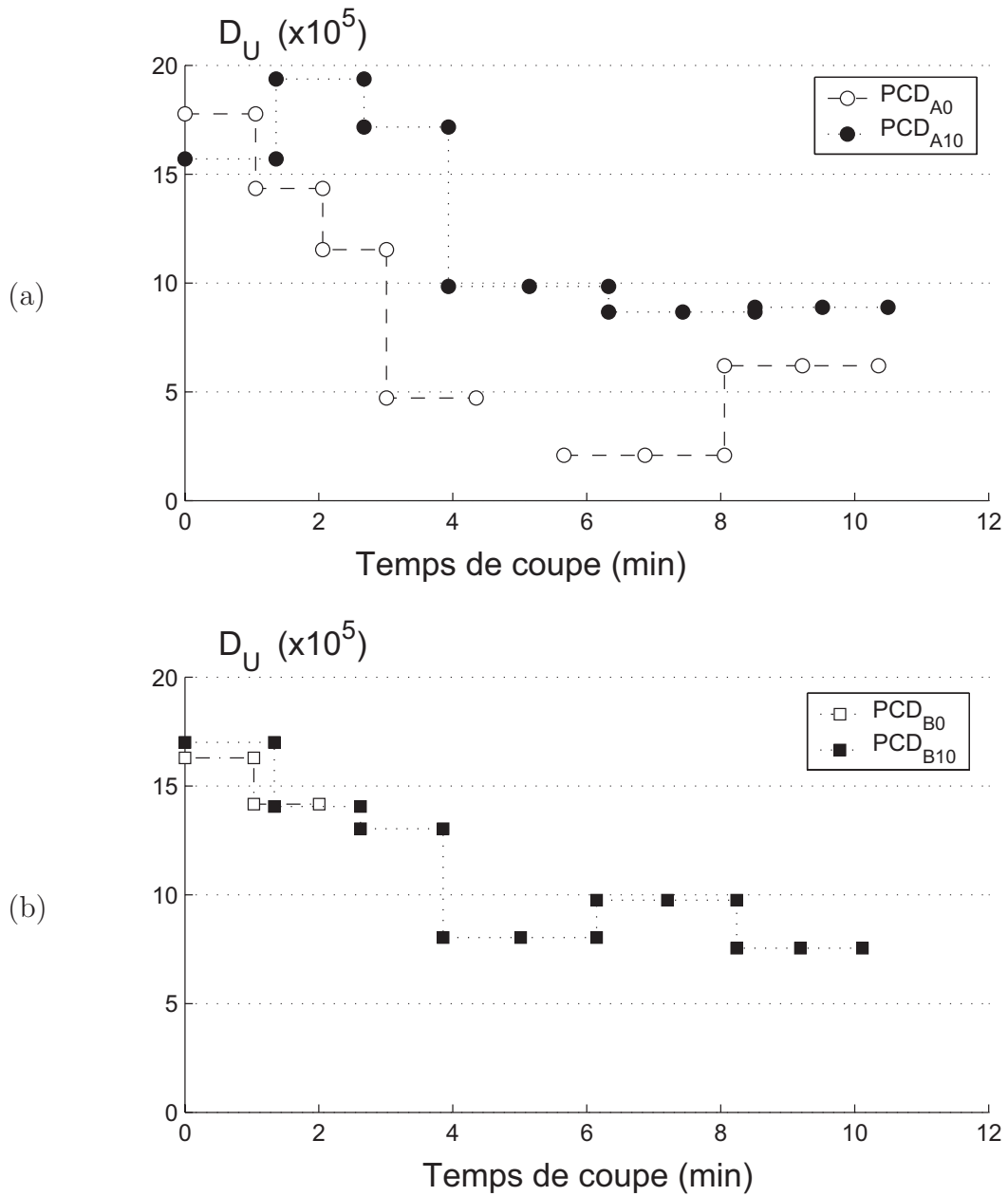


Figure 4.16 – Evolution du Dust Unit (D_U) lors des essais de coupe du CMM_{15} avec les outils PCD_A (a) et PCD_B (b).

glissement et s'appuie sur l'étude de Kudo [50] pour expliquer la formation du copeau.

Il précise ainsi que l'interface outil / copeau influe directement sur plusieurs paramètres de la coupe tels que :

- la longueur de contact copeau / face de coupe ;
- l'épaisseur du copeau ;
- le rayon de courbure du copeau.

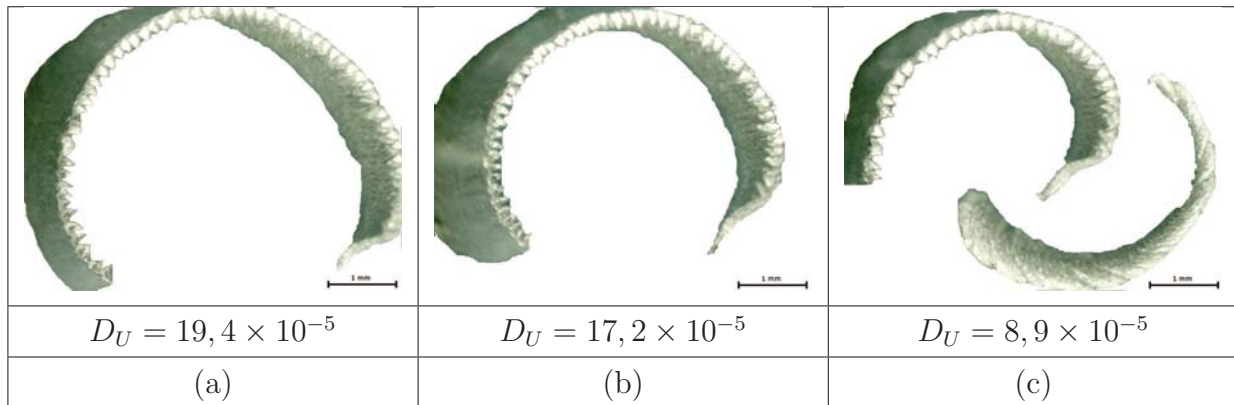


Figure 4.17 – Morphologie des copeaux obtenus avec les outils *PCD* lors des essais sur le *CMM*₁₅ après un temps de coupe de 2 minutes (a), 3 minutes (b) et 9 minutes (c).

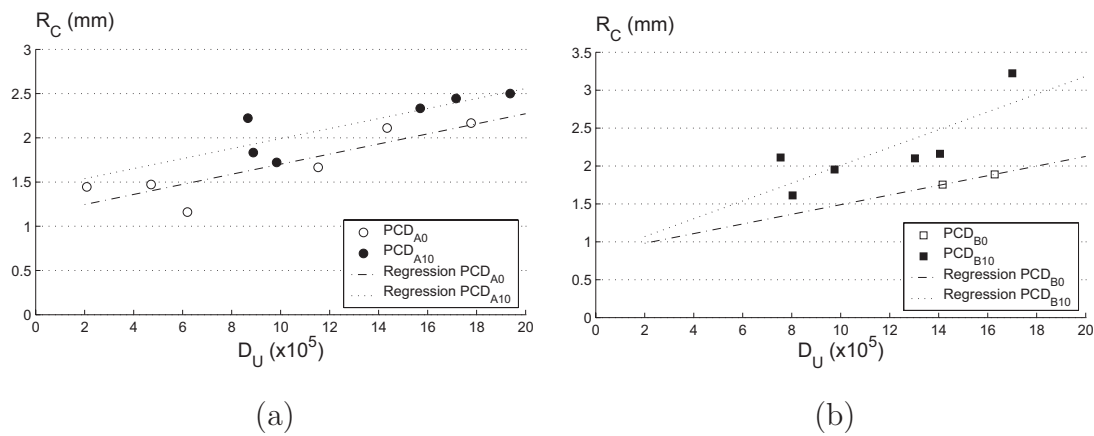


Figure 4.18 – Corrélation D_U et rayon de courbure du copeau lors des essais d'émission de poussière des outils *PCD* sur le *CMM*₁₅.

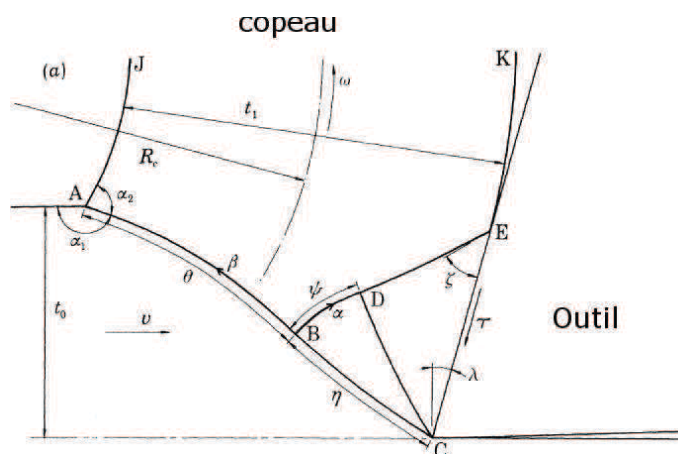


Figure 4.19 – Champs de lignes de glissement et formation du copeau [51].

Childs et Kudo [49, 50] expliquent la courbure du copeau par l'existence de la zone de compression CBE définie par la figure 4.19. Sous l'action du cisaillement, la matière s'écoule suivant la direction CB, puis est étirée dans la direction CE. Ce mécanisme se déroule dans toute la région CBE. La région BAE est plus rigide et c'est cette différence de comportement qui conduit à la courbure du copeau ainsi qu'à celle du plan de cisaillement (CBA). La zone CBE est ainsi directement impactée par les phénomènes intervenant à l'interface outil / copeau. Childs et Kudo [49, 50] considèrent que c'est la variation de la contrainte de cisaillement à l'interface (ou contrainte de friction émanant du contact outil / copeau) qui modifie l'inclinaison des lignes de glissement vers la face de coupe et la géométrie du copeau. D'autre part, Dewhurst [51] reprend le travail de Oxley et al. [52], et considère que la valeur moyenne de cette contrainte est représentative des conditions de friction à l'interface outil / copeau et influe sur sa géométrie. La figure 4.20 montre l'évolution de la courbure lorsque la contrainte frictionnelle (τ) évolue. Cette contrainte est définie proportionnellement à la limite élastique (k). Lorsque la contrainte de friction augmente, la courbure diminue et donc le rayon de courbure augmente.

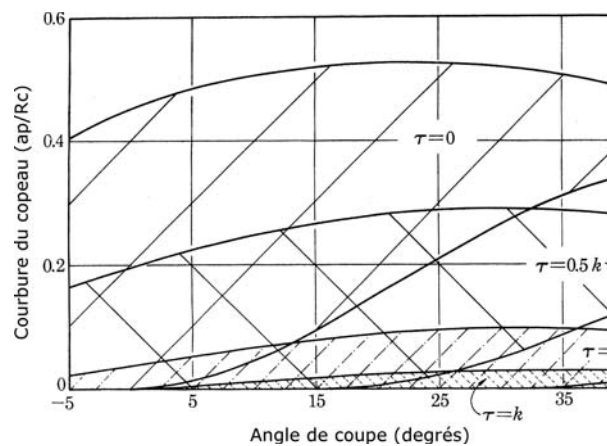


Figure 4.20 – Corrélation entre courbure du copeau et contrainte de friction à l'interface outil / copeau en fonction de l'angle de coupe [51].

Donc, l'augmentation de la friction outil / copeau se traduit par une augmentation du rayon de courbure et entraîne un accroissement de D_U .

Ces périodes de forte émissivité se situent essentiellement en début de durée de vie de l'outil, alors que la face de coupe est vierge de tout dépôt de matériau usiné. Lors de la formation du copeau, celui-ci est en contact exclusivement avec le matériau de la face de coupe dans les premiers temps d'usinage, tandis qu'une couche rapportée se forme progressivement et modifie la nature des contacts. Dans les phases à faible émissivité, la

contrainte frictionnelle est plus faible car la couche rapportée modifie le contact copeau / face de coupe.

La figure 4.20 permet de préciser aussi l'influence de l'angle de coupe sur l'émission de poussière. Pour une courbure donnée, la variation de l'angle de coupe peut entraîner une augmentation de la contrainte de friction. Cette influence de l'angle de coupe est observée sur la figure 4.16 (a), une fois la phase transitoire initiale passée.

La forte émission de poussière par les outils *PCD* se produit au début de la vie de l'outil et correspond à la phase de mise en place de la couche rapportée sur la face de coupe (phase de rodage ou d'accommodation).

4.3.3 Conclusion

L'évolution du Dust Unit D_U est très révélatrice du comportement des outils lors de la coupe des CMM_p :

- le fort taux d'usure des outils revêtus conduit à un renouvellement constant de l'interface outil / copeau et à un indice D_U stable. Celui-ci augmente dès lors qu'il y a dégradation de l'arête de coupe. Lorsque le taux d'usure augmente avec le taux du renfort, l'indice D_U croît de manière importante. Cet indice est sensible à des variations de la coupe non décelées lors du suivi de la puissance de coupe ;
- les outils *PCD* sont très résistants à l'usure, mais la faible rugosité de la face de coupe confère une grande importance au contact outil / copeau. L'évolution de D_U est similaire au rayon de courbure du copeau, qui traduit le niveau de la contrainte de friction sur la face de coupe. La quantité de poussière émise est importante au début d'usinage, c'est à dire le temps de la formation de l'arête rapportée. Cette phase initiale est assimilable à un "rodage" de la face de coupe.

4.4 Conclusion

Le processus de génération de poussière lors de la coupe des CMM_p est complexe de par l'hétérogénéité du matériau, l'action abrasive de ses particules et la forte propension à l'adhérence de la matrice aluminium. Ainsi la nature de l'outil et sa résistance à l'usure abrasive conditionnent la génération de poussière selon des mécanismes dominants :

1. les outils *CVD* sont soumis à un fort taux d'usure qui rend l'émission de poussière proportionnelle au taux du renfort. L'accroissement de la quantité d'aérosol s'accompagne d'un grossissement de la taille des particules en suspension ;

2. les outils *PCD* sont plus résistants à l'abrasion et la génération de poussière est principalement due à la friction en face de coupe. Celle-ci varie en fonction de différents paramètres :
 - le taux de renfort augmente la fragmentation du copeau et réduit la longueur de contact en face de coupe ;
 - le recouvrement de la face de coupe par la couche rapportée s'effectue dans les premiers temps de coupe, et réduit la friction une fois le dépôt sur la face de coupe stabilisé.

La micro-structure du matériau est capitale en terme d'émission de poussière. La modification de la matrice par durcissement structural, bloque la propagation des dislocations et réduit la densité des plans de cisaillement, donc les zones de friction génératrices de poussière.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de ce travail était de définir les paramètres process répondant à des exigences de productivité et de qualité de surface, ainsi que d'identifier les processus générateurs de poussières lors de la coupe de composites à matrice aluminium.

La synthèse bibliographique a montré l'étendue des conditions de coupe utilisées pour étudier l'usinage des composites à matrice métallique, ainsi que la faible production scientifique portant sur l'émission de poussière lors de la coupe, malgré les risques inhérents à ces aérosols pour les personnes. La mise en place lente et progressive d'un cadre législatif portant sur la protection des personnels vis à vis de ce risque ne favorise pas le développement des connaissances en la matière.

Afin de définir une plage de fonctionnement correcte pour les outils utilisés, une étude d'optimisation des conditions de coupe prenant en compte des critères énergétiques et de qualité a été menée. Celle ci a permis de prévoir et comprendre le comportement de certains outils par le suivi de l'effort d'avance et de l'usure. Les modes d'endommagement ainsi que les performances ont été observés pour chacun des outils lors d'essais de longue durée :

- la présence d'une usure adhésive en plus de l'usure abrasive dépend de la nature et de la structure de l'outil ;
- l'importante variabilité de la durée de vie des outils *CVD* a été mise en évidence par l'apparition soudaine et imprévisible de décollement et de bris d'outil ;
- la multiplicité des interfaces ainsi que la diminution de l'angle de taillant favorisent l'apparition de décollement du revêtement ;
- l'homogénéité et la cohésion des inserts diamants *PCD* leur confèrent une très bonne résistance à l'usure abrasive. Celle-ci progresse lentement et permet l'obtention d'une qualité de surface constante.

L'étude de l'émission de poussière lors de la coupe qui s'en est suivie a montré des liens forts entre les processus de génération de poussière et le comportement des outils lors de

la coupe. Ces différents processus se situent dans la zone de cisaillement primaire ou à l'interface outil / copeau, et leur contribution à la production de l'aérosol dépend de la résistance à l'usure des outils. Un taux d'usure important modifie en permanence le contact en zone de cisaillement secondaire par le détachement de particules de matériau d'outil qui vient amplifier la quantité de particules de quelques microns composant l'aérosol.

Une bonne résistance à l'usure confère à la friction sur la face de coupe une importance considérable en terme d'apport en émission de poussière. La création d'une couche rapportée stable limite cette émission.

A ces différents lieux de génération de poussières, vient s'ajouter la zone de cisaillement primaire. L'importance de sa participation est conditionnée par la possibilité de déplacement des dislocations au sein de la matrice aluminium.

L'ensemble de ce travail permet d'appréhender les interactions entre les mécanismes d'usures et les modes de génération de poussières. Cependant, la mise en évidence de la forte sensibilité du processus d'émission aux faibles variations de paramètres de la zone de coupe montre l'importance de la chaîne de mesure. Un important travail reste à effectuer sur cette chaîne afin d'obtenir une portabilité des résultats et une valeur indépendante du dispositif expérimental. La détermination des tailles de particules en suspension permet la définition d'équipement de protection adéquat. Mais des études de toxicité doivent être menées conjointement à la détection de la présence de nano-particules dans l'environnement de travail.

La définition d'un Couple Outil-Matière spécifique à l'émission de poussière semble un développement nécessaire pour une prise en compte industrielle de la qualité de l'air sur le lieu de travail.

Annexe 1 : Production scientifique

Publications dans revues internationales

[1] Kremer A., Devillez A., Dominiak S., Dudzinski D., El Mansori M.
Machinability of Al/SiC particulate metal-matrix composites under dry conditions with CVD diamond-coated tools, **Machining Science and Technology**, 12-2, pp.214 - 233, 2008.

Communications dans des Sommets

[1] Kremer A., El Mansori M.
Choix structurel des revêtements diamants pour l'usinage à sec d'un CMM Al / SiC, **L'usinage haute performance**, Mars 3-5, Montréal, Canada, 2008.

Communications dans des congrès internationaux

[1] Kremer A., Devillez A., Dominiak S., Dudzinski D., El Mansori M.
Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites, 6th **High Speed Machining Conference - HSM**, Mars 21-22, San Sebastian, Spain, 2007.

[2] Kremer A., El Mansori M.
Influence of nanostructured CVD diamond coatings during dry turning of a SiC particle-reinforced metal matrix composite, 36th **International Conference On Metallurgical Coatings And Thin Films - ICMCTF 2009**, April 27 - May 1, San Diego, USA, 2009.

Annexe 2 : Analyse économique

Afin de répondre à l'objectif d'usinage compétitif, il est nécessaire de comparer les performances des outils en tenant compte de leur coût. Les essais de faisabilité effectués sur le CMM_{25} (tableau 3.2) sont les seuls permettant cette comparaison.

Durée de vie des outils

Lors de cette étude, le critère d'usure utilisé est celui d'usure en dépouille V_B , avec une valeur limite de 0,2 mm. Lors des essais d'usinage du CMM_{25} , tous les outils CVD ont présentés un endommagement de l'arête de coupe avant d'atteindre cette valeur limite (tableau 3.2). Cette valeur limite définie précédemment va servir à estimer la durée de vie des outils PCD, moyennant quelques hypothèses :

- l'usure en dépouille est supposée évoluer linéairement dans le temps ;
- l'outil est considéré comme usé dès que l'usure en dépouille atteint la valeur limite.

Coût d'usinage

Le calcul du coût d'usinage s'effectue à partir des données économiques et des résultats des essais de faisabilité industrielles (mesure et calcul de durée de vie).

L'indicateur économiquement intéressant est le coût d'usinage par minute. Ce coût prends en compte uniquement le prix d'une arête de coupe. L'évolution de cet indicateur est représenté figure 1 par l'histogramme. Les valeurs des durée de vies respectives sont indiquées par la courbe. Le coût de la minute d'usinage du CMM_{25} est minimum pour les outils PCD et l'outil revêtu C_3 . Comme attendu, l'outil C_2 présentant un taux d'usure important, son coût horaire est le plus important et représente environ quatorze fois celui de C_3 et des outils PCD.

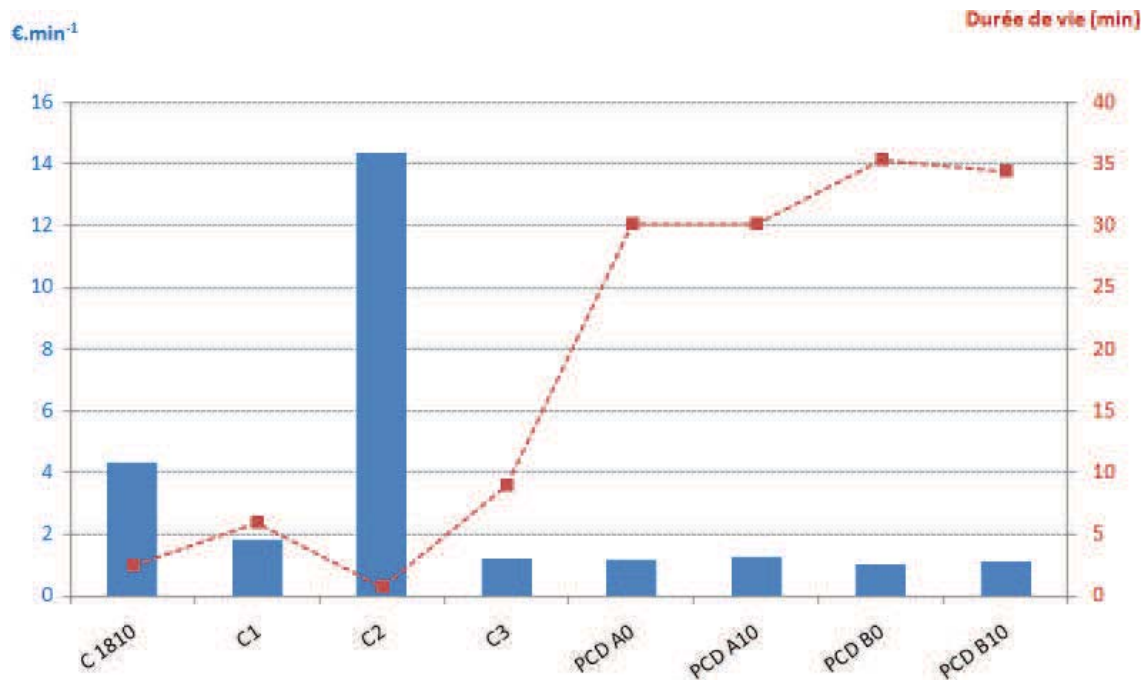


Figure 1 – Coût d'une minute d'usinage (histogramme) et durée de vie (courbe) lors de l'usinage du CMM_{25} .

Conclusion

Les performances similaires des outils PCD et de l'outil C_3 constatées à la figure 1 doivent être replacées dans un contexte industriel. Même si le coût de la minute d'usinage est très proche, la différence de durée de vie (de 30 à 3 minutes) est fondamentale :

- dans le cas d'une opération de finition, l'outil doit pouvoir finir l'usinage afin de conserver une qualité de surface compatible avec les exigences mécaniques ;
- les temps improductifs liés aux changements d'arêtes seront d'autant plus importants et coûteux que la durée de vie sera faible (outils PCD usinent pendant 10 fois plus de temps que l'outil C_3).

Les outils PCD semblent donc économiquement plus performant que les outils CVD. Toutefois la détermination réelle de leur durée de vie est nécessaire. Pour ce faire, le choix d'un critère d'usure apparaît arbitraire par le choix de sa valeur. Une étude bibliographique portant uniquement sur l'usinage des CMM révèle l'utilisation d'une grande plage de valeur limite V_B (de 0,25 [35] à 0,4 [53]). Un critère de qualité de surface semble plus judicieux car il prends en compte les exigences réelles de la pièce en fonctionnement.

Bibliographie

- [1] Encyclopédie Universalis.
- [2] Roger NASLAIN : *Introduction aux matériaux composites, 2, matrices métalliques et céramiques, / Ecole d'été du CNRS, Bombannes, Septembre 1979*. Ed. du C.N.R.S. : Institut des matériaux composites, 1979. ISBN : 2-222-03707-7.
- [3] H.P. DEGISCHER : Innovative light metals : metal matrix composites and foamed aluminium. *Materials et Design*, 18:221–226, 1997.
- [4] U.C. HECKENBERGER : Applications of mmcs in aeronautics and their processing. KMM Ind. Workshop. 23 & 24 janvier 2006, Castellon, Espagne.
- [5] G. ABOUELMAGD : Hot deformation and wear resistance of p/m aluminium metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156:1395–1401, 2004.
- [6] E. ATAS et Ch. GÜR : Determination of properties of sic reinforced aluminium metal matrix composites by ultrasonic techniques. Proceedings of the 15th World Conference on Nondestructive Testing. October 2000, Roma, Italy.
- [7] Claude Bathias et COLL. : *Matériaux composites*. DUNOD, 2005. ISBN : 2-10-006398-7.
- [8] F.L. MATTHEW et R.D. RAWLINGS : *Composite Materials : Engineering and Science*. Chapman et hall, 1994. ISBN : 0-412-55970-6.
- [9] Salim DERMARAR : Matériaux composites à matrice métallique. *Techniques de l'Ingénieur*, M250.
- [10] T. MIYAJIMA et Y. IWAI : Effects of reinforcements on sliding wear behavior of aluminum matrix composites. *Wear*, 255:606–616, 2003.
- [11] V. SONGMENE : *Usinage des composites à matrice d'alliage d'aluminium GrA-Ni*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Montréal, Université de Montréal.
- [12] M.R. GHOMASHCHI et A. VIKHROV : Squeeze casting : an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 101:1–9, 2000.

- [13] Jacques MASOUNAVE et Nathalie VILLAR : Elaboration des composites à particules. *Techniques de l'Ingénieur*, M2448.
- [14] Xiaoping LI et W.K.H. SEAH : Tool wear acceleration in relation to workpiece reinforcement percentage in cutting of metal matrix composites. *Wear*, 247:161–171, 2001.
- [15] M. EL-GALLAB et M. SKLAD : Machining of al :sic particulate metal-matrix composites part i : Tool performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 83:151–158, 1998.
- [16] Caroline J.E. ANDREWES, Hsi-Yung FENG et W.M. LAU : Machining of an aluminum/sic composite using diamond inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 102:25–29, 2000.
- [17] L. IULIANO, L. SETTINERI et A. GATTO : High-speed turning experiments on metal matrix composites. *Composites Part A*, 29A:1501–1509, 1998.
- [18] N.P. HUNG, N.L. LOH et Z.M. XU : Cumulative tool wear in machining metal matrix composites part ii : Machinability. *Journal of Materials Processing Technology*, 58:114–120, 1996.
- [19] N.P. HUNG, S.H. YEO et B.E. OON : Effect of cutting fluid on the machinability of metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 67:157–161, 1997.
- [20] S. KANNAN et H.A. KISHAWY : Tribological aspects of machining aluminium metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 198:399–406, 2008.
- [21] L. CRONJÄGER et D. MEISTER : Machining of fibre and particle-reinforced aluminium. *Annals of the CIRP*, 41/1:63–66, 1992.
- [22] M. EL-GALLAB et M. SKLAD : Machining of al :sic particulate metal matrix composites part ii : Workpiece surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology*, 83:277–285, 1998.
- [23] Gül TOSUN et Mehtap MURATOGLU : The drilling of an al/sicp metal-matrix composites. part i : microstructure. *Composites Science and Technology*, 64:299–308, 2004.
- [24] M. EL-GALLAB et M. SKLAD : Machining of aluminum/silicon carbide particulate metal matrix composites part iv. residual stresses in the machined workpiece. *Journal of Materials Processing Technology*, 152:23–34, 2004.

-
- [25] Ibrahim CIFTCI, Mehmet TURKER et Ulvi SEKER : Cbn cutting tool wear during machining of particulate reinforced mmcs. *Wear*, 257:1041–1046, 2004.
 - [26] X. DING, W.Y.H. LIEW et X.D. LIU : Evaluation of machining performance of mmc with pcbn and pcd tools. *Wear*, 259:1225–1234, 2005.
 - [27] World Health Organization (OMS) : Hazard prevention and control in the work environment : airborne dust, 1999. WHO/SDE/OEH/99.14.
 - [28] Laurence LE COQ : Elimination des particules. *Techniques de l'Ingénieur*, G1710.
 - [29] Prabhu U. ARUMUGAM, Ajay P. MALSHE et Stephen A. BATZER : Dry machining of aluminum silicon alloy using polished cvd diamond-coated cutting tools inserts. *Surface and Coating Technology*, 200:3399–3403, 2006.
 - [30] R. KHETTABI, V. SONGMENE et J. MASOUNAVE : Effect of tool lead angle and chip formation mode on dust emission in dry cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 194:100–109, 2007.
 - [31] V. SONGMENE, B. BALOUT et J. MASOUNAVE : Clean machining : Experimental investigation on dust formation part i : Influence of machining parameters and chip formation. *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*, 14 N°1:1–16, 2008.
 - [32] B. BALOUT, V. SONGMENE et J. MASOUNAVE : An experimental study of dust generation during dry drilling of pre-cooled and pre-heated workpiece material. *Journal of Manufacturing Processes*, 9 N°1:23–34, 2007.
 - [33] J. W. SUTHERLAND, V. N. KULUR et N. C. KING : An experimental investigation of air quality in wet and dry turning. *Annals of the CIRP*, 49/7:61–64, 2000.
 - [34] V. SONGMENE, B. BALOUT et J. MASOUNAVE : Clean machining : Experimental investigation on dust formation- part ii : Influence of machining strategies and drill condition. *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*, 14 N°1:17–33, 2008.
 - [35] J. Paulo DAVIM : Diamond tool performance in machining metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 128:100–105, 2002.
 - [36] G.A. CHADWICK et P.J. HEATH : Détermination of properties of sic reinforced aluminium metal matrix composites by ultrasonic techniques. BNF Metals Technologie Center 7th international conference. 1989.
 - [37] Saber MEZGHANI : *Approches multi-échelles de caractérisation tridimensionnelle des surfaces, Applications aux procédés d'usinage*. Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, 2005.

- [38] Cédric BRÉLUZEAU, Alain BOSSEBOEUF et Sylvain PETITGRAND : Revue des méthodes de démodulation de phase pour la microscopie interférométrique et développements récents. Institut d'Electronique Fondamentale Paris XI / Fogale Nanotech Nîmes.
- [39] Raphaël MOULART : *Développement et mise en oeuvre d'une méthode de mesure de champs de déformation à l'échelle micrométrique*. Thèse de doctorat, Arts et Métiers Paristech, 2007.
- [40] Sandrine BRUNET : *Influence des contraintes résiduelles induites par usinage sur la tenue en fatigue des matériaux métalliques aéronautiques*. Thèse de doctorat, Arts et Métiers Paristech, ENSAM de Paris, 1991.
- [41] M.C. SHAW : *Metal Cutting Principles*. Clarendon Press, 1984. Oxford.
- [42] Mohamed El MANSORI, Laurence FOUILLAND-PAILLÉ et Fabrice PIERRON : Usinabilité à grande vitesse et à sec des couches du rechargement base-nickel par soudage d'outillage à chaud. *Mécanique et Industries*, 6:211–225, 2005.
- [43] D.E. ILIE, B.P. O'DONNELL, J.P. MCGARRY et P.E. MCHUGH : Computational modelling of the extrusion of an al-sic metal matrix composite using macroscale and microscale methods. *Journal of Strain Analysis*, 42:237–252, 2007.
- [44] Zhen Bing HOU et Ranga KOMANDURI : Modeling of thermomechanical shear instability in machining. *International journal of Mechanical Sciences*, 39/11: 1273–1314, 1997.
- [45] Roger DEVELAY : Traitements thermiques des alliages d'aluminium. *Techniques de l'Ingénieur*, M1290.
- [46] Bruno DUBOST et Pierre SAINFORT : Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium. *Techniques de l'Ingénieur*, M240.
- [47] H. SCHULZ, E. ABELE et A. SHAM : Material aspects of chip formation in hsc machining. Cirp, scientific and technical committees, 2001. STC C, 50/1/2001, p.45.
- [48] C.F. CHEUNG, K.C. CHAN, S. TO et W.B. LEE : Effect of reinforcement in ultra-precision machining of al6061/sic metal matrix composites. *Scripta Materialia*, 47:77–82, 2002.
- [49] T. H. C. CHILDS : A new visio-plasticity technique and a study of curly chip formation. *Internation Journal of Mechanical Sciences*, 13:373–387, 1971.

- [50] Hideaki KUDO : Some new slip-line solutions for two-dimensional steady-state machining. *International Journal of Mechanical Sciences*, 7:43–55, 1965.
- [51] P. DEWHURST : On the non-uniqueness of the machining process. *Proceeding of the Royal Society of London, Series A*, 360:587–610, 1978.
- [52] P.L.B. OXLEY et W.F. HASTINGS : Minimum work as a possible criterion for determining the frictional conditions at the tool / chip interface in machining. *Proceeding of the Royal Society of London, Series A*, 282:565–584, 1976.
- [53] S.DURANTE, G. RUTTELI et F. RABEZZANA : Aluminium based MMC machining with diamond coated cutting tools. *Surface and Coatings Technology*, 94-95:632–640, 1997.

ÉTUDE DU CHOIX STRUCTUREL D'OUTILS COUPANTS EN DIAMANT REVETU OU POLYCRISTALLIN MASSIF POUR L'USINAGE COMPETITIF ET ENVIRONNEMENTAL DES COMPOSITES A MATRICE METALLIQUE ET RENFORT CERAMIQUE PARTICULAIRE (CMMp Al/SiC)

RESUME: L'objectif de ce travail est d'étudier l'usinabilité des CMMp comme matériau de structure en substitution aux alliages réfractaires et de comprendre les mécanismes générateurs de poussière inhérents à leur usinage à sec. Les différents niveaux de chargement en céramique du CMM (5, 15, 25, 35 % de SiCp) ainsi que la variété d'outils PCD et des revêtements diamants nanostructurés étudiés, a permis d'évaluer dans un premier temps le choix structurel d'outillages en liaison avec la faisabilité industrielle de leur usage en usinage grande vitesse à sec d'un CMM Al/SiC.

L'étude de faisabilité et la préconisation d'outillages ont été effectuées en prenant en compte des critères énergétiques et de qualité structurelle et environnementale. Les modes d'endommagement ainsi que les performances d'outils coupants ont été observés et analysés lors d'essais d'usure accélérée et de durabilité. La présence d'une usure adhésive suivie d'un mode abrasif de consommation d'interface accroît l'importance de la structure de l'outil (homogénéité, multiplicité des interfaces ...).

L'émission de poussière est enfin analysée en fonction de la modification structurale du matériau composite (traitement thermique) et du taux de renfort. La durabilité environnementale de son usinage est aussi évaluée par une analyse de la durée de vie des outils coupants. Le processus de génération de poussière est fortement lié au comportement des outils, et à la prédominance des phénomènes de friction qui prennent naissance à l'interface outil / copeau.

Mots-clés: *outils diamants, émission de poussière, PCD, CVD.*

STUDY OF THE STRUCTURAL CHOICE OF CUTTING TOOLS COATED WITH DIAMOND OR POLYCRYSTALLINE SOLID FOR COMPETITIVE AND ENVIRONMENTAL MACHINING OF METAL MATRIX COMPOSITES WITH CERAMIC PARTICLE REINFORCEMENT (CMMP Al / SiC)

ABSTRACT: The objective of this work is to study the machinability of CMMP as a structural material in substitution for refractory alloys and to understand the mechanisms generating dust related to their dry machining. The different levels of reinforcement of CMM (5, 15, 25, 35% of SiCp) and the variety of PCD tools and nanostructured diamond coatings studied, assessed in a first step the structural choice of tools in relationship with the industrial feasibility of their use in high speed dry machining of CMM Al / SiC.

The feasibility study and recommendation tool were made taking into account different criteria: the energy, the structural and environmental quality. Damage modes and the performance of cutting tools have been observed and analyzed in tests of wear and durability. The presence of adhesive wear mode followed by an abrasive consumption interface increases the importance of the structure of the tool (homogeneity, multiple interfaces ...).

The dust emission is finally analyzed in terms of structural modification of the composite material (heat treatment) and the reinforcement rate. Environmental sustainability of its machining is also assessed by an analysis of tool life. The process of dust generation is strongly related to tools behaviour, and the predominance of friction phenomena that arise at the tool / chip interface.

Keywords: *Diamond tool, Dust emission, PCD, CVD*

