



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Université Toulouse III - Paul Sabatier*  
Discipline ou spécialité : *Génie Mécanique*

---

Présentée et soutenue par *Rami MOHAMMAD*  
Le *11/02/2011*

**Titre :**

*Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage.*

---

**JURY**

<i>SAMPER Serge</i>	<i>Président de jury et Rapporteur</i>
<i>CAHUC Olivier</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>RUBIO Walter</i>	<i>Examineur</i>
<i>BORDREUIL Cyril</i>	<i>Examineur</i>
<i>SEGONDS Stéphane</i>	<i>Examineur</i>
<i>MONIES Frédéric</i>	<i>Examineur</i>

---

**Ecole doctorale :** *Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés*

**Unité de recherche :** *Institut Clémant Ader*  
**Directeur(s) de Thèse :** *RUBIO Walter et SEGONDS Stéphane*  
**Rapporteurs :** *CAHUC Olivier et SAMPER Serge*

Étude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette.

Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage

*Présentée et soutenue par* **RAMI MOHAMMAD**

*Le 11 Février 2011 à l'université de Paul Sabatier - Toulouse*

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Enjeux et problématique de l'usinage à sec</b>	<b>1</b>
1.1	Role de la lubrification : . . . . .	1
1.1.1	L'évacuation des copeaux : . . . . .	1
1.1.2	Refroidissement de la zone de coupe : . . . . .	2
1.1.3	Diminution du frottement : . . . . .	2
1.2	Coût de la lubrification : . . . . .	3
1.3	Classification du lubrifiant : . . . . .	4
1.4	Problématique : . . . . .	4
1.4.1	Problème de santé des personnes : . . . . .	4
1.4.2	Problème d'environnement : . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Etat de l'art</b>	<b>7</b>
2.1	Phénomène de coupe : . . . . .	7
2.1.1	Opération d'usinage : . . . . .	7
2.1.2	Zones de coupe : . . . . .	9
2.2	Matériaux des outils de coupe : . . . . .	10
2.3	Géométrie des outils de coupe : . . . . .	11
2.3.1	Les angles de coupe : . . . . .	11
2.3.2	L'acuité d'arête : . . . . .	13
2.3.3	Le brise-copeaux : . . . . .	15
2.4	Les revêtements et les procédés de fabrication : . . . . .	16
2.4.1	Le dépôt CVD (Chemical Vapour Deposition) : . . . . .	17
2.4.2	Le dépôt PVD (Physical Vapour Deposition) : . . . . .	18

2.5	Action mécanique et formation du copeau : . . . . .	19
2.5.1	Formation du copeau : . . . . .	19
2.5.2	Ecoulement du copeau lors de l'usinage : . . . . .	21
2.6	Mécanismes d'usure et durée de vie : . . . . .	22
2.6.1	Les phénomènes d'usure : . . . . .	23
2.6.2	Les modèles d'usure : . . . . .	25
2.6.3	Les modèles mathématiques d'usure (Durée de vie) : . . . . .	28
2.7	Phénomènes du collage : . . . . .	30
2.7.1	Les conditions d'apparition : . . . . .	30
2.7.2	L'arête rapportée (BUE) et la couche adhérente (BUL) : . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Contexte d'usinage</b>	<b>37</b>
3.1	Les matériaux usinés . . . . .	37
3.2	La machine de tournage . . . . .	39
3.3	Dispositifs de mesure . . . . .	40
3.3.1	Le profilomètre . . . . .	40
3.3.2	Le projecteur de profil . . . . .	42
3.3.3	Le microscope électronique à balayage (MEB) . . . . .	43
3.4	Description des outils et porte-outils . . . . .	44
3.4.1	Les outils utilisés . . . . .	44
3.4.2	Les acuités d'arête des plaquettes . . . . .	47
3.4.3	Les porte-outils . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Usinage en ébauche</b>	<b>50</b>
4.1	Usinage avec une puissance de 10 kW . . . . .	50
4.1.1	Présentation des essais . . . . .	50
4.1.2	Le collage de la matière usinée . . . . .	54
4.1.3	L'usure des plaquettes . . . . .	61
4.1.4	L'état de surface des pièces usinées . . . . .	63
4.1.5	Cohérence avec le modèle théorique . . . . .	65

4.1.6	Formation des copeaux . . . . .	66
4.1.7	Ecoulement des copeaux . . . . .	67
4.1.8	Conclusion . . . . .	69
4.2	Usinage avec une puissance de 2 kW . . . . .	70
4.2.1	Présentation des essais . . . . .	70
4.2.2	Le collage de la matière usinée . . . . .	73
4.2.3	L'usure des plaquettes . . . . .	77
4.2.4	L'état de surface des pièces usinées . . . . .	80
4.2.5	Formation et écoulement des copeaux . . . . .	82
4.2.6	Conclusion . . . . .	84
4.3	Conclusion . . . . .	85
<b>5</b>	<b>Usinage en finition</b>	<b>88</b>
5.1	Usinage à une vitesse $V_c = 1200$ m/min . . . . .	88
5.1.1	Présentation des essais . . . . .	88
5.1.2	Collage de la matière usinée . . . . .	89
5.1.3	L'usure des plaquettes . . . . .	93
5.1.4	Etat de surface des pièces usinées . . . . .	95
5.1.5	Formation des copeaux . . . . .	97
5.1.6	Conclusion . . . . .	98
5.2	Usinage à une vitesse $V_c = 800$ m/min . . . . .	99
5.2.1	Présentation des essais . . . . .	99
5.2.2	Le collage de la matière usinée . . . . .	101
5.2.3	L'usure des plaquettes . . . . .	105
5.2.4	L'état de surface des pièces usinées . . . . .	109
5.2.5	Formation des copeaux . . . . .	111
5.2.6	Conclusion . . . . .	112
5.3	Usinage à une vitesse $V_c = 400$ m/min . . . . .	113
5.3.1	Présentation des essais . . . . .	113
5.3.2	Le collage de la matière usinée . . . . .	114

5.3.3	L'usure des plaquettes . . . . .	118
5.3.4	La qualité des pièces usinées . . . . .	121
5.3.5	Formation des copeaux . . . . .	123
5.3.6	Conclusion . . . . .	124
5.4	Conclusion . . . . .	125
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>127</b>
6.1	Bilan général . . . . .	127
6.2	Perspectives . . . . .	129
<b>7</b>	<b>Annexe</b>	<b>144</b>
7.1	Calcul . . . . .	144
7.2	Faces de coupe des plaquettes . . . . .	154
7.3	Faces de dépouille des plaquettes . . . . .	162
7.4	Forme des copeaux . . . . .	170



# Remerciement

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur Serge SAMPER<sup>1</sup> et Monsieur Olivier CAHUC<sup>2</sup> pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail, et pour le temps passé à la lecture de mon mémoire.

Je tiens à saluer ici les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail de thèse de doctorat.

Mes remerciements s'adressent aux personnes qui m'ont proposé le sujet de thèse et qui m'ont encadré tout au long de ces années d'étude : M. Walter RUBIO et M. Stéphan SEGONDS. Je leur remercie de fond de cœur pour leur soutien et pour leur conseils durant toutes ces années de thèse. Je suis ravi de vous avoir connu.

Je remercie M. Frédérique Monies (Maître de conférences à l'université de Paul Sabatier) pour son soutien et sa présence pendant toutes ces années de thèse. Je remercie également M. Cyril Bordreuil (Maître de conférences à l'université de Montpellier) qui a accepté d'être membre de jury.

Je tiens à remercier tous les personnels de LGMT (Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse), Guillaume COHEN, Patrick GILLES, Mousseigne MICHEL, Jean-Jacques BARRAU, Yann LANDON, Michel SoUDRE, Johana SENATORE, Jean-Max REDONNET, Nicolas BONNEAU, Steven MARGUET.

Ma gratitude s'adresse aussi à mes collègues de bureau, M. Xavier PESSOLES et Pierre RAHME. Tout d'abord pour leur accueil, pour leurs conseils. De même, je remercie mes nouveaux collègues du bureau, Mlle. Laure JAEGER, Mlle. Isabel DANIS, M. Kamel MOUSSAOUI, M. Laurent BENEZECH.

Je remercie le gouvernement syrien pour la confiance qui m'a offert pendant ma présence en France et pour le financement de mes études tout au long de 5 ans.

Je tien à remercier ma petite femme (Samira Rosani EBRAHIM BERRIOS) pour son soutien moral et son amour pendant toutes ces années d'étude.

Je clos enfin ces remerciements en dédiant cette thèse de doctorat à mes parents en Syrie, je ne pourrais jamais oublier le soutien et l'aide des personnes de ma merveilleuse famille (Mon père, ma mère, mes frères, ma seule soeur) et également à tous mes proches à *ALZOUTINI et TARTOUS*.

---

1. Serge SAMPER : Professeur des universités à l'université de Savoie.

2. Olivier CAHUC : Professeur des universités à l'université de Bordeaux 1.





# Introduction Générale

L'objectif des travaux de recherche en fabrication mécanique a toujours été de trouver des solutions pour améliorer la productivité et la qualité des pièces usinées : faire le plus de pièces possibles, le plus rapidement possible, en réduisant au mieux les coûts et les défauts de production. Le but d'une opération d'usinage est d'enlever la matière sous forme des copeaux pour produire les pièces désirées. Les procédés d'usinage par enlèvement de matière sont nombreux, comme le fraisage, le perçage, ou le tournage. L'opération de tournage sur des machines à commandes numériques permet d'usiner des pièces cylindriques, cubiques ou excentrées en fonction de la cinématique de la machine (troisième axe etc.). L'opération de fraisage (coupe discontinue) est utilisée pour usiner des pièces dont les formes ne sont pas de révolution. Nos travaux ont pour but de déterminer les paramètres influents sur les critères de durée de vie d'outil et d'état de surface de pièce dans le cadre d'usinage à sec d'alliages d'aluminium. L'étude présentée traite donc du cas du tournage, en coupe continue, afin de cerner l'influence des paramètres dans un contexte plus simple que celui du fraisage où la coupe est discontinue.

L'interface outil – copeau est un lieu d'interactions complexes entre phénomènes mécaniques, thermiques, et physico-chimique. La surface de l'outil en contact avec le copeau subit diverses formes d'usures qui sont les résultats de mécanismes tels que l'adhésion, l'abrasion, et la diffusion. La qualité des pièces produites dépend largement des conditions de coupe, et cette qualité est un paramètre important lors de la production des pièces mécaniques. Le fluide de coupe aussi est un paramètre important puisqu'il permet de limiter l'élévation de la température dans les zones de coupe et d'établir la présence d'un film fluide entre les différentes surfaces. Cependant, dans le souci de protection de l'environnement et de la santé des personnels, la tendance actuelle est de limiter et même de supprimer l'utilisation des fluides de coupe.

Les alliages d'aluminium sont des métaux très répandus dans plusieurs domaines industriels comme dans l'aéronautique et l'armement. Dans l'industrie des pompes, la santé matière (micro dureté, fissuration,..) est un critère primordial qu'il serait intéressant d'associer à ces critères. D'autre part, l'état de surface n'étant pas associé à un critère fonctionnel, il a été usagé du Ra qui ne donne pas d'indication pertinence en tribologie ou en performance fluidique. L'alliage d'aluminium est un matériau utilisable dans la fabrication d'une pompe à eau et notamment l'alliage d'aluminium A 201, A356 et

A 713. Les avantages de ces métaux sont :

- Bonne résistance à la corrosion.
- Caractéristiques mécaniques intéressantes.
- Durcissement important par traitement thermique.
- Bas point de fusion (658 °C).

Les inconvénients de ces métaux sont :

- Faible résistance à l'usure et à la fatigue.
- L'élasticité peut être une gêne dans l'usinage.

Dans notre étude nous usinerons à sec et avec lubrification deux types d'alliages d'aluminium AA 2017 T4 et AA 7075 T651. Pour cela, les fournisseurs d'outils proposent des plaquettes avec des géométries spécifiques à l'usinage des alliages d'aluminium (un angle de coupe important et une nuance adaptée). Les propositions diffèrent toutefois en terme de géométrie, de brise-copeaux et de finition de surface de coupe (poli miroir, brute etc.). Nous allons chercher à déterminer l'influence de chacun de ces paramètres sur le déroulement de la coupe.

L'objectif des travaux présentés dans ce document est d'analyser le déroulement de la coupe lors du tournage à sec des alliages d'aluminium afin d'en comprendre les mécanismes et ainsi mieux cerner les domaines d'application. Dans notre étude, nous utiliserons des plaquettes polies et non polies afin d'analyser l'influence du polissage sur le phénomène du collage sur la face de coupe. Le nombre total de plaquettes utilisées dans cette étude est de 21 (6 plaquettes d'un rayon de 0.8 mm durant l'usinage en ébauche et 15 plaquettes d'un rayon de 0.4 mm durant l'usinage en finition). Nous étudierons les phénomènes de collage de la matière usinée et les phénomènes d'usure des outils de coupe durant l'usinage des alliages d'aluminium AA 2017 T4 et AA 7075 T651.

Le déroulement de la coupe en phase d'ébauche et de finition est sensiblement différent. L'opération d'ébauche sollicite les plaquettes et élève la température dans la zone de formation du copeau. Alors que l'état de surface importe peu, et c'est l'inverse lors des usinages de finition. Nous allons donc étudier l'influence de ces conditions de coupe. L'opération en ébauche sera faite avec une profondeur de passe de 2 mm et une avance de 0.5 mm/tr. Deux vitesses de coupe de 600 et 100 m/min seront testées. L'opération de finition sera faite avec une profondeur de passe de 1 mm et une avance de 0.24 mm/tr. Nous allons tester trois vitesses de coupe de 1200, 800, et 400 m/min.

D'un point de vue de l'état de surface, nous allons contrôler la rugosité de toutes les pièces usinées (critères  $Ra$  et  $Rt$ ) pour comprendre l'influence du collage sur cet état de surface. Une modélisation théorique de l'état de surface est présentée et confrontée aux résultats expérimentaux. La morphologie des copeaux obtenus lors du tournage est analysée, et leur écoulement sur la face de coupe sera étudié puis modélisé. Enfin une conclusion sur les possibilités et les limites du tournage à sec des alliages d'aluminium est présentée.

$V_c$	Vitesse de coupe	m/min
$N$	Fréquence de rotation	tr/min
$f$	Avance	mm/tr
$V_f$	Vitesse d'avance	mm/min
$a_p$	Profondeur de passe	mm
$\phi$	Diamètre	mm
$L$	Longueur	mm
$R\epsilon$	Rayon de bec d'outil	mm
$K_r$	Angle de direction d'arête de l'outil	degré
$K_r'$	Angle de direction d'arête secondaire de l'outil	degré
$P$	Puissance	Watt
$T$	Température	°C
$T_f$	Température de fusion	°C
BUE	(Built-up-edge) Arête rapportée	$\mu\text{m}$
BUL	(Built-up-layer) Couche adhérente	$\mu\text{m}$
Dureté	Dureté	HRC, HB
VBB	Usure de l'outil	mm
VBC	Usure de rayon de bec	mm
$K_t$	Usure en cratère	mm
VBN	Usure en entaille	mm
$T_c$	Temps de coupe	min
$R_a$	Rugosité arithmétique	$\mu\text{m}$
$R_t$	Rugosité totale	$\mu\text{m}$
$K_c$	Pression spécifique de coupe	$\text{N}/\text{mm}^2$

Table des notations.

---



# Chapitre 1

## Enjeux et problématique de l'usinage à sec

L'usinage à sec offre l'opportunité de faire de grandes économies et la durée de vie des outils peut en plus être prolongée, cependant la température dans la zone du contact outil/copeau est plus élevée qu'en usinage lubrifié. La plaquette de coupe joue un rôle dans le processus de transfert de la chaleur en assurant la formation des copeaux. Ces copeaux peuvent évacuer jusqu'à quatre-vingt cinq pour cent de la chaleur générée par l'action de coupe [TRA07]. La solution consistant à utiliser du lubrifiant n'est pas toujours à privilégier car dans certains cas elle améliore le déroulement du copeau, elle engendre des opérations de dégraissage et de recyclage. Il génère un surcoût d'utilisation. L'un des buts de l'étude présentée est de quantifier les apports de la lubrification dans le cadre du tournage d'alliage d'aluminium AA 2017 et AA 7075.

### 1.1 Role de la lubrification :

La consommation d'huiles solubles utilisées dans le travail des métaux est de plusieurs milliers de tonnes par an. La lubrification ou le graissage est un ensemble de techniques permettant de réduire le frottement, l'usure entre deux pièces en contact et en mouvement l'une par rapport à l'autre. Elle permet souvent d'évacuer une partie de l'énergie thermique engendrée par ce frottement, ainsi que d'éviter la corrosion [AGGR06].

#### 1.1.1 L'évacuation des copeaux :

Le copeau est la partie de matière qui se détache lors de la coupe dans un procédé d'usinage. Les copeaux obtenus sont de différentes formes (continus [TAN09] ou segmentés), le copeau continu est formé dans un état de déformation plastique stationnaire. Mais le copeau discontinu (segmenté) est formé dans un état de déformation plastique non stationnaire. Pour garantir une bonne évacuation du copeau il faut toujours respecter le diagramme brise-copeaux préconisé par le fabricant de la plaquette.

(figure 1.1). Des recherches ont été faites pour analyser le mode d'évacuation des copeaux [PMD09], [AMB02], et [ZHO01] afin de limiter leur influence dans la zone de coupe et pour faciliter leur récupération.

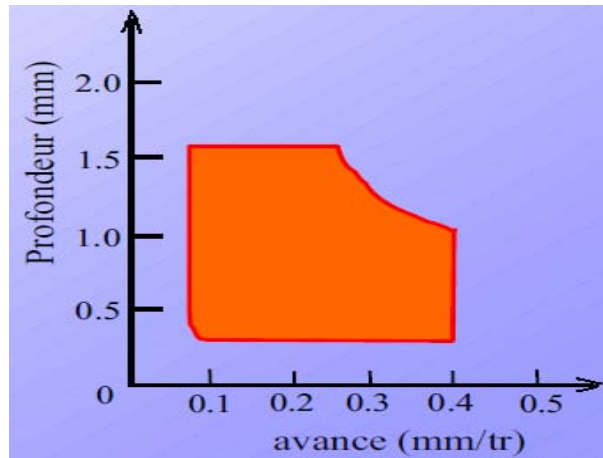


FIGURE 1.1 – Exemple de diagramme brise-Copeaux.

La prédiction de la géométrie du copeau formé dépend de l'influence de la géométrie de l'outil sur la déformation plastique [OKS08]. Il est indispensable de faire évacuer les copeaux le plus vite possible car ils contiennent 80 % de la chaleur dégagée dans la zone de coupe [COH09].

### 1.1.2 Refroidissement de la zone de coupe :

La lubrification joue un rôle sur le refroidissement de la zone de contact outil / copeau et la pièce à usiner et diminue aussi les forces de coupe [CKK<sup>+</sup>09]. Elle diminue les risques de surchauffe entre l'outil et la pièce. Une augmentation trop importante de température sur un outil peut dégrader plus rapidement son revêtement par fatigue thermique ou diminuer sa dureté [LAF08]. La lubrification limite légèrement le phénomène de plastification produit par la combinaison de température et de charge [BRO05].

### 1.1.3 Diminution du frottement :

La zone du frottement entre la matière usinée et l'outil de coupe est la zone (2) (figure 1.2) là où le copeau se forme. Il y a aussi un frottement entre l'outil de coupe et la pièce usinée dans la zone (3), ce frottement dans la zone (3) provoque une usure d'outil. Le fluide de coupe diminue les coefficients de frottement et d'adhérence aux interfaces, et diminue les efforts de coupe durant l'usinage des métaux [SM01].

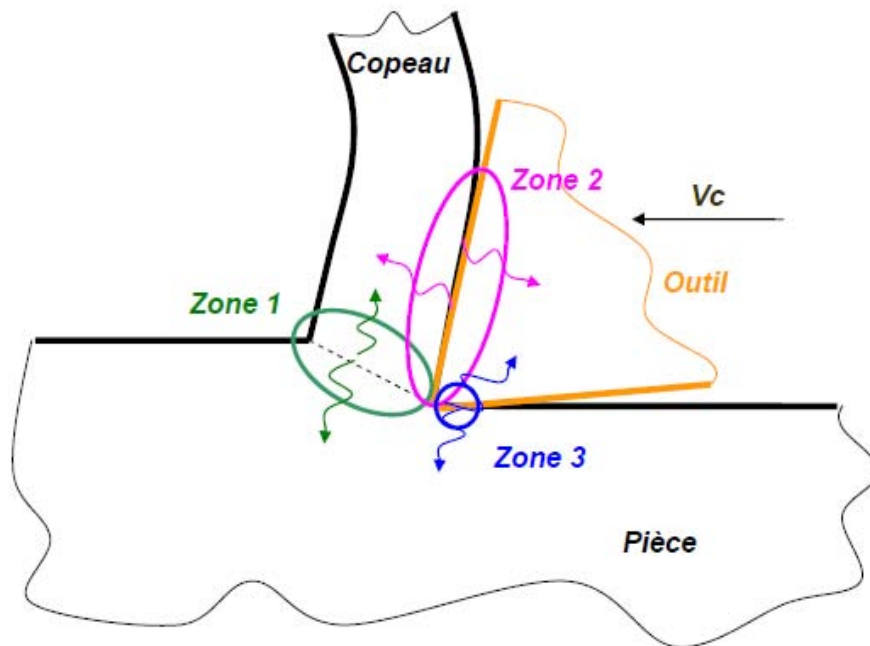


FIGURE 1.2 – Zones de coupe.

## 1.2 Coût de la lubrification :

L'élimination du fluide de coupe présente un intérêt financier par l'élimination des coûts des huiles et de retraitement et un intérêt environnemental. Le problème de la suppression ou la réduction de ces fluides de coupe est de maintenir la qualité des pièces usinées. La lubrification a un coût non négligeable (16 % du total des frais [COL96], [KE97]) qui résulte des prix :

- de l'huile utilisée, de son stockage et de son transport.
- de l'eau additionnée (huile soluble).
- de la dépollution des copeaux car plusieurs constituants de l'huile sont des polluants.
- de l'entretien (contrôle des niveaux et suivi de consommation).
- des équipements : Pompes, jets, dispositifs de pulvérisation.

La réduction de ce lubrifiant a des avantages économiques sur le cycle de vie [DKA06]. Par exemple, la consommation annuelle par réservoir de machine d'un lubrifiant concentré est de 2.5 litres. L'huile est diluée à environ 5.5 % et est distribuée par un réseau centralisé. Ce lubrifiant coûte autour de 3 euros / L. Ce prix augmente donc le prix total d'usinage dans le cas d'utilisation du lubrifiant.



### 1.3 Classification du lubrifiant :

La norme ISO 6743-7 fournit une classification des fluides de coupe selon leur constitution. Les différents lubrifiants sont :

- Huile minérale : plus stable et qui ne s'oxyde pas à l'air, son pouvoir mouillant et lubrifiant est amélioré par l'incorporation d'une petite quantité de soufre (1 à 3%) ou de graphite.
- Huile végétale : utilisée quelquefois comme huile de coupe (colza, lin), mais devient rance à l'usage.
- Huile animale : comme le suif qui est un produit résiduel obtenu par la fonte de la graisse de mouton ou de bœuf.
- Huile de coupe : Elle doit posséder à la fois un pouvoir mouillant élevé et un pouvoir lubrifiant qui assure, malgré des pressions importantes, l'existence d'une pellicule d'huile entre le copeau et la surface d'attaque de l'outil.
- Pétrole lampant : permet l'usinage aisé de certaines matières comme l'aluminium qui auraient tendance à coller sur la face d'attaque de l'outil.

Depuis quelques années apparaissent des lubrifiants d'une nouvelle génération à base de nano particules qui diminuent le coefficient du frottement de 20%.

Les huiles se distinguent en deux familles, les huiles entières : utilisées pour leurs caractéristiques lubrifiantes, et les fluides réfrigérants et lubrifiants, réalisés en mélangeant à l'eau, qui sert de réfrigérant, 5 à 10% d'huile soluble qui sert de lubrifiant. Cette huile soluble est un mélange d'huile minérale, d'un agent d'émulsion qui assure la stabilité huile/eau, et un agent désinfectant (phénol) pour protéger l'ouvrier des allergies à l'huile (boutons). L'emploi de l'huile soluble est suffisant lorsque la pression copeau / outil n'est pas trop forte (tournage, fraisage, sciage, perçage).

Le fluide cryogénique (à base d'azote liquide) est une autre technique des fluides de coupe utilisée pour le refroidissement de la zone de coupe [VPC07a]. On trouve aussi le réchauffage des matériaux durs par un faisceau laser qui permet de diminuer leurs niveaux de caractéristiques mécaniques [APS06], mais les outils s'usent très vite.

### 1.4 Problématique :

#### 1.4.1 Problème de santé des personnes :

L'utilisation des fluides de coupe pose beaucoup de problèmes pour la santé des personnes qui sont en contact avec ces fluides dans le lieu de travail. Les différentes maladies liées à l'utilisation de ces fluides de coupe sont des maladies cutanées et respiratoires liées à la manipulation des huiles. Il est fortement recommandé d'éliminer ou de réduire l'utilisation de ces fluides pour assurer une bonne santé des personnes. Les huiles entières ou fluides aqueux, sont potentiellement en contact avec les

mains et les avant bras des opérateurs. Les études menées par l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) montrent que ces parties du corps humain sont les plus exposées aux atteintes cutanées. Le remplacement progressif des huiles minérales par les fluides synthétiques ou semi synthétiques a inversé les pathologies, avec actuellement une prépondérance des dermatites eczématiformes et irritatives, qui sont d'ailleurs le plus souvent liées à l'adjonction de substances afin d'augmenter les capacités intrinsèques du fluide [GFD<sup>+</sup>04], [FF01]. La survenue d'une dermatose professionnelle induite par les fluides de coupe est le plus souvent de pronostic très réservé à la fois sur les plans professionnel et médical [GT07]. Les dermatites de contact constituent la grande majorité des maladies professionnelles d'origine dermatologique. Leur incidence est estimée entre 0,5 et 0,7 cas pour 1 000 travailleurs et elles affectent 1 à 2 des salariés selon Goldin [GFD<sup>+</sup>04]. Parmi elles, ce sont les dermatites eczématiformes qui sont majoritaires. Selon les chercheurs, les dermatoses observées sont réparties en 26 cas d'eczéma de contact. Les dermatites issues de la manipulation des fluides de coupe sont dans la majorité des cas de très mauvais pronostics et nécessitent la mise en place de moyens de prévention individuelle et collective rigoureux permettant ainsi la réduction. Il existe au CHRU-Lille deux types de consultations utiles pour le diagnostic et pour la prise en charge médicale ou médico-légale de ces dermatoses d'origine professionnelle. D'autres études [KSM07] sont aussi en cours pour mettre en évidence la participation des "poussières" dans l'apparition de maladies liées au travail des métaux. L'étude de la formation de micro particules métalliques est étudiée. Suivant les matériaux et les conditions de coupe nous pouvons observer des évolutions, tant sur le volume, que sur la dimension de ces poussières. Durant l'usinage la température augmente dans la zone de coupe et devient importante pour générer un certain nombre d'aérosols par la gazéification du fluide de coupe [CAU05]. Nous appelons aérosol toute particule liquide ou solide qui reste en suspension dans l'air et qui a une vitesse de chute qui n'excède pas 0.25m/s (norme NFX 44-001). L'INRS [CAU05] propose plusieurs voies pour éviter les différentes sources d'infections cutanées et respiratoires :

- Utiliser des produits où tous les irritants et allergènes potentiels sont inventoriés (fiche sécurité complète à jour).
- Suivre la composition, la concentration, le pH des fluides de coupe en cours d'utilisation.
- Former et informer le personnel quant à la manipulation de ces produits.
- Centraliser et verrouiller l'approvisionnement en fluide de coupe au pied des machines pour mieux contrôler les caractéristiques des fluides dans les bacs.

#### **1.4.2 Problème d'environnement :**

L'élimination des fluides de coupe est souhaitable pour éviter les pollutions réellement ou potentiellement générées par ces produits. La production d'huiles minérales est réalisée dans les raffineries très polluantes. Le stockage de ces huiles nécessite des installations très coûteuses pour assurer un niveau de sécurité acceptable (feu, gaz, fuite). Un nettoyage/dégraissage efficace des pièces usinées est essentiel dans toutes les industries de transformation des métaux (après usinage ou déformation à

froid ou à chaud, avant et après traitements thermiques, avant soudage ou brasage/diffusion ...). Il faut nettoyer les pièces métalliques afin d'éliminer les huiles et graisses présentes sur leur surface. Malgré le développement et la mise sur le marché de nouveaux produits de nettoyage, les solvants chlorés fournis dans des systèmes en boucle fermée constituent généralement la meilleure solution. Outre leur supériorité technique, ils possèdent, lorsqu'ils sont utilisés en système fermé, des atouts uniques en termes de sécurité des conditions de travail, de protection de l'environnement et de rentabilité. Ces solvants offrent des avantages et propriétés spécifiques pour les applications de nettoyage/dégraissage des métaux :

- Ininflammabilité.
- Compatibilité avec de nombreux contaminants tels que les huiles ou les copeaux et poussières métalliques.

Cependant, le traitement de ces solvants usagés reste un point très problématique pour l'avenir de cette filière. La famille de Normes ISO 14001 relative à la mise en place d'un système de management environnemental, préconise la prise en compte de toutes les phases du cycle de vie d'un produit afin d'en réduire leur impact potentiel sur l'environnement. Il est ainsi recommandé de confiner les lieux de stockage et les machines utilisant les fluides de coupe afin de limiter la pollution des sols et de l'eau. L'application du fluide de coupe conventionnel crée des problèmes techno-environnementaux sévères [XA09].

L'usinage avec fluide de coupe pose des problèmes aussi bien économiques, techniques, environnementaux que pour la santé des personnes. Le travail à sec peut répondre en partie à ces problèmes en respectant certaines limitations, le travail présenté vise à déterminer plus précisément les possibilités et les limites de l'usinage à sec dans le cas du tournage des alliages AA 2017 et AA 7075.

# Chapitre 2

## Etat de l'art

Les fournisseurs d'outils de coupe proposent dans le marché des outils avec des géométries différentes et des prix différents. Les plaquettes polies sont les moins chères dans le marché. Par contre, les plaquettes revêtues sont plus chères d'environ 4 à 5 fois que les plaquettes polies. L'utilisation de différentes géométries des plaquettes (polies ou non polies, revêtues ou non revêtues) pendant l'usinage des alliages d'aluminium permet de comparer l'influence de ces différentes géométries sur le déroulement de la coupe (collage, usure, qualité des pièces finies) et de préconiser une géométrie adapté à l'usinage de ces matériaux.

### 2.1 Phénomène de coupe :

#### 2.1.1 Opération d'usinage :

L'usinage est une famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques. Le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de manière à donner à la pièce brute la forme voulue, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision. Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (vitesse de coupe  $V_c$ ) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance  $V_f$  eq 2.2). La fréquence de rotation de la broche est donnée par l'équation suivante. (eq 2.1).

$$N = \frac{V_c}{\pi \cdot \phi} \quad (2.1)$$

$$V_f = N \cdot f \quad (2.2)$$

En tournage, le chariotage (figure 2.1) est une opération consistant à usiner sur un tour un cylindre d'un certain diamètre par déplacement de l'outil de coupe suivant un axe parallèle à l'axe de rotation de la pièce  $Z$ . Les paramètres de coupe sont l'avance ( $f$ ), la profondeur de passe ( $a_p$ ) et la fréquence de rotation ( $N$ ).

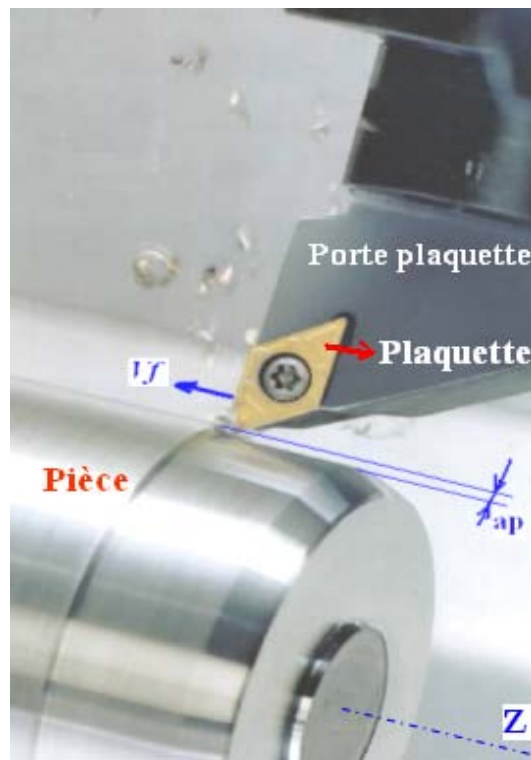


FIGURE 2.1 – Opération de chariotage en tournage [COR05].

Une plaquette de coupe moderne est composée de deux parties distinctes afin d'augmenter les performances et la durée de vie de l'outil :

- Un substrat qui a pour rôle d'encaisser les efforts mécaniques et les contraintes thermiques de l'usinage (haute résistance à la pression, à la flexion et ténacité suffisante).
- Un revêtement qui a pour fonction d'améliorer la résistance à l'usure, l'inertie chimique et thermique. Ainsi que le glissement du copeau sur l'outil pour son évacuation.

Dans notre étude nous allons utiliser des plaquettes non revêtues car les plaquettes revêtues ont des rayons d'acuité d'arête importants. Les grands rayons d'acuité d'arête produisent des pièces d'un mauvais état de surface et augmentent les vibrations.

Un outil est distingué par 3 faces (figure 2.2), la face de coupe et les faces de dépouilles principale et secondaire. Ces trois faces sont séparées par les arêtes tranchantes principales et secondaires.

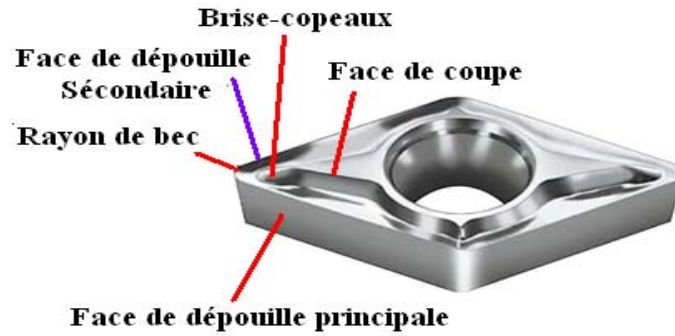


FIGURE 2.2 – Géométrie d'un outil de coupe [COR05].

### 2.1.2 Zones de coupe :

La compréhension du phénomène d'arrachement de la matière est nécessaire pour augmenter la qualité de la surface usinée. Connaître la forme et les propriétés du copeau est essentiel pour avoir des performances efficaces. Dans le cas de la coupe orthogonale, on ne prend en considération qu'une seule arête de coupe, simultanément perpendiculaire à la vitesse de coupe  $V_c$  et à la vitesse d'avance  $V_f$ . La formation de copeau se fait dans les zones de coupe (figure 1.2). Il convient de distinguer 3 zones où les phénomènes thermomécaniques se produisent et interagissent.

– La zone 1 ou de cisaillement primaire :

Elle provient du changement de direction d'écoulement de la matière ; cette zone est le siège de cisaillement et de taux de cisaillement intenses engendrant une forte élévation thermique due à la dissipation. Dans cette zone, l'écoulement du copeau passe de la vitesse de coupe  $V_c$  à la vitesse du copeau. La variation de direction d'écoulement du copeau provoque un phénomène de grande déformation très rapide car très localisé, ce qui engendre une très forte augmentation de la chaleur dans la zone située autour de ce plan de cisaillement. La phénoménologie de la formation du copeau fait intervenir un grand nombre de paramètres, tels que la rhéologie du matériau usiné, la nature du contact outil/matière et les différents paramètres d'usinage. Suivant ces différents paramètres, le cisaillement s'effectue de manière continue (copeau d'épaisseur constante et de microstructure homogène) ou de manière instable (copeau dentelé et de microstructure hétérogène, figure 2.3).

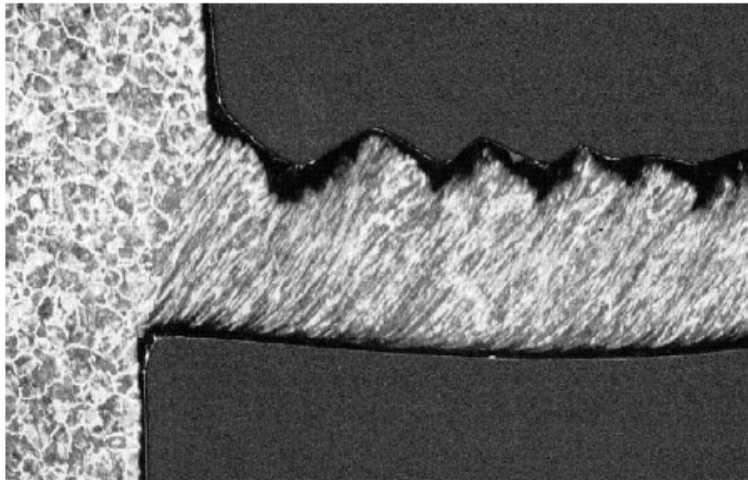


FIGURE 2.3 – Segmentation du copeau [PC09].

– La zone 2 ou de cisaillement secondaire :

Cette zone se situe à l'interface entre la face de coupe de l'outil et le copeau. Induite par le frottement du copeau sur l'outil ; cette zone est à la fois soumise à des forts taux de cisaillement et à une forte élévation de température engendrée par le frottement [FMSU07]. La déformation du matériau dans cette zone provoque une haute température [GBN05], [CNE07]. Cette zone à frottement génère une quantité de chaleur très importante (~ 20 à 30 % de la chaleur totale produite) selon [TRE88], ce flux de chaleur diffuse à la fois dans l'outil et dans le copeau. La température maximale est située à la fin du contact entre le copeau et la face de coupe, et peut produire un effet d'usure en cratère critique. A l'avant de cette zone il peut y avoir l'arête rapportée (BUE : Built-Up-Edge) qui se forme, cette arête rapportée provoque l'instabilité durant l'usinage [HK97].

– La zone 3 ou de cisaillement tertiaire :

C'est la zone où la surface de la pièce finie est réalisée. Le contact entre l'outil et la surface usinée peut provoquer des déformations plastiques dans la pièce. Les déformations dans cette zone sont moins intenses que dans les deux zones précédentes et elles dépendent de la forme de la pointe de l'outil. La qualité de la surface usinée dépend fortement des interactions entre la forme de l'outil, les efforts et la température dans cette zone.

## 2.2 Matériaux des outils de coupe :

Les matériaux des outils de coupe peuvent être regroupés dans trois catégories : les aciers rapides, les carbures cémentés, les cermets, le diamant fritté PCD, les céramiques, le CBN.

– Acier rapide :

Ce sont des aciers fortement alliés : carbone 0.7 à 1.6 % et tungstène ou molybdène qui caractérisent des familles différentes. D'autres éléments additifs viennent renforcer les propriétés de ces matériaux (Chromé Cr, Vanadium ou cobalt Co par exemple). Avec ces matériaux on obtient des duretés de l'ordre de 700 à 1000 HV. Ils sont beaucoup utilisés pour le perçage (80 % du marché), mais de moins en moins pour la production industrielle de pièces en tournage.

– Les carbures cémentés :

Sont des substrats obtenus par frittage de poudres métalliques sans fer. Ces matériaux sont souvent formés de carbure de tungstène Wc, de titane TiN ou de silicium Si pour les plus utilisés. Afin de lier les grains de carbure entre eux, nous utilisons des éléments métalliques comme le cobalt, qui allie sa ductilité à la dureté des carbures. Nous obtenons avec ces matériaux des outils présentant des duretés variables comprises entre 1250 et 1800 HV. Il existe un grand nombre de possibilité d'usinage avec ces matériaux. Ce sont les plaquettes proposées par les principaux fabricants d'outil dans le cas de l'usinage d'alliage d'aluminium.

– Les cermets :

Sont des carbures, des nitrures, des carbonitrures ou des borures liés par un métal ou un alliage ferreux. Les liants sont donc de plusieurs types (cobalt, nickel, nickel - fer, nickel – chrome, etc...). La dénomination « cermet » est peu utilisée dans l'industrie car souvent ils sont assimilés à des carbures cémentés. Nous obtenons avec ces matériaux des outils pouvant avoir des duretés de l'ordre de 1500 à 2000 HV. Leur dureté à chaud permet de faire des opérations d'usinage dans des conditions extrêmes (jusqu'à 1000°C), les cermets ont des applications très diverses (Tournage, Fraisage, etc.) et ont une très bonne résistance mécanique, une faible conductivité thermique et une bonne résistance à la diffusion et à l'usure. Ils sont donc souvent utilisés en tournage de semi – finition ou de finition des aciers. Leur grande dureté n'est toutefois pas utile dans le cadre de l'usinage des alliages d'aluminium.

## 2.3 Géométrie des outils de coupe :

La plaquette de coupe est la partie active dans une opération d'usinage. Les outils de coupe se caractérisent par leurs matériaux et par différents paramètres géométriques comme : les angles de coupe, l'acuité d'arête, le brise-copeaux, et le rayon de bec. La géométrie des outils est étudiée pour assurer une formation aisée des copeaux, offrir une arête de coupe robuste et fragmenter les copeaux en éléments d'une longueur acceptable.

### 2.3.1 Les angles de coupe :

Les angles de coupe sont repérés dans différents plans de projection. Dans le cas de l'outil en main, les principaux plans de projection sont les plans : Pf, Pp, Pr, Ps (figure 2.4). Les angles de coupe



(figure 2.5) sont :

- Angle de direction d'arête principale  $Kr$  (angle mesuré entre le plan Pf et ps).
- Angle d'inclinaison de l'arête de coupe  $\lambda_s$  (angle mesuré entre le plan Pr et l'arête de coupe).
- Angle de pointe de l'outil  $\varepsilon_r$  (angle mesuré entre le plan principal Ps et le plan secondaire Ps').
- Angle de direction d'arête secondaire  $Kr'$  (angle mesuré entre le plan Pf et le plan Pr).

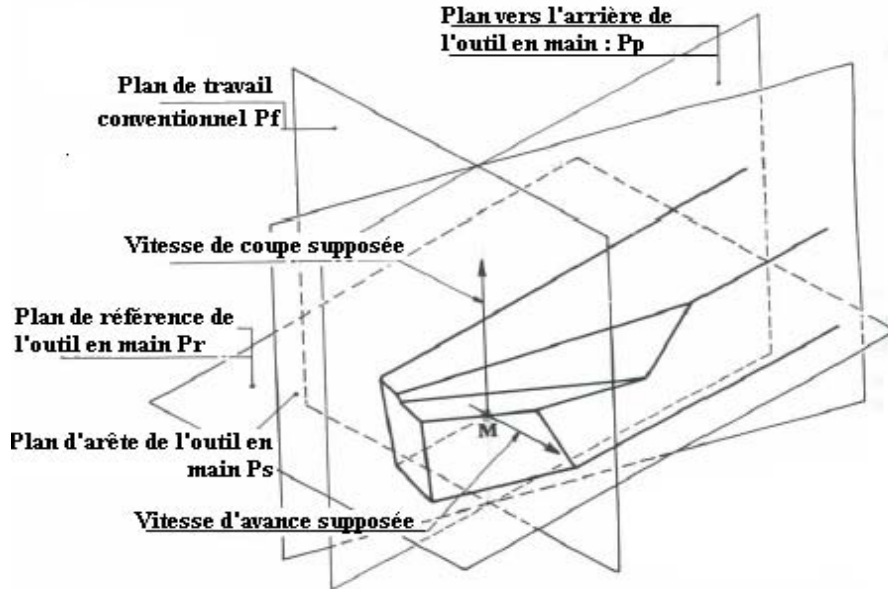


FIGURE 2.4 – Principaux plans de l'outil en main [GV95].

Les angles de direction d'arête principale  $Kr$ , de pointe de l'outil  $\varepsilon_r$ , et de direction d'arête secondaire  $Kr'$  sont liés par l'équation (eq 2.3).

$$Kr + \varepsilon_r + Kr' = 180^\circ \quad (2.3)$$

Les angles  $\gamma_f$  angle de coupe et  $\lambda_s$  angle d'inclinaison sont les éléments fondamentaux pour l'évacuation des copeaux [EBJ03]. La variation de l'angle de pointe de l'outil de coupe joue un rôle sur la durée de vie de l'outil et sur la segmentation des copeaux [BAVT10]. L'augmentation de l'angle de coupe  $\gamma_f$  diminue les forces de coupe et la température durant l'usinage [CCM<sup>+</sup>10]. L'angle en dépouille principale  $\alpha_f$  n'a aucune influence sur les forces de coupe [ASN<sup>+</sup>08]. Mais les angles en dépouille principale  $\alpha_f$ , et secondaire  $\alpha_f'$ , sont très importants et seront toujours minimisés pour augmenter la résistance mécanique des arêtes et du bec de l'outil [AST07]. Plus l'angle de dépouille d'une plaquette augmente plus la résistance de l'arête de coupe de cette plaquette aux forces mécanique diminue. L'angle de dépouille  $\alpha_f$  (figure 2.5) joue un rôle important sur l'usure de la face de dépouille, car plus cet angle est grand plus l'usure en dépouille diminue [BAR96].

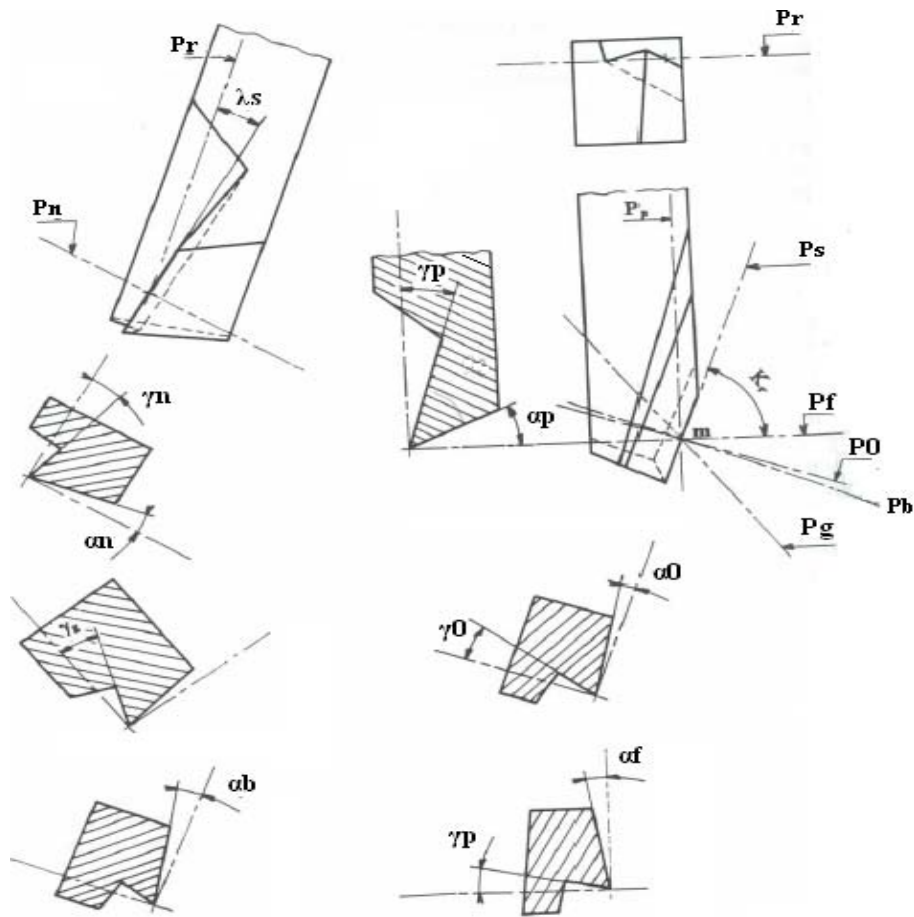


FIGURE 2.5 – Angles de coupe [GV95].

### 2.3.2 L'acuité d'arête :

L'acuité d'arête est la frontière entre les faces de coupe et les faces de dépouille, elle est particulièrement sensible. L'arête de coupe est en réalité une très petite surface cylindrique ou constituée d'un ou plusieurs plans (chanfreins). La prise en compte de cette acuité d'arête est importante car elle est la source de formation du copeau. Deux types d'acuité d'arête peuvent exister, l'arête chanfreinée et l'arête arrondie [KBK93]. Suivant la forme de cette acuité arrondie ( $R\beta$ ) (figure 2.6), chanfreinée (figure 2.7), ou les deux, la formation du copeau est très différente. L'acuité d'arête parfaite a un rayon nul  $R\beta = 0$ , plus un matériau est ductile (alliage d'aluminium) plus le rayon de l'acuité d'arête nécessaire au bon déroulement de la coupe doit être faible afin d'éviter l'apparition de l'arête rapportée ou de zone morte qui produit au final l'écaillage de la pièce. Il faut prévoir une géométrie combinant un arrondi suivi d'un chanfrein afin de créer une zone de compression suffisamment importante pour que la rupture du matériau usiné se produise de manière continue [RYJW04]. L'arête chanfreinée est caractérisée par la largeur de chanfrein  $b\gamma_n$  et par l'angle de chanfrein  $\gamma_n$  (figure 2.7). L'utilisation des outils chanfreinés (négatifs) durant l'usinage de AA 6061 augmente les forces de coupe. L'acuité arrondie diminue ces forces de coupe plus que l'acuité chanfreinée, [FW05], [ÖZ03], [CENE06].

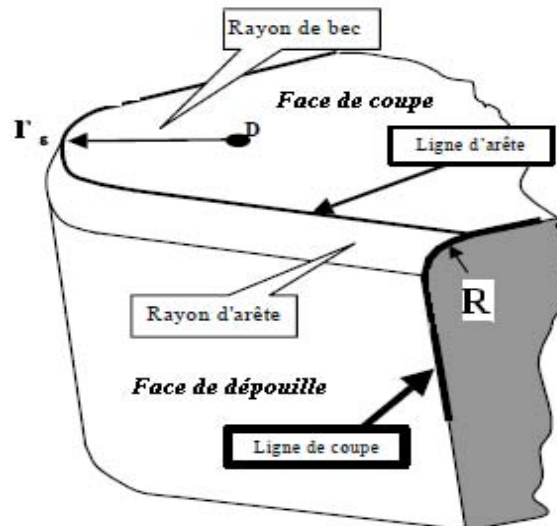


FIGURE 2.6 – Description géométrique de l'outil [ROPA02].

L'acuité des arêtes autorise un bon contrôle des états de surface et une longue durée de vie d'outil. Un faible rayon d'acuité d'arête diminue la charge dans l'outil [RYS<sup>+</sup>05] et lui permet de mieux résister à l'usure. Les chercheurs ont trouvé que la durée de vie d'un outil avec une acuité de 10  $\mu\text{m}$  est 4 à 5 fois plus grande que celle d'un outil avec une acuité de 50  $\mu\text{m}$ . Une augmentation du rayon d'acuité d'arête produit de mauvais états de surfaces à cause de l'augmentation des composantes de compression par rapport aux composantes de cisaillement de déformation [TM99] (Voir figure 2.8). Les chercheurs ont trouvé que : pour une avance de 0.15 mm/tr et une dureté de matériau usiné de 57 HRC, l'acuité d'arête d'un rayon de 22  $\mu\text{m}$  donne un  $Ra$  de 0.73  $\mu\text{m}$ , alors que l'acuité d'arête d'un rayon de 121  $\mu\text{m}$  donne un  $Ra$  de 0.90  $\mu\text{m}$ . Les chercheurs ont aussi remarqué que l'influence du rayon de l'acuité d'arête sur la rugosité de surface diminue avec l'augmentation de dureté de la pièce à usiner. Le polissage de la face de coupe d'un outil revêtu de diamant (CVD) diminue significativement la rugosité de cette surface, diminue le rayon de l'acuité d'arête et diminue les composantes de forces de coupe [PAS06], [OIB96]. La répartition de pression sur le rayon d'acuité  $R\beta$  et sur la face de dépouille principale a été l'un des axes de recherche de Cahuc et ses collaborateurs [CTCG00].

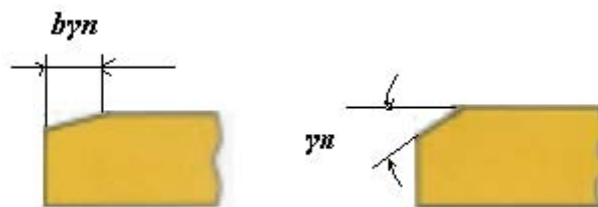


FIGURE 2.7 – Géométrie d'une arête chanfreinée.

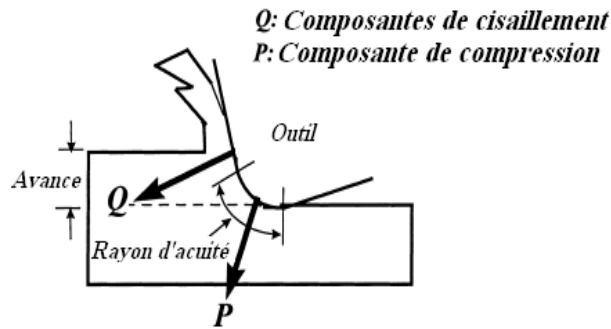


FIGURE 2.8 – Représentation de composantes de cisaillement et de compression [TM99].

Un faible rayon d'acuité d'arête permet donc :

- De limiter les efforts en usinage.
- D'améliorer la durée de vie.
- De réduire les vibrations dans la machine et obtenir des pièces avec de meilleurs états de surface.

### 2.3.3 Le brise-copeaux :

Lorsque le copeau se déroule de manière continue, il peut s'enrouler autour de la pièce ou de l'outil. Son évacuation devient délicate et dangereuse ; l'état de surface de la pièce peut se détériorer. Il est donc important de fractionner le copeau. Souvent la face de coupe des outils utilisés en usinage est constituée d'un brise-copeaux pour favoriser un bon fractionnement du copeau [KSK09]. Le brise-copeaux consiste en une forme de surface de coupe particulière, généralement une cuvette qui facilite le fractionnement du copeau et détermine la direction de son écoulement. La forme de brise-copeaux change d'un outil à l'autre (figure 2.9). Différents types de cuvettes de brise-copeaux ont été largement utilisés dans l'usinage pour assurer un bon contrôle du copeau [FAN02].

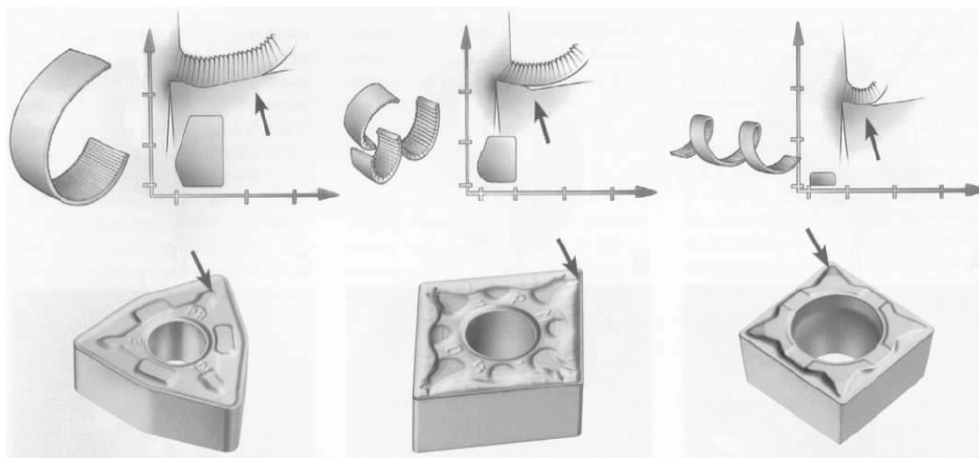


FIGURE 2.9 – Différentes formes de brise-copeaux [COR05].

## 2.4 Les revêtements et les procédés de fabrication :

Les revêtements permettent d'améliorer les conditions de coupe et la productivité. Le principe du revêtement (figure 2.10) consiste à recouvrir d'un film mince (jusqu'à 10  $\mu\text{m}$  d'épaisseur) les outils de coupe pour leur donner des propriétés particulières comme la grande dureté. Selon Grzesik [GRZ03] les revêtements peuvent être classés en 4 groupes.

1. Les revêtements à base de titane (TiC, TiN, TiB<sub>2</sub>, TiCN).
2. Les revêtements céramiques.
3. Les revêtements de diamant (PCBN).
4. Les revêtements autolubrifiants avec MoS<sub>2</sub> ou WC.

Le revêtement de diamant PCBN augmente la dureté de surface et crée une barrière thermique entre la pièce et le substrat de l'outil dont la température est abaissée [CNE07]. Le rôle recherché du revêtement est de :

1. Protéger le substrat de l'usure (adhésion, abrasion, oxydation diffusion).
2. Faire office de barrière thermique.
3. Résister à la fissuration [TMS01].

Le choix du revêtement dépend de but recherché : résistance à l'usure et / ou à l'oxydation, tenue à la température, réduction du frottement etc. Il y a deux types de dépôt de revêtement CVD et PVD, la figure (figure 2.11) montre les procédés de fabrication de CVD et PVD. La société française du vide [VID94] a établi un tableau comparatif de mode de dépôt de revêtement, tableau (2.1).

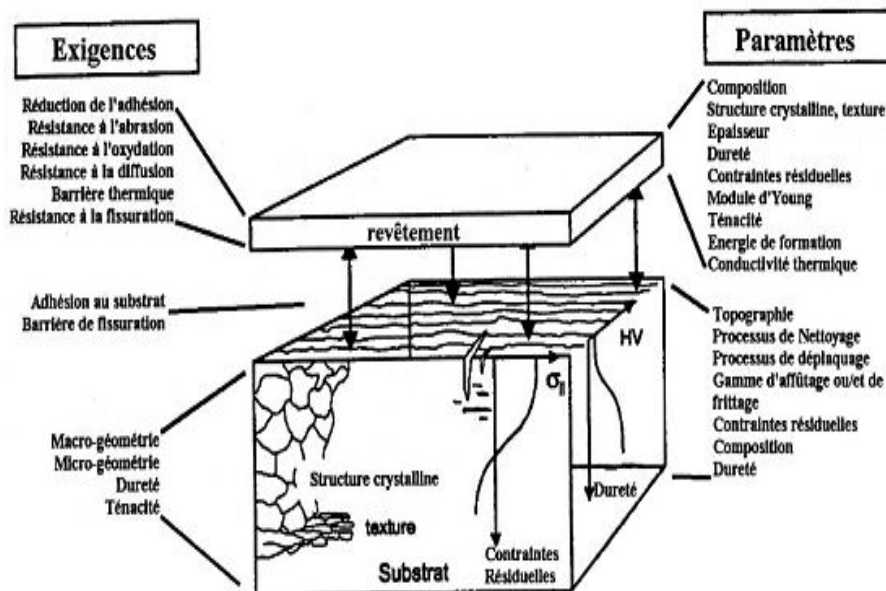


FIGURE 2.10 – Le revêtement [CHR03].

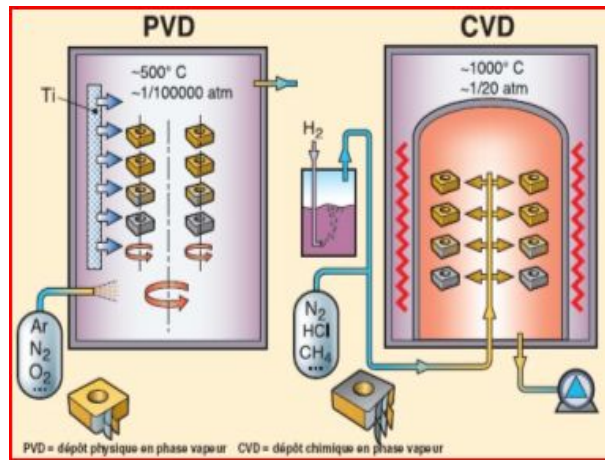


FIGURE 2.11 – Procédés de fabrication de CVD et PVD.

Caractéristiques	Modes de dépôt	Vitesse de dépôt	Type de dépôt	Dépôt sur formes complexes	Dépôt sur surface poreuse	Perturbation à l'interface de croissance	Chauffage du substrat par moyens externes
Dépôt CVD	Réaction chimique	200 à 2500 A/mn	Atomes	Bons résultats	Résultats moyens et limités	Oui	Oui
Dépôt PVD	Energie thermique	Jusqu'à 75 µm/mn	Atomes et ions	Peu recommandée	résultats médiocres	Non	Oui

TABLE 2.1 – Tableau comparatif des modes de dépôt sous vide.

### 2.4.1 Le dépôt CVD (Chemical Vapour Deposition) :

Le dépôt de type CVD est un dépôt réservé aux substrats de type carbure résistants aux hautes températures. Les revêtements de type CVD sont généralement des revêtements :

- De la famille de titane : TiN, TiC, Ti(C, N).
- De type de céramique : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> par exemple.
- De type de diamant : DLC (Diamant Like Carbone).

Les avantages et les inconvénients de ce type de dépôt sont :

1. Grande dureté des dépôts.
2. Grande variété des matériaux déposés.
3. Forte épaisseur (12 µm) qui permet d'obtenir une durée de vie importante.
4. Bonne adhérence sur le substrat de type carbure.

L'un des problèmes majeurs du CVD est le manque d'acuité d'arête du fait de l'importance de la couche déposée [REC05]. La déposition d'un film de 2  $\mu\text{m}$  de DLC par la technique de CVD sur des plaquettes triangulaires TCMW 16 T304 n'a plus d'influence sur les forces de coupe lors d'usinage de AL - Si [SCAT07].

## 2.4.2 Le dépôt PVD (Physical Vapour Deposition) :

Les revêtements PVD sont plus courants pour l'usinage des alliages de titane et super - alliages. Ils sont minces et lisses et ne transmettent que de très faibles tensions résiduelles au carbure qu'ils recouvrent. Comparés aux revêtements CVD, ceux PVD suivent plus fidèlement le profil des arêtes de coupe très vives dont on tire largement profit aujourd'hui. Ceci veut dire que les arêtes des plaquettes revêtues PVD sont intrinsèquement plus tenaces que celles des plaquettes revêtues CVD. Le revêtement PVD apporte une bonne résistance à l'usure [ABKY07], une stabilité chimique à la surface de l'outil et une bonne résistance à la formation de l'arête rapportée [MAG07]. Le dépôt PVD présente les avantages suivants [CHR03] :

- Faible température qui permet de garder l'intégrité physique.
- Possibilité de faire des revêtements multicouche.
- Possibilité de faire varier la température du substrat.
- Haute dureté de dépôt.
- Faible épaisseur des dépôts qui permet d'assurer la constance de la géométrie des outils.
- Excellente liaison avec le substrat.

Le revêtement TiALN/VN élimine la formation de l'arête rapportée et le transfert du métal durant le fraisage à sec de l'alliage d'aluminium AL 7010 – T7651 et ALSi9CuL. Les outils revêtus par ce revêtement s'usent moins que les outils non revêtus [HLR<sup>+</sup>06]. Dans notre étude d'usinage d'alliage d'aluminium AA 2017 T4 et AA 7075 T651, les plaquettes non revêtues seront utilisées pour leur petit rayon d'acuité d'arête qui limite les efforts de coupe et réduit la vibration de la machine.

Les propriétés traditionnelles, les coefficients de frottement des revêtements CVD et PVD sont classées sur le tableau (2.2).

REVETEMENT		DURETE VHN (50GF)	COEFFICIENT DE FROTTEMENT	TEMPERATURE OXYDATION	RESISTANCE A LA CORROSION
TiN	PVD	2900	0.65	500°C	Bon
AlTiN	PVD	4500	0.42	800°C	Bon
CrN	PVD	2500	0.55	700°C	Excellente
TiC	CVD	3200	0.60	350°C	Bon
TiC/TiN	CVD	3000	0.65	500°C	Bon
TiCN	PVD	4000	0.45	400°C	Bon
MoST	PVD	2000	0.01	450°C	Bon

TABLE 2.2 – Propriétés de PVD et CVD.

## 2.5 Action mécanique et formation du copeau :

### 2.5.1 Formation du copeau :

La formation du copeau résulte d'une action mécanique complexe. Le mouvement relatif outil/matière provoque une compression entre la face de coupe de l'outil et la pièce. L'évacuation de cette compression se fait par la pénétration de l'arête de coupe dans la matière et la formation des copeaux. La coupe dépend directement des actions mécaniques de l'outil mais aussi de sa géométrie et de l'évolution de cette géométrie par usure [CHR03]. Les copeaux doivent être nécessairement fragmentés en petites particules afin d'en permettre une évacuation facile. La bonne fragmentation du copeau dépend du type de matériau usiné, de la forme d'outil, et de conditions de coupe. Les fabricants d'outils fournissent des "courbes de fragmentation" donnant pour chacun des outils de leur catalogue les paramètres vitesse d'avance et profondeur de passe à mettre en œuvre pour obtenir cette fragmentation (brise-copeaux). Les copeaux obtenus par un usinage sont de formes très différentes, on peut les classer en deux catégories (figure 2.12) :

1. Les copeaux continus : formés dans un état de déformation plastique stationnaire.
2. Les copeaux discontinus ou segmentés : formés dans un état de déformation plastique non stationnaire. La segmentation des copeaux est très influencée par le phénomène de fissuration et de rupture.

Nombreuses sont les recherches réalisées sur la formation du copeau durant l'usinage [MR06], [SEN06], [NVY08], [LJJ09]. Une étude de formation des copeaux lors d'usinage de l'alliage d'aluminium a été faite par Kamiya et autres [KY08]. Les chercheurs ont conclu que : les copeaux formés lors de l'usinage à sec de l'alliage d'aluminium AA 7075 T651 sont des copeaux continus, mais ces copeaux sont fragmentés lors d'usinage de AA 2017 T4, AA 6061, et AA 4032.

Les modèles théoriques proposés pour étudier les actions mécaniques dans la zone de coupe sont des modèles mécaniques et modèles thermiques. Pour simplifier l'étude de zone de coupe, on considère



parfois la coupe orthogonale qui ramène les problèmes de coupe en deux dimensions. L'un des modèles proposés pour analyser la formation du copeau dans la zone de coupe est le modèle de Merchant (figure 2.13) [FM49] pour calculer les efforts de coupe dans la coupe orthogonale. Les paramètres présentés sur la figure (2.13) sont :  $\gamma$  l'angle de coupe,  $\phi$  l'angle de cisaillement,  $F_s$  l'effort de cisaillement,  $F_c$  l'effort de coupe,  $F_f$  effort d'avance,  $F_n$ ,  $V_{cop}$  vitesse d'écoulement du copeau,  $L_{cop}$  l'épaisseur de copeau, et  $\lambda$  l'angle du cône de frottement entre l'outil et le copeau. Dans ce modèle, la forme du copeau dépend de l'intensité des contraintes créées dans les zones de coupe orthogonale. D'autres études et modèles ont permis de discuter et de faire évoluer le modèle de Merchant [KB81].

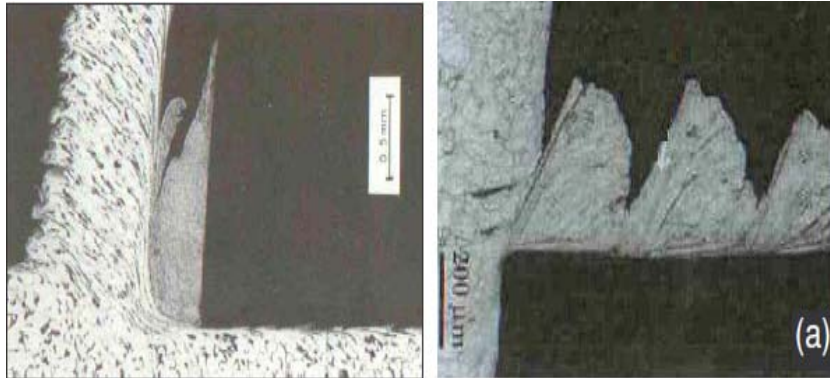


FIGURE 2.12 – Copeaux continus et copeaux fragmentés [HAB06].

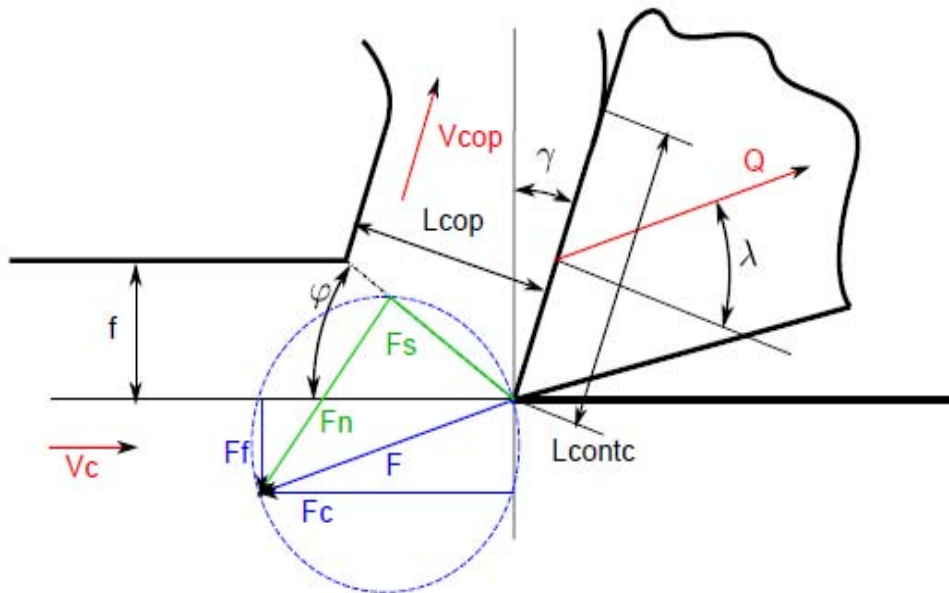


FIGURE 2.13 – Modèle de Merchant [E45].

### 2.5.2 Ecoulement du copeau lors de l'usinage :

L'étude de l'écoulement du copeau après sa formation permet de connaître la direction d'éjection (sur la face de coupe) et son "enroulement" ultérieur [JGFL95]. Cette étude permet aussi la prévision des efforts de coupe en 3D. L'angle d'écoulement du copeau sur la face de coupe se calcule en considérant que cette direction est perpendiculaire à la droite qui relie la pointe de la "crête" générée sur la pièce au point de l'arête de coupe située à la limite du diamètre de la pièce usinée (trait pointillé bleu Figure 2.14). L'angle formé entre la direction d'avance et l'arête de coupe fictive est appelé  $\eta'$ . Le calcul de cet angle s'effectue à partir de figure (figure 2.14) et est donné par l'équation (eq 2.4) dans le cas où  $\gamma_0$  (angle de face de coupe) et (angle d'inclinaison)  $\lambda_s$  sont nuls. [AFM96], [AMO95].

$$\eta' = Kr - \eta = \text{Arctan} \left( \frac{a_p - \frac{f^2}{8.R\epsilon}}{\frac{f}{2} + \frac{a_p}{\tan(Kr)} + \frac{R\epsilon}{\tan(Kr/2)}} \right) \quad (2.4)$$

Avec  $R\epsilon$  le rayon de bec de l'outil en mm,  $f$  l'avance en mm/tr,  $a_p$  la profondeur de passe en mm, et  $\eta$  l'angle d'évacuation du copeau qui peut être exprimé par l'équation (eq 2.5).

$$\eta = Kr - \text{Arctan} \left( \frac{a_p - \frac{f^2}{8.R\epsilon}}{\frac{f}{2} + \frac{a_p}{\tan Kr} + \frac{R\epsilon}{\tan(Kr/2)}} \right) \quad (2.5)$$

Dans le cas où  $Kr = 90^\circ$ , l'angle  $\eta$  de l'équation 2.5 se traduit par l'expression (eq 2.6).

$$\eta = \frac{\pi}{2} - \text{Arctan} \left( \frac{a_p - \frac{f^2}{8.R\epsilon}}{\frac{f}{2} + R\epsilon} \right) \quad (2.6)$$

Cette équation est valable dans le cas où  $a_p > R\epsilon$ . Dans le cas de "petites profondeurs" de passe où seule une fraction arrondie du bec d'outil usine, nous avons l'expression (eq 2.7).

$$\eta = Kr - \text{Arctan} \left( \frac{a_p - \frac{f^2}{8.R\epsilon}}{\frac{f}{2} + \sqrt{2.R\epsilon.a_p - a_p^2}} \right) \quad (2.7)$$

La direction d'écoulement du copeau a été aussi étudiée par différents chercheurs comme Bradely et Jared [JD01]. Les chercheurs ont constaté que l'angle de direction du copeau se calcule en fonction des paramètres  $a_p$ ,  $f$ ,  $Kr$ ,  $R\epsilon$ . La prédiction de l'angle d'écoulement du copeau peut se faire à partir du calcul des composantes de force de coupe [HCJ09], [JL93]. Une étude expérimentale de l'influence des conditions de coupe et de la géométrie de l'outil sur la direction d'écoulement du copeau a été réalisée par différents chercheurs [JAW91], [WM95], [WAN01]. L'angle d'écoulement du copeau  $\eta$  formé dans les outils positifs ( $\gamma_0 > 0$ ) est plus grand que celui dans les outils plats ( $\gamma_0 = 0^\circ$ ), cette différence peut être due à l'influence de l'angle de coupe et l'angle d'inclinaison dans les outils positifs

[GFJ94]. Au cours d'une opération de chariotage, l'usure de l'arête de coupe secondaire est toujours négligée, or si l'angle de coupe secondaire ( $K_r'$ ) est important ou que l'angle d'écoulement du copeau sur la face de coupe ( $\eta$ ) est faible, les contraintes de traction causent une rupture plus rapide de l'arête secondaire. Cette fragilisation libère l'écoulement des copeaux et fait diminuer l'angle d'évacuation des copeaux. Suite à cette modification d'angle d'écoulement du copeau, l'arête secondaire est de plus en plus sollicitée en traction, Guillaume COHEN [COH09] a étudié dans sa thèse l'influence de l'angle d'écoulement des copeaux sur l'effondrement de l'arête de coupe secondaire durant le tournage de l'acier C40. Dans nos travaux, nous allons étudier l'écoulement des copeaux et nous allons mesurer l'angle d'écoulement des copeaux durant l'usinage d'alliages d'aluminium AA 2017 T4 et AA 7075 T651 pour vérifier si l'écoulement des copeaux a un effet sur l'arête de coupe secondaire et pour savoir dans quelle direction les copeaux seront éjectés.

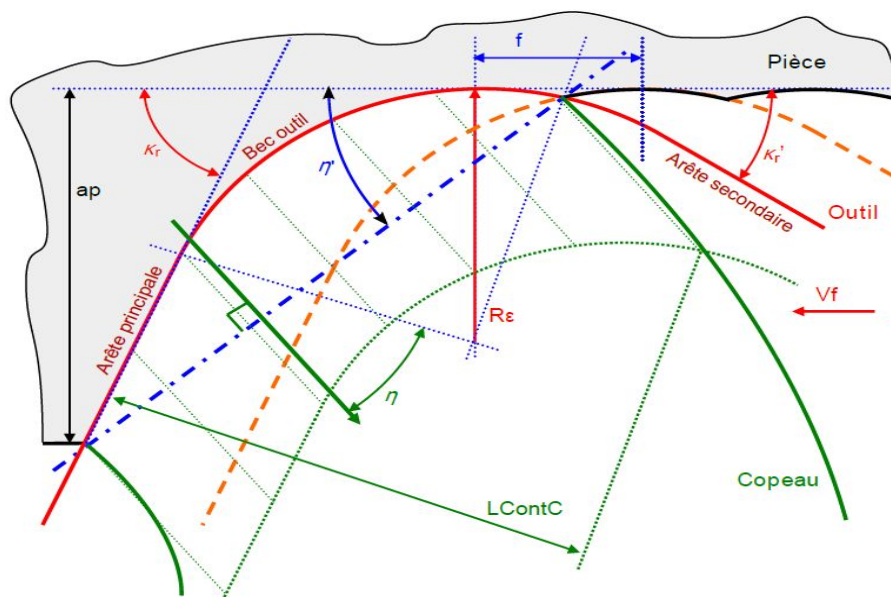


FIGURE 2.14 – Décomposition des zones en chariotage [COH09].

L'écoulement sur la plaquette de coupe provoque une usure de celle-ci que nous détaillons dans le paragraphe suivant.

## 2.6 Mécanismes d'usure et durée de vie :

L'usure de l'outil est due aux contraintes thermomécaniques qu'on lui fait subir lors de l'usinage. Cette usure est provoquée par la concentration des contraintes de coupe de l'usinage, elle est fonction :

1. De la géométrie de l'outil, angle de coupe, présence du brise – copeaux.
2. Du revêtement et son comportement mécanique et thermique.

Différents mécanismes sont responsables de la dégradation de l'outil de coupe et différents modes d'usure coexistent. Leur importance dépend de la température mise en jeu dans la zone de coupe [CBS<sup>+</sup>02] (figure 2.15) et de la vitesse de défilement du copeau sur la plaquette. La figure 2.15 montre que l'usure adhésive est le mécanisme le plus actif sur une large plage de la température de coupe.

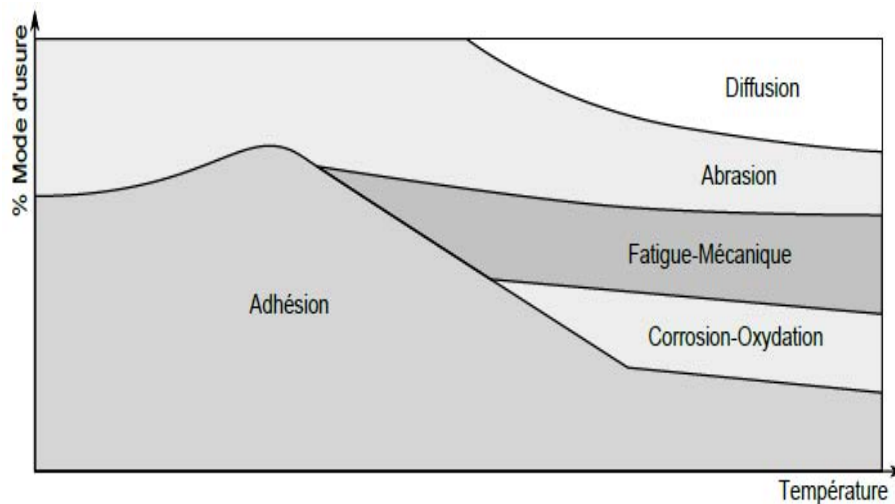


FIGURE 2.15 – Modes d'usure prédominants selon la température [CBS<sup>+</sup>02].

### 2.6.1 Les phénomènes d'usure :

L'usure des outils de coupe est la conséquence de divers mécanismes (phénomène mécanique et phénomène physico – chimique).

#### Les phénomènes mécaniques :

- **Abrasion** : Ce mécanisme s'opère lorsque la pièce et le copeau frottent avec des pressions de contact importantes sur l'outil et si la matière comporte des constituants (alumine, nitrure, carbure, oxyde) plus durs que l'outil.
- **Adhésion** : Cette usure est due aux états de surface de la pièce et de l'outil durant l'usinage. Ces entités frottent les unes contre les autres. A cause des fortes pressions il y a des micros – soudures qui se créent et se rompent au cours de l'usinage. Ce processus conduit soit à l'apparition de l'arête rapportée si ces micros – soudures sont plus résistantes que celles de l'outil, soit à l'usure de l'outil, si la micro – soudure sur le copeau est plus résistance que celle de l'outil.
- **Fissuration** : Lors de l'usinage, l'outil est soumis à des contraintes thermiques et mécaniques très importantes. La combinaison des hautes températures à l'interface outil / copeau et des vibrations de l'outil engendrées par la déformation plastique peut provoquer des fissures au sein de l'outil.

- Déformation plastique : La combinaison des hautes températures à l'interface (outil/copeau) et de la pression exercée sur l'outil provoque la déformation plastique d'une partie de l'outil (arête de coupe).

### Les phénomènes (physico – chimique) :

- Oxydation : Durant l'usinage lubrifié avec le liquide de coupe et à cause de l'élévation de température de l'outil, l'eau contenue dans les fluides de coupe va se vaporiser. Cette vaporisation de l'eau avec l'oxygène de l'air provoque une fragilisation de l'outil par oxydation.
- Diffusion chimique : Ce phénomène apparaît pour des températures élevées où la structure de l'outil change sous l'effet de migrations de ses constituants chimiques vers le copeau [CHR03], [KOO03]. Les hautes températures et les pressions exercées permettent de donner suffisamment d'énergie aux atomes pour que ceux-ci puissent migrer de l'outil vers le copeau ou vice versa (figure 2.16). Cette figure montre que les atomes de carbone et de cobalt migrent de l'outil vers la pièce et les atomes de fer migrent de la pièce vers l'outil. Durant l'usinage de l'alliage d'aluminium comme dans le cas de AA 2024 T351 [LIS04], les atomes de Al migrent dans l'outil à travers le cobalt Co et forment des composées intermétalliques  $Al_xCo_y$ . La formation de ces composées intermétalliques fragilise la cohésion entre les grains de carbure et le liant de cobalt Co. La consommation des atomes de cobalt Co qui ont servi à créer les intermétalliques peut changer la concentration de Co dans la phase de liant. Pour rééquilibrer la concentration des atomes de Co, des atomes du cobalt (situés dans les couches inférieures de l'outil) vont migrer vers la surface de coupe de l'outil et par conséquent ces couches inférieures seraient également fragilisées. La température élevée conduit les atomes (durant l'usinage de l'acier) à migrer de l'outil vers le copeau causant la formation du cratère sur la face de l'outil. Dans le cas où le matériau usiné est ductile comme dans le cas de l'usinage de l'alliage AA 2024 T351 [NLGG05], la diffusion chimique à haute température a été étudiée par plusieurs chercheurs [JYW08]. La diffusion chimique des éléments de la pièce vers l'outil à haute température conduit à former la couche adhérente BUL [LLW08], [LIS04]. Cette couche adhérente forme une barrière thermique entre la pièce et l'outil [CBM<sup>+</sup>08]. La solubilité de l'aluminium dans le cobalt durant l'usinage de l'alliage d'aluminium a été étudiée à partir du diagramme de phase Al – Co (figure 2.17) [GG02]. Les études de solubilité de l'aluminium montrent que l'aluminium est peu soluble dans le cobalt Co aux faibles températures. Mais cette limite de la solubilité augmente de manière importante quand la température  $T_c$  dépasse 300°C. L'élévation sévère de la température conduit à fusionner de l'aluminium qui se dépose sur la face de coupe pour former la couche adhérente tandis que les particules intermétalliques dures sont emportées par le copeau. Le seuil critique à partir duquel les mécanismes de diffusion s'accélèrent est ( $T_f/2$  : la moitié de la température de fusion), ce seuil est d'environ 300°C dans le cas des alliages d'aluminium.

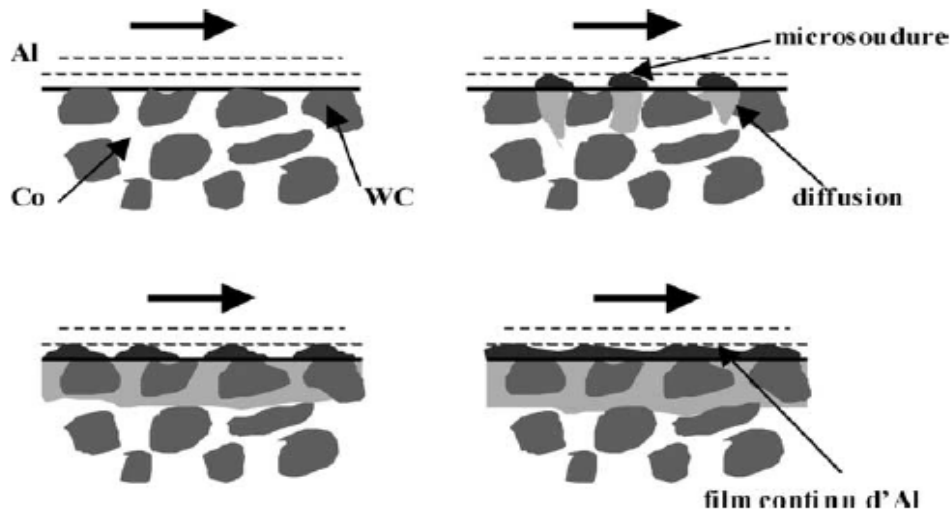


FIGURE 2.16 – L'usure par diffusion [GG02].

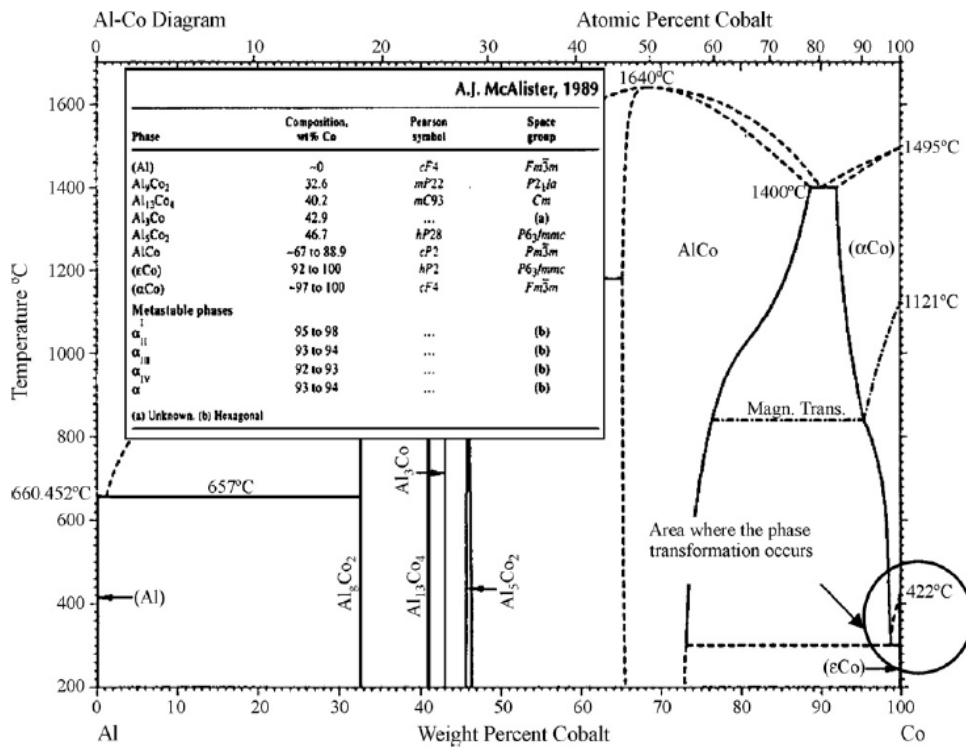


FIGURE 2.17 – Le diagramme de phase de Al – Co [CBM<sup>+</sup>08].

### 2.6.2 Les modèles d'usure :

La géométrie de l'outil évolue au cours de son utilisation. Au delà de certaines modifications, la géométrie ne permet plus de produire des pièces conformes. Des paramètres de quantification de

l'usure de l'outil sont donc nécessaires afin de connaître son état et pour prévenir son changement.

- L'usure en dépouille (VBB) : Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil et provoque une bande striée parallèle à l'arête de coupe (figure 2.18). Elle est caractérisée par une valeur VBB admissible, la valeur de VBB max est mesurée dans la zone B (figure 2.18). La valeur admissible est  $VBB = 0.6 \text{ mm}$  dans l'ébauche  $VBB = 0.3 \text{ mm}$  en finition [SC02]. Pour les petites profondeurs de passe ( $a_p < R\epsilon$ ) l'usure de l'outil se fait dans la zone C (zone de rayon de l'outil) ; cette usure se caractérise par VBC [SR09], [GZ08]. L'usure de l'outil VBB dépend de différents paramètres comme la dureté de matériau à usiner et la dureté de l'outil de coupe. Plus le matériau à usiner est dur, plus l'usure en dépouille augmente, et plus le matériau d'outil de coupe est dur, plus cette usure diminue [KDS03]. Plus le matériau à usiner est ductile comme l'alliage d'aluminium AA 7050 T7451, plus l'usure en dépouille diminue [TLP<sup>+</sup>09]. L'augmentation des paramètres de coupe comme l'avance  $f$ , la vitesse de coupe  $V_c$ , et du temps d'usinage  $T_c$  conduisent à augmenter l'usure de dépouille [MSB07], [GSSS09], [DBM08], [KL07], [ANM09], [KOP04]. L'usinage à sec conduit à augmenter l'usure de dépouille VBB plus que l'usinage cryogénique [DK07].
- Pour diminuer l'usure de dépouille il faut :
  1. Choisir une nuance présentant une meilleure résistance à l'usure.
  2. Réduire la vitesse de coupe.

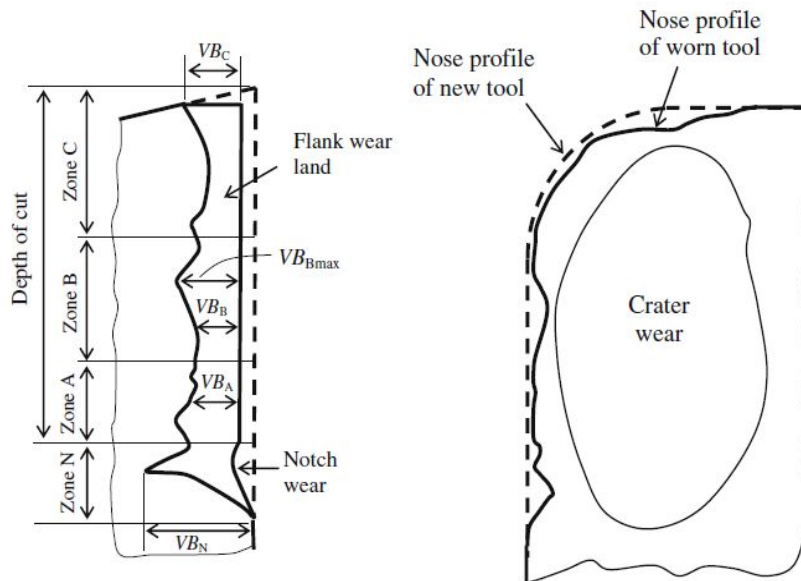


FIGURE 2.18 – L'usure de dépouille selon ISO 3685.

- L'usure en entaille VBN : Elle est une forme spéciale d'usure combinée de la face de dépouille et de la face de coupe. Ce genre d'usure est dûe à des phénomènes métalliques (calamines des pièces forgées, oxydation des aciers). Elle est caractérisée par VBN et formée dans la zone N (figure 2.18), la valeur de VBN peut être un indicateur de critère de durée de vie. La zone d'entaille se retrouve

juste à la fin de la longueur en contact entre l'outil et la pièce, cette longueur ne dépend que de la profondeur de passe  $a_p$  et de l'angle de coupe principal  $K_r$  [COH09]. Dans certains cas, l'entaille peut être provoquée par la présence d'une couche superficielle dure sur une pièce coulée, forgée, traitée thermiquement ou ayant subi un usinage préalable. La présence de l'usure en entaille est l'une des causes principales d'augmentation de la rugosité de la pièce usinée [PMDP05]. La dureté du matériau à usiner joue un rôle important sur l'usure en entaille, plus la dureté du matériau est grande, plus l'usure VBN augmente [KDS06]. L'augmentation de vitesse de coupe provoque une augmentation de l'usure VBN [ANT07], et [EBFS05]. Pour éviter la formation de VBN il faut :

1. Accroître la rigidité de l'arête de coupe.
  2. Réduire l'avance.
  3. Réduire la vitesse de coupe.
- L'usure en cratère KT : C'est la forme la plus courante d'usure de la face de coupe. Elle est caractérisée par la profondeur du cratère KT (figure 2.19), une valeur prédominante de KT peut être choisie comme critère de durée de vie de l'outil. L'usure du cratère la plus sévère est atteinte quand l'épaisseur du copeau non déformé atteint une valeur maximale  $t_{max}$  (eq 2.8) [HD05]. Le mouvement du copeau sur la face de coupe de l'outil résulte en un frottement sévère entre le matériau usiné et la face de coupe ce qui conduit à l'usure en cratère [KKB07], [SLM<sup>+</sup>05]. La profondeur maximale du cratère KT est établie par l'équation suivante (eq 2.9) qui donne directement la profondeur du cratère KT à partir de l'avance  $f$  [ISO93].

Plusieurs facteurs affectent l'usure en cratère, ces facteurs sont :

- Le matériau à usiner : Plus le matériau à usiner est dur plus l'usure en cratère est grande [YAN01], [BB01], [EM09]. L'usinage du matériau dur provoque une température élevée sur la face de coupe ce qui accélère l'usure en cratère par le phénomène de diffusion chimique des éléments de l'outil vers le copeau.
- Les paramètres de coupe : L'usinage à grande vitesse de coupe augmente également la température sur la face de coupe ce qui accélère l'usure en cratère [RR06], [VPC07b]. Aussi, plus le temps d'usinage augmente plus l'usure en cratère augmente [LSB09], [ACR<sup>+</sup>08].
- Le fluide de coupe : L'usinage à sec provoque une grande usure en cratère à cause de la haute température générée par le frottement copeau / outil. L'utilisation d'une huile soluble ou une lubrification cryogénique durant l'usinage diminue cette usure [VPC07a], [AB09], [KA08], [DFF03]. Cette lubrification diminue la température sur la face de coupe et en conséquence elle diminue la diffusion chimique des éléments de l'outil vers le copeau.
- La dureté du matériau des outils de coupe : Plus le matériau de l'outil de coupe utilisé pour l'usinage est dur plus la résistance à l'usure en cratère augmente [CVP<sup>+</sup>94], [CVL<sup>+</sup>99], et [KKB07].

L'étude bibliographique de cratère ne nous a montré aucune usure en cratère durant l'usinage de alliage d'aluminium. Dans notre étude nous étudierons ce cratère lors du tournage des alliages d'aluminium AA 2017 et AA 7075.



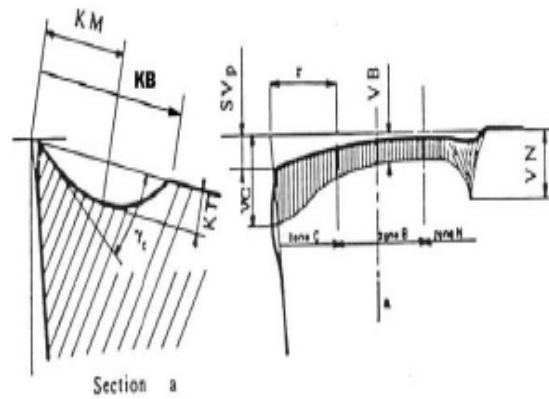


FIGURE 2.19 – Schéma de l'usure de cratère d'un outil d'après la norme NFE 66 505.

$$t_{max} = R\epsilon - \sqrt{R\epsilon^2 + f^2 - 2 \cdot f \cdot \sqrt{2 \cdot R\epsilon \cdot a_p - a_p^2}} \quad (2.8)$$

$$KT = 0.06 + 0.3 * f \quad (2.9)$$

### 2.6.3 Les modèles mathématiques d'usure (Durée de vie) :

La durée de vie de l'outil est caractérisée par le temps pour atteindre la valeur limite du critère d'usure. On choisit comme critère d'usure l'un des trois critères suivants :

- Défaillance brutale : due à la déformation plastique de l'arête. Ce critère n'est employé que pour les outils en acier rapide ou les outils céramiques.
- Usure frontale : employée pour tous les outils, caractérisée soit par l'usure frontale moyenne soit par l'usure frontale maximale VBB max. La largeur maximale de l'usure frontale est couramment fixée à VBB max = 0.6 mm, et la largeur moyenne VBB moy = 0.3 mm.
- L'usure en cratère : est caractérisée par la profondeur de cratère (eq 2.9).

Plusieurs lois de durée de vie existent : Loi de Taylor, loi de Gilbert, et loi de Koenig – Depiereux, nous les détaillons ci-dessous.

1. La loi de Taylor : Ce modèle établi par Taylor en 1969 est caractérisé par l'équation (eq 2.10). Le coefficient  $C_v$  et l'exposant  $n$  sont des constantes. La constante  $C_v$  est caractérisée par le matériau. La durée de vie d'un outil est influencée par la vitesse de coupe, elle augmente quand la vitesse de coupe diminue. Le revêtement est l'un des paramètres qui joue un rôle important sur la durée de vie, son utilisation augmente la durée de vie de l'outil car il diminue l'usure par

diffusion entre la pièce et la face de coupe [PMJ01]. Le tableau (2.3) présente les différentes constantes du modèle de Taylor.

Modèle	Matériau usiné	Outil utilisé	Paramètres	Référence
$Tc = \frac{71853}{Vc^{2.292} \cdot f^{0.431}}$	Acier AISI D2	SNMA 120408	$Vc = 70, 95, 120$ m/min $f = 0.08, 0.14, 0.20$ tr/min $a_p = 0.5$ mm	[AZMM06]
$Vc \cdot Tc^{0.7605} = 52.02$	Acier AISI 1045	Carbure de tungstène	$Vc = 180, 240, 300$ m/min $f = 0.18$ tr/min $a_p = 2$ mm	[LIM95]
$Vc \cdot Tc^{0.9375} = 2.983$	Acier AISI 1045	TNMG 220408	$Vc = 125, 140, 160, 180$ m/min $f = 0.22$ tr/min $a_p = 2$ mm	[ROG08]
$Tc = 3.10^7 \cdot Vc^{-1.9781}$	Acier ASTM 2	SNGN 090312	$Vc = 50$ à $800$ m/min $f = 0.05$ tr/min $a_p = 0.2$ mm	[KKS09]

TABLE 2.3 – Coefficients du modèle de Taylor.

$$T = C_v \cdot V^n \quad (2.10)$$

2. La loi de Gilbert : Cette loi est une généralisation de la loi de Taylor pour prendre en considération l'influence de l'avance  $f$  et de la profondeur de passe  $a_p$ . Elle est caractérisée par l'équation (eq 2.11). Plusieurs recherches ont été réalisées pour trouver les constantes de ce modèle (tableau 2.4) en considérant le critère de durée de vie  $VBB = 0.3$  mm.

Modèle	Matériau usiné	Outil utilisé	Paramètres	Référence
$T_c = 4546.V_c^{-1.9703} \cdot f^{-0.4883} \cdot a_p^{-0.1924}$	Acier EN24T	CNMA 120404	$V_c = 28$ à $150$ m/min $f = 0.12$ à $0.50$ tr/min $a_p = 0.42$ à $1.33$ mm	[CE98]
$T_c = \frac{5,48 \cdot 10^9}{V_c^{3,46} \cdot f^{0,696} \cdot a_p^{0,460}}$	Acier	Carbure P20	$V_c = 250$ à $400$ m/min $f = 0.15$ à $0.55$ tr/min $a_p = 0.5$ à $6$ mm	[SSB06]

TABLE 2.4 – Modèle de Gilbert.

$$T_c = K.V_c^k \cdot f^x \cdot a_p^y \quad (2.11)$$

3. La loi de Konig – Depiereux : Cette loi prend en compte l'influence de l'avance  $f$  et la profondeur de passe  $a_p$  dans une équation exponentielle (voir équation 2.12).

$$T = \exp\left(-\alpha V_c^\mu - \gamma f^\nu - \delta a_p^\lambda\right) \quad (2.12)$$

Ces lois permettent d'évaluer la durée de vie d'une plaquette à partir des paramètres de coupe utilisés lors de l'usinage. Le critère de durée de vie moyen courant est  $VBB = 0.3$  mm.

L'un des phénomènes qui endommagent les plaquettes de coupe lors d'usinage est le collage de matière usinée sur les plaquettes. Ce collage peut détériorer les arêtes de coupe des plaquettes, car dans certains cas quand la matière collée (arête rapportée) casse, elle peut emporter avec elle des fragments de la plaquette, ce qui conduit à l'effondrement de l'arête de coupe et la fin de vie de la plaquette. Nous présentons ce phénomène dans le paragraphe suivant.

## 2.7 Phénomènes du collage :

### 2.7.1 Les conditions d'apparition :

Sous l'effet de la pression appliquée de la pièce vers l'outil lors de l'usinage, de véritables soudures se créent entre l'outil et le copeau par écrasement / entrelacement des aspérités ou par phénomène

d'absorption et de solubilité (s'il existe une affinité chimique entre les atomes qui constituent les deux surfaces). Lorsque les jonctions formées se rompent, des fragments de matière provenant du copeau restent accrochés sur la face de coupe de l'outil. Des chercheurs [BMC07], [KKS09], montrent que le collage de la matière sur la pièce usinée dégrade l'état de surface. Durant le tournage à sec des matériaux ductiles comme l'alliage d'aluminium AA2024 avec des outils carbure non revêtus, le collage se forme progressivement par étalement des morceaux macroscopiques d'aluminium [LIS04]. Le collage de matériau (figure 2.20) semble principalement provoqué par ancrage mécanique mais cela n'exclut pas qu'il puisse être renforcé par des phénomènes de solubilité ou de diffusion. La formation de BUE sur la face de coupe de l'outil peut augmenter de  $30^\circ$  sur les outils qui usinent avec  $\alpha = 0^\circ$  et  $15^\circ$  sur les outils qui usinent avec  $\alpha = 15^\circ$  [LIS04] (l'angle de coupe est ramené « naturellement » à  $30^\circ$ ). Carrilero et al [CBS<sup>+</sup>02] montrent que l'usure adhésive est le mécanisme le plus actif sur une large plage de températures de coupe et ceci pour une large gamme de matériaux usinés. Cela serait le principal phénomène d'usure lors de l'usinage des alliages d'aluminium. Lorsque les fragments du matériau usiné sont évacués par l'action du copeau arrivant sur la face de coupe, ils peuvent emporter avec eux des particules de l'outil causant la dégradation progressive de celui-ci.

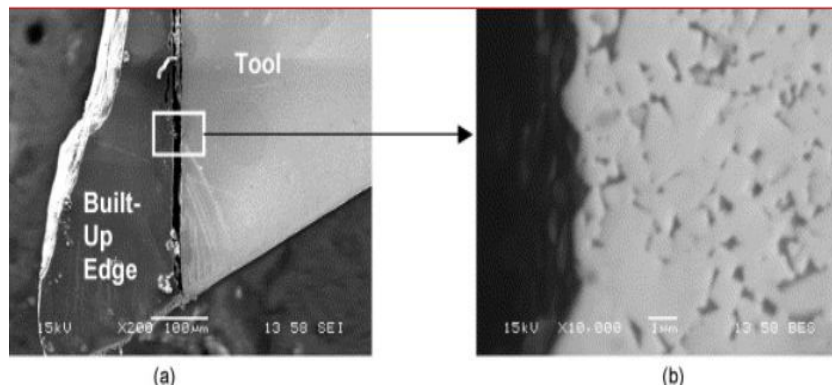


FIGURE 2.20 – L'arête rapportée formée lors d'usinage de l'alliage d'aluminium AA 2024 avec les paramètres  $V_c = 60$  m/min,  $f = 0,1$  mm/tr,  $T = 7$  min,  $a_p = 4$  mm,  $\alpha = 15^\circ$  [LIS04].

Le processus de formation et de destruction de l'arête rapportée n'est pas stable [DSD<sup>+</sup>07]. La formation de BUE peut se répéter plusieurs fois au cours d'un usinage causant une variation périodique de l'angle de coupe. Il peut en résulter une modification des dimensions souhaitées du produit fini et une détérioration de son état de surface si des fragments de la BUE adhèrent à la pièce. Le mécanisme de la formation de l'arête rapportée est encore mal connu, mais il est généralement associé au phénomène d'écrouissage de la matière qui semble être prédominant dans la formation des copeaux aux faibles vitesses de coupe. Le tournage à sec de l'Inconel 718 avec un outil céramique NX2525 et des paramètres ( $a_p = 0,1, 0,2, \text{ et } 0,3$  mm,  $V_c = 22, 43, \text{ et } 73$  m/min,  $f = 0,054, 0,143, \text{ et } 0,147$  mm/tr) (figure 2.21) montre qu'il n'y a pas de collage du matériau à cause de sa dureté élevée (cet outil a peu d'affinité chimique pour l'Inconel 718) [HLLL08]. La coupe cryogénique élimine la formation de l'arête rapportée sur l'outil car la faible température réduit la possibilité du collage de copeau sur

l'outil [YN08]. Le collage du matériau usiné peut être réduit en utilisant des outils revêtus [HLR<sup>+</sup>06], cependant cela diminue l'acuité d'arête qui est un paramètre important pour le bon déroulement de l'usinage des alliages d'aluminium.

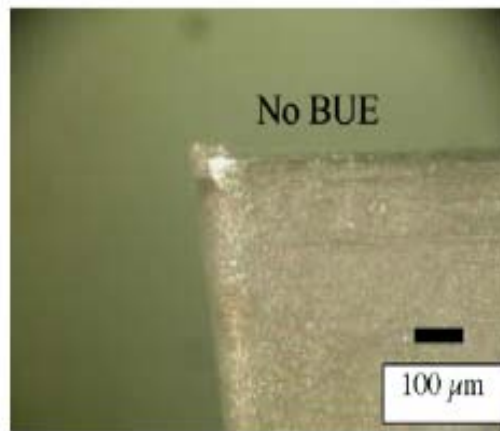


FIGURE 2.21 – Outil NX 2525 durant le tournage de Inconel 718 [HLLL08].

### 2.7.2 L'arête rapportée (BUE) et la couche adhérente (BUL) :

Le phénomène du collage se traduit par le dépôt de matière qui se forme sur la face de coupe. Ce dépôt peut prendre la forme d'une arête rapportée (BUE : Built-Up-Edge) à l'arête de coupe ou une forme d'une couche adhérente (BUL : Built-Up-Layer) qui est l'extension plastique de la BUE sur la face de coupe sous l'effet de la pression. Cette couche adhérente correspond au transfert de matériau usiné suivant une zone large sur la face de coupe de l'outil. La couche adhérente (BUL) formée sur la face de coupe de l'outil peut avoir à la fois des effets bénéfiques et néfastes [LIS04]. D'une part, elle peut faciliter le glissement du copeau et peut servir de barrière de diffusion. D'autre part, si elle n'est pas maîtrisée, elle contribue au collage de dépôt macroscopique sur la face de coupe. L'arête rapportée et la couche adhérente (figure 2.22) apparaissent dans certaines conditions de coupe, notamment à faibles vitesses de coupe [NLGG05]. La hauteur maximale de BUE peut être identifiée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB). L'arête rapportée et la couche adhérente ne sont pas stables et parfois elles se fragmentent de la face de coupe de l'outil, elles peuvent conduire à l'usure en cratère de la face de coupe. Si la couche adhérente est stable, alors elle a un effet protecteur sur l'outil et notamment sur l'arête de coupe [DSD<sup>+</sup>07]. La couche adhérente se forme initialement sur la face de coupe par combinaison thermique et mécanique [SRI<sup>+</sup>05], [RCSM05]. Après la formation de la couche adhérente (BUL), l'arête rapportée (BUE) commence à se développer jusqu'à une hauteur critique. L'arête rapportée formée se déforme sur la face de coupe, elle augmente l'épaisseur de la couche adhérente et forme des multicouches (figure 2.23). La formation de l'arête rapportée lors de l'usinage augmente la rugosité de la pièce usinée [OZC03], [CPM04], [MB03]. Quand l'arête rapportée se brise, des fragments de l'arête rapportée peuvent passer sous l'arête de coupe de l'outil

et rester collés sur la pièce usinée ce qui augmente la rugosité de cette pièce et d'autres fragments restent collés sur le copeau (figure 2.24) [COB03].

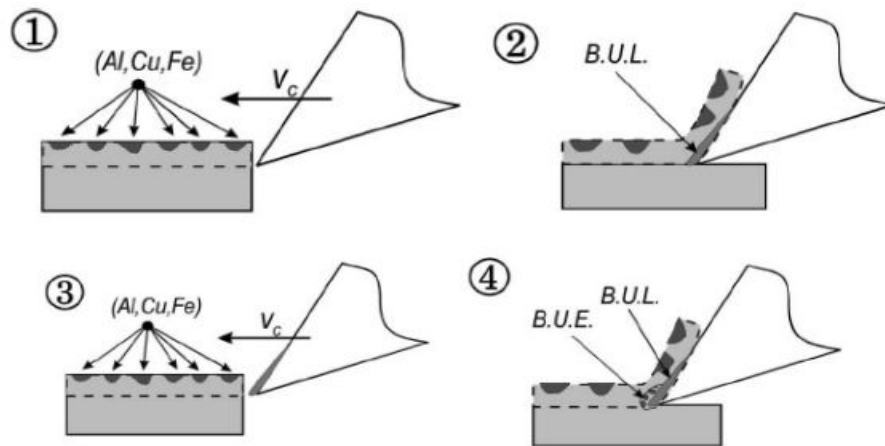


FIGURE 2.22 – Schéma de BUE et BUL en usinage [CBS<sup>+</sup>02].

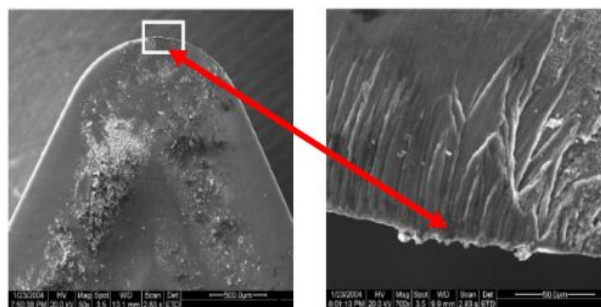


FIGURE 2.23 – Formation de multicouche sur la face de coupe des outils [RCSM05].

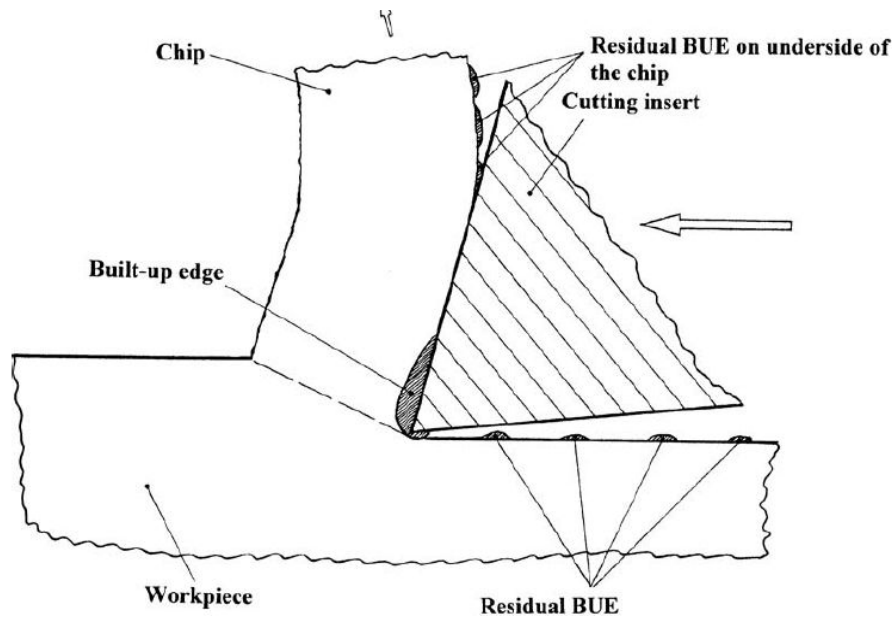


FIGURE 2.24 – BUE résiduelle [COB03].

Différentes recherches montrent que la vitesse de coupe est l'un des paramètres qui influent sur le collage du matériau usiné. L'augmentation de vitesse de coupe conduit à diminuer la hauteur de cette arête rapportée [TY04], [OZC03], [KR07]. Cette augmentation de vitesse de coupe améliore l'état de surface des pièces usinées [KKCS04]. La diminution de la hauteur de l'arête rapportée continue jusqu'à sa disparition à une telle vitesse de coupe. Cette vitesse de coupe est appelée la vitesse de coupe critique  $V_{critique}$  [RJM07]. La vitesse de coupe critique diminue avec l'augmentation de  $a_p$  et/ou  $f$  [MC98]. L'arête rapportée et la couche adhérente dépendent du matériau de la pièce à usiner ; le collage durant l'usinage des matériaux ductiles comme l'alliage d'aluminium est plus grand que le collage durant l'usinage des matériaux durs comme l'acier. L'arête rapportée (BUE : Built Up Edge) formée sur les outils SNG 433 lors de l'usinage de AA 2024 est environ 5 fois la BUE formée lors d'usinage de AA 6061 avec les mêmes conditions de coupe [KR07]. L'alliage d'aluminium AA 6061 colle moins que AA 2024. Aussi, l'alliage d'aluminium AA 7075 T651 colle moins que l'alliage AA 2024 [SRI<sup>+</sup>05]. La profondeur de passe est un paramètre qui joue aussi un rôle sur le collage du matériau. L'augmentation de cette profondeur de passe lors d'usinage de matériau composite provoque un collage important [MB03], [ES98]. L'utilisation du fluide de coupe est l'une des méthodes recommandées pour minimiser le collage du matériau sur la face de coupe des outils lors d'usinage d'acier AISI 12L14 [RJM07]. Le revêtement aussi joue un rôle très important sur la diminution de quantité de matériau collé sur les outils de coupe [CPM04], [CTS04], [BA08]. Le revêtement protège donc les outils de coupe de l'usure et du collage de matériau qui change les dimensions finales des pièces usinées. Le tableau 2.5, montre les différents types d'endommagements des outils de coupe lors d'usinage.

Matériau usiné	Outil	Procédé d'usinage	Type d'endommagement	Référence
AA2024 AA7050	Carbure revêtu de TiN KCMW 11T3	Tournage à sec	BUE, BUL	[SRI <sup>+</sup> 05]
AA2024 Al – 4 % Cu	KCMW 11 T3 rhombique	Tournage à sec	BUE, BUL	[CBS <sup>+</sup> 02]
Al2024 Al6061 Al 7075	SNG 433 K68	Tournage à sec	BUE, BUL	[KR07]
AA 7050	Carbure revêtu de TiN	Tournage à sec	BUE, BUL	[RCSM05]
AA 2024	Plaquette TF perçage revêtu et non revêtu	Perçage à sec	BUE, BUL	[NLGG05]
Al 7010 AlSi9Cu1	Fraise de D = 25 Revêtue TIALN/VN TiAlCrTN DLC et non revêtue	Fraisage à sec	BUE	[HLR <sup>+</sup> 06]
Acier AISI 1020, 1045, 4140	Plaquette rhombique revêtue et non DNMG	Tournage à sec	VBB, BUE	[CPM04]
Acier AISI 304	Carbure cémenté WC ISO P10	Tournage à sec	VBB, BUE	[TY04]
Composite Al4C3 - Al	Tungstène non revêtu K10	Tournage à sec	BUE	[OZC03]
Composite LM6Mg15Si Cp - Al	Rhombique non revêtu CCGX 09 T3 04	Tournage à sec	VBB, BUE	[MB03]
Aciers AISI	Carbure tungstène TN 35	Tournage à sec	BUE	[MC98]
Acier SAE 52100	Plaquette CNMG rhombique	Tournage à sec et lubrifié	BUE	[DE04]
Acier SAE 12L14	Carbure cémenté SPUN 120308	Tournage à sec et lubrifié	BUE	[RJM07]

TABLE 2.5 – Différents type d'endommagement des outils de coupe.

L'arête rapportée et la couche adhérente contiennent des éléments chimiques comme le fer, le cuivre, et l'aluminium. La composition chimique de BUE et BUL dépend du type de matériau usiné. L'analyse EDS (Energie Dispersive Spectromètre) de BUE et BUL durant le tournage de l'alliage d'aluminium AA 2024 (AL – 4 % Cu) avec des outils rhombiques KCMW 11 T3 08 [CBS<sup>+</sup>02] montre que les pics de cuivre et de fer (Cu et Fe) sont moins intenses dans la BUL (figure 2.25 a) que dans la BUE (figure 2.25 b). Cette différence est due à la perte des particules intermétalliques (AL, Cu, Fe) au moment de formation de la couche adhérente.



Pour éviter le phénomène du collage de matériau usiné, il faut :

- Augmenter la vitesse de coupe lors de l'usinage.
- Sélectionner une géométrie d'outil positive.
- Usiner avec des outils revêtus.

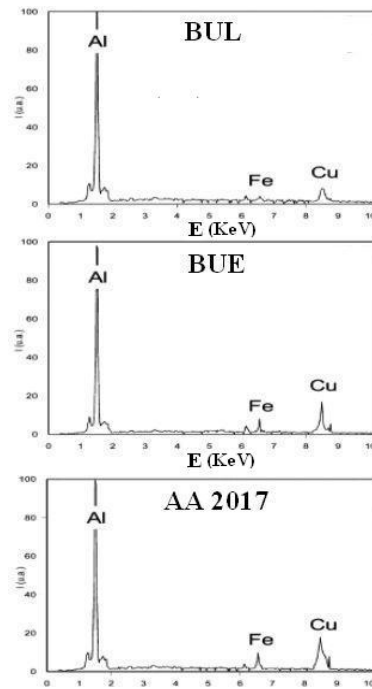


FIGURE 2.25 – Analyse EDS de BUE et BUL après l'usinage de AA 2024 [CBS<sup>+</sup>02].

# Chapitre 3

## Contexte d'usinage

Le choix du type de matériau à usiner dépend de domaine d'application recherché. Les matériaux disponibles dans le marché ont des caractéristiques mécaniques différentes. Dans notre étude, nous avons choisi l'usinage des alliages d'aluminium. Ces matériaux sont très utilisables dans l'aéronautique et ils disposent des duretés faibles permettent de bien étudier le phénomène du collage durant l'usinage. Il est nécessaire d'utiliser les différents dispositifs de mesures (MEB, profilomètre, électroérosion) pour pouvoir analyser l'évolution des différents paramètres (usure, état de surface, collage).

### 3.1 Les matériaux usinés

L'étude a été faite sur l'usinage à sec des alliages d'aluminium. Ces alliages d'aluminium ont une température de fusion  $T_f$  comprise entre 500°C et 600°C et sont de bons conducteurs de chaleur. Le tableau 3.1 montre les principales utilisations des alliages d'aluminium dans l'industrie, le classement de ces alliages se fait selon la norme française AFNOR et la norme ISO [CAH00]. Les états métallurgiques des alliages d'aluminium sont définis par une lettre majuscule qui caractérise l'état fondamental (traitement mécanique ou thermique) suivie de chiffres complémentaires pour subdiviser cet état si nécessaire.

- F = brut de fabrication à chaud.
- O = état recuit.
- H = état durci par écrouissage et éventuellement partiellement adouci.
- T = état durci par précipitation (trempe). Le tableau 3.2 montre la subdivision de l'état (T) Trempé [LUG03]. Dans ce cas, nous ajoutons après le 1<sup>er</sup> ou le 2<sup>ème</sup> chiffre (T4, T5 ou T76) le chiffre 5 qui est réservé aux traitements diminuant les contraintes résiduelles. Ce chiffre 5 est suivi d'un autre chiffre indiquant le type de traitement subi : 51= Contraintes résiduelles atténuées par traction. 52 = Contraintes résiduelles atténuées par compression.

AFNOR	ISO	Principales Utilisations
5083	AlMg4.5Mm	Ensemble mécano soudé, construction navale, industrie chimique, industrie cryogénique, citernes de transport et stockage
6060	Al Mg Si	Menuiserie métallique. Carter de machines. Décoration. Eléments mécaniques de signalisation, de sécurité. Industrie textile
6082 A	Al Si1 Mg Mn	Pièce mécanique, pièce de machine, plaque de base, menuiserie métallique, industrie textile, article ménager
2017 A	Al Cu4 Mg Si	Pièce de mécanique, pièce de machine, plaque de base. Aéronautique.
2024	Al Cu4 Mg l	Pièce de grande résistance non chaudronnée. Aéronautique. Armement.
2618	Al Cu2 Mg Ni	Pièce mécanique de haute précision grâce à une grande stabilité dimensionnelle. Bonne tenue à chaud. Aéronautique.
2030	Al Cu Pb Mg	Alliage de décolletage donnant des copeaux très fragmentés.
7075	Al Zn6 Mg Cu	Pièce de fatigue à limite élastique élevée. Soudabilité médiocre. Usinabilité bonne. Aéronautique. Matériel Roulant. Boulonnerie. Bâtons de ski. Skis

TABLE 3.1 – Les alliages d'aluminium.

Pour notre étude, nous avons usiné des ronds des alliages d'aluminium AA 2017 T4 et AA 7075 T651 T65. Les deux matériaux ont des duretés différentes, la dureté de l'alliage d'aluminium AA 2017 T4 est de l'ordre de 110 HB ; cette dureté est de l'ordre de 140 HB pour l'alliage d'aluminium AA 7075 T651. Toutes les pièces ont des longueurs et des diamètres identiques (L = 350 mm, D = 150 mm). Le tableau (3.3) présente la composition chimique de ces deux matériaux. L'alliage AA 2017 T4 contient 4.5 % de cuivre (Cu), alors que l'alliage AA 7075 T651 contient 5.6 % de zinc (Zn). La conductivité thermique de AA 2017 T4 est similaire à celle de AA 7075 T651.

	Etat	Désignation d'état
Trempé mûri	1 - Trempé au cours de processus de transformation (laminage – filage). 2 - Trempé en opération séparée.	T1, T4
Trempé écroui et mûri		T3
Trempé et revenu	1 - Trempé au cours de processus de transformation (laminage – filage). 2 - Trempé en opération séparée.	T5, T6
Trempé écroui et revenu	Trempé au cours de processus de transformation (laminage – filage).	T8
Trempé et revenu doux	Etat favorable au pliage et au cintrage.	T51 ou T61
Trempé et sur revenu	1 - Traitement de sur revenu standard. 2 - Traitement de sur revenu moins poussé que le traitement standard.	T73, T76

TABLE 3.2 – La subdivision de l'état métallurgique T.

Compositions chimique	AA 2017 T4		AA 7075 T651	
	min %	max %	min %	max %
Si	0.20	0.80	/	0.4
Fe	/	0.70	/	0.5
Cu	3.5	4.5	1.2	2
Mn	0.4	1	/	0.3
Mg	0.4	1	2.1	2.9
Cr	/	0.1	0.18	0.28
Zn	/	0.25	5.1	5.6
Ti	/	/	/	0.2
Al	Reste	Reste	Reste	Reste

TABLE 3.3 – Compositions chimique de AA 2017 T4 et AA 7075 T651.

## 3.2 La machine de tournage

Nous avons réalisé tous les essais de tournage sur un tour à commande numérique CTN 210 CAZE-NEUVE (puissance maximale 10 kW, voir figure 3.1 A). La rotation maximale autorisée, sans monter de mandrin équilibré, est de 4500 tr/min. La figure (3.1 B) montre la fixation de la pièce usinée dans la machine. Les caractéristiques principales de cette machine sont présentées sur le tableau (3.4).



FIGURE 3.1 – Tour numérique CTN 210.

	Tour Horizontale CTN 210 3 axes	Caractéristiques
Structure	A banc incliné	Oui
Structure	Avec Tourelles	1
Structure	Bâti en fonte	Oui
Outils	Nombre d'outils fixes sur tourelle	12
Outils	Nombre d'outils rotatifs sur tourelle	6
Outils	Puissance maxi outils rotatifs en kW	3.5 kW
Prise de pièces	Diamètre maximal usinable en mm	360 mm
Prise de pièces	Longueur maximale usinable en mm	510 mm
Commande	Modèle de CNC Proposés en standard	Siemens Shop Turn
Commande	Programmation par apprentissage	Oui
Commande	Programmation conversationnelle	Oui
Commande	Programmation ISO	Oui
Autres	Poids total	3 Ton

TABLE 3.4 – Caractéristiques de tour CTN 210 3 axes.

### 3.3 Dispositifs de mesure

#### 3.3.1 Le profilomètre

Une surface usinée n'est pas une surface parfaitement lisse : selon la méthode d'usinage et les plaquettes utilisées, mais aussi selon le matériau, elle présente de nombreuses irrégularités micro géométriques ou macro géométriques. Ces irrégularités sont définies par comparaison avec une ligne "moyenne", la norme utilisée pour l'état de surface est la norme ISO 4287, où les notions de rugosité et d'ondulation sont considérées en 2D (voir figure 3.3). L'état de surface des pièces usinées

dépend de plusieurs paramètres : le rayon de bec des plaquettes  $R\epsilon$ , et l'avance  $f$ . Nous avons utilisé un rugosimètre Taylor Hopson Surtronic 3+ (figure 3.2) avec filtre gaussien choisi suivant des recommandations (voir détail en tableau 3.5) pour examiner l'état de surface des pièces. Le choix des paramètres d'entrée (longueur de Cut Off, et longueur d'évaluation  $L_n$ ) du rugosimètre dépend des conditions d'usinage. Les paramètres de rugosité pris en compte dans la suite de nos études seront les critères  $Ra$  (rugosité arithmétique) et  $Rt$  (rugosité totale). Le calcul de  $Ra_{th}$  s'effectue autour d'une ligne moyenne (équation 3.1), avec  $Y$  étant l'écart des points du profil à cette ligne moyenne et  $L$  la longueur de mesure.



FIGURE 3.2 – Profilomètre (Taylor Hopson).

$$Ra_{th} = \frac{1}{L} \int |Y(x)| dx \quad (3.1)$$

Durant l'opération de chariotage avec un outil d'un rayon  $R\epsilon$  et une avance  $f$  nous avons les deux expressions suivantes (eq 3.2 et eq 3.3) :

$$Rt_{th} = \frac{f^2}{8 * R\epsilon} \quad (3.2)$$

$$Ra_{th} = \frac{f^2}{18 * \sqrt{3} * R\epsilon} \quad (3.3)$$

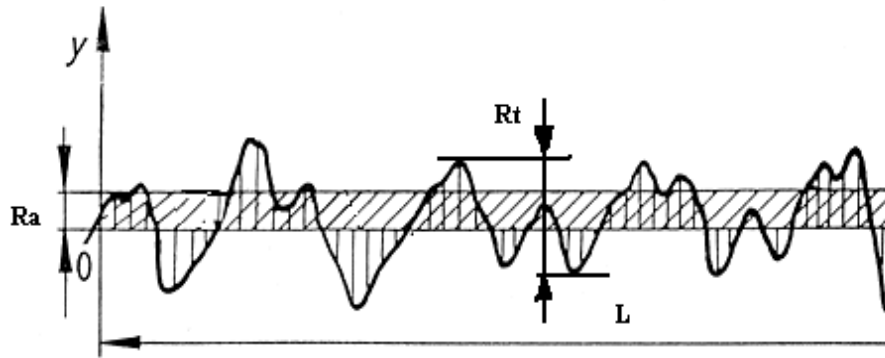


FIGURE 3.3 – Profil 2D de l'état de surface.

Profils périodiques	Profils apériodiques	Profils apériodiques	Longueur d'onde limite	Longueur d'évaluation	Longueur d'évaluation	Section palpée
Pas de rainures $S_m$ mm	Rugosité moyenne $R_z$ $\mu m$	Moyenne arithmétique $R_a$ $\mu m$	$L_c$ mm	$L$ mm	$L_n$ mm	$L_t$ mm
0.01 à 0.04	jusqu'à 0.1	jusqu'à 0.02	0.08	0.08	0.4	0.48 ou 0.56
0.04 à 0.13	0.1 jusqu'à 0.5	0.02 jusqu'à 0.1	0.25	0.25	1.25	1.5 ou 1.75
0.13 à 0.4	0.5 jusqu'à 10	0.1 jusqu'à 2	0.8	0.8	4	4.8 ou 5.6
0.4 à 1.3	10 jusqu'à 50	2 jusqu'à 10	2.5	2.5	12.5	15 ou 17.5
1.3 à 4	Plus 50	Plus 10	8	8	40	48 ou 56

TABLE 3.5 – Choix de filtre numérique passe haut DIN 4768.

### 3.3.2 Le projecteur de profil

Nous avons utilisé dans notre étude un projecteur de profil (TESA VISIO300 DCC) pour examiner l'usure frontale VBB des plaquettes ou le collage de matériau usiné (BUE ou BUL). Le projecteur de profil utilisé est une machine de mesure vidéo équipée d'une table de 350 x 210 mm, d'une caméra haute résolution (795 x 596 Pixels), couleur (16 M couleurs), NTSC/PAL codé sur 24 Bits. Il est équipée aussi d'un ordinateur tactile intégré (appelé panel PC) avec écran plat (voir figure 3.4). Il est aussi équipée d'un pointeur laser pour faciliter la localisation sur l'objet. L'illumination laser s'émet directement sur l'objet à travers une lentille. Le pointeur est alimenté en basse tension mais sa lumière peut endommager l'œil humain. Il est donc fortement déconseillé de regarder directement ou

indirectement le spot laser. L'éclairage de surface se fait par une fibre optique annulaire, lampe : 21 Volts - 150 Watts. Le zoom motorisé 6.5x avec 5 mémoires programmables sauvegardées permettant un grossissement de 20x à 135x.



FIGURE 3.4 – Projecteur de profil.

### 3.3.3 Le microscope électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage utilisé est un appareil JEOL JSM-6380 LV (voir figure 3.5). Il peut fonctionner en mode SEI (Secondary Electron Image) ou BEI (Backscattering Electron Image). Dans le mode de SEI, un détecteur d'électrons transcrit le flux d'électrons en une luminosité sur un écran de type télévision. En balayant la surface, nous relevons les variations de contraste qui donnent une image de la surface avec un effet de relief. Mais, dans le mode BEI les électrons rétro diffusés proviennent d'un volume plus important ; le volume d'émission fait donc plusieurs fois la taille du faisceau. Le MEB (JEOL) a une résolution de 3.0 nm. La chambre des échantillons peut loger des échantillons jusqu'à 150 mm de diamètre. Le grossissement maximal autorisé sur le MEB est de l'ordre de 100000x. Nous avons utilisé le MEB dans notre étude pour examiner les plaquettes usées à la fin de l'usinage (faces de coupe et faces de dépouille). Nous avons aussi examiné les acuités d'arête des plaquettes neuves et usées en faisant des grossissements de 500x, 1000x, 1500x et 2000x.





FIGURE 3.5 – JEOL JSM-6380 LV.

## 3.4 Description des outils et porte-outils

### 3.4.1 Les outils utilisés

Nous avons réalisé tous les essais de chariotage en utilisant des plaquettes rhombiques ( $55^\circ$  et  $80^\circ$ ) revêtues et non revêtues. Le rayon de bec de ces plaquettes ( $R\epsilon$ ) est de l'ordre de 0.4 ou 0.8 mm. Toutes les plaquettes sont de 3 fournisseurs : Sandvik, Iscar, et Otelo. Le tableau (3.6) montre toutes les plaquettes utilisées durant l'usinage de l'alliage d'aluminium et leurs désignations. Le tableau (3.7) présente les images des faces de coupe de toutes les plaquettes, ces images ont été prises à l'aide du projecteur de profil.

Plaquette	Angle de pointe	Rayon mm	Revêtement	Face de coupe polie	Désignation	Raccourcis	Utilisation
Sandvik	55°	0.4	H10	Non	DCGX 11 T304-AL H10	S1	F (400, 800, 1200)
Sandvik	55°	0.8	H10	Non	DCGX 11 T308-AL H10	S2	Eb (100)
Sandvik	55°	0.8	CD 1810	Non	DCGX 11 T304-AL CD 1810	S3	Eb (100)
Sandvik	80°	0.8	H10	Non	CCGX 12 04 08-AL H10	S4	Eb (600)
Iscar	55°	0.4	-	Oui	DCGT 11 T304-AS IC20	I1	F (400, 800, 1200)
Otelo	80°	0.8	-	Oui	CCGT 12 04 08 AL KIC 11	O1	Eb (100, 600)
Otelo	55°	0.4	-	Oui	DCGT 11 T304 Al KIC 11	O2	F (400, 800, 1200)

TABLE 3.6 – Plaquettes utilisées pour les essais de chariotage.

Les angles de coupe et les angles de dépouille de toutes les plaquettes ne sont pas identiques. Nous avons mesuré les angles de coupe ( $\gamma$ ) et les angles de dépouille ( $\alpha$ ) de toutes les plaquettes (voir figure 3.6). Les plaquettes Iscar présentent l'angle de coupe le plus grand et l'angle de dépouille le plus petit. Mais, les plaquettes Sandvik présentent le plus petit angle de coupe mais le plus grand angle de dépouille. L'angle de dépouille a une influence sur l'usure de la face de dépouille de la plaquette. Certains chercheurs comme El-Baradie [BAR96] trouvent que plus l'angle de dépouille est grand plus l'usure de dépouille VBB de la plaquette diminue, et la résistance de l'arête de coupe aux forces de coupe diminue. D'après la figure (3.6), l'angle de dépouille des plaquettes Iscar est 28.8 % plus petit que celui des plaquettes Sandvik et 24.2 % plus petit que celui des plaquettes Otelo. L'angle de coupe des plaquettes Iscar est 18.18 % plus grand de celui des plaquettes Sandvik. Le tableau (3.8) présente les valeurs mesurées des angles de coupe  $\gamma$  et des angles de dépouilles  $\alpha$  de toutes les plaquettes utilisées.

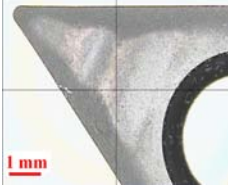
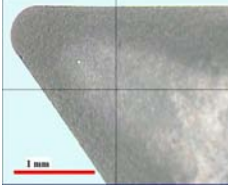
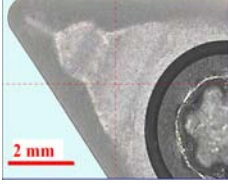

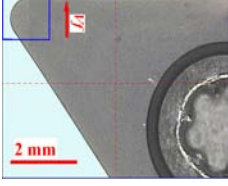
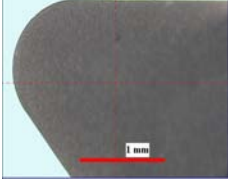
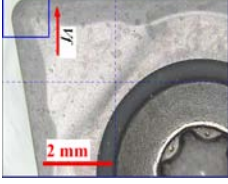
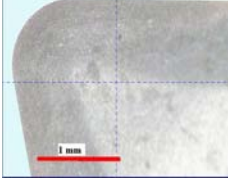
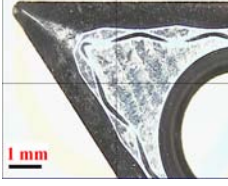
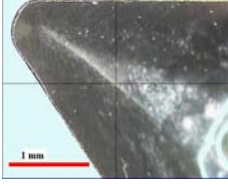
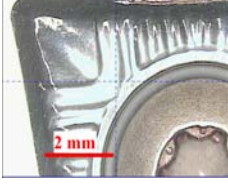
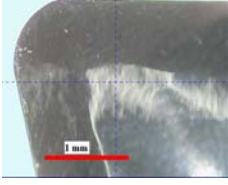

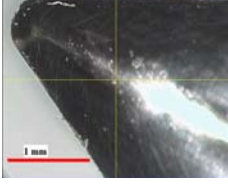
Plaquette (Voir tableau 3.6)	Face de coupe	
S1		
S2		
S3		
S4		
I1		
O1		
O2		

TABLE 3.7 – Images des faces de coupe des plaquettes neuves.

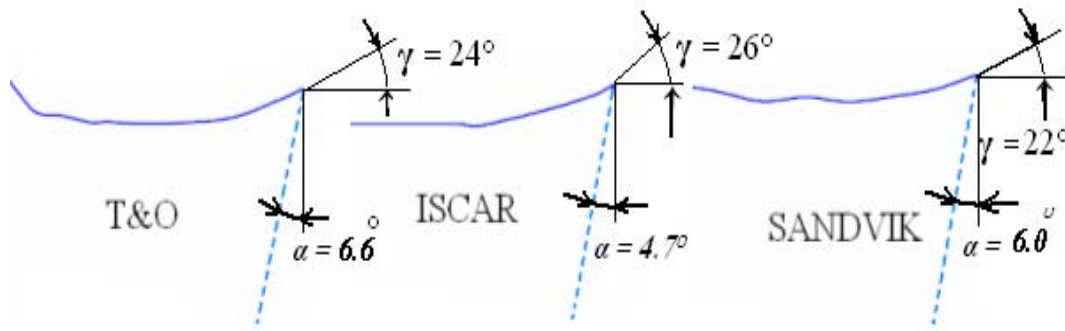


FIGURE 3.6 – Profil 2D des faces de coupe des trois types de plaquettes (Otelco, Iscar, et Sandvik).

Nous avons mesuré le rayon de bec réel, les angles de direction d'arête principale  $Kr$  et secondaire  $Kr'$  de chaque plaquette en utilisant le projecteur de profil (Voir tableau 3.8).

Plaquette (voir désignation tableau 3.6)	$R\epsilon$ mm	$Kr$ degré	$Kr'$ degré	$R\beta$ $\mu$ m	Angle de coupe $\gamma$	Angle de dépouille $\alpha$
S1	0.33	95.4°	30.1°	8	22°	6.0°
S2	0.77	93.7°	31.5°	10	22°	6.8°
S3	0.8	93.8°	31.2°	25	22°	6.0°
S4	0.78	95.6°	5.6°	8	22°	6.0°
I1	0.38	95.1°	30.5°	6	26°	4.7°
O1	[0.76-0.8]	95.7°	5.4°	8	24°	6.6°
O2	0.36	94.7°	30.8°	7	24°	6.6°

TABLE 3.8 – Valeurs mesurées de  $R\epsilon$ ,  $Kr$ ,  $Kr'$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$ , et  $R\beta$  de toutes les plaquettes.

### 3.4.2 Les acuités d'arête des plaquettes

L'acuité d'arête se mesure à la frontière entre la face de coupe et la face de dépouille. Elle se présente par une surface cylindrique ou par plusieurs plans chanfreins et se caractérise (dans le cas de l'acuité cylindrique) par un rayon  $R\beta$  (voir détail en chapitre 2.3.2). Nous avons observé les frontières entre la face de coupe et la face de dépouille pour toutes les plaquettes en utilisant le microscope électronique à balayage (figure 3.5). Le tableau (3.10) présente les images MEB des plaquettes neuves. Le tableau (3.8) présente les résultats de mesure du rayon d'acuité d'arête  $R\beta$  de chaque plaquette. Ce tableau montre que les plaquettes Sandvik non revêtues ont à peu près le même rayon d'acuité d'arête, ce rayon est de l'ordre de 8  $\mu$ m. Le revêtement diamant CD 1810 de la plaquette (S3) donne une acuité d'arête importante, le rayon de cette acuité est de l'ordre de 25  $\mu$ m. Le revêtement diamant sur la plaquette a augmenté le rayon de l'acuité d'arête de cette plaquette de 150 %. Certains chercheurs

comme Jeffry [TM99] disent que : plus le rayon de l'acuité d'arête est grand, plus l'état de surface des pièces usinées devient mauvais. L'acuité d'arête de la plaquette Iscar est la plus petite, son rayon est de l'ordre de 6  $\mu\text{m}$ . Les deux plaquettes polies (Otelco) O1 et O2 présentent des acuités d'arête identiques. Le rayon de cette acuité d'arête est de l'ordre de 8  $\mu\text{m}$ .

### 3.4.3 Les porte-outils

Nous avons utilisé deux types de porte-outils, un pour les plaquettes 55° désignation SDJCL 2020K 11 ( voir figure 3.7B) et l'autre pour les plaquettes 80° désignation SCLCL 2020 K12 (voir figure 3.7A). Le tableau (3.9) présente les dimensions de ces deux porte-outils. Le porte-outils SDJCL 2020 K 11 produit un angle  $K_r$  de 95° et un angle  $K_r'$  de 30°. Le porte-outils SCLCL 2020 K 12 produit un angle de  $K_r$  de 95° et un angle  $K_r'$  de 5°.

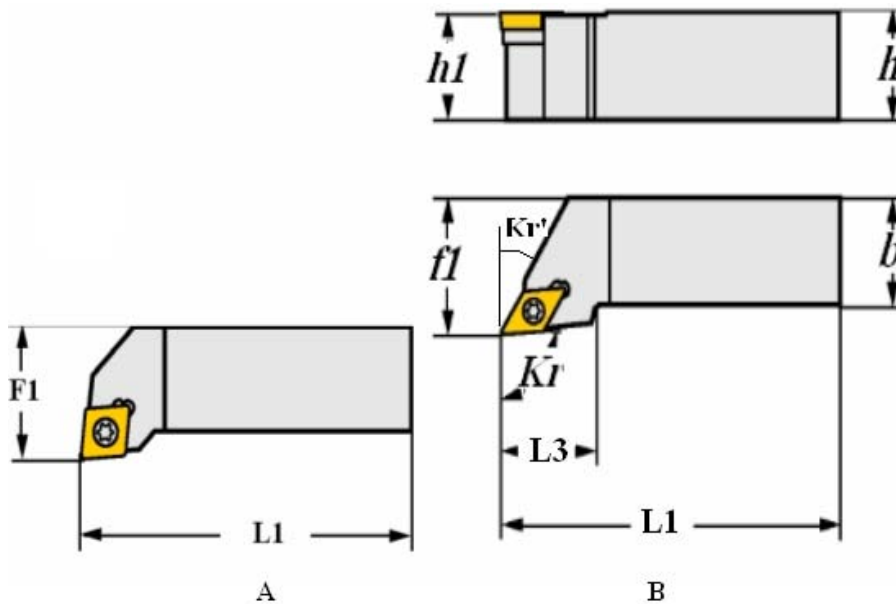


FIGURE 3.7 – Porte-outils.

Référence	b	f1	h	h1	L1	L3
SCLCL 2020 K 12	20.0	25.0	20.0	20.0	125.0	25.0
SDJCL 2020 K 11	20.0	25.0	20.0	20.0	125.0	24.0

TABLE 3.9 – Dimensions des porte-outils.

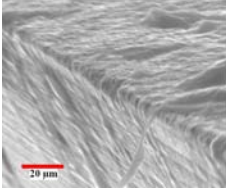
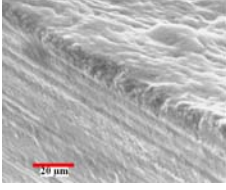
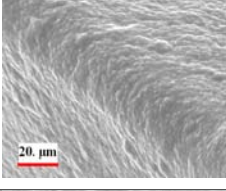
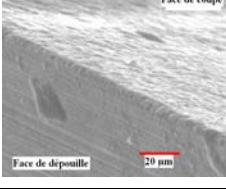

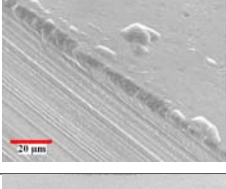
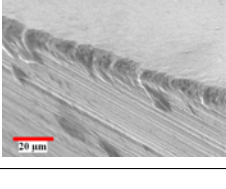
Plaquette (voir désignation tableau 3.6)	Images MEB x 1000
S1	
S2	
S3	
S4	
I1	
O1	
O2	

TABLE 3.10 – Images des acuités d'arête prises au MEB pour les plaquettes neuves.

# Chapitre 4

## Usinage en ébauche

Dans le cas d'un usinage en ébauche, nous choisissons des conditions de coupe sévères (une forte profondeur de passe et une forte avance). Cette opération consiste à obtenir une forte productivité (le plus de matière enlevée en moins de temps possible). Le but de cette étude sur l'usinage en ébauche est de solliciter fortement les plaquettes utilisées pour étudier tous les phénomènes d'endommagement des plaquettes à cause de la température dégagée. Nous allons effectuer cette étude sur l'alliage d'aluminium AA 2017 T4. La profondeur de passe  $a_p = 2$  mm et l'avance  $f = 0.5$  mm/tr restent constantes tout au long de l'usinage en ébauche. Nous allons tester deux vitesses de coupe différentes 600 et 100 m/min. Le but de l'usinage à une vitesse de 600 m/min est obtenir une productivité maximale en rapport avec la puissance de la machine utilisée (Cazeneuve CTN 210) et de voir l'influence de l'élévation de la température dans la zone de contact. Le choix d'une vitesse de coupe de 100 m/min permet d'étudier l'effet d'une faible vitesse de coupe sur le collage de la matière usinée et sur l'usure des plaquettes. Cette vitesse peut paraître faible en condition industrielle mais elle correspond à des diamètres de pièces faibles qui ne permettent pas à cause de la limitation de la vitesse de la broche d'atteindre des vitesses de coupe élevées. L'ensemble des études porte sur un temps total d'usinage de l'ordre de 49 min pour la vitesse de 600 m/min et de l'ordre de 30 min lors d'usinage avec une vitesse de 100 m/min. Tous les essais seront effectués à sec et avec lubrification d'une huile soluble (concentrée à 6.5 %) pour étudier l'effet du lubrifiant sur les phénomènes du collage et de l'usure.

### 4.1 Usinage avec une puissance de 10 kW

#### 4.1.1 Présentation des essais

Nous avons usiné à sec et avec lubrification (huile soluble concentrée à 6.5%) des ronds d'alliages d'aluminium AA 2017 T4 (Voir les compositions chimique en tableau 3.3) sur un tour à commande numérique (voir figure 3.1). Nous avons réalisé les essais de chariotage en utilisant les trois plaquettes suivantes :

1. Deux plaquettes polies (80°) O1 (voir désignation en tableau 3.6), une en usinage à sec et l'autre en usinage lubrifié de AA 2017 T4.
2. Une plaquette non polie (80°) S4 (voir désignation en tableau 3.6) pour l'usinage à sec de AA 2017 T4.

Ces plaquettes sont différentes d'un point de vue du prix, une plaquette Sandvik (S4) est plus chère qu'une plaquette Otelo (O1) de l'ordre de 28 % (voir tableau 4.1). Le porte-outils utilisé pour ce type de plaquette est de type SCLCL 2020 K 12 (voir figure 3.7A). La lubrification durant l'usinage avec l'huile soluble joue un rôle important sur le refroidissement de la zone de contact plaquette / pièce et aussi sur l'évacuation des copeaux. Ce dernier point est secondaire étant donné la configuration d'usinage. Néanmoins elle pose des problèmes de pollution et augmente les coûts de fabrication ; il est donc recommandé de réduire l'utilisation du lubrifiant durant l'usinage [CRE00]. L'objectif est donc de voir son influence sur l'usure des outils, sur la formation des copeaux, ainsi que sur l'état de surface obtenu.

Plaquette	Prix en euro HT
Otelo rhombique à 80° (O1)	9.13
Sandvik rhombique à 80° (S4)	11.75

TABLE 4.1 – Prix unitaire d'une plaquette (en 2009).

Les paramètres de coupe utilisés pour les essais sont : une profondeur de passe  $a_p = 2$  mm, une vitesse de coupe  $V_c = 600$  m/min, et une avance  $f = 0.5$  mm/tr. Ces paramètres de coupe nous permettent de réaliser des opérations de chariotage avec une puissance de coupe proche de la puissance maximale de la machine. La puissance est calculée par le comoment entre le torseur cinématique et le torseur des actions mécaniques. Dans notre configuration d'usinage, la puissance nécessaire pour le tournage dépend principalement de la vitesse de coupe  $V_c$  et de l'effort tangentiel de coupe  $F_c$  ; celle-ci se calcule à l'aide de la formule suivante (eq 4.1).

$$P_c = a_p * f * \sin(Kr) * V_c * K_c \quad (4.1)$$

$a_p$  représentant la profondeur de passe en mm,  $f$  l'avance en mm/tr,  $V_c$  la vitesse de coupe en m/min, et  $K_c$  la pression spécifique de coupe en N/mm<sup>2</sup>.

La pression spécifique de coupe est l'effort nécessaire pour séparer de la pièce un copeau de 1 mm<sup>2</sup> de section ; il dépend du type de matériau à usiner. La valeur recommandée de  $K_c$  est de l'ordre de 700 N/mm<sup>2</sup> [COR05], dans nos travaux nous avons choisi une valeur de 1000 N/mm<sup>2</sup> pour la sécurité. Il existe d'autre modèle de puissance mécanique de coupe. Cahuc Olivier et al [CDGB01] ont développé un modèle de la puissance de coupe en considérant les moments au bout de la plaquette. Ce modèle issue de la mécanique se traduit par l'équation (eq 4.2), soit ( $F_z$  et  $F_y$ ) sont les composantes



de forces,  $M_z$  le composante du moment sur l'axe Z (voir figure 4.1),  $w$  est la vitesse angulaire. Les chercheurs ont constaté expérimentalement que le troisième terme de l'équation (eq 4.2) est négligeable en comparant avec les deux premiers. Nous allons simplifier le calcul de la puissance en appliquant l'équation (eq 4.1), cette équation donne une puissance de coupe de l'ordre de 10 kW. Tous les essais seront comparés à partir du volume de matière usinée  $Q$  (cm<sup>3</sup>). Le temps total d'usinage est de l'ordre de 49 min pour l'usinage à sec et de l'ordre de 30 min pour l'usinage lubrifié. Nous avons contrôlé « en fin d'usinage » les frontières entre la face de coupe et la face de dépouille de chaque plaquette. Ces frontières sont de forme cylindrique, le rayon de ce cylindre est  $R\beta$ . En utilisant le MEB (figure 3.5), nous avons mesuré le rayon de l'acuité d'arête  $R\beta$  des trois plaquettes utilisées pour les essais.

$$P_m = F_y * V_c + M_z * w + F_z * V_f \quad (4.2)$$

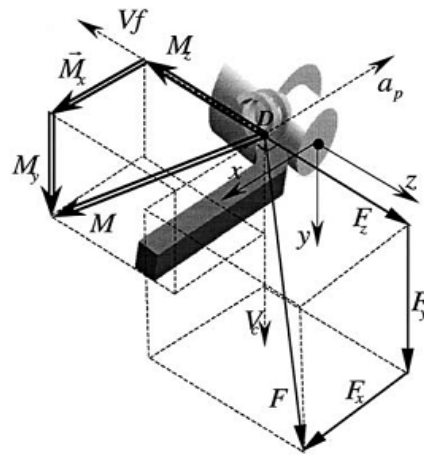


FIGURE 4.1 – Mesures des actions mécaniques (forces et moments) [CDGB01].

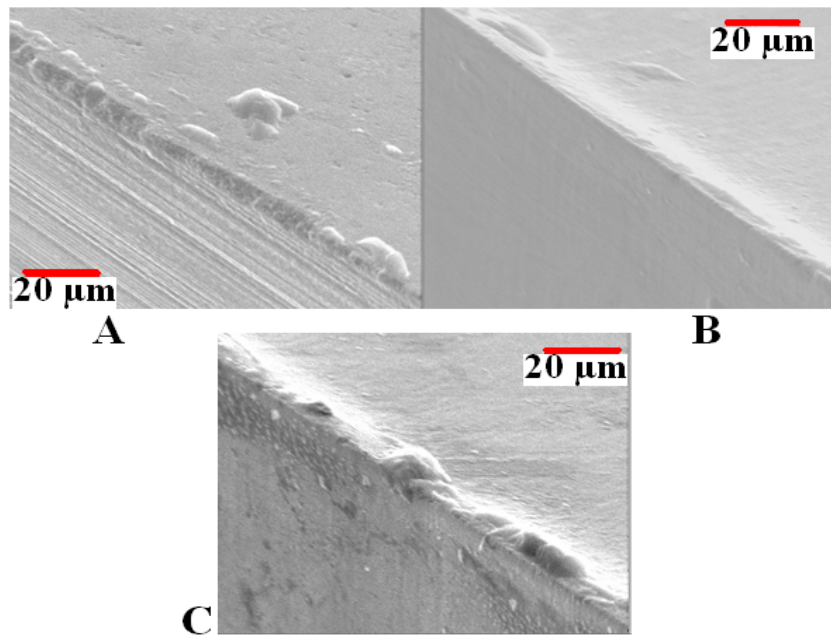


FIGURE 4.2 – Images des acuités d’arête prises au MEB. A. Plaquette (O1) Otelo 80° neuve. B. Plaquette (O1) usée après 49 min d’usinage à sec de AA 2017 T4. C. Plaquette (O1) usée après 30 min d’usinage lubrifié de AA 2017 T4.

Les images MEB de l’acuité d’arête des plaquettes (O1) neuves et usées sont présentées sur la figure (4.2). Cette figure montre qu’après 49 min d’usinage à sec, la face de coupe de la plaquette semble en retrait par rapport à l’arête de coupe indiquant la présence d’un cratère. De la même manière nous constatons qu’après 30 min d’usinage lubrifié (voir figure 4.2 C) la face de coupe au voisinage de l’arête de coupe est également en retrait avec quelques dépôts de matière collés sur l’arête de coupe. L’usinage à sec de AA 2017 T4 avec la plaquette (S4) montre que la face de coupe de cette plaquette a été polie par le déroulement des copeaux. Nous constatons également un retrait de la face de coupe de cette plaquette. Celui ci semble plus brutal que pour les plaquettes O1. Cela correspond à un cratère au voisinage de l’arête de coupe (voir figure 4.3 B).

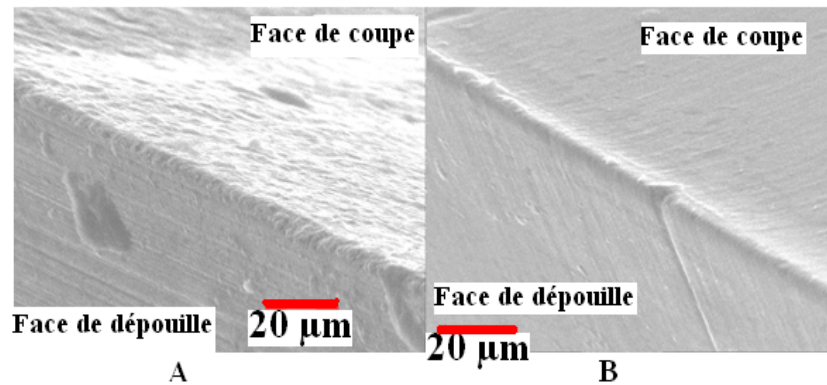


FIGURE 4.3 – Images des acuités d’arête prises au MEB. A. Plaquette (S4) Sandvik 80° neuve. B. Plaquette (S4) usée après 49 min d’usinage à sec de AA 2017 T4.

A partir des images issues du MEB, nous avons mesuré le rayon  $R\beta$  de l’acuité d’arête de toutes les plaquettes utilisées durant l’usinage. Le tableau 4.2 présente les valeurs de  $R\beta$  mesurées sur les plaquettes neuves et usées. A l’état neuf, les plaquettes O1 et S4 ont des acuités d’arête similaires. Après quelques minutes d’usinage, les rayons des acuités d’arête diminuent mais restent proches l’un de l’autre. Les deux plaquettes (O1 et S4) bien que distinctes au départ d’un point de vue du polissage de la face de coupe, voient cette caractéristique se ressembler de plus en plus au fil de l’usinage. Le rayon de l’acuité d’arête diminue à la fin du processus d’usinage avec les deux plaquettes, en raison de la formation d’un cratère au voisinage de l’arête de coupe.

$R\beta$ $\mu\text{m}$	Plaquette neuve	Plaquette usée
O1/sec	8	4
O1/lub	8	6
S4/sec	8	5

TABLE 4.2 – Valeurs de  $R\beta$  des plaquettes (O1 et S4) neuves et usées.

D’après le tableau (4.2), nous remarquons que :

1. L’usinage à sec avec la plaquette S4 diminue le rayon de l’acuité d’arête de 37 %.
2. L’usinage à sec avec la plaquette O1 diminue le rayon de l’acuité d’arête de 50 %.
3. L’utilisation du lubrifiant durant l’usinage de AA 2017 T4 avec la plaquette O1 ne semble pas avoir d’influence significative sur l’acuité d’arête. Celle-ci diminue également.

#### 4.1.2 Le collage de la matière usinée

– La couche adhérente (BUL) :

Nous avons utilisé le projecteur de profil (figure 3.4) afin d’observer la face de coupe de chaque plaquette et d’analyser tout changement sur celle-ci comme le collage de la matière usinée et l’usure en cratère. L’ensemble des images des faces de coupe au cours du temps d’usinage est donné sur le tableau (7.1) du chapitre annexe 7. Nous présentons les images de la face de coupe ci dessous à T=49 minutes pour l’usinage à sec et T=30 minutes pour l’usinage lubrifié et les comparons aux plaquettes neuves. Nous observons du collage sur la face de coupe, notamment derrière la zone du cratère. La comparaison de la face de coupe entre les plaquettes neuves et usées (voir figure 4.4) montre que la couche adhérente couvre une grande surface de la face de coupe sur la plaquette S4 durant l’usinage à sec.

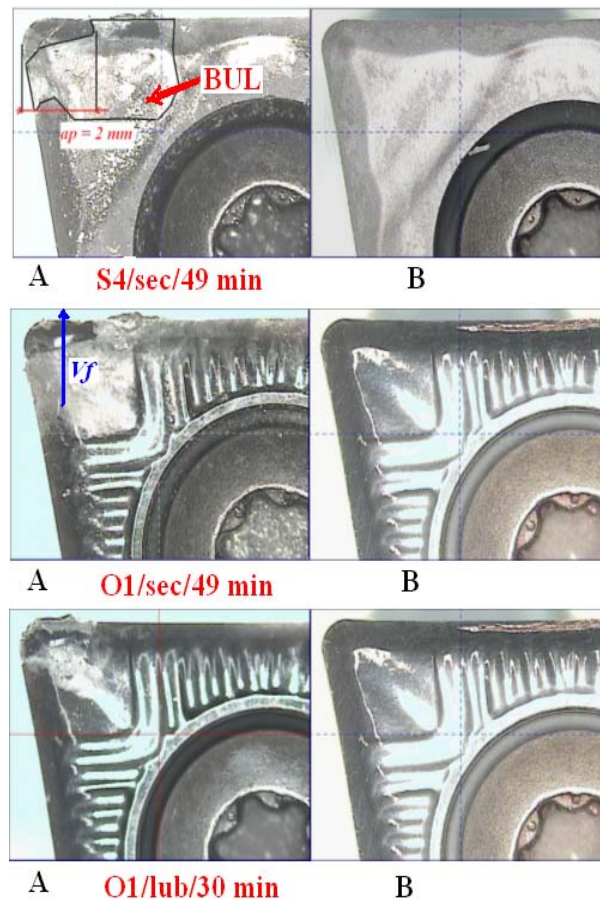


FIGURE 4.4 – Images prises sur le projecteur de profil. A. BUL formée sur la face de coupe. B. Plaquette neuve.

En comparant les plaquettes durant l’usinage à sec, nous constatons que la surface de BUL formée sur la plaquette polie O1 est moindre que celle de la surface de la plaquette S4. Cela peut être justifié par le polissage de la plaquette O1 qui facilite l’écoulement de la matière sans adhérence. En comparant les plaquettes O1 pour les usinages à sec et lubrifié, nous constatons que cette surface diminue fortement durant l’usinage lubrifié. Il apparaît clairement que le lubrifiant diminue le coefficient de frottement ce qui permet aux copeaux de s’écouler plus facilement sans adhérer à la face de coupe.

Nous pouvons maintenant nous interroger sur le rôle de cette couche adhérente. Est-elle néfaste ou favorable ? Certains pensent que cette couche adhérente crée une barrière de protection sur la face de coupe des outils [LIS04]. LIN et al [LLW08] disent que la disparition de la couche adhérente de la face de coupe d'une plaquette favorise l'usure par diffusion. Afin d'avoir une information sur l'état réel des plaquettes sous la couche adhérente, nous avons dissout l'alliage d'aluminium restant sur les plaquettes dans un bain de soude. Nous avons observé les plaquettes nettoyées au MEB. La figure (4.5) présente une comparaison entre une plaquette Sandvik neuve et une autre usée après 49 min d'usinage. La figure (4.5 A x 50) montre l'état neuf de la plaquette Sandvik (S4). La figure (4.5 A x 2000) représente un grossissement x 2000 d'une zone de la face de coupe située à 1 mm de l'arête de coupe principale et 1.3 mm de l'arête de coupe secondaire. La figure (B x 50) montre la plaquette Sandvik (S4) après 49 min d'usinage mais la figure (4.5 B x 2000) est un grossissement x 2000 de la même zone de la face de coupe qui se situe à 1 mm de l'arête de coupe principale et 1.3 mm de l'arête de coupe secondaire (cette zone se situe derrière le cratère). La comparaison des deux zones montre que la zone située derrière l'usure en cratère n'est pas similaire à celle de l'état neuf, cette zone est polie par le frottement des copeaux sur la face de coupe. La surface d'extension de cette couche adhérente est différente pour les trois plaquettes. Nous avons mesuré la surface de cette couche adhérente à l'aide d'un logiciel image J qui permet de mesurer les surfaces en fonction du nombre de pixels. Les valeurs moyennes de BUL sont données sur le tableau (4.3) et les graphiques de BUL en fonction de quantité de matière usinée sont présentés en figure (4.6). Cette figure montre que la surface de BUL formée pendant l'usinage à sec sur la plaquette S4 varie entre 10 et 12 mm<sup>2</sup>. Mais, la surface de BUL formée pendant l'usinage à sec sur la plaquette O1 varie entre 6 et 10 mm<sup>2</sup>.

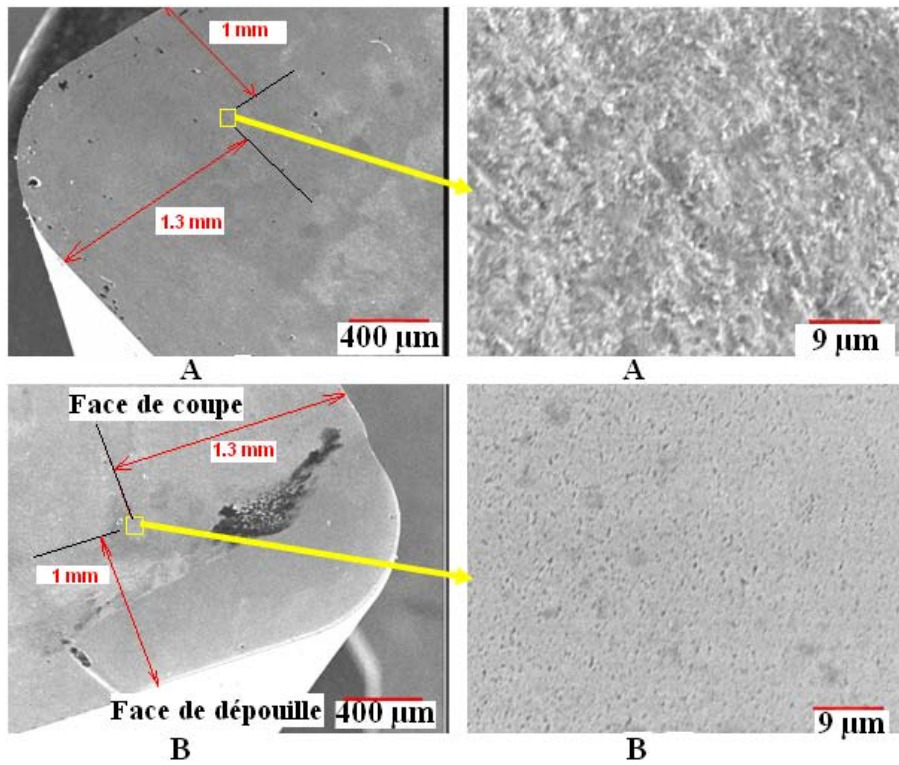
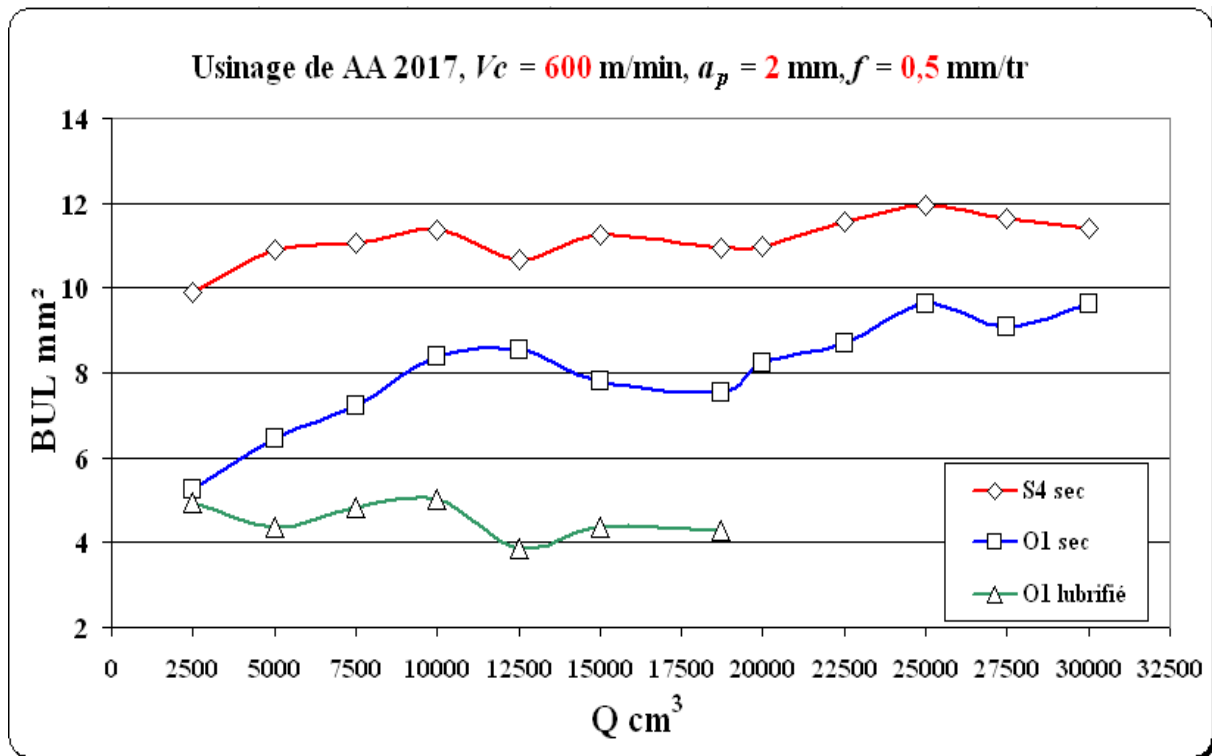


FIGURE 4.5 – Images MEB de la plaquette Sandvik 80°. A. Plaquette neuve. B. Plaquette utilisée après 49 min d’usinage.

BUL moy mm <sup>2</sup>	Q = 19000 cm <sup>3</sup>	Q = 30000 cm <sup>3</sup>
O1 / sec	7.32	8.04
O1 / lub	4.52	—
S4 / sec	10.87	11.14

TABLE 4.3 – Valeurs moyennes de BUL en mm<sup>2</sup> pour Vc = 600 m/min.

FIGURE 4.6 – BUL formée à une vitesse  $V_c = 600$  m/min.

D'après le tableau (4.3) nous pouvons conclure que :

1. Après  $19000 \text{ cm}^3$  de matière usinée, la lubrification diminue la surface d'extension de BUL sur la face de coupe des plaquettes polies (O1) de 38 %.  $BUL_{\text{moy lub}} < BUL_{\text{moy sec}}$ , car le lubrifiant diminue le frottement des copeaux sur la face de coupe des plaquettes.
2. L'utilisation des plaquettes polies (O1) diminue la surface d'extension de BUL sur la face de coupe de 33 % après  $19000 \text{ cm}^3$  de matière usinée. Aussi, nous trouvons que  $BUL_{\text{moy O1}} < BUL_{\text{moy S4}}$ , cela peut être expliqué par l'effet du polissage qui diminue le frottement entre le copeau et la face de coupe.
3. En usinant plus de matière à sec (jusqu'à  $30000 \text{ cm}^3$ ), la surface d'extension de BUL sur la face de coupe continue à augmenter.

L'ensemble des mesures montre clairement l'influence de la lubrification et du polissage sur la couche adhérente. Il est cependant important de constater que cette couche est située à l'arrière du cratère et que finalement son influence sur la tenue de la plaquette durant sa durée de vie n'est pas importante puisque ce n'est pas dans cette zone que l'on constate une dégradation de la plaquette.

– L'arête rapportée :

Durant l'usinage de l'alliage d'aluminium AA 2017 T4, une partie de la matière usinée reste collée sur l'arête de coupe de l'outil et forme l'arête rapportée. Cette arête rapportée joue un rôle sur la

rugosité de la pièce usinée, sur la géométrie d’outil utilisé [BMC07] et sur les actions mécaniques. Cette arête rapportée n’est pas stable car elle se forme et se brise durant l’usinage [DSD<sup>+</sup>07]. Une dégradation de l’état de surface de la pièce usinée peut être provoquée par le collage des fragments de BUE qui passe sous l’arête de coupe et restent collés sur la pièce usinée (voir figure 2.24), [? ]. Les valeurs données ci dessous correspondent à un nombre important de mesures. Il est vrai qu’il n’est pas simple de faire un constat sur l’arête rapportée étant donné l’instabilité du phénomène. Cependant ce nombre de mesures nous permet de formuler un certain nombre de tendances.

Nous avons mesuré la hauteur maximale de l’arête rapportée formée sur chaque plaquette (voir détail en tableau 7.8 annexe 7 ). La figure (4.7) présente les faces de dépouille de toutes les plaquettes en fin d’usinage. Sur chaque plaquette, nous avons mesuré la hauteur BUE max. Le collage de la matière usinée atteint une valeur maximale de 186 µm sur la plaquette S4. Nous avons calculé la hauteur moyenne de BUE formée sur toutes les plaquettes après 19000 cm<sup>3</sup> et après 30000 cm<sup>3</sup> (voir tableau 4.4). Les graphiques (sur la figure 4.8) présentent la variation de hauteur de BUE en fonction de la quantité de matière usinée.



FIGURE 4.7 – BUE maximale, A. Plaquette (S4) après 30000 cm<sup>3</sup> de matière usinée à sec, B. Plaquette (O1) après 30000 cm<sup>3</sup> de matière usinée à sec, C. Plaquette (O1) après 19000 cm<sup>3</sup> de matière usinée avec le lubrifiant.

BUE moy µm	Q = 19000 cm <sup>3</sup>	Q = 30000 cm <sup>3</sup>
O1 / sec	58	63
O1 / lub	56	—
S4 / sec	70	75

TABLE 4.4 – Valeurs moyennes de BUE après 19000 et 30000 cm<sup>3</sup> de matière usinée à Vc = 600 m/min.



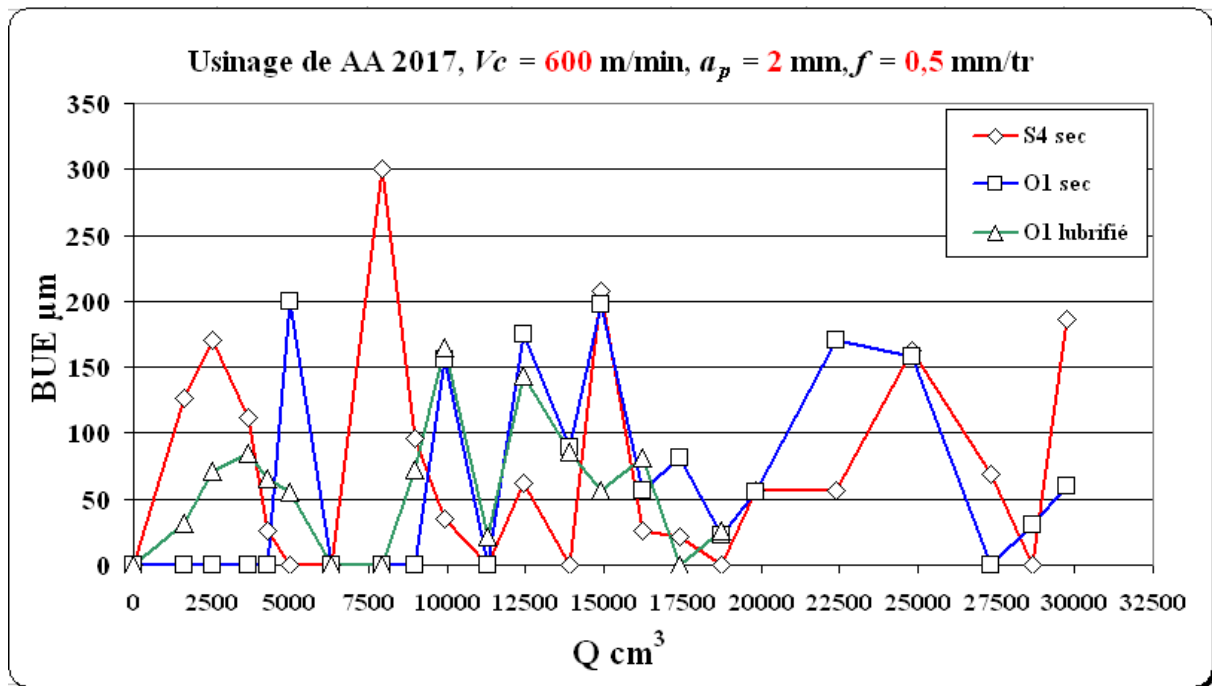


FIGURE 4.8 – Courbes de BUE en fonction de quantité de la matière usinée durant l’usinage de AA 2017 T4.

La figure (4.8) montre que l’arête rapportée formée sur la plaquette S4 évolue dans une bande de largeur d’environ  $200 \mu\text{m}$ . Jusqu’à environ une quantité de matière enlevée de  $10000 \text{ cm}^3$ , l’arête rapportée est quasiment inexistante sur la plaquette O1 durant l’usinage à sec. A partir de  $10000 \text{ cm}^3$ , on constate que la BUE formée sur la plaquette O1 évolue de la même façon que la plaquette S4. D’après le tableau (4.4) et la figure (4.8), nous pouvons remarquer que :

1. Après  $30000 \text{ cm}^3$  de matière usinée, l’utilisation des plaquettes polies (O1) diminue le collage de la matière usinée de  $16 \%$  par rapport aux plaquettes non polies (S4) durant l’usinage à sec de AA 2017 T4.
2. Après  $19000 \text{ cm}^3$  de matière usinée, l’utilisation d’une huile soluble ne présente aucune influence sur le collage de la matière usinée.

– Conclusion :

L’étude du collage de la matière usinée sur la face de coupe (BUL) et sur l’arête de coupe (BUE) avec des plaquettes O1 et S4 montre que :

1. La couche adhérente diminue durant l’usinage avec l’utilisation des plaquettes polies (O1).
2. Le lubrifiant diminue la surface de BUL formée sur les plaquettes polies.
3. L’utilisation du lubrifiant durant l’usinage de AA 2017 T4 avec des plaquettes O1 ne présente aucune influence significative sur l’arête rapportée.

Nous pouvons conclure que si l'on souhaite diminuer le collage de la matière usinée durant l'usinage de AA 2017 T4, il faut utiliser des plaquettes polies O1. L'utilisation de lubrifiant dans ce cas, d'un point de vue de l'arête rapportée est inutile.

### 4.1.3 L'usure des plaquettes

– Usure en dépouille VBB :

L'usure en dépouille VBB des plaquettes O1 et S4 est très régulière sur la largeur de l'arête de coupe en prise avec la matière (voir figure 4.7). Cette figure montre que l'usure en dépouille des plaquettes progresse régulièrement au cours du temps d'usinage (voir détail sur le tableau 7.8). Nous avons observé la propagation de cette usure au cours de temps d'usinage, la figure (4.9) présente les courbes de variation de VBB en fonction de la quantité de matière usinée. D'après cette figure, nous remarquons que l'usure de la plaquette S4 durant l'usinage à sec est plus grande que celle de la plaquette O1. Cette figure aussi montre que la valeur maximale de VBB est atteinte à la fin de l'usinage, ce qui correspond aux travaux de [GSSS09] et [KL07]. Le tableau (4.5) présente les valeurs de VBB sur toutes les plaquettes pour 19000 cm<sup>3</sup> et 30000 cm<sup>3</sup> de matière usinée. L'analyse géométrique des plaquettes a montré que la plaquette O1 a un angle de dépouille plus important que celui de la plaquette S4. Cet écart angulaire faible ne justifie pas à lui tout seul la différence d'usure entre les deux plaquettes. Nous avons constaté une usure derrière l'arête de la plaquette S4 plus brutale. Il semblerait que la constitution de la plaquette (nuance) soit le paramètre essentiel dans la différence d'usure des plaquettes.

VBB mm	19000 cm <sup>3</sup>	30000 cm <sup>3</sup>
O1 / sec	0.140	0.186
O1 / lub	0.139	—
S4 / sec	0.157	0.230

TABLE 4.5 – Valeurs maximales de VBB durant l'usinage de AA 2017 T4 à une Vc = 600 m/min.

D'après le tableau (4.5), nous remarquons que :

1. Pour 19000 cm<sup>3</sup> de matière usinée à sec, l'usure de la plaquette polie O1 est moins importante que celle de la plaquette S4 de 12 %. Aussi, nous trouvons que pour la même quantité de matière usinée, la lubrification ne semble pas avoir d'influence significative sur l'usure de la plaquette O1.
2. Pour 30000 cm<sup>3</sup> de matière usinée à sec, l'usure VBB continue à augmenter surtout pour la plaquette S4. L'usure VBB de la plaquette S4 est environ 23 % plus grande que celle de la plaquette O1. Cette différence peut être expliquée un peu en partie par la différence des angles de dépouille réels des plaquettes O1 et S4 (voir tableau 3.8). Le tableau 3.8 montre que l'angle

de dépouille  $\alpha$  de la plaquette S4 est environ 9 % plus petit que celui de la plaquette O1. Plus l'angle de dépouille diminue plus l'usure de dépouille VBB augmente. Ces résultats correspondent aux travaux d'El-Baradie [BAR96]. Cependant ce critère n'est pas suffisant pour justifier une telle différence d'usure. La nuance semble être prépondérante.

L'étude de l'usure frontale (critère VBB) des plaquettes O1 et S4 durant l'usinage à sec et lubrifié de AA 2017 T4 montre que la lubrification avec une huile soluble de 6.50 % ne semble pas avoir d'influence significative sur la diminution de l'usure des plaquettes polies O1.

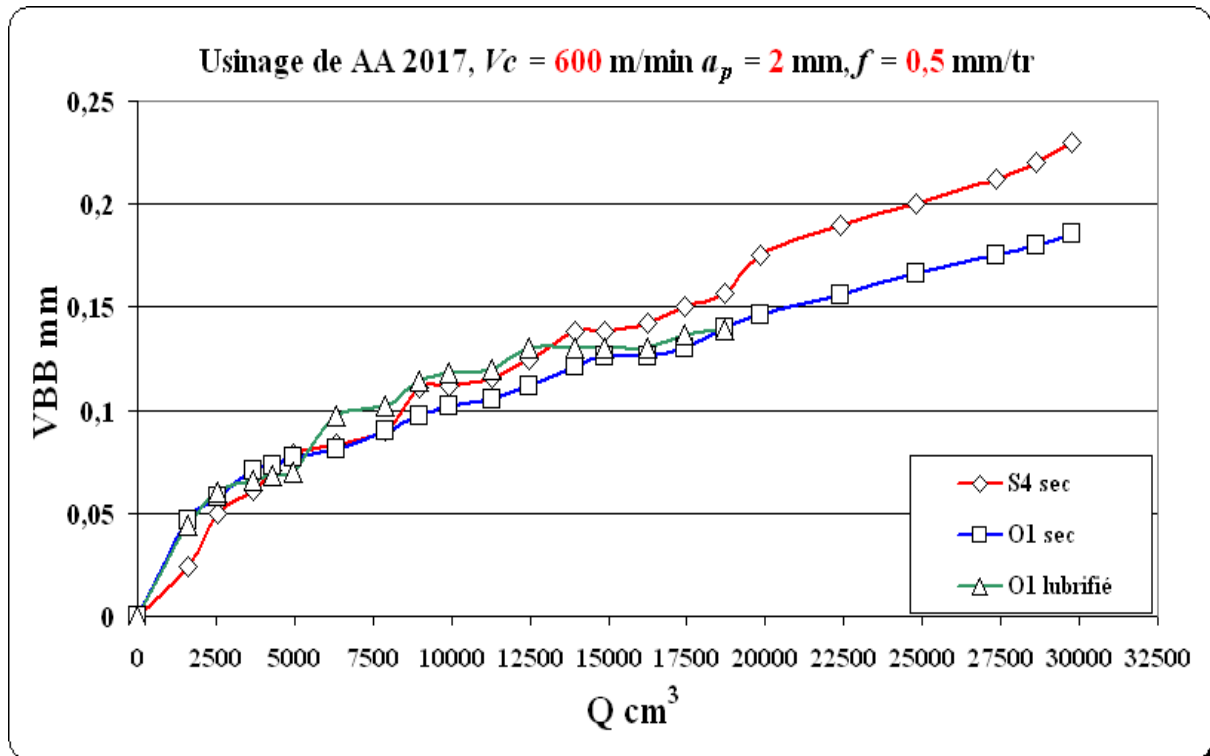


FIGURE 4.9 – Usure de dépouille VBB durant l'usinage de AA 2017 T4 à  $V_c = 600$  m/min.

– L'usure en cratère KT :

L'usure en cratère KT est caractérisée par sa profondeur  $K_t$  (voir figure 2.19). Cette usure peut se former par arrachement mécanique ou par diffusion chimique [YT77]. La mesure de la plaquette après avoir dissout la couche adhérente montre que la diffusion chimique, si elle a lieu, est négligeable. Ici l'arrachement mécanique est donc prépondérant. Nous avons observé l'évolution de l'usure en cratère avec le temps d'usinage sur toutes les plaquettes (voir détail en annexe 7.1). La mesure a été effectuée sur des tailles d'images plus importantes que celles présentées sur le tableau annexé. La taille des images du tableau a été adaptée afin de pouvoir toutes les rassembler côte à côte. Nous avons mesuré la surface de cratère formé à sec sur les deux plaquettes O1 et S4 à  $T=30$  et  $T=49$  minutes et la plaquette O1 en usinage lubrifié à l'aide du logiciel (Image J). Le tableau (4.6) montre les résultats des mesures des surfaces de cratères durant ces essais sur les trois plaquettes. La figure (4.10) présente l'image MEB de l'usure en cratère après le nettoyage des plaquettes à la soude à  $T=49$  minutes.

Kt cratère	Surface en mm <sup>2</sup> (T=30)	Surface en mm <sup>2</sup> (T=49)
O1 / sec	1.08	1.11
S4 / sec	1.10	1.13
O1/lub	1.07	1.09

TABLE 4.6 – Mesure de surface de cratère.

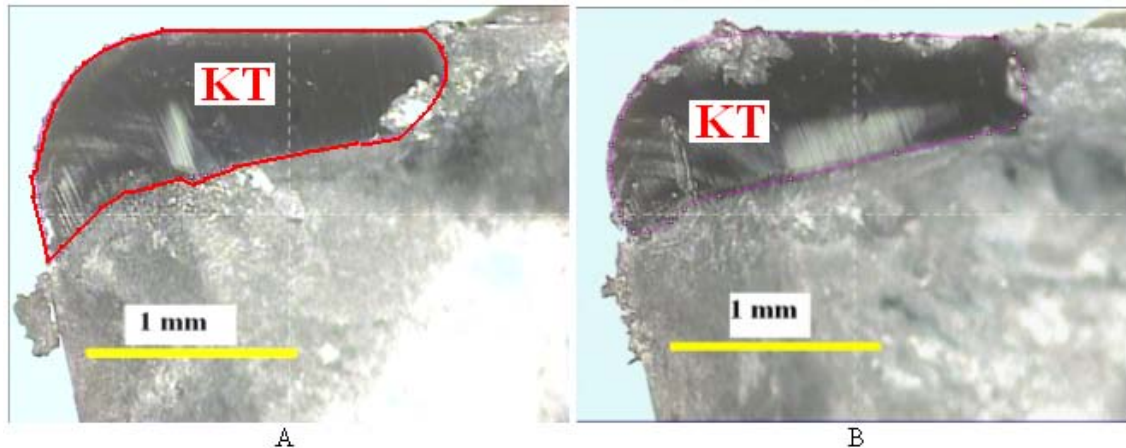


FIGURE 4.10 – Surface de cratère formé après 49 min sur les plaquettes, A. plaquette S4, B. Plaquette O1.

Les images de la face de coupe des plaquettes O1 et S4 (annexe 7.1) montrent que :

1. L'usure de cratère formée durant l'usinage à sec ou lubrifié sur la plaquette O1 est du même ordre de grandeur. Le lubrifiant dans ce cas n'apporte pas d'amélioration pour la diminution de l'usure en cratère.
2. Durant l'usinage à sec de AA 2017 T4, le polissage ne semble pas avoir d'influence sur l'usure en cratère. Cela est compréhensible car rapidement dans la zone de cisaillement secondaire l'écoulement de la matière effectue un polissage de la face de coupe. La qualité géométrique des surfaces (au niveau du polissage) devient alors similaire.

#### 4.1.4 L'état de surface des pièces usinées

Nous avons mesuré la rugosité arithmétique  $Ra$  et la rugosité totale  $Rt$  de toutes les pièces usinées à l'aide du rugosimètre. La longueur de Cut Off choisie est de l'ordre de 2.5 mm (valeur correspondante à  $f = 5 \times 0.5$  mm/tr, voir tableau 3.5). Les deux figures (4.11 et 4.12) présentent l'évolution de  $Ra$  et  $Rt$  en fonction de la quantité de matière usinée. D'après ces deux figures, nous remarquons que la plaquette S4 donne un  $Ra$  qui évolue entre 7.7 et 7.9  $\mu\text{m}$ , la valeur de  $Rt$  varie entre 31 et 36  $\mu\text{m}$ . Durant l'usinage à sec, la plaquette O1 donne un  $Ra$  qui varie entre 8.2 et 8.4  $\mu\text{m}$ , la rugosité totale

$R_t$  produite avec cette plaquette varie entre 33 et 36  $\mu\text{m}$ . Nous avons mesuré les rayons exacts des plaquettes. A l'aide des modèles théoriques des  $R_a$  et  $R_t$  (voir détail en 7.1), nous démontrons que la différence des rayons de bec des plaquettes justifie l'écart sur les rugosités (voir paragraphe suivant). La BUE n'intervient donc pas sur la rugosité de la pièce obtenue même si régulièrement elle apparaît et disparaît. Il semblerait que la BUE est partie non pas sur la pièce mais avec le copeau. L'apparition du collage n'est pas néfaste à l'état de surface des pièces usinées.

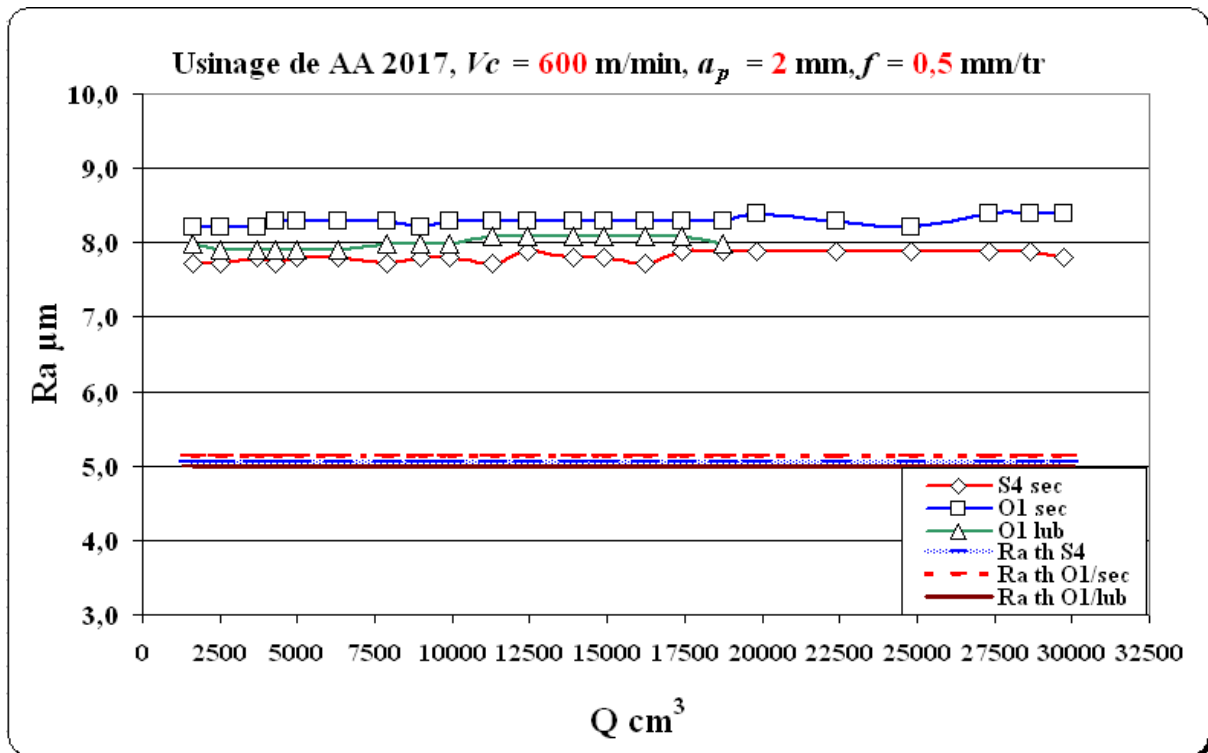


FIGURE 4.11 – Courbes de  $R_a$  durant l'usinage de AA 2017 T4 à  $V_c = 600 \text{ m/min}$ .

Nous avons présenté les valeurs moyennes de  $R_a$  et  $R_t$  dans le tableau (4.7). D'après ce tableau, nous constatons que :

1. L'utilisation du lubrifiant durant l'usinage de AA 2017 T4 avec la plaquette O1 n'a aucune influence sur la rugosité des pièces usinées.
2. Après 30000  $\text{cm}^3$  de matière usinée, les plaquettes S4 et O1 ont des pièces avec des état de surface quasi identiques (ramenés à des rayons de bec identiques).

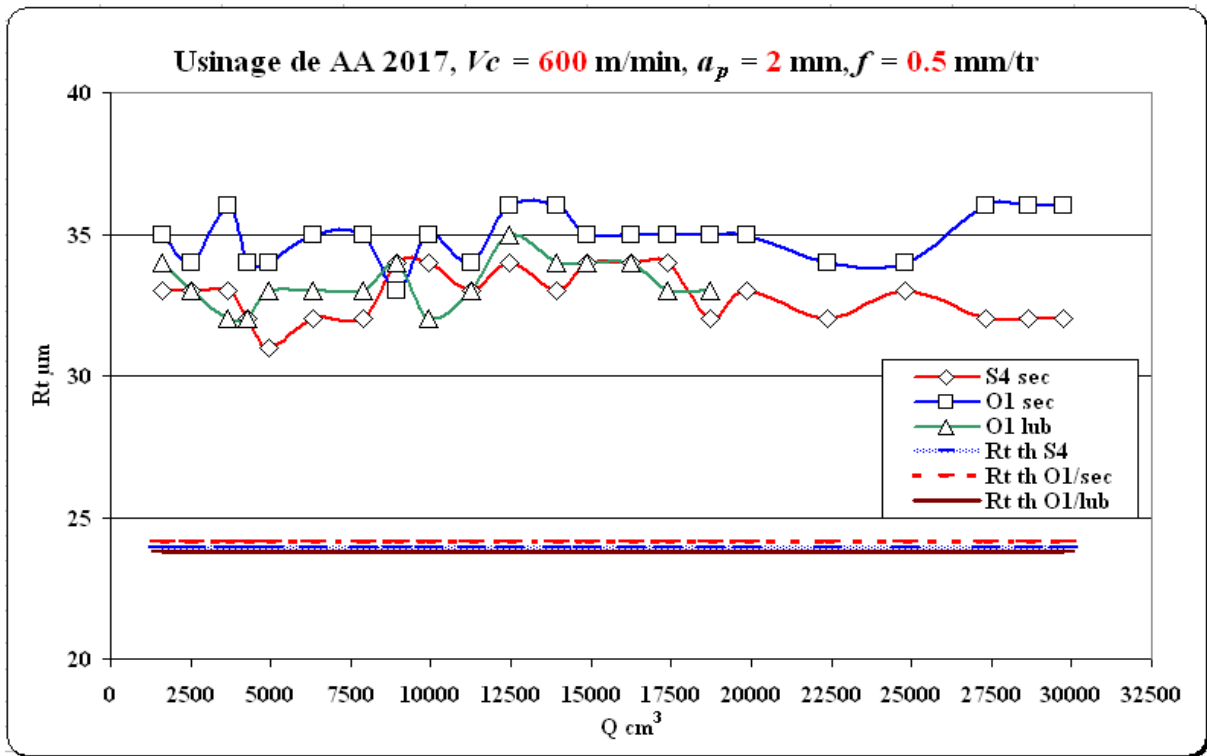


FIGURE 4.12 – Courbes de  $R_t$  durant l’usinage de AA 2017 T4 à  $V_c = 600$  m/min.

$R_a$ moy $\mu\text{m}$	$Q = 19000 \text{ cm}^3$	$Q = 30000 \text{ cm}^3$
O1 / sec	8.3	8.3
O1 / lub	8.0	—
S4 / sec	7.8	7.8
$R_t$ moy $\mu\text{m}$	$Q = 19000 \text{ cm}^3$	$Q = 30000 \text{ cm}^3$
O1 / sec	35	34.9
O1 / lub	33.3	—
S4 / sec	33	32.8

TABLE 4.7 – Valeurs moyennes de  $R_a$  et  $R_t$  durant l’usinage de AA 2017 T4 à  $V_c = 600$  m/min.

#### 4.1.5 Cohérence avec le modèle théorique

Nous avons proposé un modèle théorique pour trouver la rugosité arithmétique  $R_{a_{th}}$  et la rugosité totale  $R_{t_{th}}$  (voir détail de calcul en 7.1) durant l’usinage avec des plaquettes  $80^\circ$ . Les zones de coupe sur la plaquette durant l’usinage avec les plaquettes  $80^\circ$  sont présentées sur la figure (7.1).

Nous avons appliqué les deux modèles de l’état de surface dans notre cas d’usinage avec les deux plaquettes O1 et S4. Pour faire les calculs, nous avons pris en compte les valeurs réelles de  $R\epsilon$  et  $Kr'$  du tableau 3.8. Le tableau (4.8) présente les valeurs théoriques de  $R_a$  et  $R_t$  obtenues par les deux plaquettes O1 et S4 en appliquant les deux modèles.

Plaquette	R $\epsilon$	Ra <sub>th</sub> en $\mu\text{m}$	Rt <sub>th</sub> en $\mu\text{m}$
O1 (sec)	0.763	5.14	24.16
O1 (lub)	0.8	5.00	23.76
S4 (sec)	0.784	5.06	23.93

TABLE 4.8 – Ra<sub>th</sub> et Rt<sub>th</sub> durant l'usinage avec O1 et S4

La comparaison entre les résultats expérimentaux (tableau 4.7) et les résultats théoriques (tableau 4.8) montre que les modèles théoriques donnent des valeurs de Ra et Rt bien moins importantes par rapport à celles mesurées expérimentalement. L'écart entre les valeurs théoriques et expérimentales peut être dû aux phénomènes dynamiques à cause de l'importance zone de contact lors d'usinage avec des plaquettes rhombiques à 80° (Ce point sera détaillé dans le paragraphe 4.2 avec l'utilisation de plaquettes rhombiques à 55° et 80°).

L'ensemble des essais réalisés montre que la variation de la géométrie de la plaquette (acuité, angle de coupe par arête rapportée, usure en dépouille et usure en cratère) n'influe pas de manière sensible l'état de surface.

#### 4.1.6 Formation des copeaux

Nous avons récupéré des copeaux produits durant l'usinage pour pouvoir analyser leur évolution au cours de l'usinage. La figure (4.13) présente des images prises sur le projecteur de profil des copeaux récupérés à la fin du processus d'usinage. Cette figure montre que la longueur des copeaux obtenus en fin d'usinage reste constante. Pour étudier l'évolution des copeaux avec le temps d'usinage, nous avons organisé les images obtenues dans des tableaux (voir détail en tableau 7.15 chapitre annexe 7). Nous avons mesuré la longueur des copeaux obtenus au début et à la fin de l'usinage, le tableau 4.9 présente la longueur de ces copeaux en mm.



FIGURE 4.13 – Images des formes des copeaux, A. Copeaux obtenus à sec avec la plaquette S4 après 30000 cm<sup>3</sup>, B. Copeaux obtenus à sec avec la plaquette O1 après 30000 cm<sup>3</sup>, C. Copeaux obtenus avec lubrifiant avec la plaquette O1 après 19000 cm<sup>3</sup>.

Longueur moyenne des copeaux mm	S4 / sec	O1 / sec	O1 / lub
Après 3600 cm <sup>3</sup>	4.5	5.5	5.6
Après 30000 cm <sup>3</sup>	3.5	3.5	3.6

TABLE 4.9 – Longueur des copeaux obtenus à  $V_c = 600$  m/min.

La longueur moyenne des copeaux à la fin du processus d'usinage (après 30000 cm<sup>3</sup>) diminue légèrement, de l'ordre de 20 %, pour une plaquette S4 à sec et de l'ordre de 40 % pour une plaquette O1 à sec. L'influence du lubrifiant sur la longueur du copeau est de 3 %. L'épaisseur moyenne des copeaux est  $h_{moy} = 0.5$  mm (valeur mesurée sur la figure 4.13). L'épaisseur du copeau théorique se calcule par l'équation (eq 4.3). La valeur théorique de l'épaisseur des copeaux est similaire à celle mesurée pour toutes les plaquettes.

$$h_{moy} = f * \sin(Kr) \quad (4.3)$$

Les trois plaquettes possèdent un brise-copeaux permettant de fractionner les copeaux lorsque ceux-ci viennent au contact de cette géométrie. L'apparition d'arête rapportée modifie la géométrie locale de la face de coupe qui modifie la coupe et donc l'écoulement des copeaux. Il apparaît clairement lors d'essais de répétabilité que le collage sous forme d'arête rapportée est le paramètre qui conduit à fractionner plus facilement les copeaux. L'arête rapportée sera un point intéressant de ce point de vue.

#### 4.1.7 Ecoulement des copeaux

– Modélisation d'écoulement des copeaux

L'étude de direction d'écoulement des copeaux aide à la prévision des efforts de coupe [AFM96] (voir détail en 2.5.2). Nous trouvons en particulier une étude de l'écoulement des copeaux durant l'usinage dans la thèse de COHEN [COH09]. Le modèle proposé par le chercheur est appliqué dans le cas où  $\gamma_0 = \lambda_s = 0$ , ce modèle est donné dans l'expression (eq 2.5) et il est appliqué dans le cas où la coupe se fait dans la zone arrondie de la plaquette, et avec les conditions  $Kr' = 30^\circ$  et  $Kr < 90^\circ$ . Dans notre cas d'usinage, les plaquettes utilisées sont des plaquettes rhombiques à  $80^\circ$ . La coupe est réalisée dans deux zones : une petite zone arrondie et une zone droite (voir figure 7.3). Dans ce cas là, nous avons  $Kr > 90^\circ$  et  $Kr' = 5^\circ$ . Le modèle proposé dans l'équation (eq 2.5) ne peut pas être appliqué à notre cas. Nous avons donc proposé un modèle qui correspond à notre cas d'usinage avec des plaquettes  $80^\circ$ . Dans le cas où  $a_p > R\epsilon$  nous avons trouvé l'équation (eq 4.4), mais dans le cas où  $a_p < R\epsilon$  comme sur la figure (7.4) nous avons trouvé l'équation (eq 4.5) (le détail de  $\xi$  est développé dans l'annexe 7). Dans le cas d'usinage avec des plaquettes  $55^\circ$ , la coupe ne se réalise que dans la zone arrondie de la plaquette comme sur la figure (7.2). Dans ce cas là, l'angle d'écoulement de copeau ( $\eta$ ) se calcule



aussi par l'équation (eq 4.4). L'équation (eq 4.6) donne l'angle d'écoulement des copeaux dans le cas d'usinage avec une plaquette 55° et à condition que  $a_p < R\epsilon$ .

$$\eta = Kr - \frac{\pi}{2} + \text{ArcTan} \left[ \frac{f}{a_p - R\epsilon} - \text{Tan} \left( Kr - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (4.4)$$

$$\eta = \text{ArcTan} \left[ \frac{\sqrt{2 * R\epsilon * a_p - a_p^2} + f - R\epsilon * \text{Sin}(\xi)}{a_p - R\epsilon + R\epsilon * \text{Cos}(Kr')} \right] \quad (4.5)$$

$$\eta = \text{ArcTan} \left[ \frac{\sqrt{2 * R\epsilon * a_p - a_p^2} + \frac{f}{2}}{a_p - R\epsilon + R\epsilon * \text{Cos}(Kr')} \right] \quad (4.6)$$

Ces modèles de l'angle d'écoulement des copeaux sont appliqués dans le cas des plaquettes plates (sans brise-copeaux) où l'angle de coupe est nul ( $\gamma = 0^\circ$ ). Ces modèles se calculent directement à partir des valeurs de ( $R\epsilon$ ,  $f$ ,  $a_p$ ,  $Kr'$ , et  $Kr$ ). Nous avons mesuré cet angle formé sur la face de coupe de chaque plaquette durant l'usinage à sec et lubrifié de AA 2017 T4 (voir figure 4.14).

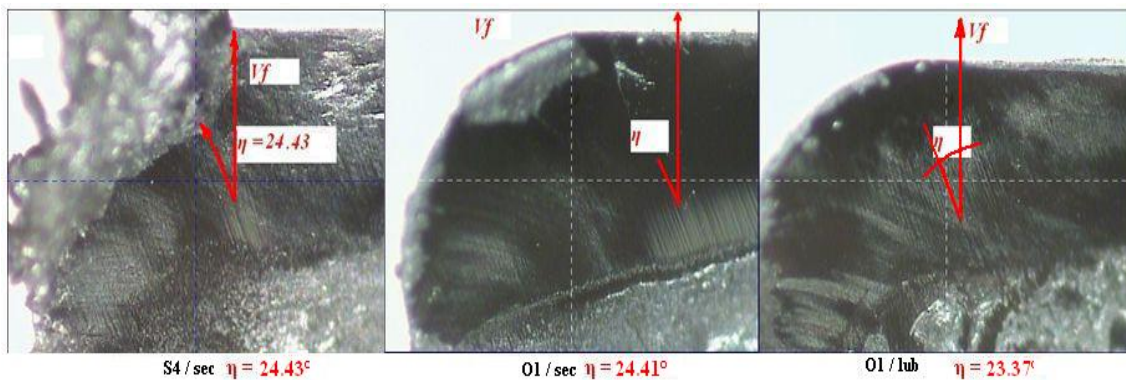


FIGURE 4.14 – Angle d'écoulement des copeaux durant l'usinage à  $V_c = 600$  m/min.

– Validation des modèles théoriques

Dans notre cas d'usinage, nous avons calculé les angles d'écoulement des copeaux sur les plaquettes 80° (cas où  $a_p > R\epsilon$ ) en appliquant l'équation (eq 4.4). Le tableau (4.10) présente les résultats expérimentaux (figure 4.14) et les résultats théoriques obtenus en appliquant le modèle (eq 4.4).

$f = 0.5$ mm/tr, $V_c = 600$ m/min, $a_p = 2$ mm	$R\epsilon$ mm	Kr degré	$\eta$ mesuré degré	$\eta$ calculé degré
O1 / sec	0.763	95.6	24.41	23.09
O1 / lub	0.8	95.6	23.37	23.09
S4 / sec	0.78	95.7	24.43	22.92

TABLE 4.10 – Valeurs mesurées et calculées (selon eq 4.4) de l'angle  $\eta$  durant l'usinage de AA 2017 T4 à  $V_c = 600$  m/min.

D'après le tableau (4.10), on remarque que :

Il apparaît difficile de dégager des tendances sur l'écoulement du copeau dans les diverses configurations d'usinage. Les angles restent très proches et les divers collages (BUE et BUL) n'affectent pas la direction d'écoulement. Le lubrifiant ne semble pas avoir d'influence sur ce résultat.

#### 4.1.8 Conclusion

Nous avons usiné sur une machine à commande numérique l'alliage d'aluminium AA 2017 T4 en utilisant trois plaquettes avec un rayon de bec proche de 0.8 mm (deux plaquettes polies Otelo O1 pour l'usinage à sec et lubrifié et une plaquette non polie Sandvik S4 pour l'usinage à sec). Les paramètres de coupe choisis ont été  $a_p = 2$  mm,  $f = 0.5$  mm/tr, et  $V_c = 600$  m/min, ces paramètres ont été choisis pour une utilisation de puissance maximale de la machine de 10 kW. Le temps total d'usinage à sec a été de 49 minutes et l'usinage lubrifié a été étudié pendant 30 min. L'examen des plaquettes a été fait sur le MEB, l'état de surface des pièces usinées a été contrôlé sur un profilomètre. Dans cette étude, nous pouvons conclure que :

- La couche adhérente (BUL) formée sur la plaquette polie (O1) est plus petite que la couche adhérente formée sur la plaquette non polie (S4). Cette zone s'étend lorsque l'on augmente le temps d'usinage. La lubrification diminue fortement cette couche. L'analyse après enlèvement de la couche adhérente montre que la face a été polie et qu'il ne semble pas y avoir de phénomène de diffusion.
- Le lubrifiant ne présente aucune influence significative sur l'arête rapportée (BUE) pour une même plaquette. Il semblerait que le polissage de la face de coupe diminue le phénomène d'arête rapportée.
- Le lubrifiant n'a pas d'influence sur l'usure en dépouille pour une même plaquette. Cependant il a été montré des usures différentes pour des plaquettes de différentes marques. Ce point s'explique par les constitutions (nuances) différentes entre plaquettes.
- Les cratères formés sur les faces de coupe restent très proches en surface mesurée. Cependant nous avons remarqué une différence sur le début du cratère qui semble plus près de l'arête de coupe pour la plaquette S4. Ceci comme précédemment est dû à la nuance de la plaquette. Cet aspect peut être un point important dans l'effondrement de l'arête sous d'importantes forces de coupe.

- La rugosité arithmétique  $Ra$  varie entre 7.8 et 8.2  $\mu\text{m}$  pour tous les cas. En particulier, le lubrifiant ne présente aucune amélioration sur la rugosité des pièces usinées.
- L'analyse de la géométrie des copeaux montre une réduction de la longueur des copeaux pour tous les cas ce qui est favorable à une bonne évacuation.
- Le bilan global montre que la lubrification intervient essentiellement sur la couche adhérente après le cratère. Celle-ci ne présentant pas de risque supplémentaire de rupture anticipée de la plaquette, il apparaît intéressant d'usiner ce matériau sans lubrification.

La comparaison de l'usinage à sec entre des plaquettes polies (Otelo) et des plaquettes non polies (Sandvik) montre un intérêt pour la première. D'une part, les plaquettes polies sont moins chères que les plaquettes non polies, d'autre part les plaquettes polies présentent une résistance à l'usure plus importante que les plaquettes non polies. Cela provient de la nuance.

## 4.2 Usinage avec une puissance de 2 kW

### 4.2.1 Présentation des essais

Dans ce chapitre, l'objectif de ces essais est de mettre en évidence les différents comportements des plaquettes dans des conditions de coupe particulières : section de copeaux de 1  $\text{mm}^2$  et vitesse de coupe faible (100 m/min). Nous avons usiné à sec des barres d'alliages d'aluminium AA 2017 T4 (voir composition chimique en tableau 3.3) sur un tour à commande numérique. Nous avons réalisé l'opération de chariotage en utilisant trois plaquettes rhombiques d'un rayon  $R\epsilon = 0.8$  mm (deux plaquettes  $55^\circ$  et une plaquette  $80^\circ$ ), les plaquettes utilisées sont :

1. Une plaquette ( $55^\circ$ ) non revêtue S2 (voir désignation en tableau 3.6).
2. Une plaquette ( $55^\circ$ ) revêtue de diamant S3 (voir désignation en tableau 3.6).
3. Une plaquette ( $80^\circ$ ) polie O1 (voir désignation en tableau 3.6).

Nous avons utilisé les deux porte-outils présentés sur la figure (3.7). Le tableau (3.8) présente les valeurs réelles mesurées du rayon de bec, les angles de direction d'arête principale et secondaire ( $Kr$  et  $Kr'$ ), les angles de coupe et de dépouille, et le rayon de l'acuité d'arête de trois plaquettes utilisées. Les paramètres de coupe utilisés pour les essais sont : une profondeur de passe  $a_p = 2$  mm, une vitesse de coupe  $V_c = 100$  m/min, et une avance  $f = 0.5$  mm/tr. En appliquant l'équation (eq 4.1) nous trouvons que la puissance consommée par la coupe est de l'ordre de 2 kW. Toutes les mesures sont effectuées pour une quantité de matière usinée  $Q$  ( $\text{cm}^3$ ). Une quantité de 100  $\text{cm}^3$  de matière usinée représente à peu près 1 min d'usinage. Le temps total d'usinage est de l'ordre de 30 min pour les trois plaquettes. La figure (4.15) présente les faces de coupe des plaquettes neuves sur le projecteur de profil.

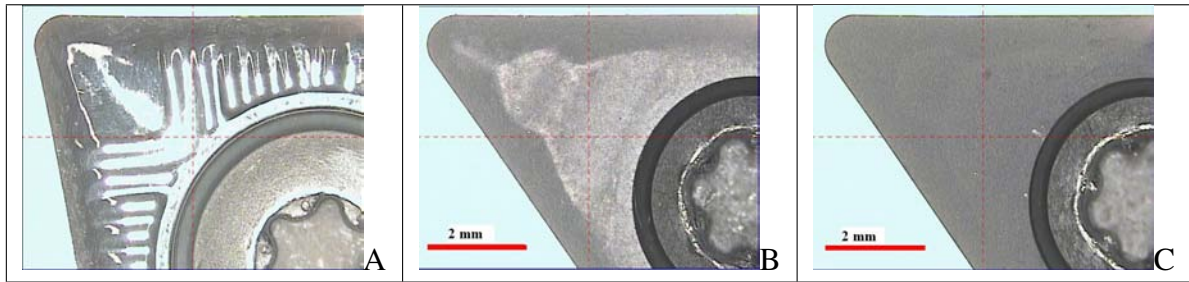


FIGURE 4.15 – Plaquettes neuves, A. Plaquette O1, B. Plaquette S2, C. Plaquette S3.

Nous avons mesuré les acuités d'arête des plaquettes neuves et des plaquettes usées en utilisant le MEB. Le tableau (4.11) présente les acuités d'arête des plaquettes neuves et usées (après 30 min d'usinage à sec).

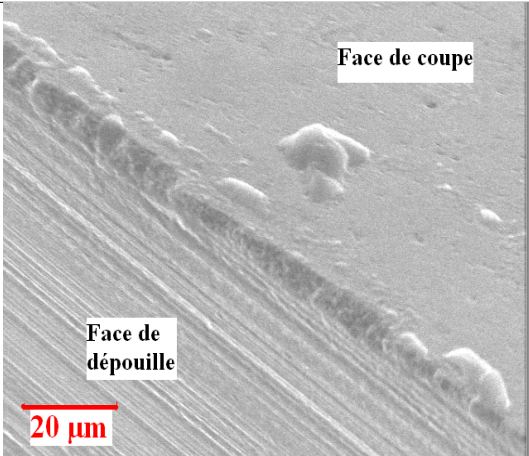
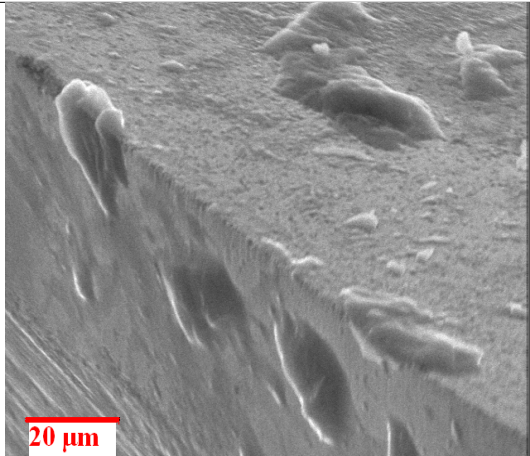
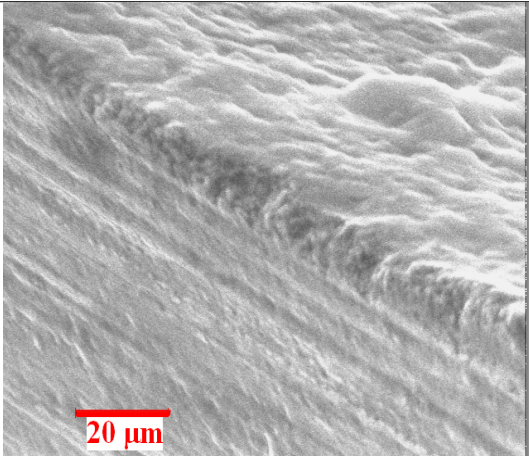
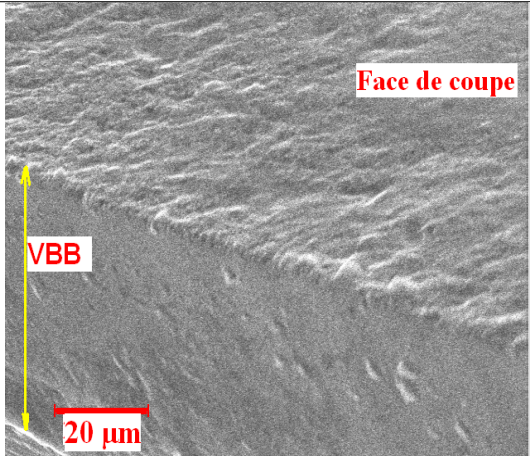
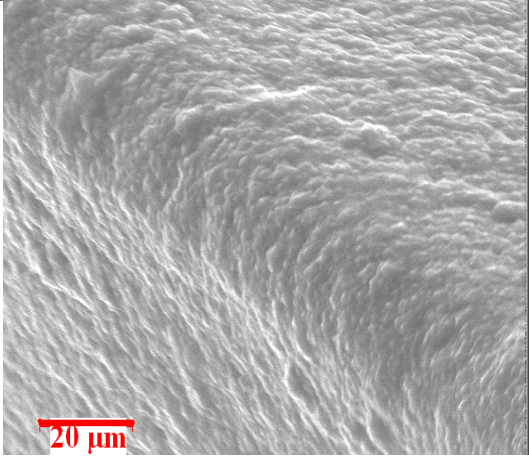
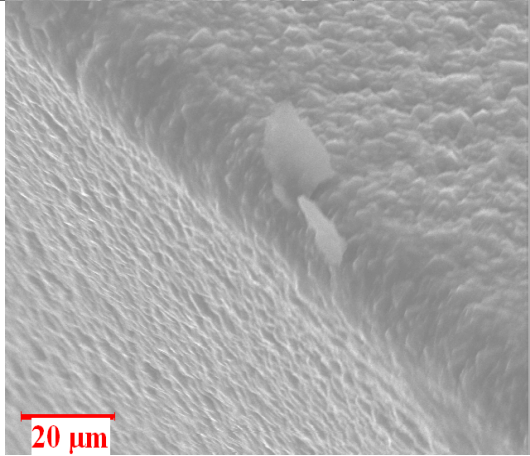
		Images MEB.	
Plaquette	Plaquette neuve	Plaquette usée (après 30 min)	
O1			
S2			
S3			

TABLE 4.11 – Images MEB des acuités d’arête des plaquettes neuves et usées après 30 min d’usinage à sec de AA 2017 T4 à  $V_c = 100$  m/min.

Les images des acuités d’arête des plaquettes usées ont été prises après un nettoyage de ces plaquettes dans un bain à soude. Le tableau (4.12) présente les résultats de mesure du rayon de l’acuité d’arête des plaquettes neuves et usées. D’après ce tableau, nous remarquons que la plaquette S3 (neuve) a un

rayon d'acuité d'arête de 25  $\mu\text{m}$ . Ceci est dû au dépôt du revêtement diamant qui augmente le rayon de l'acuité d'arête de 150 %. Ce rayon de cette acuité  $R\beta$  semble diminuer après 30 min d'usinage à sec et atteindre une valeur de 18  $\mu\text{m}$ . La géométrie de surface de la face de coupe au voisinage de l'arête de coupe de la plaquette usée (S3) reste similaire à l'état initial. D'après [PAS06], l'utilisation des plaquettes revêtues (comme la plaquette S3) augmente les composantes de forces de coupe durant l'usinage à cause de l'importance du rayon d'acuité d'arête, ce qui conduit à l'augmentation de l'usure. Ce phénomène n'est pas apparent dans les conditions de coupe choisies ici. Sur la plaquette (S3), il n'apparaît pas d'usure sur la face de coupe ni sur la dépouille. Le revêtement diamant dans ces conditions d'usinage assure son rôle en protégeant efficacement la plaquette des usures. Après 30 min d'usinage à sec avec la plaquette S2, le rayon de l'acuité d'arête diminue fortement (plus de 50 %). Cette diminution est due à la formation d'un cratère juste derrière l'arête de coupe. Aussi, la plaquette S2 voit sa face de coupe au voisinage de l'arête de coupe se polir. La plaquette polie O1 présente moins de diminution du rayon d'acuité d'arête. Cela s'explique par le fait qu'à l'état neuf elle a un rayon d'acuité d'arête plus petit. La diminution reste cependant importante (de l'ordre de 50 %) après 30 min d'usinage. La face de coupe reste dans un état similaire à l'état initial déjà poli.

$R\beta$ $\mu\text{m}$	Plaquette neuve	Plaquette usée
O1	8	4
S2	10	4
S3	25	18

TABLE 4.12 – Rayon de l'acuité d'arête des plaquettes neuves et usées après 30 min d'usinage à sec à  $V_c = 100$  m/min.

L'étude de l'acuité d'arête des plaquettes neuves et usées, nous montre que :

1. Après 30 min d'usinage à sec, les acuités d'arête des plaquettes O1 et S2 deviennent très proches l'une de l'autre. Les deux plaquettes (O1 et S2) bien que distinctes au départ sur le polissage de la face de coupe ou sur l'acuité d'arête, voient ces deux caractéristiques se rapprocher au cours de l'usinage. L'écoulement du copeau sur la face de coupe crée une usure derrière l'arête de coupe qui polit la face et diminue le rayon d'acuité d'arête.
2. La plaquette revêtue (S3) conserve en cours d'usinage sa géométrie l'état neuf.

## 4.2.2 Le collage de la matière usinée

– La couche adhérente (BUL) :

Nous avons analysé la face de coupe des plaquettes utilisées sur le projecteur de profil. La figure (4.16) présente les images des faces de coupe des plaquettes (O1, S2, et S3) après 3000  $\text{cm}^3$  (équivalent à 30 min). L'ensemble des photos des plaquettes au cours de la durée totale d'usinage est donné sur le tableau (7.2) annexe 7.

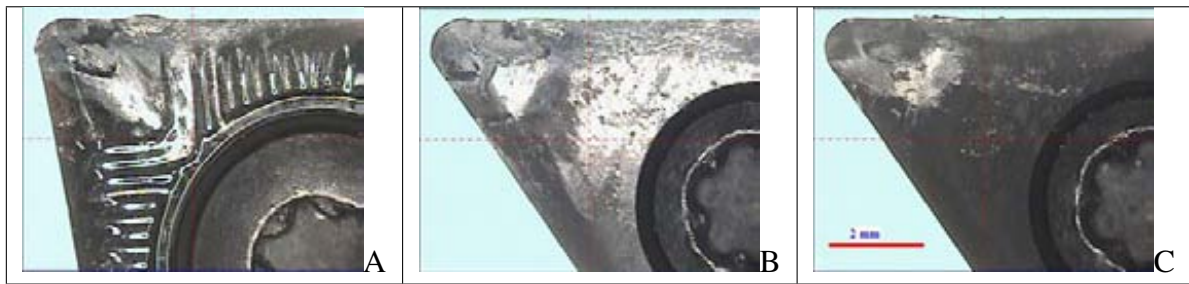


FIGURE 4.16 – Faces de coupe des plaquettes usées après 3000 cm<sup>3</sup> de matière usinée à sec, A. Plaquette O1, B. Plaquette S2, C. Plaquette S3.

La couche brillante formée sur les faces de coupe des plaquettes (O1, S2, et S3) (figure 4.16), est la couche adhérente. La géométrie de la BUL en terme de surface ne dépend pas de la géométrie globale de la plaquette (rhombique 55° ou 80°). La surface d'extension de cette couche adhérente dépend du type de matériau à usiner et du type des plaquettes utilisées pendant l'usinage (polie, revêtue, ou non revêtue). D'après cette figure, nous trouvons que la couche adhérente formée sur la plaquette S2 couvre une surface de la face de coupe plus grande que celle formée sur les deux autres plaquettes O1 et S3. L'utilisation des plaquettes (O1 et S3) diminue la surface d'extension de BUL sur la face de coupe. Nous avons mesuré la surface d'extension de cette couche adhérente sur la face de coupe de chaque plaquette. La figure (4.17) présente les graphiques de surface de BUL mm<sup>2</sup> en fonction de quantité de matière usinée. D'après cette figure, nous remarquons que les deux plaquettes (O1 et S3) se comportent de manière similaire d'un point de vue de la couche adhérente (BUL). Le tableau (4.13), présente les valeurs moyennes de surface de BUL collée sur les faces de coupe des plaquettes. La différence de surface se situe sur la face de coupe en prolongement de l'arête de coupe. L'adhérence de la BUL dans cette zone ne se produit pas sur la plaquette O1 étant donné la géométrie particulière de la face de coupe (brise-copeaux). Les deux plaquettes (S2) et (S3) sont d'un point de vue de la géométrie globale identique. Le rayon d'acuité de la plaquette revêtue modifie le phénomène de coupe et la géométrie du copeau. Ce point sera détaillé dans l'analyse des copeaux. Les faces de coupe des plaquettes (S2) et (S3) étant toutes les deux non polies, nous ne pouvons pas conclure que c'est uniquement cet aspect qui rentre en compte dans la formation de BUL. Le déroulement du copeau sur la face de coupe est un élément essentiel.

Plaquette	O1	S2	S3
BUL moy mm <sup>2</sup>	5.12	9.40	4.95

TABLE 4.13 – Valeurs moyennes de BUL durant l'usinage de AA 2017 T4 à Vc = 100 m/min.

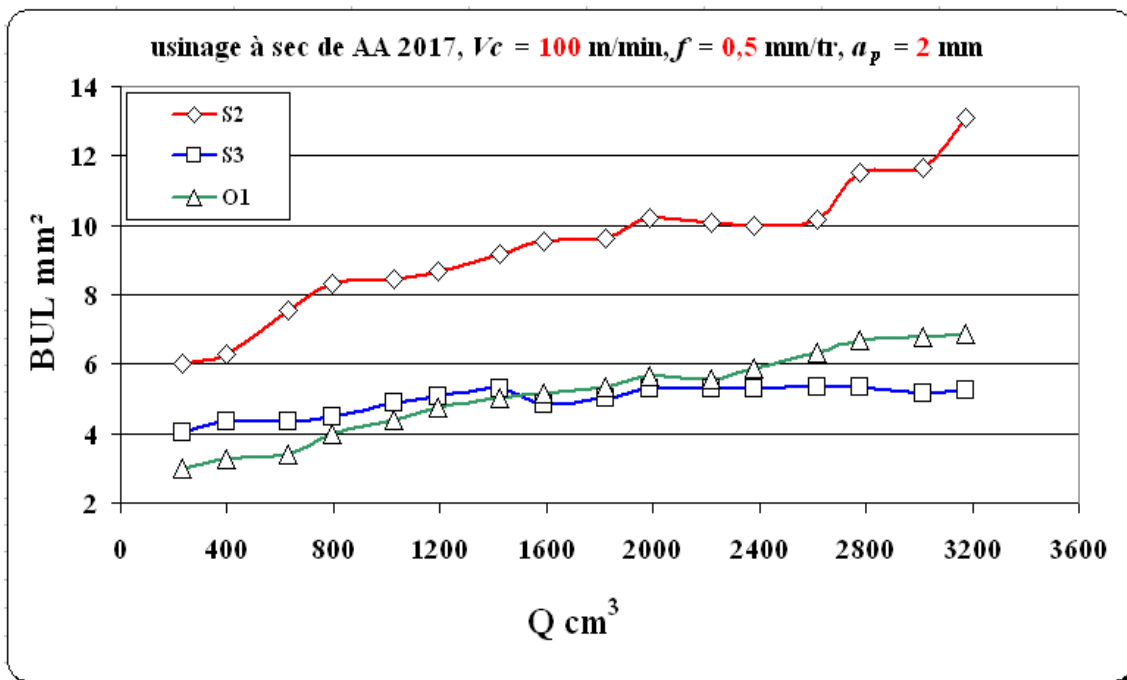


FIGURE 4.17 – Graphiques de BUL en fonction de quantité de la matière usinée.

Le tableau (4.13) montre que :

1. La couche adhérente derrière le cratère est quasi-identique sur les 3 plaquettes. Le polissage et l'acuité d'arête sont deux éléments intervenant dans le déroulement du copeau et dans la BUL située en prolongement de l'arête de coupe.
2. L'utilisation d'une plaquette revêtue S3 de par son rayon d'acuité d'arête modifie la forme du copeau et contribue à diminuer la BUL en prolongement de l'arête de coupe.
3. La géométrie du brise copeaux de la plaquette polie O1 contribue également à empêcher le collage de la matière dans cette zone.

– L'arête rapportée (BUE) :

Nous avons mesuré l'arête rapportée formée sur chaque plaquette utilisée à l'aide du projecteur de profil. Le tableau (7.9) présente les images de la face de dépouille de toutes les plaquettes tout au long d'usinage. Cette arête rapportée se forme et se brise plusieurs fois pendant l'usinage à sec de AA 2017 T4. La figure (4.18) montre les faces de dépouille des plaquette utilisées après 3000 cm<sup>3</sup> de matière usinée à sec. A la fin de l'usinage l'arête rapportée (BUE) atteint une hauteur de 828 μm sur la plaquette O1 et 200 μm sur la plaquette S2. La plaquette revêtue S3 ne présente aucun collage de la matière usinée.



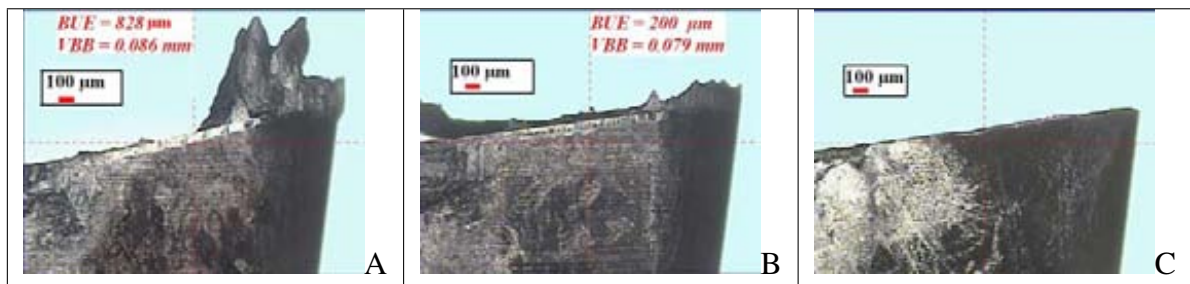


FIGURE 4.18 – Faces de dépouille des plaquettes usées après 3000 cm<sup>3</sup> de matière usinée à sec, A. Plaquette O1, B. Plaquette S2, C. Plaquette S3.

Nous pouvons constater le phénomène instable de l'arête rapportée par les variations importantes des mesures effectuées sur les plaquettes (O1) et (S2). Les grandes valeurs de BUE peuvent être expliquées par l'effet de la faible température provoquée lors d'usinage à une faible vitesse de coupe. Cette arête rapportée peut se déformer plastiquement sur la face de coupe de la plaquette et forme une multicouche, ce que conduit à augmenter l'épaisseur de la couche adhérente [RCSM05]. Nous avons tracé les variations de BUE en fonction de la quantité de matière usinée (figure 4.19). Sur cette figure, nous remarquons qu'il n'y a pas de matière collée sur la plaquette S3. Deux possibilités sont envisageables. Si l'on compare la géométrie de la plaquette (S3) avec les deux autres, les deux différences sont le revêtement et le rayon d'acuité d'arête. L'analyse de la BUL n'a pas montré de différence entre la plaquette (O1) et la plaquette (S3). Il semblerait que le revêtement ne soit pas à l'origine de cette non formation de l'arête rapportée. Dans ce cas, nous pouvons envisager que le paramètre prépondérant (il est peut être corrélé avec le revêtement) soit le rayon d'acuité d'arête. Pour les autres plaquettes, la BUE mesurée est très variable et très importante montrant qualitativement une mauvaise coupe.

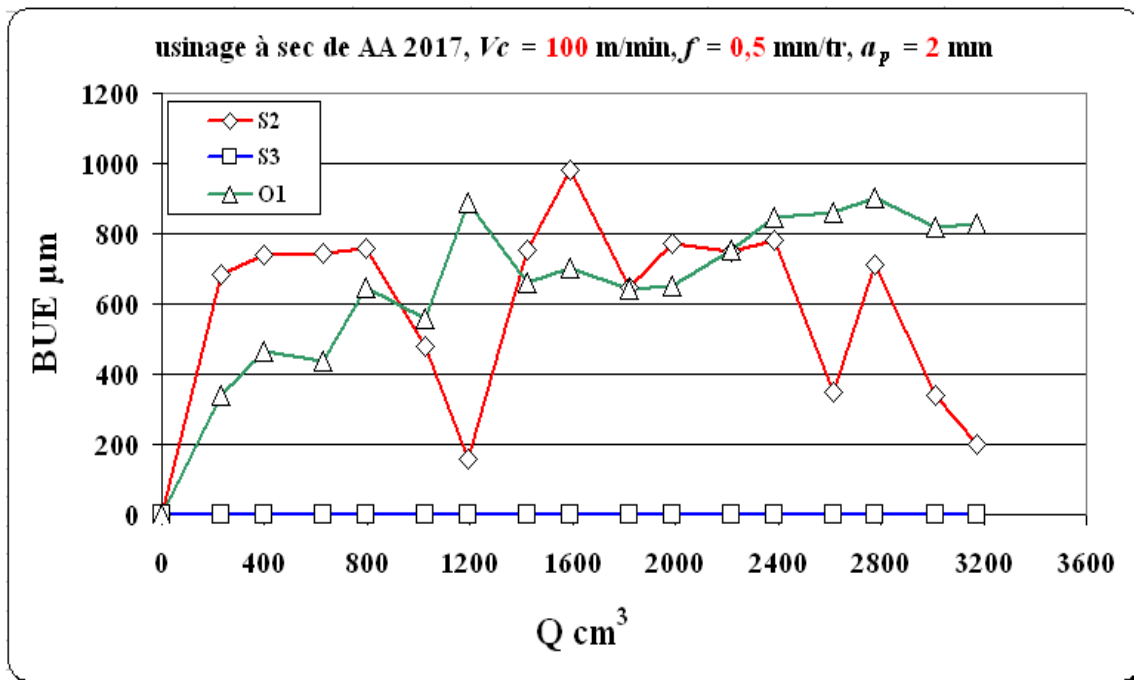


FIGURE 4.19 – Graphiques de BUE en fonction de quantité de la matière usinée.

L'analyse du collage (BUE et BUL) montre que dans des conditions de coupe à faible vitesse de coupe, la plaquette revêtue se comporte qualitativement beaucoup mieux que les plaquettes non revêtue qu'elles soient polies ou non.

### 4.2.3 L'usure des plaquettes

– L'usure en dépouille :

D'après la bibliographie, elle dépend principalement de la vitesse de coupe et du type d'usinage (avec ou sans lubrification). Plus la vitesse de coupe est grande plus l'usure VBB augmente [MSB07], [KOP04]. D'après les modèles de durée de vie des plaquettes, la réduction de la vitesse de coupe va conduire à une réduction de l'usure VBB. Dans notre cas d'usinage, la vitesse de coupe étant très faible, les usures mesurées restent faibles. Nous pouvons voir l'ensemble des photos des faces de dépouille au cours de l'usinage sur le tableau 7.9 Cette usure est très régulière sur toute la longueur de l'arête de coupe pour les plaquettes O1 et S2 (voir figure 4.18 A et B). La figure (4.20) présente les graphiques de variation de VBB en fonction de la quantité de matière usinée. Le tableau (4.14) présente les valeurs maximales mesurées de VBB sur toutes les plaquettes utilisées. La valeur de VBB max de la plaquette revêtue S3 est très faible confirmant l'intérêt du revêtement afin de diminuer l'usure VBB. Nous remarquons que les deux plaquettes O1 et S2 se comportent de manière similaire par rapport à l'usure VBB. Ici, le polissage de la plaquette O1 n'a pas d'influence sur l'usure de la plaquette. Paradoxalement, la comparaison avec les usures à  $V_c=600$  m/min montre que pour un

même volume de matière enlevée, l'usure à  $V_c=100$  m/min est plus grande (de l'ordre de 30%) que celle à  $V_c=600$  m/min. Cela montre les limites des modèles d'usure qui peuvent être appliqués dans un certain domaine de vitesses de coupe. Les très faibles vitesses de coupe sont préjudiciables à la qualité de la coupe et à la durée de vie des outils sans pour autant les dégrader très rapidement.

Plaquette	O1	S2	S3
VBB max mm	0.086	0.079	0.018

TABLE 4.14 – Valeurs de VBB max durant l'usinage de AA 2017 T4 à  $V_c = 100$  m/min.

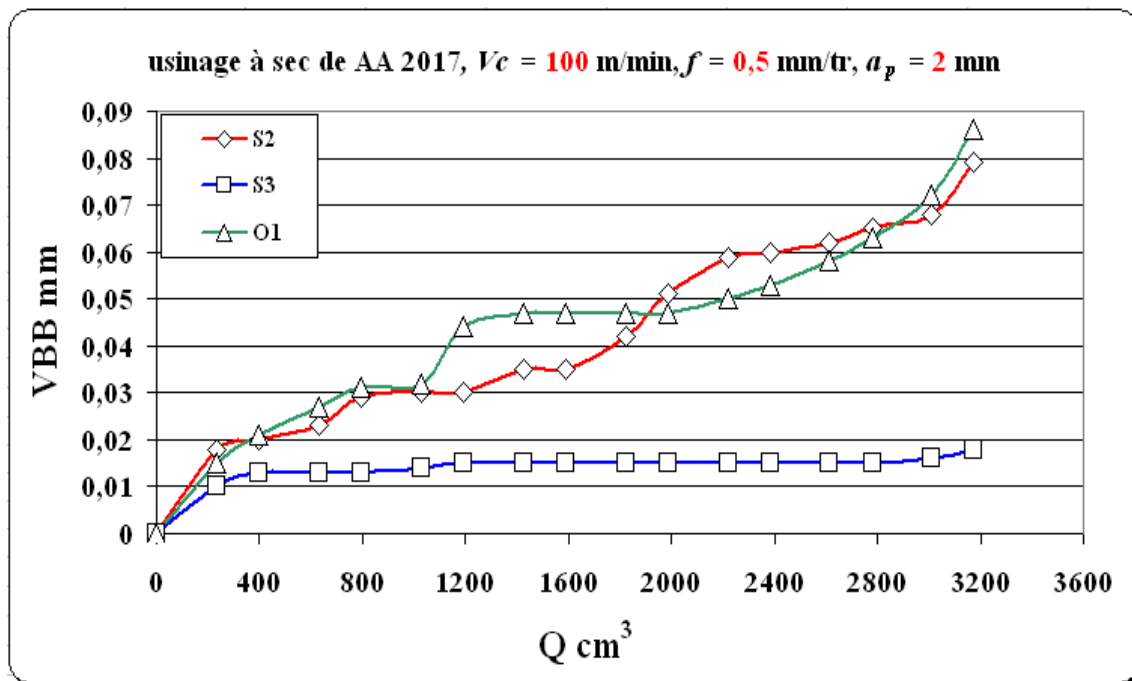


FIGURE 4.20 – Graphiques de VBB en fonction de quantité de la matière usinée.

Pour réduire l'usure de dépouille de la plaquette lors d'un usinage à sec de AA 2017 T4, il est recommandé :

1. d'usiner avec des plaquettes revêtues diamant car le revêtement confirme son rôle de protecteur.
2. de ne pas utiliser si possibles des vitesses de coupe très faibles.

– L'usure en cratère :

La faible vitesse de coupe utilisée génère une couche BUL recouvrant toute la surface derrière l'arête de coupe. Ceci rend impossible la mesure du cratère au cours de l'usinage. Pour pouvoir mesurer les cratères, nous avons nettoyé par un bain de soude les plaquettes. Les plaquettes nettoyées sont représentées sur la figure (4.21). Nous pouvons observer qu'il n'y a pas d'usure en cratère sur les

faces de coupe des plaquettes O1 et S3. La température provoquée dans la zone de contact outil / copeau est faible car la vitesse de coupe utilisée durant l'usinage est faible aussi. La figure (4.21) montre les images MEB des plaquettes nettoyées. D'une part le revêtement diamant de la plaquette S3, grâce à sa dureté élevée, empêche la formation du cratère, d'autre part la face polie de la plaquette O1 facilite l'écoulement du copeau en présentant un frottement moins important que celui de la face non polie. Les aspérités importantes de la face non polie vont présenter une résistance à l'écoulement du copeau.

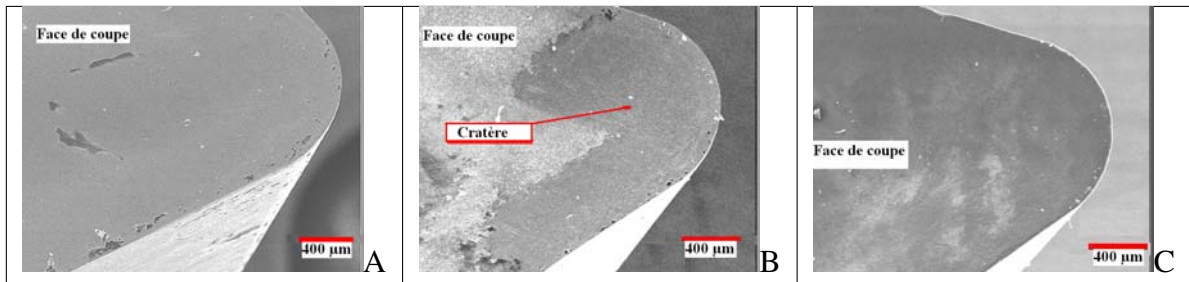


FIGURE 4.21 – Image MEB de la face de coupe, A. Plaquette O1, B. Plaquette S2, C. Plaquette S3.

L'usure en cratère se présente sur une large zone de la face de coupe de la plaquette S2. Nous avons repoussé les frontières entre la zone de cratère et la face de coupe initiale de la figure (4.21 B). La figure (4.22) présente les images prises au MEB des frontières entre le cratère et la face de coupe initiale. Sur cette figure, nous remarquons que la face de coupe dans la zone du cratère est polie à cause de l'écoulement des copeaux. Nous retrouvons au delà du cratère la face initiale de la plaquette.

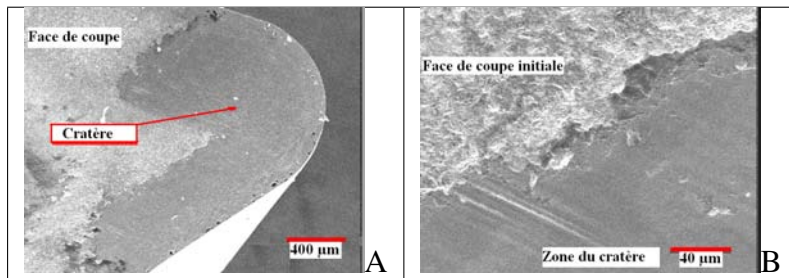


FIGURE 4.22 – Face de coupe de la plaquette S2, A. Grossissement x 50, B. Grossissement x 500.

L'étude de l'usure des plaquettes durant l'usinage à sec de AA 2017 T4 à une faible vitesse de coupe nous montre que :

1. Les usures en dépouille et en cratère sont inexistantes sur la plaquette revêtue de diamant S3.
2. Les deux plaquettes O1 et S2 se comportent similairement d'un point de vue de l'usure de dépouille mais la plaquette non polie présente un cratère qui n'existe pas sur la plaquette polie.

#### 4.2.4 L'état de surface des pièces usinées

Nous avons mesuré l'état de surface de toutes les pièces usinées à sec avec les trois plaquettes (O1, S2, et S3) à l'aide du rugosimètre. La longueur de Cut Off est toujours de 2.5 mm. A chaque mesure, nous avons relevé les valeurs de rugosité arithmétique  $Ra$  et la rugosité totale  $Rt$ . Les deux figures (4.23 et 4.24) présentent les courbes de  $Ra$  et de  $Rt$  en fonction de la quantité de matière usinée. Aussi, nous avons présenté sur ces deux figures les valeurs théoriques de  $Ra$  et  $Rt$  calculées selon les modèles théoriques (proposés en 7.1 et 7.1). Globalement les états de surface ne varient que très peu et plutôt aléatoirement dans un intervalle réduit. Si l'on analyse les états de surfaces obtenues par les plaquettes (S2) et (S3) ceux ci sont quasi-identiques alors que les effets de collage (BUE et BUL) étaient très différents. Nous pouvons en conclure que le collage n'influence pas l'état de surface. La même conclusion peut être émise à propos du rayon d'acuité d'arête. Les deux sont très différents cependant nous obtenons des résultats très proches. Les résultats mesurés sont conformes pour ces deux plaquettes au modèle théorique. Pour la plaquette (O1), la variation de l'état de surface sur la durée d'usinage est quasi-nulle. Nous notons cependant un écart important entre le modèle théorique et les mesures.

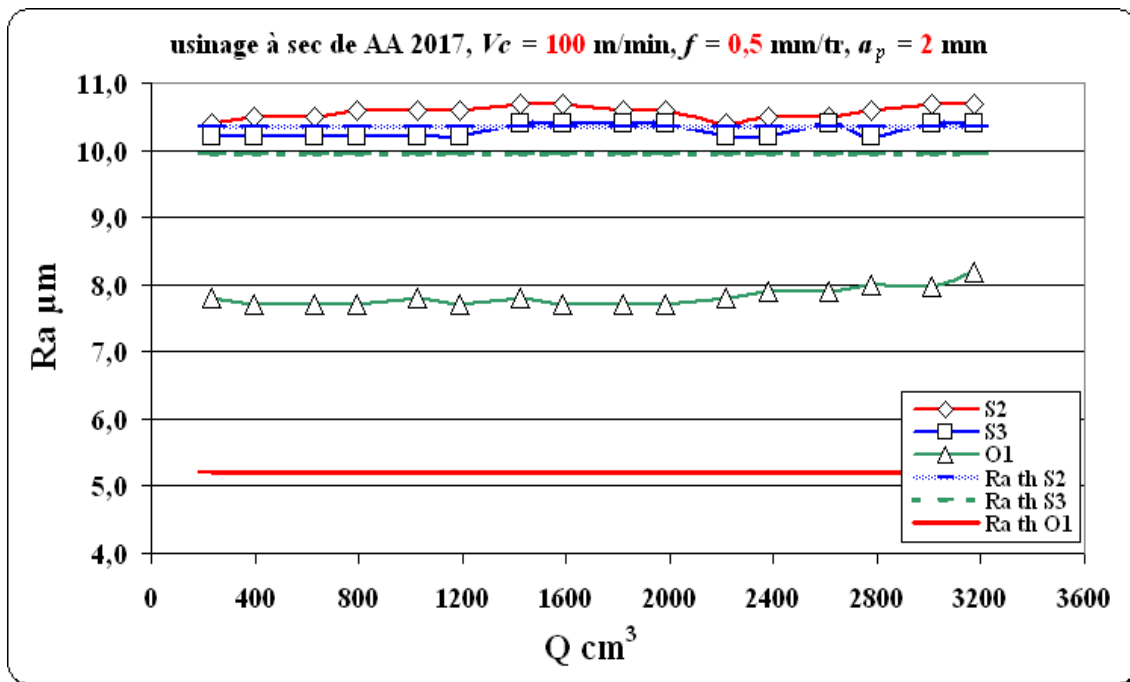


FIGURE 4.23 – Graphiques de  $Ra$  en fonction de la quantité de matière usinée

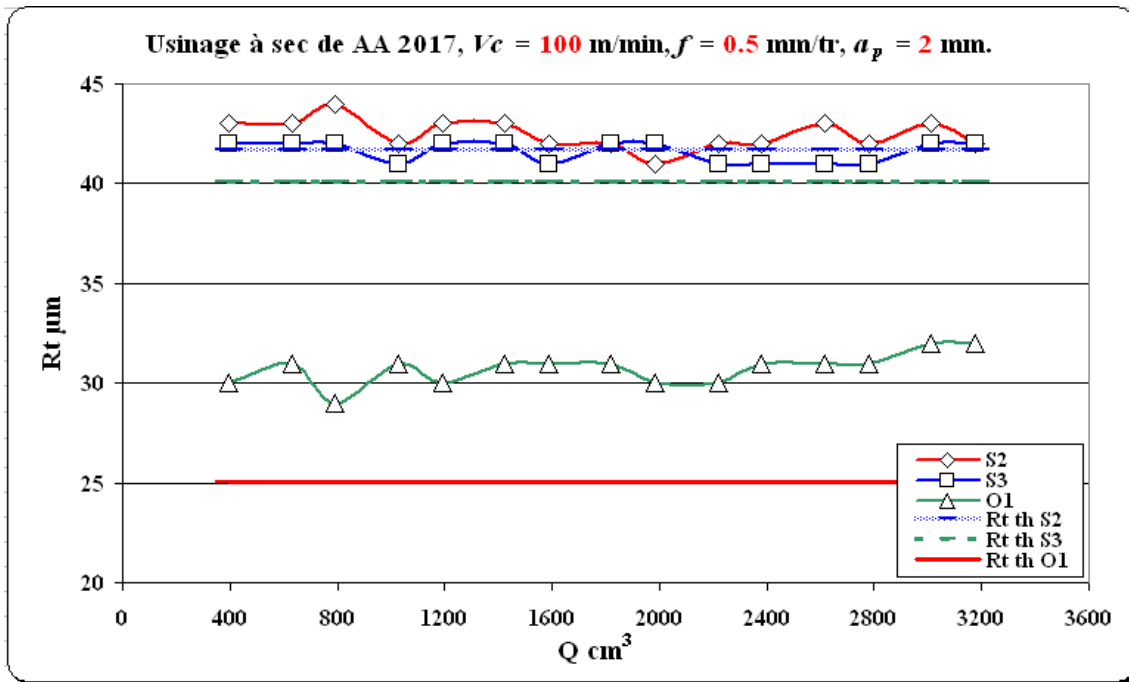


FIGURE 4.24 – Graphiques de  $R_t$  en fonction de la quantité de matière usinée

D'après la figure (4.25), nous remarquons que la rugosité théorique produite avec la plaquette  $55^\circ$  est plus grande que celle produite avec la plaquette  $80^\circ$ , ce qui correspond aux graphiques de  $R_a$  et  $R_t$  des figures (4.23 et 4.24). Cela explique l'écart entre les rugosités obtenues par les plaquettes (S2) et (S3) et la plaquette (O1). Concernant l'écart entre le modèle théorique et les mesures pour les plaquettes rhombiques à  $80^\circ$ , nous pouvons voir sur la figure (4.25) que la zone de contact devient plus importante. Cela entraîne des phénomènes dynamiques néfastes à la qualité de l'état de surface. Ces aspects ne sont pas pris en compte dans le modèle théorique uniquement basé sur des considérations géométriques.

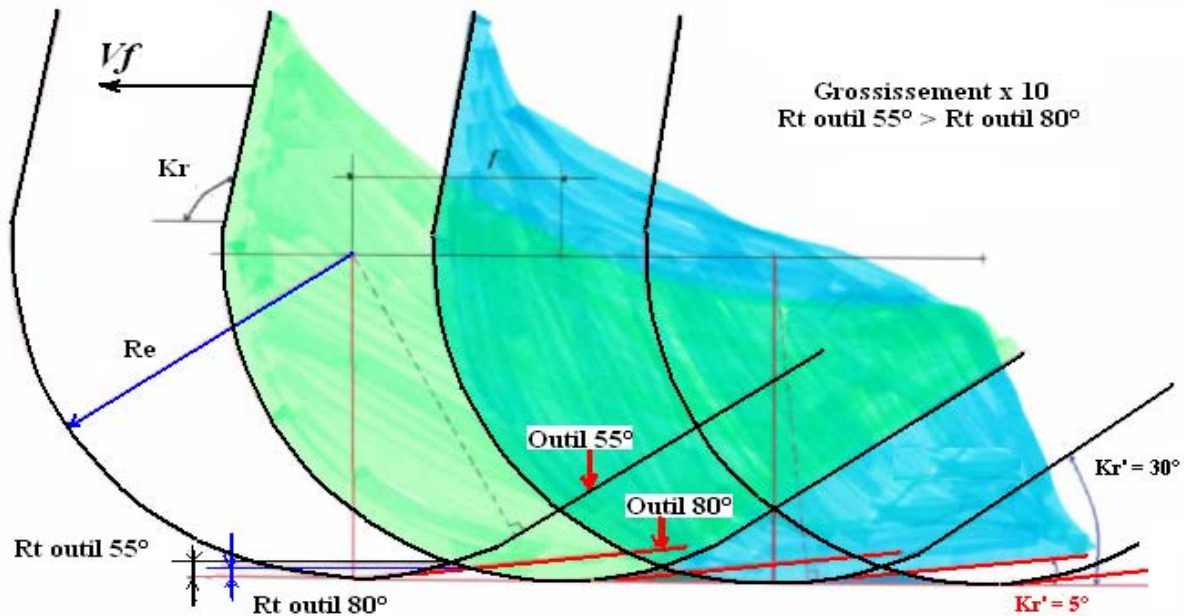


FIGURE 4.25 – Différence de rugosité entre la plaquette 55° et la plaquette 80°.

Nous pouvons conclure que :

1. Quelle que soit la plaquette utilisée, l'état de surface au cours de l'usinage n'évolue pas.
2. Les deux plaquettes Sandvik 55° (S2 et S3) se comportent d'une manière similaire par rapport aux critères  $Ra$  et  $Rt$  des pièces usinées. Le revêtement, le collage et le rayon d'acuité d'arête n'interviennent pas dans l'état de surface.
3. Les modèles théoriques pour les plaquettes rhombiques à 80° ne sont pas suffisamment proches de la réalité.

#### 4.2.5 Formation et écoulement des copeaux

– Formation des copeaux :

La bonne fragmentation des copeaux lors d'un usinage facilite son évacuation. Nous avons étudié la forme et la longueur des copeaux durant l'usinage à sec de AA 2017 T4 avec les plaquettes (O1, S2, et S3). Tous les copeaux ont été analysés sur le projecteur du profil. L'étude de l'évolution des copeaux montre que les copeaux obtenus sont fragmentés mais la longueur des copeaux obtenus avec les trois plaquettes reste constante (voir détail en tableau 7.16 chapitre annexe 7). La figure (4.26) présente les copeaux obtenus après 26 min d'usinage à sec de AA 2017 T4, cette figure montre que la meilleure fragmentation des copeaux a été obtenue durant l'usinage avec la plaquette S2. La longueur d'un morceau du copeau obtenu avec la plaquette S2 est de l'ordre de 4 mm (voir tableau 4.15). Cette longueur est deux fois plus petite que celle des copeaux obtenus avec la plaquette S3.

La longueur des copeaux obtenus avec la plaquette O1 est 3 fois plus grande que celle des copeaux obtenus avec la plaquette S2. Les copeaux obtenus par les plaquettes (O1) et (S3) ont une courbure relativement grande et constante. Les copeaux avec la plaquette (S2) montre un copeau vrillé ayant subi une torsion. Nous comprenons par cette forme le collage important (sous forme de BUL). Cette géométrie est sûrement due à la géométrie de la face de coupe (rugosité et acuité d'arête).



FIGURE 4.26 – Forme des copeaux, A. Plaquette O1, B. Plaquette S2, C. Plaquette S3.

Plaquette	O1	S2	S3
Longueur des copeaux mm	12	4	8

TABLE 4.15 – Longueur des copeaux après 26 min d'usinage à sec de AA 2017 T4 à  $V_c = 100$  m/min.

La comparaison des plaquettes par rapport aux copeaux obtenus montre que :

1. l'utilisation des plaquettes non revêtues S2 produit une meilleure fragmentation des copeaux mais qui est le résultat d'une coupe plus « contrainte ».
2. l'utilisation des plaquettes revêtues de diamant et polies facilite l'écoulement du copeau ce qui le rend plus long.

– Ecoulement des copeaux :

L'écoulement des copeaux après leurs formations sur la face de coupe de la plaquette lors d'un usinage crée des stries, ces stries nous indiquent dans quelle direction le copeaux circule sur la face de coupe. La direction d'écoulement de ces copeaux est caractérisée par un angle ( $\eta$ ). Nous avons déjà proposé des modèles pour calculer l'angle d'écoulement des copeaux durant l'usinage avec des plaquettes  $80^\circ$  ou  $55^\circ$ . L'angle d'écoulement des copeaux formés durant l'usinage avec des plaquettes  $80^\circ$  et  $55^\circ$  à condition que  $a_p > R\epsilon$  se calcule en appliquant l'équation ( eq 4.4). Le modèle proposé dépend de 4 paramètres : l'angle de direction d'arête  $Kr$ , la profondeur de passe  $a_p$ , le rayon de bec  $R\epsilon$ , et l'avance  $f$ .

Grâce aux stries dues à l'écoulement des copeaux, nous avons mesuré expérimentalement l'angle ( $\eta$ ) formé sur la face de coupe de chaque plaquette. La figure (4.27) montre l'angle ( $\eta$ ) formé sur la face de coupe de la plaquette O1 après 30 min d'usinage à sec de AA 2017 T4.



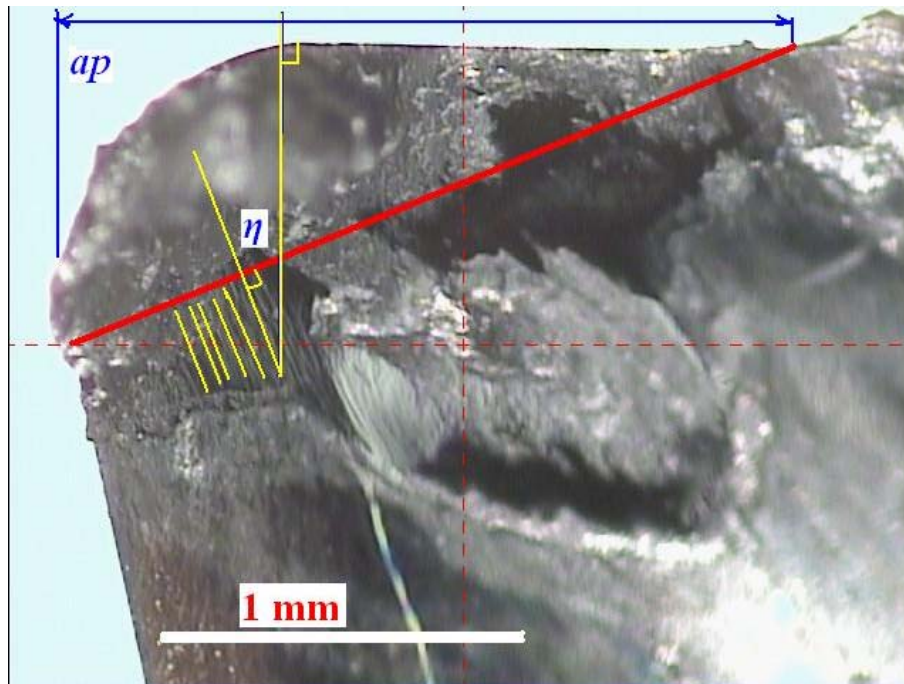


FIGURE 4.27 – Mesure de l’angle  $\eta$  sur une plaquette O1 après 30 min d’usinage à sec de AA 2017 T4 à  $V_c = 100$  m/min.

Nous avons aussi calculé cet angle dans le cas où  $a_p > Re$  en appliquant l’équation (eq 4.4) pour les plaquettes à  $80^\circ$  et  $55^\circ$  (O1, S2, et S3). Le tableau (4.16) présente les valeurs mesurées et théoriques de l’angle d’écoulement des copeaux durant l’usinage avec les trois plaquettes.

Plaquette	O1	S2	S3
$\eta$ mesuré degré	24.86	24.23	23.16
$\eta$ calculé degré	23.28	22.57	23.10

TABLE 4.16 – Valeurs mesurées et théoriques de l’angle d’écoulement des copeaux.

La comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées du tableau (4.16) ne montre aucune variation sensible. Au vu de la forme des copeaux, nous avons analysé un phénomène de coupe très différent entre les plaquettes (O1) et (S3) et la plaquette (S2). Dans le modèle d’écoulement et dans les stries laissées sur la face de coupe, cela n’apparaît pas. Ce modèle n’est pas révélateur du comportement de l’outil dans la matière.

## 4.2.6 Conclusion

Nous avons usiné l’alliage d’aluminium AA 2017 T4 avec une profondeur de passe  $a_p = 2$  mm et une avance  $f = 0.5$  mm/tr. Nous avons testé une vitesse de coupe de 100 m/min pour étudier l’effet d’une

faible vitesse de coupe sur l'usure des plaquettes et sur le collage de la matière usinée. Les plaquettes utilisées ont un rayon de bec de 0.8 mm. Les différentes études menées nous permettent de conclure :

- D'un point de vue du collage BUL, la plaquette avec le revêtement diamant et la plaquette polie se comportent similairement. La plaquette non revêtue et non polie modifie la coupe et les copeaux se collent sur l'arrière de l'arête de coupe. L'arête rapportée est inexistante sur la plaquette revêtue diamant et très importante sur les deux autres plaquettes. Nous avons analysé que ce point provenait du rayon d'acuité d'arête.
- Pour les usures VBB, le revêtement offre une résistance à l'usure très élevée. Les deux autres plaquettes s'usent dans les mêmes ordres de grandeur entre elles mais de manière plus importantes que pour  $V_c=600$  m/min. Il semblerait que la faible vitesse de coupe crée un frottement plus important entre la pièce et la face en dépouille. L'usure en cratère n'est visible que sur la plaquette non polie et non revêtue. Ceci est dû au frottement plus important.
- Aucune plaquette ne montre de modification de l'état de surface de la pièce. Cela est intéressant car les différences géométriques et de coupe que l'on constate (collage, rayon d'acuité, revêtement) ne semble pas influencer la rugosité.
- L'étude de la géométrie du copeau montre clairement que la coupe avec la plaquette non revêtue non polie est plus « contrainte » avec un copeau ayant subi une torsion et revenant sur la face de coupe. Ceci expliquant le collage important sur cette plaquette.

Il se dégage de cette étude que le comportement de la plaquette revêtue de diamant dans ces vitesses de coupe très faibles est excellent. La plaquette polie montre également une bonne coupe et le choix peut finalement se faire à partir du coût des plaquettes.

### 4.3 Conclusion

Nous avons usiné sur une machine à commande numérique des barres d'alliage d'aluminium AA 2017 T4. Tous les essais ont été réalisés avec et sans lubrification. afin de voir l'influence du lubrifiant sur l'usure des plaquettes, le collage de la matière usinée, la formation des copeaux, ainsi que sur l'état de surface obtenu. Nous avons choisi des paramètres de coupe assez élevés (une avance  $f = 0.5$  mm/tr, une profondeur de passe  $a_p = 2$  mm) afin d'élever la température dans la zone de coupe. Deux vitesses de coupe ont été testées (100 et 600 m/min). Le but d'usiner à une vitesse de 600 m/min a été de réaliser un usinage à puissance maximale (10 kW) afin d'élever la température dans la zone du contact outil/copeau. L'intérêt de l'usinage à une faible vitesse de coupe a été d'analyser l'effet unique de la vitesse de coupe sur l'ensemble des paramètres étudiés. Nous avons utilisé 6 plaquettes rhombiques ( $55^\circ$  et  $80^\circ$ ), toutes avec un rayon de bec proche de 0.8 mm. Le temps d'usinage a été de 49 min durant l'usinage avec une vitesse de coupe de 600 m/min et de l'ordre de 30 min durant l'usinage à une vitesse de 100 m/min.

L'étude de l'effet du lubrifiant a montré qu'il diminue le coefficient de frottement ce qui permet aux

copeaux de s'écouler facilement sans adhérence et ainsi diminuer la BUL. Nous n'avons pas remarqué de modifications concernant la BUE. L'analyse de l'influence de la BUL sur l'usure par diffusion n'a pas été établie. Il s'avère que la BUL n'est pas néfaste à l'outil. Le lubrifiant n'a pas d'influence ni sur l'usure en dépouille ni sur l'usure en cratère, il n'apporte aucune amélioration de l'état de surface. Au vu de l'ensemble de ces analyses, l'intérêt du lubrifiant dans l'usinage dans ces conditions d'usinage n'a pas été avéré.

L'étude du phénomène du collage nous a montré que le polissage et le revêtement de diamant diminuent le collage sur la face de coupe (BUL). La couche adhérente formée derrière le cratère n'est pas importante car ce n'est pas dans cette zone qu'on constate une dégradation de la plaquette. L'effet de l'usinage à une faible vitesse de coupe provoque un collage important à cause de la faible température et de la faible vitesse d'écoulement. Le rayon de l'acuité d'arête de la plaquette revêtue a été le facteur déterminant dans la non formation de BUE. La plaquette revêtue diamant se comporte beaucoup mieux que les plaquettes non revêtues et non polies vis à vis de l'usure. D'un côté elle diminue le collage de la matière usinée et d'autre côté elle présente une meilleure résistance à l'usure en dépouille et en cratère. Nous avons remarqué que la constitution de la plaquette (nuance) est l'un des paramètres importants sur la différence d'usure entre les plaquettes.

D'un point de vue de la rugosité, nous avons constaté que l'apparition et la disparition du collage n'a aucune d'influence sur l'état de surface des pièces usinées. Nous avons constaté aussi que le revêtement diamant et l'acuité d'arête n'interviennent pas dans l'état de surface. Les modèles théoriques de l'état de surface nous ont montré que pour des plaquettes rhombiques à  $55^\circ$ , les valeurs théoriques correspondent aux valeurs mesurées. Pour des plaquettes rhombiques à  $80^\circ$ , il y a un écart important entre les valeurs théoriques et mesurées de l'état de surface. Cette différence est due à une zone de contact importante qui entraîne des phénomènes dynamiques néfastes à la rugosité des pièces. L'étude qualitative de la géométrie des copeaux a montré des différences importantes au niveau du phénomène de coupe. Cela met en évidence que des paramètres géométriques comme la qualité de surface de la face de coupe et le rayon d'acuité d'arête sont influents sur l'écoulement de la matière mais finalement n'influent pas sur l'usure de l'outil ou les états de surface. De cette analyse, une étude plus poussée sur le rayon d'acuité d'arête serait intéressante à mener.

Le tableau 4.17 présente un résumé de l'usinage en ébauche.

AA 2017 T4	10 kW			2 kW		
Plaquette	O1 / sec	O1 / lub	S4 / sec	O1/ sec	S2 / sec	S3 / sec
BUE	++	+	++	+++	+++	0
BUL	++	+	+++	+	+++	+
VBB	++	++	++	+++	+++	0
KT	++	++	++	0	+	0
<i>Ra</i>	+	+	+	+	+	+
<i>Rt</i>	+	+	+	+	+	+

TABLE 4.17 – Résumé des essais en ébauche.

# Chapitre 5

## Usinage en finition

Dans le cas d'une opération de finition, on cherche à respecter les contraintes du dessin de définition (dimensions et état de surface). Dans ce chapitre, nous allons effectuer une opération de finition durant l'usinage à sec et lubrifié des alliages d'aluminium AA 2017 T4 et AA 7075 T651 en testant trois vitesses de coupe 1200, 800 et 400 m/min. Les deux matériaux ont des duretés différentes, l'alliage d'aluminium AA 7075 T651 a une dureté plus grande (de l'ordre de 28%) que l'alliage AA 2017 T4. Comme pour l'étude en ébauche, nous allons étudier les aspects liés à la plaquette (l'usure, le collage, le déroulement des copeaux) et la rugosité de la pièce. L'ensemble des études porte sur un temps d'usinage de l'ordre de 16 min lors de l'usinage à 1200 m/min, de l'ordre de 90 min lors d'usinage à une vitesse de coupe de 800 m/min et de l'ordre de 50 min à une vitesse de 400 m/min.

### 5.1 Usinage à une vitesse $V_c = 1200$ m/min

#### 5.1.1 Présentation des essais

Nous avons usiné à sec des pièces de l'alliage d'aluminium AA 2017 T4 sur le tour à commande numérique (Cazeneuve CTN 210). La composition chimique de AA 2017 T4 est présentée sur le tableau (3.3), les pièces utilisées ont des longueurs et des diamètres uniques ( $L = 350$  mm,  $D = 150$  mm). Nous avons réalisé les essais en utilisant trois plaquettes rhombiques à  $55^\circ$  d'un rayon de bec théorique de 0.4 mm. Les plaquettes utilisées sont :

1. Une plaquette polie Iscar (I1) (voir désignation en tableau 3.6).
2. Une plaquette non polie Sandvik (S1) (voir désignation en tableau 3.6).
3. Une plaquette polie Otelo (O2) (voir désignation en tableau 3.6).

Tous les essais ont été effectués sans lubrifiant (à sec). Les valeurs réelles mesurées de la géométrie de toutes les plaquettes (rayons de bec, angles de coupe, angles de dépouille) sont données sur le

tableau (3.8). Nous pouvons noter des différences sensibles sur les rayons de bec (de 0.33 à 0.38), les angles de coupe (de 22° à 26°) et de dépouille (de 4.7° à 6.6°) sur ces 3 plaquettes.

Nous avons utilisé les paramètres de coupe suivants : une profondeur de passe  $a_p = 1$  mm, une vitesse de coupe  $V_c = 1200$  m/min, une avance  $f = 0.24$  mm/tr. Les essais du tournage ont été effectués pendant 16 min, ce temps est équivalent à  $4800 \text{ cm}^3$  de matière usinée. Les diverses mesures ont été faites pour chaque  $800 \text{ cm}^3$  de matière usinée équivalent à 2.7 min du temps d'usinage. La figure (5.1) présente les faces de coupe des plaquettes neuves grossies sur le projecteur du profil.

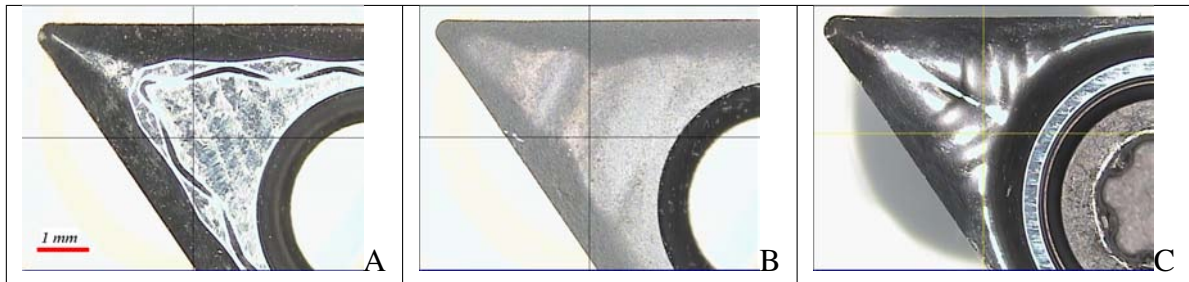


FIGURE 5.1 – Plaquettes neuves, A. Plaquette Iscar (I1), B. Plaquette Sandvik (S1), C. Plaquette Otelo (O2).

Nous avons coupé par électroérosion les plaquettes neuves perpendiculairement à l'arête de coupe principale et à une distance de 0.5 mm du point de la plaquette (la moitié de profondeur de passe) afin de mesurer l'acuité d'arête de ces plaquettes. La figure (5.2) montre l'acuité d'arête des plaquettes neuves mesurées sur le MEB. La mesure de cette acuité d'arête donne des valeurs de  $R\beta$  très proches. Le rayon de cette acuité d'arête ( $R\beta$ ) est de l'ordre de  $6 \mu\text{m}$  pour la plaquette Iscar (I1),  $8 \mu\text{m}$  pour la plaquette Sandvik (S1), et  $7 \mu\text{m}$  pour la plaquette Otelo (O2). A l'issue des 16 min d'usinage à sec de l'alliage AA 2017 T4 à une vitesse de 1200 m/min par les trois plaquettes, la mesure des acuités d'arête sur le MEB n'a pas montré d'usure significatives.

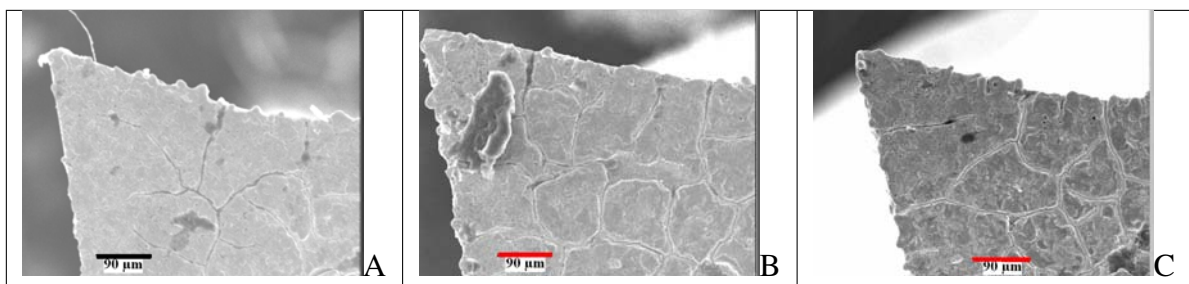


FIGURE 5.2 – Images MEB des acuités d'arête des plaquettes neuves, A. Plaquette I1, B. Plaquette S1, C. Plaquette O2.

### 5.1.2 Collage de la matière usinée

– La couche adhérente (BUL) :

Nous avons analysé la couche adhérente formée sur chaque plaquette utilisée à l'aide du projecteur du profil. Cette couche adhérente s'identifie par sa surface d'extension sur la face de coupe. La surface de BUL formée lors de l'usinage de AA 2017 T4 varie d'une plaquette à l'autre. Cette couche adhérente peut être bénéfique si elle diminue la diffusion en créant une barrière thermique ou néfaste si elle contribue au collage de dépôt de matière usinée d'un point de vue de l'arête rapportée [LIS04]. Devillez et autres [DSD<sup>+</sup>07] disent que la BUL formée est protectrice si elle est stable. Nous avons analysé la couche adhérente formée sur la face de coupe à la fin du processus d'usinage (après 16 min) afin de comprendre son effet sur la plaquette après dissolution de la BUL dans un bain de soude. Les analyses des plaquettes nettoyées ne montrent aucune diffusion.

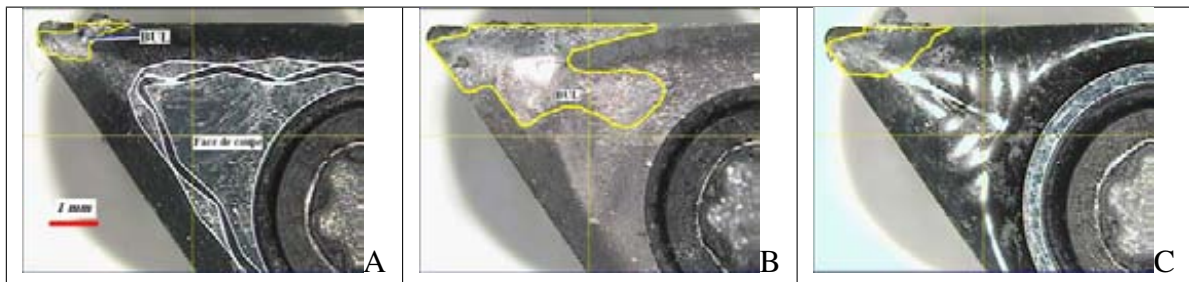


FIGURE 5.3 – Face de coupe des plaquettes après 16 min d'usinage à sec de AA 2017 T4, A. Plaquette I1, B. Plaquette S1, C. Plaquette O2.

D'après la figure (5.3), nous remarquons que :

1. La BUL formée sur toutes les plaquettes après 16 min d'usinage se forme derrière la zone de cratère.
2. La surface de la BUL formée sur la plaquette polie O2 est environ deux fois plus grande que celle formée sur la plaquette I1.
3. La zone d'extension de BUL formée sur la plaquette S1 est environ 5 fois plus grande que celle formée sur la plaquette I1.

Le tableau (7.7) présente les images des faces de coupe des trois plaquettes pour chaque 800 cm<sup>3</sup> de matière usinée. Ce tableau montre que la BUL formée sur les deux plaquettes polies (I1 et O2) est moins importante que celle de la plaquette non polie (S1). Le polissage diminue le collage sur la face de coupe. La couche adhérente (BUL) provoque un collage de la matière usinée sur la face de coupe formant une multicouche allant jusqu'à l'arête de coupe secondaire (voir figure 5.4 B). Le collage sur l'arête secondaire n'est pas stable car il se forme et se détache plusieurs fois au cours de l'usinage ce qui peut conduire à une dégradation de l'arête secondaire (figure 5.4 C). Nous avons mesuré la surface de cette couche adhérente à l'aide d'un logiciel [Image J]. La figure (5.5) présente la variation de surface de BUL en fonction de la quantité de la matière usinée. Sur cette figure, nous remarquons que la BUL formée sur la plaquette S1 reste constante jusqu'à 2400 cm<sup>3</sup> de matière usinée. Au delà, la surface de BUL commence à augmenter et atteint la valeur maximale de 4.73 mm<sup>2</sup> à la fin de

l'usinage. Les deux plaquettes polies (I1 et O2) sont quasi-identiques d'un point de vue de la couche adhérente.

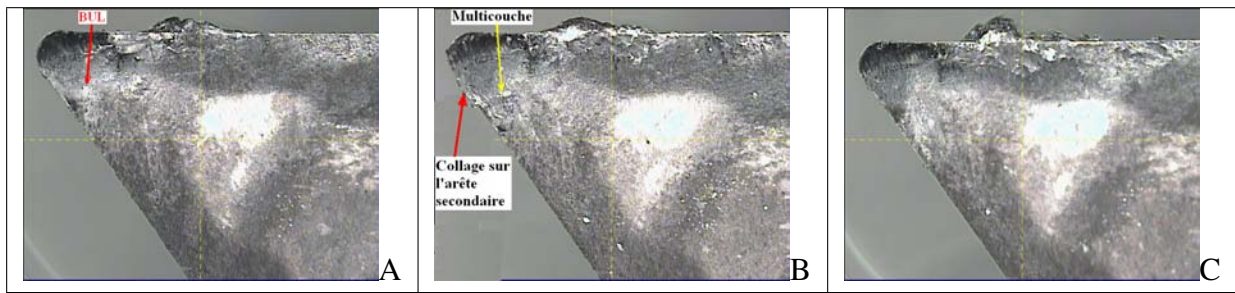


FIGURE 5.4 – La BUL formée sur une plaquette non polie Sandvik (S1), A. Après 2400 cm<sup>3</sup>, B. Après 2800 cm<sup>3</sup>, C. Après 3200 cm<sup>3</sup>.

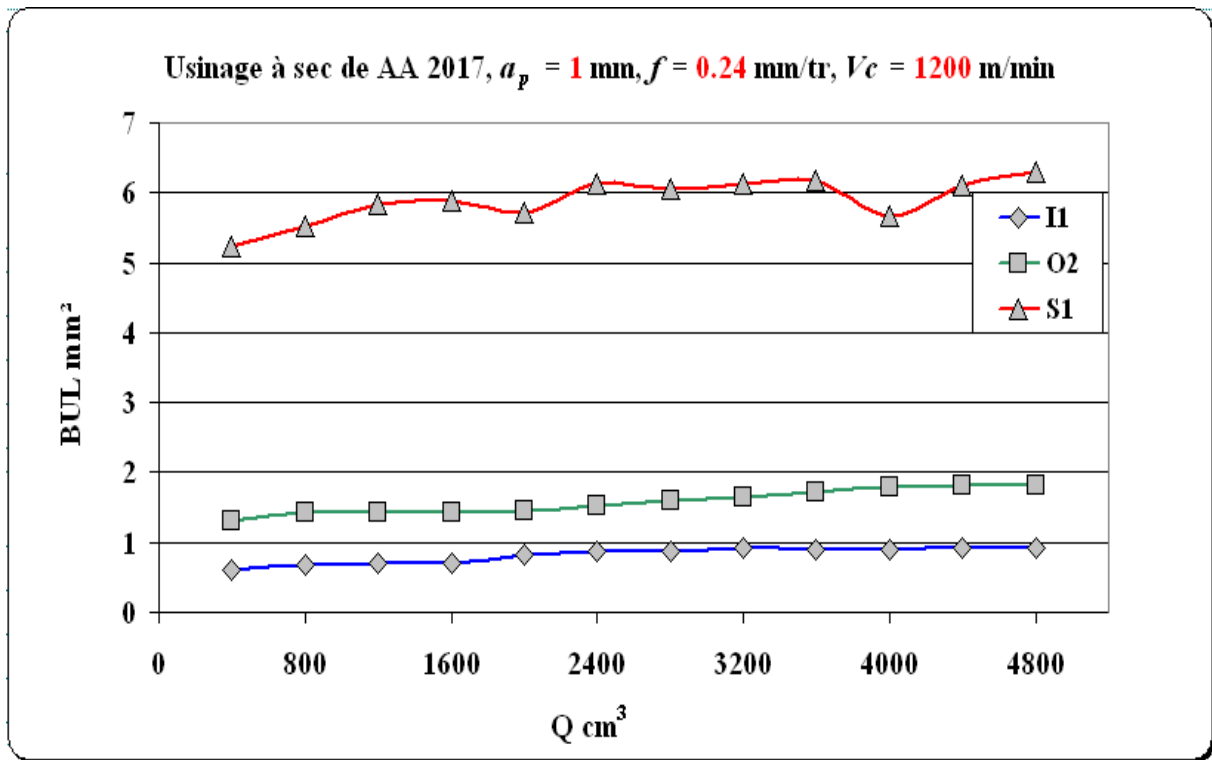


FIGURE 5.5 – Surface d'extension de BUL sur la face de coupe des plaquettes (S1, O2, et I1).

D'après les courbes de BUL (figure 5.5), nous constatons que :

1. La couche adhérente (BUL) formée se situe derrière la zone de cratère, elle contribue au collage de la matière usinée sur la face de coupe de la plaquette ce que forme la multicouche. La multicouche adhérente n'est pas stable, elle apparaît et disparaît régulièrement au cours de l'usinage et son influence ne semble pas importante.



2. Le polissage de la face de coupe des plaquettes diminue fortement la couche adhérente d'environ 80 % car il facilite l'écoulement de la matière sans adhérence.

Si l'on compare les BUL obtenues ici et en ébauche, nous constatons que même pour une vitesse de coupe élevée la plaquette non polie est la plus sujette au collage. La vitesse d'écoulement n'intervient pas. Cela se comprend car sur la zone de cisaillement secondaire, les modèles montrent une vitesse de glissement nulle à l'interface. Le non polissage de la face devient donc un paramètre essentiel dans la formation de la BUL.

– L'arête rapportée (BUE) :

Le tableau (7.14) présente les images de la face de dépouille des plaquettes pour chaque 800 cm<sup>3</sup> de la matière usinée. Les images présentées dans ce tableau montre que la BUE n'est pas stable. Elle apparaît et disparaît durant l'usinage, ce qui correspond aux travaux de Devillez [DSD<sup>+</sup>07]. L'arête rapportée disparaît de l'arête de coupe pour les deux plaquettes S1 et O2 à la fin de l'usinage (après 16 min) (voir figure 5.6). Mais, cette arête rapportée atteint une hauteur de 80 µm sur la plaquette I1 (figure 5.6 A). Pour étudier l'évolution de cette arête rapportée avec le temps, nous avons présenté les courbes de variation de la BUE en fonction de quantité de matière usinée (voir figure 5.7).

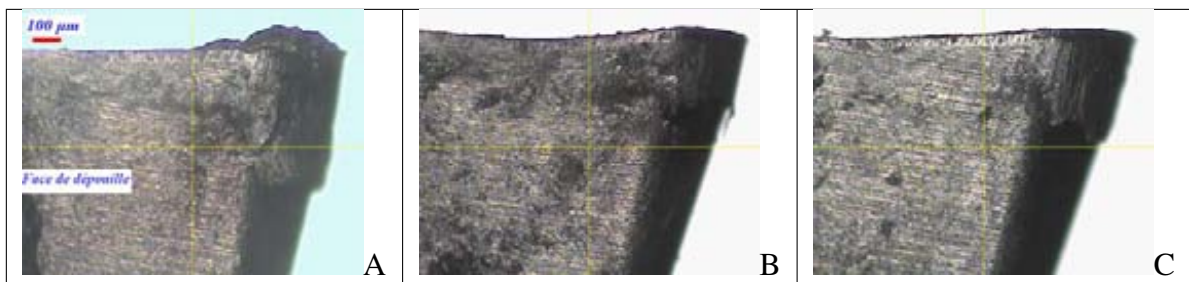


FIGURE 5.6 – Faces de dépouille des plaquettes après 16 min d'usinage à sec de AA 2017 T4, A. Plaquette I1, B. Plaquette S1, C. Plaquette O2.

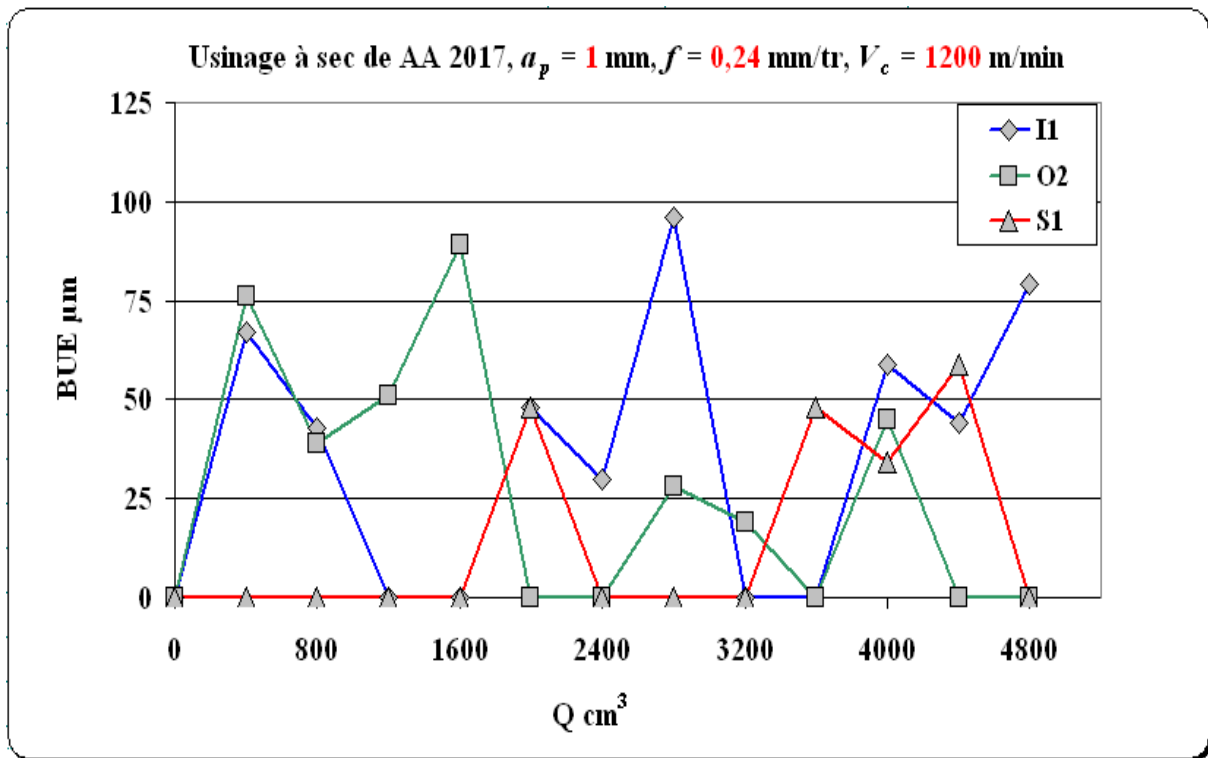


FIGURE 5.7 – Graphiques de BUE en fonction de quantité de la matière usinée.

La figure (5.7) montre que la hauteur maximale de la BUE sur les 3 plaquettes est du même ordre de grandeur. Parfois ces valeurs deviennent nulles, lorsque la BUE a disparu, pour devenir importantes lorsque celle-ci s'est à nouveau créée. Il est cependant important de noter que la vitesse de coupe élevée n'élimine pas ce phénomène d'arête rapportée.

L'analyse globale du phénomène du collage de la matière usinée durant l'usinage à sec de AA 2017 T4 à une vitesse  $V_c = 1200 \text{ m/min}$  montre que :

1. Le polissage de la face de coupe provoque une diminution de la couche adhérente.
2. Les différentes géométries (angles de coupe, dépouille, polissage, rayon de bec) des plaquettes utilisées donnent un résultat similaire sur la formation d'arête rapportée.

### 5.1.3 L'usure des plaquettes

– L'usure de la face de dépouille (VBB) :

La figure (5.6) présente la face de dépouille des trois plaquettes après  $4800 \text{ cm}^3$  de matière usinée à sec (mesures effectuées pour chaque  $800 \text{ cm}^3$ ). Cette usure (VBB) après rodage augmente progressivement de la même façon pour les trois plaquettes. La figure (5.8) présente les graphiques de variation de l'usure VBB en fonction de la quantité de matière usinée pour chaque plaquette utilisée.

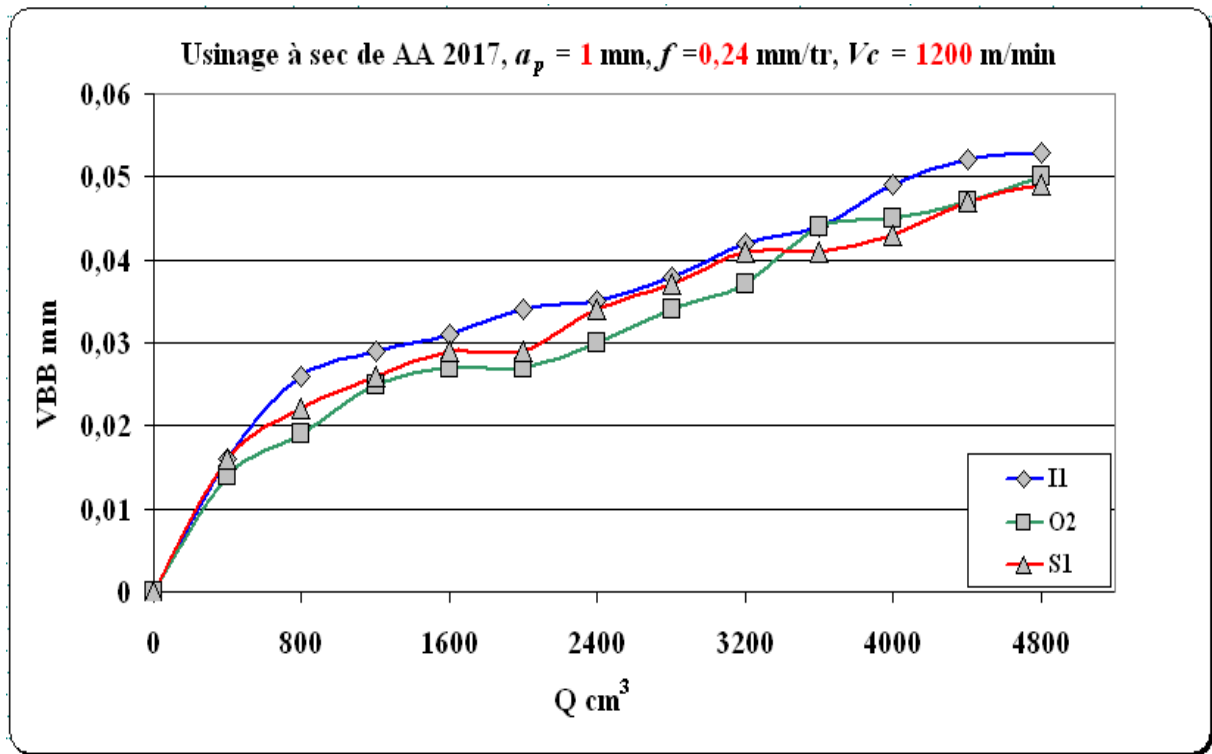


FIGURE 5.8 – Graphiques de VBB en fonction de quantité de la matière usinée.

D'après la figure (5.8), nous pouvons constater que les trois plaquettes (I1, S1, et O2) se comportent de la même façon d'un point de vue de l'usure VBB. La valeur maximale de VBB atteint à peu près 0.05 mm après 16 min d'usinage à sec de AA 2017 T4 avec les trois plaquettes. La quantité de matière usinée n'a pas permis de mettre en évidence l'influence de l'angle de dépouille sur l'usure VBB. Cependant en comparant l'usure obtenue en ébauche ( $V_c=600$  m/min) à l'issue de 4800 cm<sup>3</sup> (VBB=0.07) de matière usinée, on constate une diminution dans ce cas. Une coupe à vitesse élevée diminue le frottement de la pièce usinée sur la face en dépouille. L'élévation de température à ce stade de l'usinage n'augmente pas l'usure de la plaquette.

– L'usure en cratère :

La face de coupe des plaquettes utilisées s'use à cause du frottement du copeau. Nous avons analysé le cratère formé à la fin du processus d'usinage (après 16 min d'usinage à sec de AA 2017 T4) à l'aide du projecteur du profil. La figure (5.9) montre les faces de coupe des trois plaquettes à la fin de l'usinage. Sur cette figure, nous remarquons également que la matière usinée se colle sur la face de coupe derrière la zone du cratère. La face de coupe de la plaquette I1 (figure 5.9 A) présente un collage de matière dans la zone du cratère et proche de l'arête de coupe, ce collage correspond à l'arête rapportée.

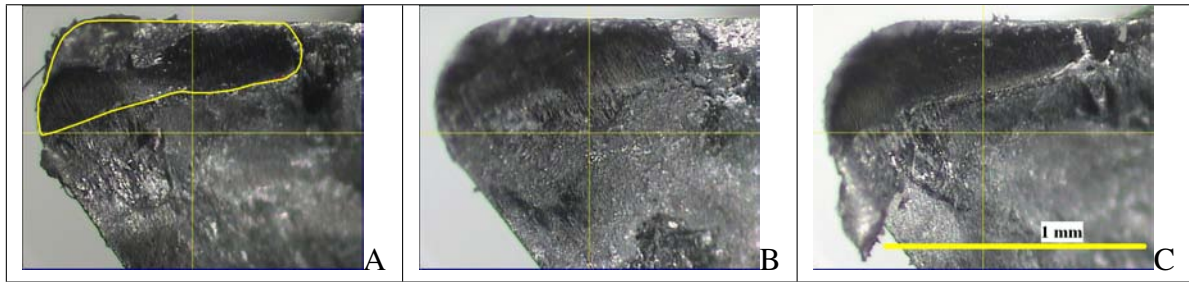


FIGURE 5.9 – Faces de coupe des plaquettes après 16 min d’usinage à sec de AA 2017 T4, A. Plaquette I1, B. Plaquette S1, C. Plaquette O2.

Nous avons mesuré la surface de cette usure en cratère, les résultats trouvés sont classés sur le tableau (5.1).

Plaquette	I1	S1	O2
Surface de cratère mm <sup>2</sup>	0.274	0.266	0.284

TABLE 5.1 – Surface de l’usure en cratère sur la face de coupe.

D’après la figure (5.9) et le tableau (5.1) nous constatons que l’usure en cratère est identique sur toutes les plaquettes (polies ou non polies). Le polissage de la face de coupe de la plaquette ne présente pas d’intérêt de ce point de vue. La comparaison avec l’usure en cratère lors de l’usinage à puissance maximale ( $P=10\text{kW}$ ) montre, pour une même quantité de matière, une usure beaucoup plus faible dans le cas où  $V_c$  est élevée ( $V_c=1200\text{ m/min}$ ). La comparaison a été faite à partir des surfaces de cratère ramenées à un copeau de  $1\text{ mm}^2$ . Ceci s’explique facilement par les forces de coupe qui sont beaucoup plus importantes en ébauche.

#### 5.1.4 Etat de surface des pièces usinées

Les pièces usinées ont été contrôlées du point de vue de l’état de surface en utilisant le rugosimètre (figure 3.2). Nous avons choisi une valeur de Cut Off de  $0.8\text{ mm}$ , cette valeur est choisie en rapport avec une avance de  $0.24\text{ mm/tr}$  (voir tableau 3.5). Pour chaque mesure, nous avons contrôlé la rugosité arithmétique  $R_a$  et la rugosité totale  $R_t$  des pièces usinées. Les graphiques suivants (figures 5.10 et 5.11) présentent l’évolution de  $R_a$  et  $R_t$  en fonction de quantité de la matière usinée, les deux graphiques présentent les valeurs mesurées et théoriques des paramètres de l’état de surface. Le tableau (5.2) présente les valeurs moyennes des paramètres de l’état de surface après 16 min d’usinage à sec de AA 2017 T4.

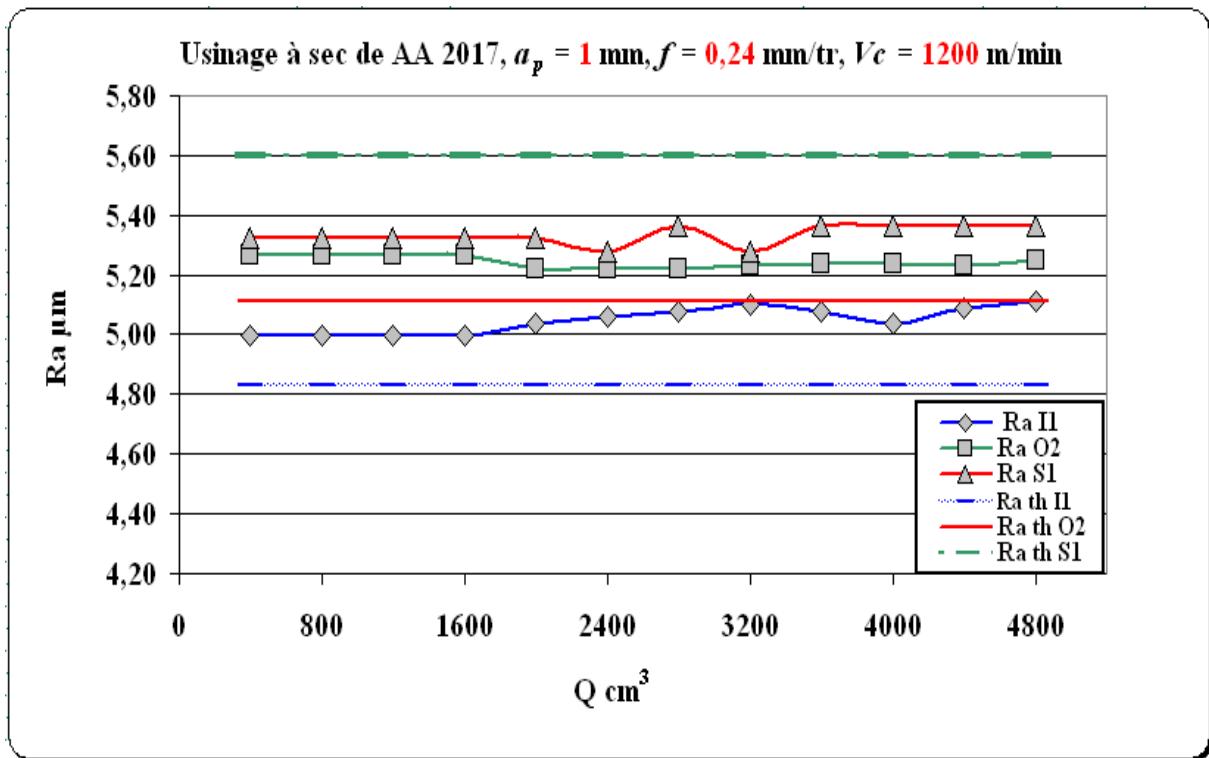


FIGURE 5.10 – Graphiques de  $Ra$  (rugosité arithmétique) en fonction de quantité de la matière usinée.

Plaquette	$Ra$ moy $\mu\text{m}$	$Rt$ moy $\mu\text{m}$
I1	5.05	21.9
S1	5.33	23.2
O2	5.24	22.3

TABLE 5.2 – Valeurs moyennes de  $Ra$  et  $Rt$  après 16 min d’usinage à sec de AA 2017 T4 à  $V_c = 1200$  m/min.

D’après les deux figures (5.10 et 5.11) et le tableau (5.2), nous trouvons que :

1. Les états de surface pour les 3 plaquettes évoluent très peu. Cela est normal étant donné que l’analyse de l’usure des plaquettes a montré une très faible modification géométrique des plaquettes.
2. Les différences entre les valeurs mesurées sont dues aux rayons de bec des trois plaquettes qui sont différents.
3. Nous voyons une différence entre le modèle et les valeurs mesurées. Les modèles théoriques proposés (voir détail en 7.1) donnent directement les valeurs théoriques de  $Ra$  et  $Rt$ . Au niveau de la rugosité arithmétique, c’est dans le cas des rayons les plus grands que l’écart entre modèle et mesure est le plus important. Cela s’explique par les phénomènes vibratoires « non inclus dans le modèle » qui sont plus présents pour des rayons de bec plus importants. Cet écart est

encore plus vrai pour la rugosité totale qui correspond à une seule valeur comparée (la rugosité maximale).

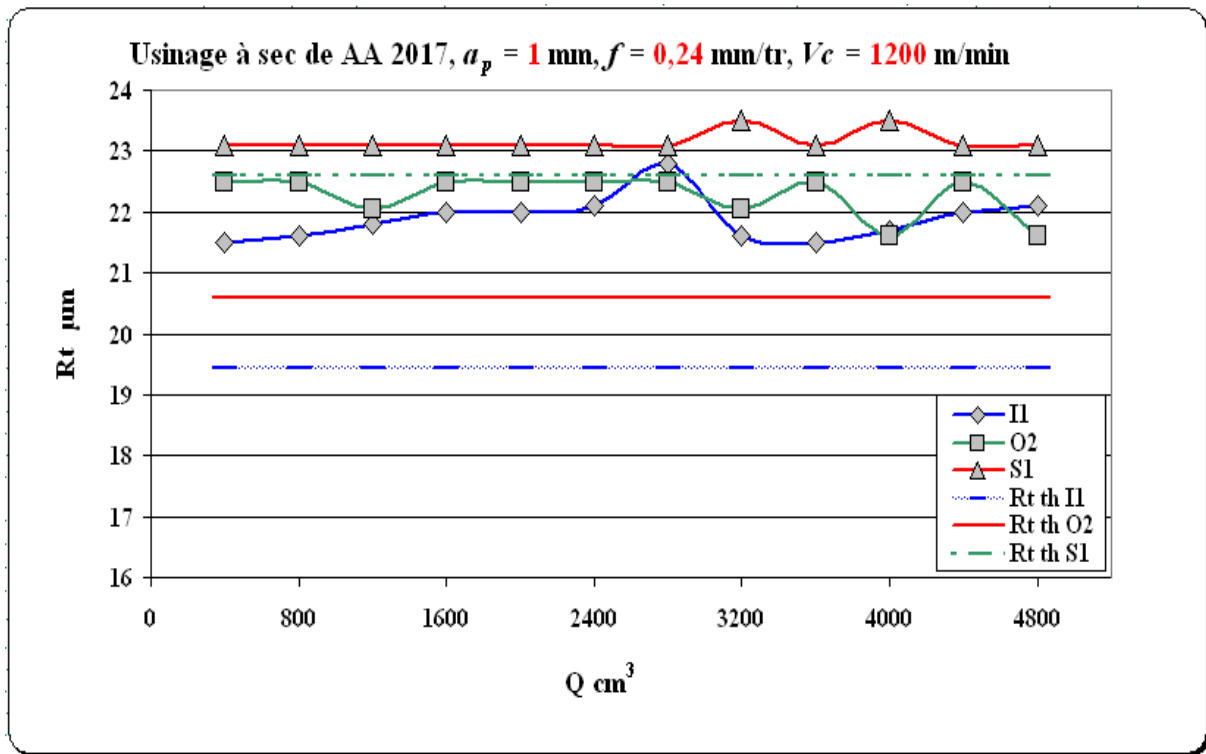


FIGURE 5.11 – Graphiques de  $R_t$  (rugosité totale) en fonction de quantité de la matière usinée.

L'étude de l'état de surface montre que la formation des dépôts de matière usinée sur l'arête de coupe des plaquettes durant l'usinage à sec de AA 2017 T4 à une vitesse  $V_c = 1200 \text{ m/min}$  ne semble pas avoir d'influence sur l'état de surface des pièces usinées.

### 5.1.5 Formation des copeaux

Les copeaux produits tout au cours de l'usinage sont fragmentés. La géométrie des plaquettes joue un rôle important sur l'évacuation des copeaux. Canteli et autre [CCM<sup>+</sup>10] ont constaté que l'augmentation de l'angle de coupe ( $\gamma$ ) diminue les forces de coupe et cela provoque une bonne évacuation des copeaux. Dans notre cas, la différence de longueur des copeaux obtenus avec les trois plaquettes (I1, S1, et O2) peut être expliquée par la différence de l'angle de coupe.

$$\gamma \text{ de la plaquette Iscar (I1)} > \gamma \text{ de la plaquette Otelo (O2)} > \gamma \text{ de la plaquette Sandvik (S1)}$$

Cependant d'autres paramètres géométriques diffèrent entre (O2, I1) et S1. Il est difficile de connaître l'influence du polissage étant donné que les plaquettes polies présentent également des angles de

coupe plus grands que la plaquette S1. Afin d'identifier l'influence de chaque paramètre sur le fractionnement du copeau, il serait nécessaire de disposer de plaquettes ayant un seul paramètre changeant pour connaître l'influence de ce paramètre.

La longueur moyenne des copeaux obtenus avec O2 et I1 est de l'ordre de 2 mm (voir détail sur le tableau 7.21). Pour la plaquette S1, nous obtenons des longueurs de copeaux de l'ordre de 5 mm. La figure (5.12) présente les copeaux obtenus en fin d'usinage (après 16 min).

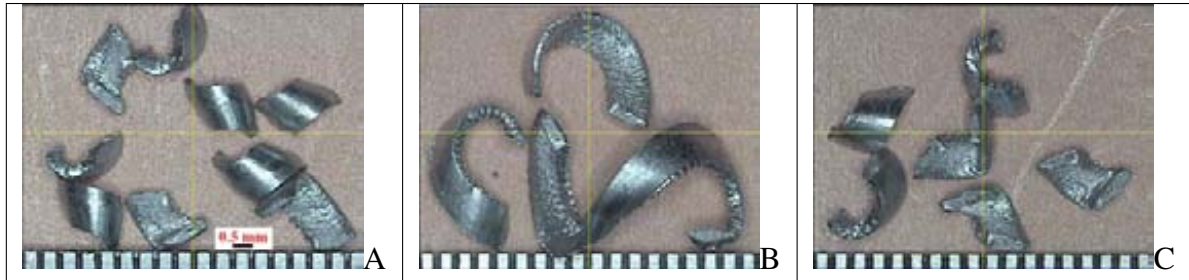


FIGURE 5.12 – Forme des copeaux après 16 min d'usinage à sec de AA 2017 T4 à  $V_c = 1200$  m/min, A Copeaux obtenus avec I1, B. Copeaux obtenus avec S1, C. Copeaux obtenus avec O2.

La comparaison avec les copeaux obtenus pour les conditions d'ébauche ( $a_p=2$  mm et  $f=0.5$ mm/tr) montre que pour une même géométrie de plaquette, la longueur des copeaux est très variable. Ceci confirme bien que le fractionnement des copeaux dépend du couple choisi dans le diagramme brise copeaux.

### 5.1.6 Conclusion

Nous avons usiné à sec l'alliage d'aluminium AA 2017 T4 avec les paramètres de coupe suivants : une vitesse de coupe = 1200 m/min, une avance = 0.24 mm/tr, et une profondeur de passe = 1 mm. Nous avons utilisé trois plaquettes rhombiques à 55° (I1, S1, et O2), deux plaquettes polies (O2 et I1) et une plaquette non polie (S1). Le but cette opération de finition a été d'étudier les phénomènes du collage de la matière usinée et l'usure à une vitesse de coupe élevée. Etant donné la vitesse de coupe élevée et les capacités maximales de rotation de la broche, il ne nous a pas été possible d'usiner d'importantes quantités de matière. Nous nous sommes limités à 16 minutes par plaquette. Nous n'avons pas rencontré de différences majeures pour ces trois plaquettes si ce n'est un collage plus important sous forme de couche adhérente sur la face de coupe en arrière du cratère pour la plaquette non polie. La mesure de l'usure en dépouille qui est très faible, nous permet d'avancer que la coupe à cette vitesse de coupe semble plus « franche », diminuant le frottement de la pièce sur la face en dépouille. On observe toujours du collage sous forme d'arête rapportée même pour cette vitesse élevée. Dans la zone de cisaillement secondaire, les vitesses d'écoulement de matière restent très faibles conduisant à ces dépôts de matière. L'état de surface des pièces usinées « pour les trois plaquettes » évolue très peu.

La formation des dépôts de matière usinée sur l'arête de coupe ne semble pas avoir d'influence sur l'état de surface. La petite différence de la rugosité entre les trois plaquettes est due à la différence des rayons de bec. Il apparaît qu'à ce stade de l'usinage, les trois plaquettes restent dans un état proche de l'état initial. Le collage supplémentaire de la matière sur la face de coupe ne conduit pas à une dégradation accélérée de la plaquette ou à une diminution de la qualité de la pièce obtenue.

## 5.2 Usinage à une vitesse $V_c = 800$ m/min

### 5.2.1 Présentation des essais

Nous avons usiné sur le tour à commande numérique Cazeneuve CTN 210 des barres d'alliage d'aluminium AA 2017 T4 et AA 7075 T651 ; la composition chimique de ces deux alliages est présentée sur le tableau (3.3). La dureté de ces deux matériaux est de l'ordre de 110 HB pour l'alliage AA 2017 T4 et de l'ordre de 140 HB pour l'alliage AA 7075 T651. Les deux matériaux sont très utilisés dans l'aéronautique. Tous les essais ont été faits sans lubrification. Les plaquettes utilisées sont des plaquettes rhombiques à  $55^\circ$  avec un rayon théorique de  $R\epsilon = 0.4$  mm, le nombre total des plaquettes utilisées est 6 plaquettes (trois plaquettes pour chaque type d'alliage). Les plaquettes utilisées sont les suivantes :

1. Deux plaquettes polies Iscar (I1) (voir désignation en tableau 3.6).
2. Deux plaquettes non polies Sandvik (S1) (voir désignation en tableau 3.6).
3. Deux plaquettes polies Otelo (O2) (voir désignation en tableau 3.6).

Nous avons utilisé le projecteur du profil pour mesurer la valeur réelle du rayon de bec et les angles de coupe et de dépouille de chaque plaquette. Nous avons classé ces valeurs mesurées sur le tableau (3.8). Les paramètres de coupe utilisés sont : une profondeur de passe  $a_p = 1$  mm, une vitesse  $V_c = 800$  m/min, une avance  $f = 0.24$  mm/tr. Tous les essais ont été effectués pendant 90 min (valeur correspondante à  $18000$  cm<sup>3</sup> de la matière usinée). La figure (5.13) présente la face de coupe des plaquettes neuves.

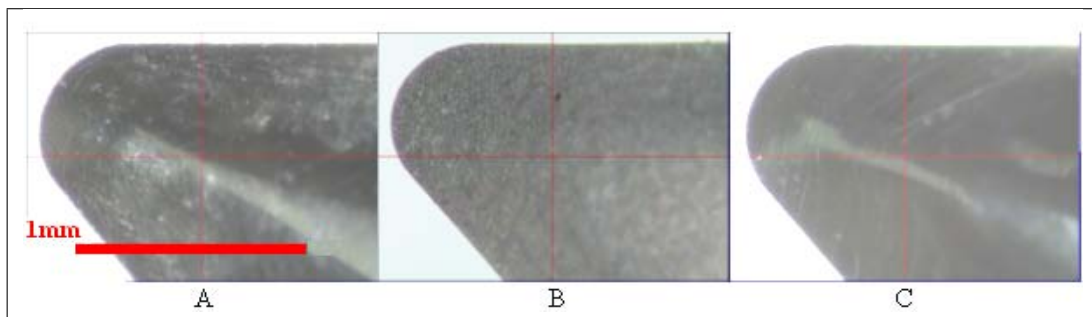


FIGURE 5.13 – Faces de coupe des plaquettes neuves, A. Plaquette Iscar (I1), B. Plaquette Sandvik (S1), C. Plaquette Otelo (O2).



Nous avons observé toutes les plaquettes neuves et usées sur le projecteur de profil. Toutes les mesures ont été faites en fonction de la quantité de la matière usinée  $Q$  ( $\text{cm}^3$ ). Nous avons mesuré l'acuité d'arête des plaquettes neuves et usées sur le MEB. Nous avons coupé par électroérosion les plaquettes neuves et les plaquettes utilisées pour l'usinage des deux matériaux (AA 2017 T4 et AA 7075 T651) perpendiculairement à l'arête de coupe principale et à une distance de 0.5 mm ( $a_p/2$ ) du point de la plaquette laissant la trace d'usinage finale sur la pièce. Le but de cette procédure est de mesurer les acuités d'arête des plaquettes neuves et usées dans la zone de moitié de profondeur de passe, car cette zone est la zone de pression maximale de la matière usinée (copeaux produits) sur la face de coupe. Sur le MEB, nous avons contrôlé le rayon de l'acuité d'arête ( $R\beta$ ) et l'usure en cratère (KT). La figure (5.14) présente les acuités d'arête des plaquettes neuves (I1, S1, et O2) mesurées sur le MEB. La figure (5.15) présente les acuités d'arête des plaquettes usées après 90 min d'usinage à sec dans les deux matériaux AA 2017 T4 et AA 7075 T651. D'après ces deux figures (5.14 et 5.15) et le tableau (5.3), nous remarquons que : les acuités d'arête des plaquettes utilisées durant l'usinage de AA 2017 T4 et de AA 7075 T651 restent similaires à l'état neuf. Cette opération de découpe a été faite après avoir nettoyé toutes les plaquettes dans un bain de soude pour éliminer le collage de la matière usinée. Le tableau (5.3) présente les résultats de mesure du rayon de l'acuité d'arête des plaquettes usées et des plaquettes neuves. Nous observons clairement la composition des plaquettes sur ces images avec les différents grains de carbure agglomérés entre eux avec le liant. Le phénomène de diffusion évoqué comme une usure potentielle liée à l'élimination du liant ne semble pas réelle au vu des images ci dessous. Nous remarquons sur ces images les cratères et un détachement d'un morceau de la face de coupe pour la plaquette Otelo dans l'alliage AA 7075 T651.

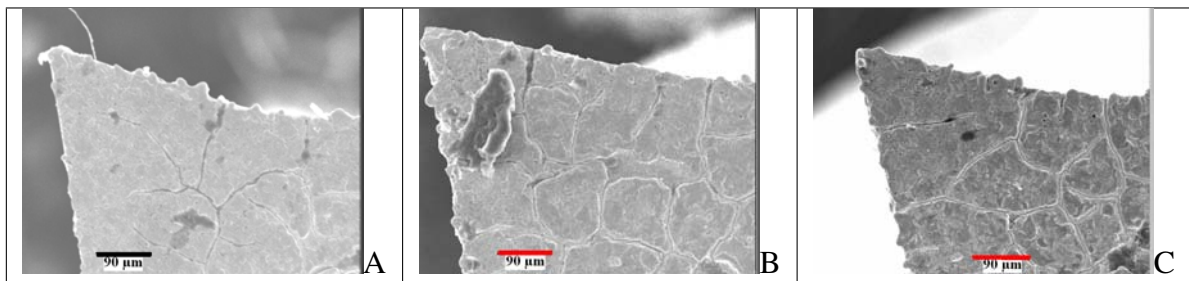


FIGURE 5.14 – Acuités d'arête des plaquettes neuves prises au MEB, A. Plaquette I1, B. Plaquette S1, C. Plaquette O2.

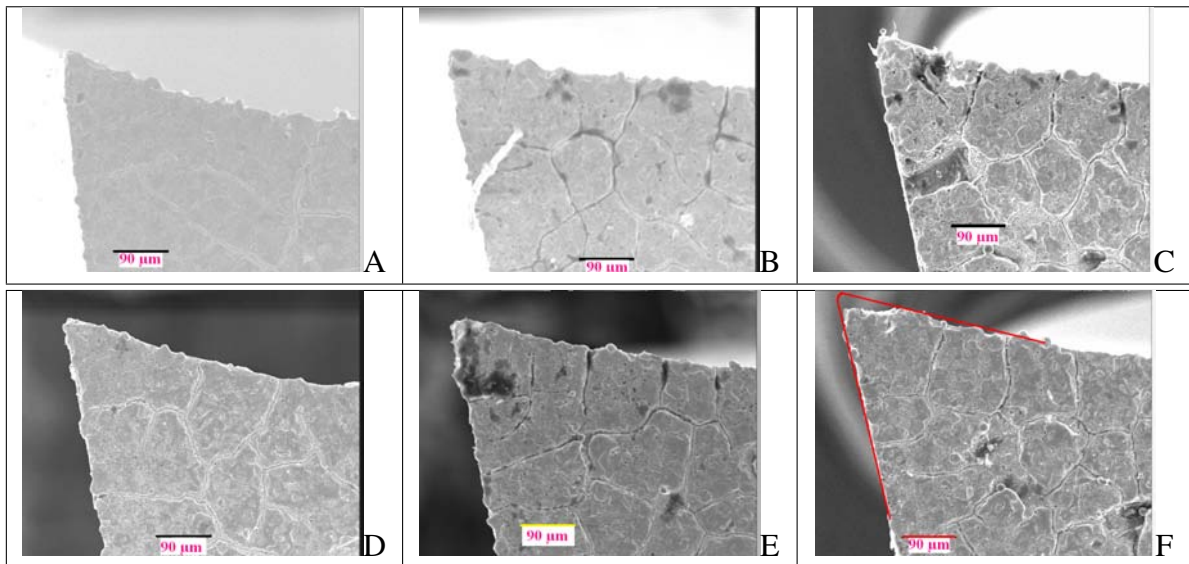


FIGURE 5.15 – Acuités d’arête des plaquettes usées prises au MEB, A. Plaquette I1 après l’usinage de AA 2017 T4, B. Plaquette S1 après l’usinage de AA 2017 T4, C. Plaquette O2 après l’usinage de AA 2017 T4, D. Plaquette I1 après l’usinage de AA 7075 T651, E. Plaquette S1 après l’usinage de AA 7075 T651, F. Plaquette O2 après l’usinage de AA 7075 T651.

Cette rupture de la face de coupe peut s’expliquer par la fragilisation de la plaquette liée à l’apparition du cratère. Le copeau glissant sur la face de coupe finit par cisailer une partie de la pointe de la plaquette. Cette plaquette devient alors plus robuste jusqu’à ce qu’un nouveau cratère se forme. Ce phénomène a été présent sur l’alliage AA 7075 T651 plus dur mais se retrouvera également sur l’alliage AA 2017 T4.

$R\beta$ $\mu\text{m}$	I1	S1	O2
Plaquette neuve	6	8	7
Plaquette pour l’usinage de AA 2017 T4	6	8	6
Plaquette pour l’usinage de AA 7075 T651	6	8	6

TABLE 5.3 – Valeurs mesurées de  $R\beta$  sur les plaquettes neuves et sur les plaquettes usées après 90 min d’usinage à sec à  $V_c = 800$  m/min.

### 5.2.2 Le collage de la matière usinée

– La couche adhérente (BUL) :

La couche adhérente se forme derrière la zone du cratère et peut aller jusqu’à l’arête secondaire. La zone du collage de la matière usinée sur la face de coupe des plaquettes (BUL) devient de plus en plus large au cours du temps d’usinage. Nous avons analysé la BUL en utilisant le projecteur de profil. La figure (5.16) présente les faces de coupe des trois plaquettes après 90 min d’usinage à sec des deux matériaux. L’évolution de la BUL au cours du temps peut être vue sur les deux tableaux (7.5 et

7.6). La figure (5.16) montre qu'il y a une couche brillante formée sur la face de coupe, cette couche adhérente varie selon la plaquette utilisée et selon le matériau usiné. La zone d'extension de BUL sur la face de coupe des plaquettes utilisées pour l'usinage de AA 2017 T4 est plus large que celle formée sur les plaquettes utilisées pour l'usinage de AA 7075 T651. L'explication de la différence entre la BUL formée durant l'usinage de AA 2017 T4 et la BUL formée durant l'usinage de AA 7075 T651 est due à la différence de dureté de ces deux alliages. Nous constatons que l'alliage d'aluminium AA 2017 T4 colle plus que l'alliage d'aluminium AA 7075 T651 sur la face de coupe des plaquettes.

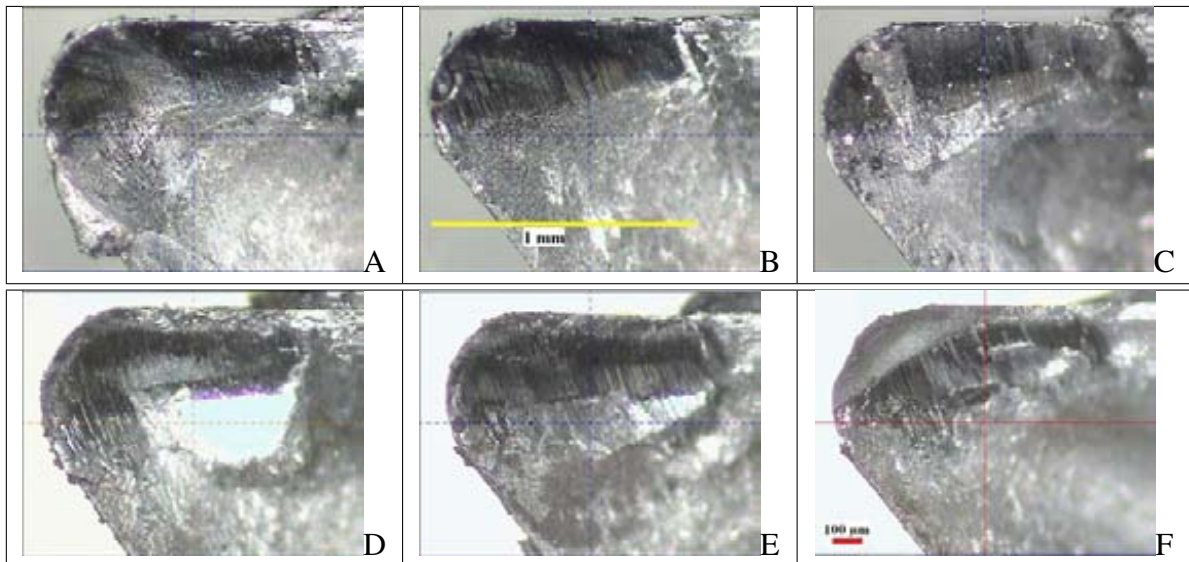


FIGURE 5.16 – Faces de coupe des plaquettes après 90 min d'usinage à sec prises sur le projecteur de profil, A. Plaquette I1 utilisée pour l'usinage de AA 2017 T4, B. Plaquette S1 utilisée pour l'usinage de AA 2017 T4, C. Plaquette O2 utilisée pour l'usinage de AA 2017 T4, D. Plaquette I1 utilisée pour l'usinage de AA 7075 T651, E. Plaquette S1 utilisée pour l'usinage de AA 7075 T651, F. Plaquette O2 utilisée pour l'usinage de AA 7075 T651.

Nous avons mesuré la surface d'extension de la BUL formée sur les plaquettes durant l'usinage de ces deux alliages à l'aide du logiciel [Image J]. Les courbes de BUL sont présentés sur la figure (5.17) en fonction de quantité de matière usinée. Les courbes de couleur grise présentent la BUL formée durant l'usinage de AA 2017 T4 et les courbes en noire présentent l'usinage de AA 7075 T651. L'évolution du collage est à peu près constante quel que soit le matériau ou la plaquette utilisée.

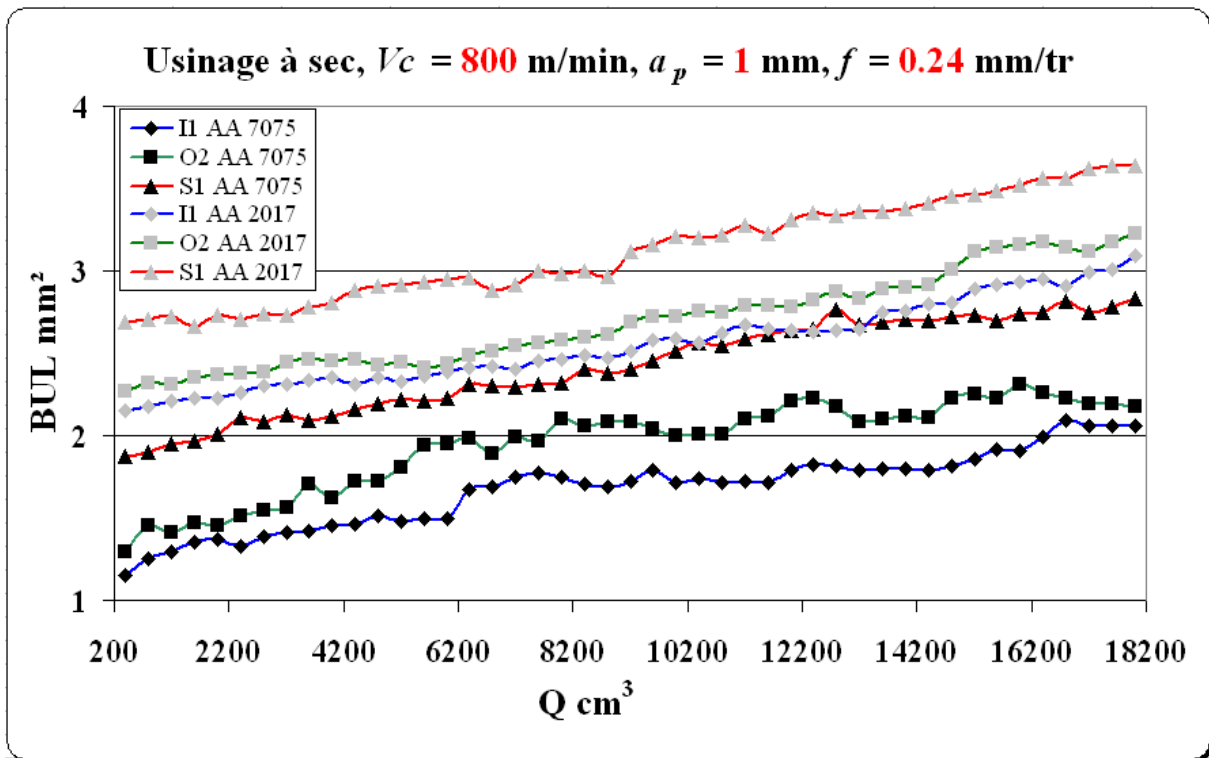


FIGURE 5.17 – Surface de BUL sur la face de coupe des plaquettes.

Le tableau (5.4) présente les valeurs moyennes de BUL sur toutes les plaquettes.

BUL mm <sup>2</sup>	I1	S1	O2
AA 2017 T4	2.55	3.25	2.60
AA 7075 T651	1.68	2.49	1.87

TABLE 5.4 – Valeurs moyennes de BUL.

Comme pour les essais précédents nous constatons que les plaquettes non polies favorisent l'apparition du collage. Quel que soit le matériau ce résultat est avéré. Deux conclusions s'imposent : le matériau usiné influe sur la quantité de BUL ainsi que le polissage. Le phénomène de diffusion n'étant pas démontré, cela ne contribue pas à accélérer la dégradation de la plaquette.

– L'arête rapportée (BUE) :

La hauteur des dépôts de la matière collée sur l'arête de coupe de chaque plaquette a été examinée sur le projecteur de profil. La figure (5.18) présente les images des faces de dépouille des plaquettes après 90 min d'usinage à sec de AA 2017 T4 et AA 7075 T651. Toutes les mesures de BUE ont été réalisées chaque 2000 cm<sup>3</sup> de matière usinée (valeur correspondante à 10 min d'usinage). Celles ci sont présentées dans les tableaux (7.12 et 7.13) en annexe 7.

Nous pouvons constater d'après cette figure qu'une partie de la matière usinée reste collée sur la face de dépouille de la plaquette S1 durant l'usinage de AA 2017 T4. Ce collage même s'il est plus fréquent sur la plaquette S1 se retrouve également sur les deux autres plaquettes. Les trois plaquettes possèdent des états de surface similaires (rectifiés) mais la plaquette I1 possède un angle de dépouille plus faible ( $4^\circ$  pour  $6^\circ$  aux plaquettes O2 et S1). Ce paramètre ne semble pas être influent dans ce phénomène de collage sur la face en dépouille. La comparaison avec les essais en ébauche et à  $V_c=1200$  m/min montre que ce phénomène de collage n'était pas apparu auparavant. Cela est sûrement lié à l'état d'usure de la plaquette qui n'avait pas été si important dans les autres cas. Ce collage comme l'arête rapportée est un phénomène cyclique qui apparaît et disparaît au cours du temps. Si l'on regarde l'usinage dans le AA 7075 T651, ce collage sur la face de dépouille n'est pas présent. Cela peut s'expliquer par la différence de dureté entre les deux matériaux qui joue un rôle important sur la température provoquée lors du tournage. La température provoquée lors d'usinage de AA 7075 T651 est probablement plus importante que celle provoquée lors d'usinage de AA 2017 T4.

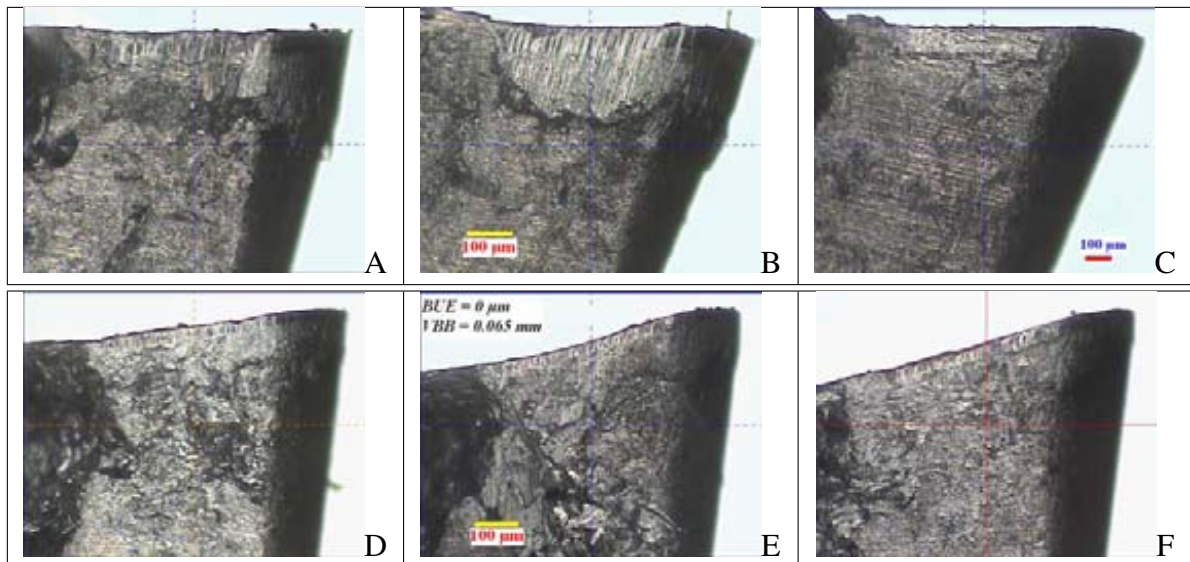


FIGURE 5.18 – Faces de dépouille des plaquettes après 90 min d'usinage à sec prises sur le projecteur de profil, A. Plaquette (I1) pour l'usinage de AA 2017 T4, B. Plaquette (S1) pour l'usinage de AA 2017 T4, C. Plaquette (O2) pour l'usinage de AA 2017 T4, D. Plaquette (I1) pour l'usinage de AA 7075 T651, E. Plaquette (S1) pour l'usinage de AA 7075 T651, F. Plaquette (O2) pour l'usinage de AA 7075 T651.

La hauteur de BUE formée varie selon les matériaux usinés. Les courbes de variation de BUE en fonction de quantité de la matière usinée sont présentées sur la figure (5.19). Le tableau (5.5) présente les valeurs moyennes de BUE au cours de l'usinage.

BUE moy $\mu\text{m}$	I1	S1	O2
AA 2017 T4	50	22	22
AA 7075 T651	11	8	7

TABLE 5.5 – Valeurs moyennes de BUE en  $\mu\text{m}$ .

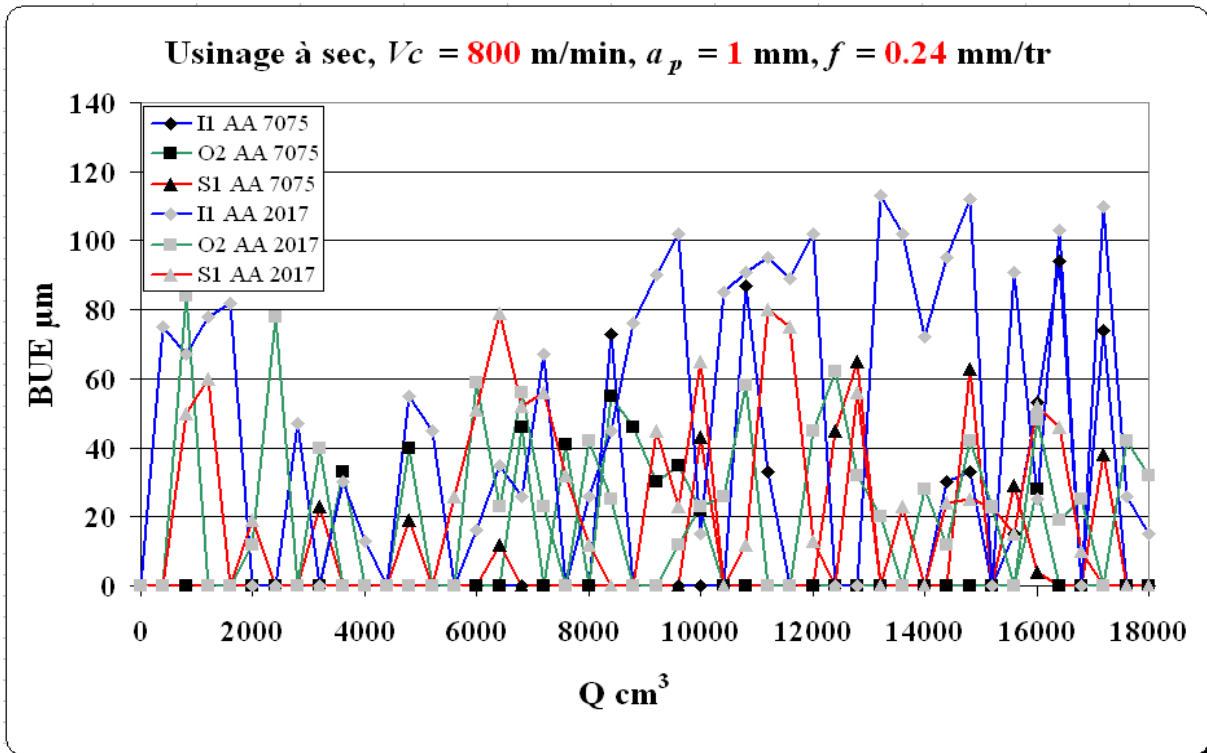


FIGURE 5.19 – Courbes de BUE durant l’usinage à sec de AA 2017 T4 et AA 7075 T651 à  $V_c = 800$  m/min.

L’analyse de ces courbes montre surtout des similitudes entre matériaux avec un collage plus importante sous forme de BUE pour le AA 2017 T4. Les différences géométriques des plaquettes pouvant influencer la formation de BUE ne sont pas faciles à mettre en évidence en regard des valeurs relevées. Ceci est dû au phénomène cyclique de formation de la BUE et lorsque nous effectuons une mesure, nous sommes incapable de savoir à quel stade de formation elle se trouve. La comparaison entre les deux vitesses de coupe (1200 et 800 m/min) durant l’usinage de AA 2017 T4 d’un point de vue arête rapportée, montre que la vitesse de coupe dans cet intervalle n’a pas d’influence importante sur l’arête rapportée formée sur toutes les plaquettes. Cependant la comparaison avec les essais à  $V_c=600$  m/min montre une augmentation de la BUE qui devient très importante lorsque  $V_c=100$  m/min.

### 5.2.3 L’usure des plaquettes

– L’usure de la face de dépouille VBB :

La figure (5.18) présente les usures VBB des plaquettes utilisées pour l'usinage de AA 2017 T4 et de AA 7075 T651. L'évolution des usures en dépouille sur toutes les plaquettes dans le temps est détaillée dans les deux tableaux (7.12 et 7.13 en annexe 7).

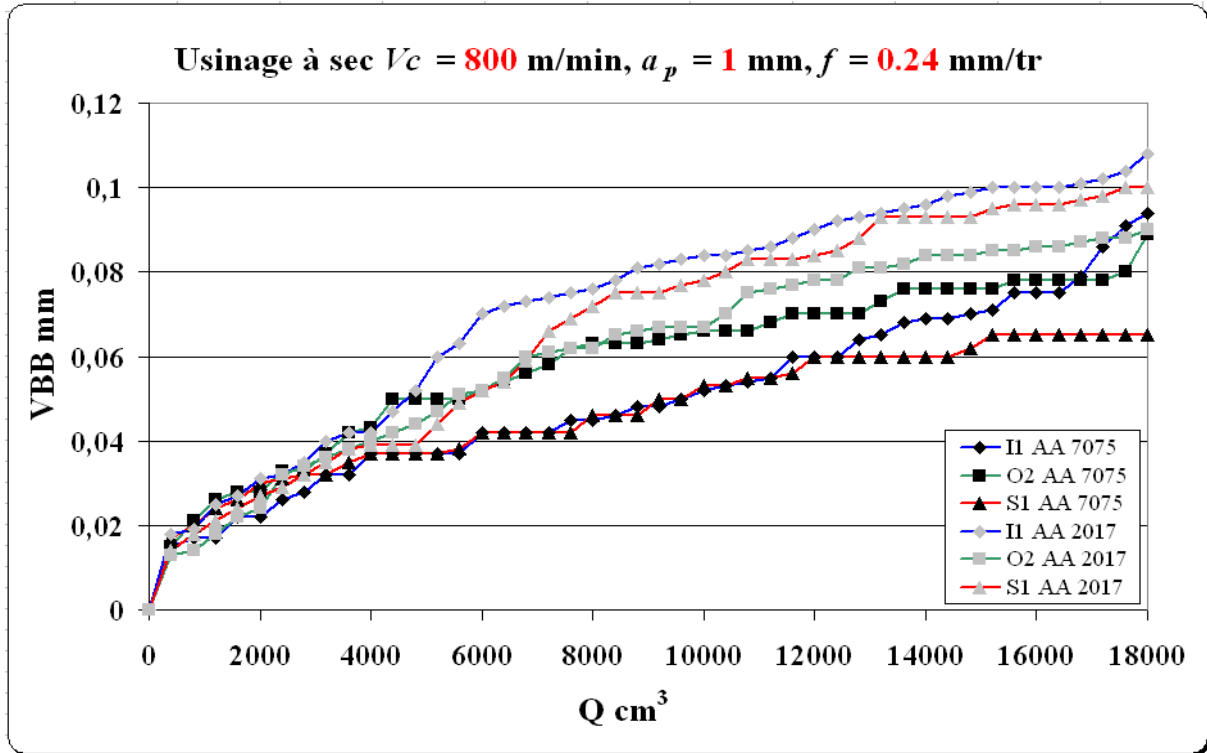


FIGURE 5.20 – Courbes de VBB durant l'usinage à sec de AA 2017 T4 et AA 7075 T651 à  $V_c = 800$  m/min.

Il apparaît d'après les courbes de VBB (figure 5.20) que l'usure en dépouille sur toutes les plaquettes utilisées durant l'usinage de AA 2017 T4 est plus grande que celle rencontrée durant l'usinage de AA 7075 T651. Cette tendance s'affirme au delà d'une certaine usure. Dans un premier temps les évolutions des usures en dépouille pour les 2 matériaux sont du même ordre de grandeur et dans la tolérance de lecture. Plusieurs pistes peuvent être envisagées pour évoquer ce phénomène : le AA 2017 étant moins dur, la matière dans la zone de cisaillement primaire provoque localement sur l'arête de coupe une température et une pression plus importante. Ce point sera validé par l'analyse de la position du cratère par rapport à l'arête de coupe pour les deux matériaux. Une deuxième piste peut être liée au retour élastique de la matière sur la face en dépouille, celle-ci provoquant une pression plus importante. Enfin la matière de l'alliage AA 2017 T4 étant moins dure, des particules dures peuvent être à l'interface de la pièce et user la face en dépouille. L'analyse de l'usure durant l'usinage de AA 7075 T651 montre que les trois plaquettes évoluent sensiblement de la même manière jusqu'à une quantité de  $12000 \text{ cm}^3$  avec peut-être une légère modification pour  $Q=18000 \text{ cm}^3$ . L'écart constaté reste cependant très faible (de l'ordre de  $0.01 \text{ mm}$ ) vis à vis de l'usure globale admissible (quelques dixièmes). L'angle de dépouille plus faible de la plaquette Iscar n'apparaît pas être à ce stade de

l'usure un facteur aggravant.

VBB max mm	I1	S1	O2
AA 2017 T4	0.108	0.100	0.090
AA 7075 T651	0.094	0.065	0.089

TABLE 5.6 – Valeurs de VBB max durant l'usinage à sec à  $V_c = 800$  m/min.

– L'usure en cratère :

La figure (5.16 A, B, et C) montre l'usure en cratère formée sur les plaquettes (I1, S1, et O2) après 90 min de l'usinage à sec de AA 2017 T4. De ces images, il apparaît clairement que le matériau est un élément prépondérant dans la position du début du cratère. Nous avons représenté sur la figure (5.21) les faces de coupe pour la plaquette Sandvik pour les deux matériaux usinés ainsi que les sections découpées par électroérosion. D'après la bibliographie, l'usure en cratère dépend des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$ , et  $f$ ) et de la dureté des matériaux à usiner. Plus la dureté d'un matériau est grande plus l'usure en cratère est accentuée. L'usinage à sec de AA 7075 T651 provoque un cratère qui se situe à une distance de l'arête de coupe. Cette distance est de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$  sur les deux plaquettes (I1 et S1) et de l'ordre de 80  $\mu\text{m}$  sur la plaquette O2 (voir figure 5.16 D, E, et F). La différence de dureté des deux matériaux provoque une différence de comportement de la matière dans la zone de cisaillement primaire. L'alliage AA 7075 T651 se comporte comme étant un matériau plus fragile. Le copeau se détache de la pièce par propagation d'une fissure. Celui ci ne venant alors au contact de la pièce qu'à une certaine distance de l'arête de coupe. La formation d'un cratère par arrachement mécanique semble être le phénomène intervenant dans la formation du cratère. Nous n'avons pas mesuré la température dans la zone de contact outil/copeau à cause de la difficulté du positionnement de la caméra thermique. La difficulté de mesure de la température autour de la zone de coupe vient du fait que l'évacuation des copeaux s'effectue vers la caméra thermique [COH09]. Nous avons mesuré la surface et la profondeur du cratère (après découpage par électroérosion) sur chaque plaquette (voir tableau 5.8 , et 5.7).



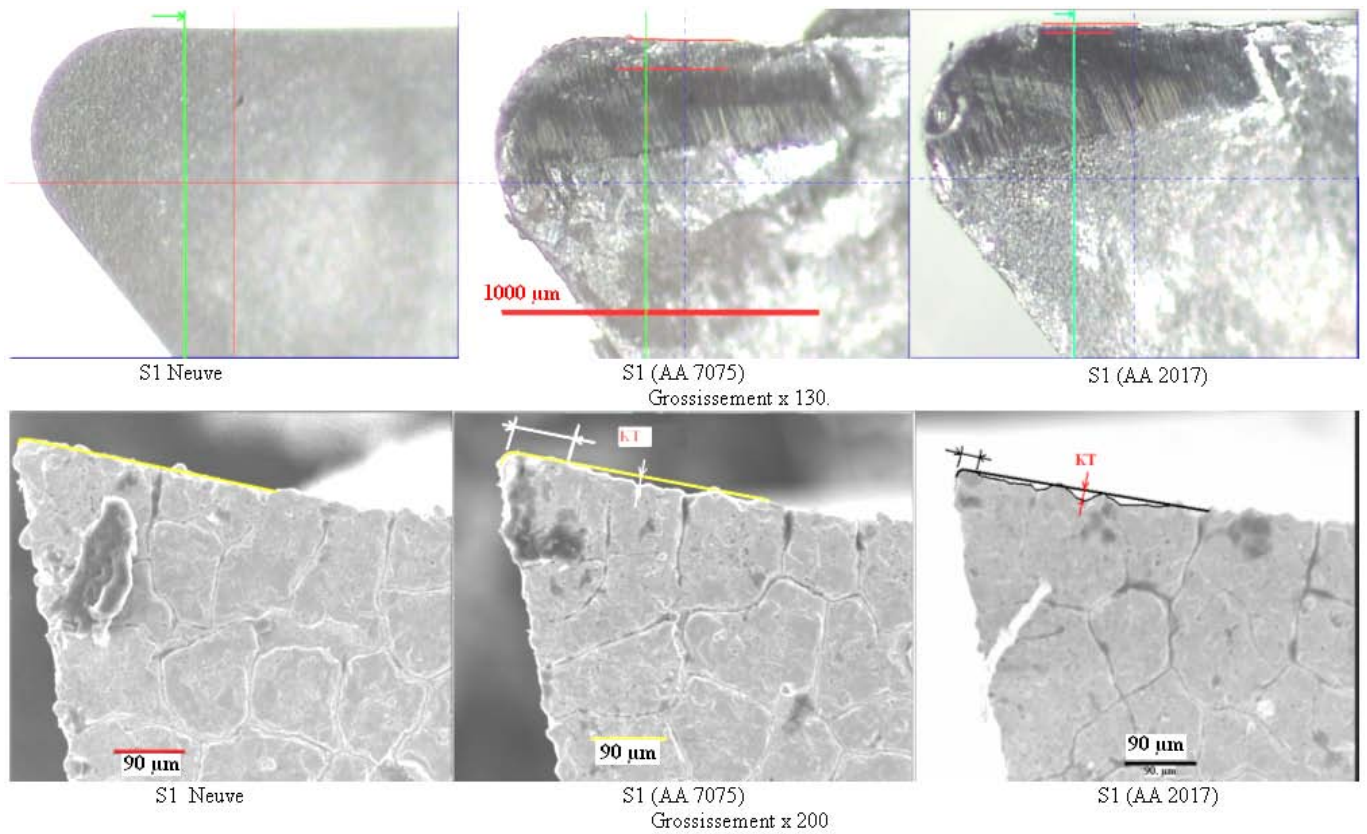


FIGURE 5.21 – La mesure de profondeur du cratère sur la plaquette S1 après 90 min d’usinage à sec de AA 2017 T4 et AA 7075 T651.

Plaquette	I1		S1		O2	
	Distance $\mu\text{m}$	KT $\mu\text{m}$	Distance $\mu\text{m}$	KT $\mu\text{m}$	Distance $\mu\text{m}$	KT $\mu\text{m}$
AA 2017 T4	20	12	20	12	20	12
AA 7075 T651	95	10	87	11	93	10

TABLE 5.7 – Valeurs de KT et distance du cratère de l’arête de coupe de la plaquette.

Plaquette	I1	S1	O2
AA 2017 T4	0.39	0.40	0.38
AA 7075 T651	0.23	0.26	0.29

TABLE 5.8 – Surface de cratère après 90 min d’usinage à sec à  $V_c = 800$  m/min.

Nous pouvons constater que les usures en cratère de toutes les plaquettes durant l’usinage de l’alliage d’aluminium AA 2017 T4 sont identiques. La mesure de profondeur de cratère sur toutes les plaquettes ne montre pas de différence essentielle entre les deux matériaux. Le choix de mesure de KT à la moitié de profondeur de passe a été fait en supposant que la profondeur maximale du cratère se

trouve dans cette zone (zone correspondante à  $a_p/2$ ). La différence de dureté entre les deux matériaux provoque une différence de température dégagée dans la zone de contact outil/copeau. Le comportement différent de la coupe pour les deux matériaux n'engendre pas une modification importante de l'usure en cratère. L'usinage sans lubrification conduisant à une élévation de température ne contribue pas après 90 minutes d'usinage à une dégradation et une usure accélérée des plaquettes.

## 5.2.4 L'état de surface des pièces usinées

Nous avons mesuré les deux paramètres de l'état de surface (la rugosité arithmétique  $Ra$  et la rugosité totale  $Rt$ ) à l'aide du rugosimètre. Les deux figures (5.22 et 5.23) présentent les courbes de  $Ra$  et  $Rt$  en fonction de la quantité de matière usinée.

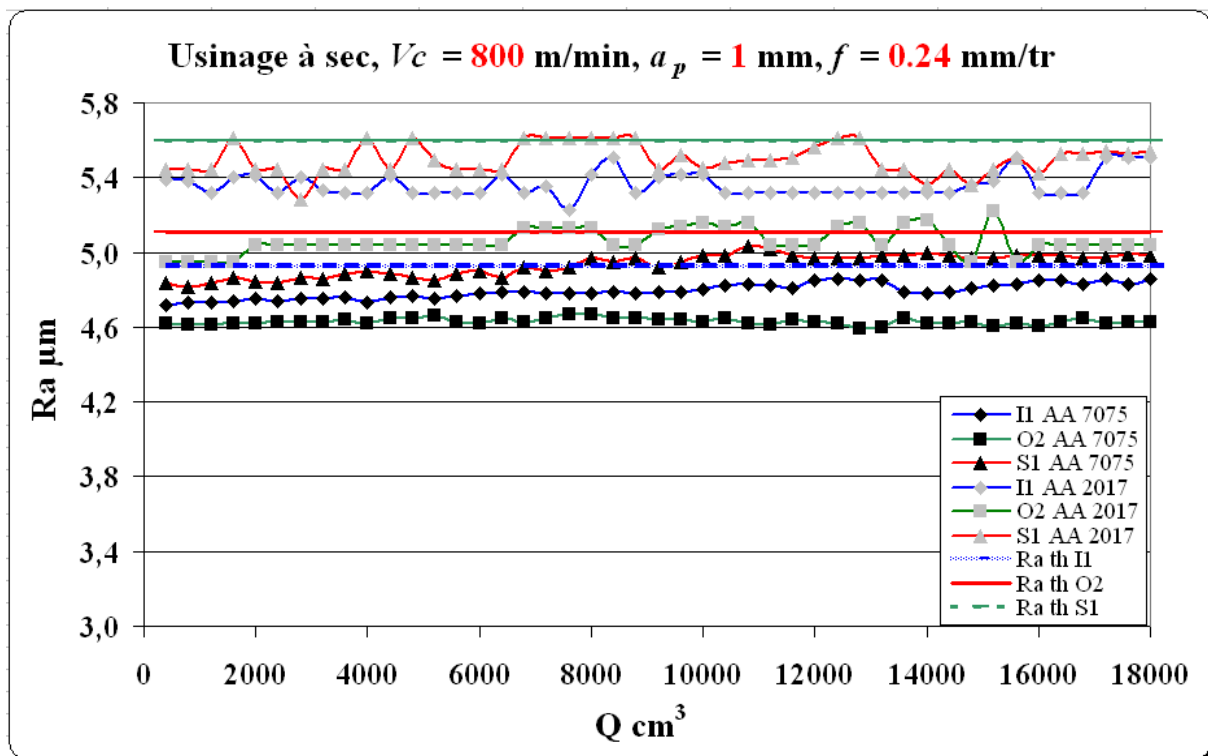


FIGURE 5.22 – Courbes de  $Ra$  durant l'usinage à sec de AA 2017 T4 et AA 7075 T651 à  $V_c = 800$  m/min.

Pour chaque courbe, nous constatons que l'état de surface ne varie pas au cours du temps. Les phénomènes d'usure ou de collage constatés précédemment n'influent pas sur l'état de surface. Ces courbes montrent que lors de l'usinage à sec d'un seul matériau les courbes se situent conformément au rayon de bec mesuré. La comparaison de l'usinage des deux matériaux confirme le phénomène de coupe différent qui conduit à avoir du collage et une coupe moins « franche » pour le matériau AA2017 T4.

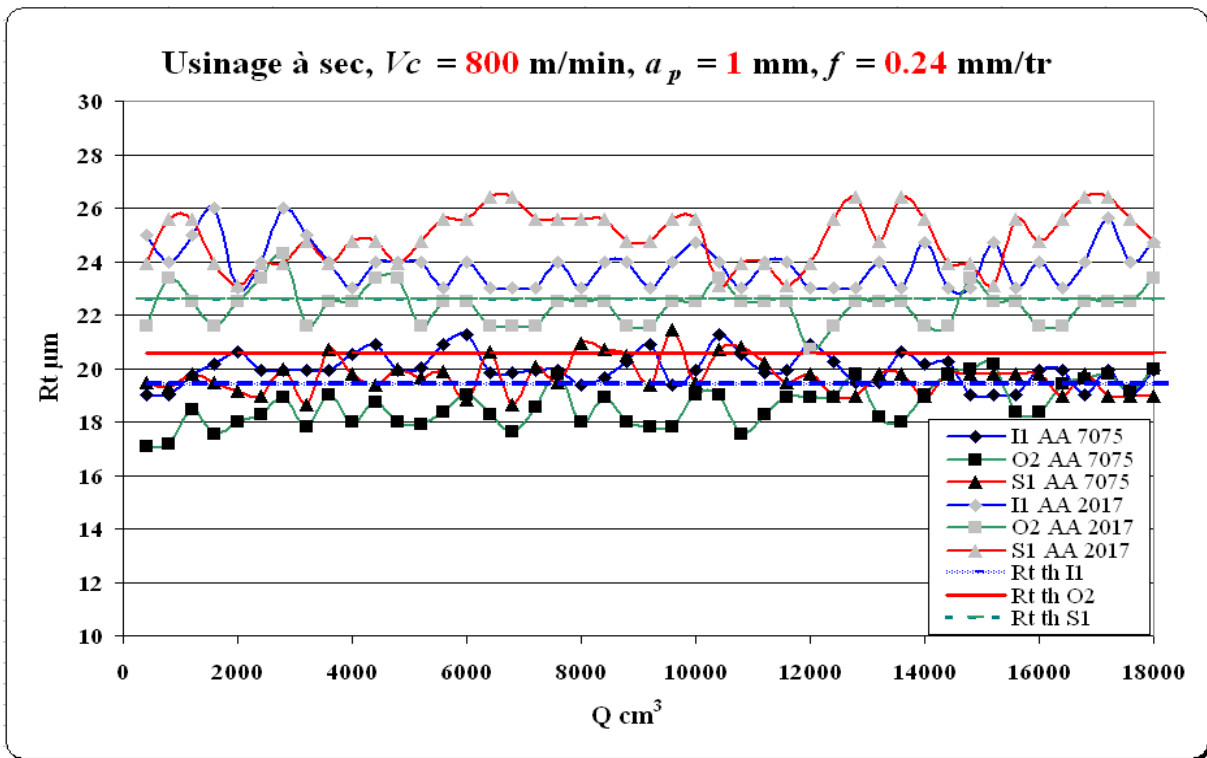


FIGURE 5.23 – Courbes de  $R_t$  durant l’usinage à sec de AA 2017 T4 et AA 7075 T651 à  $V_c = 800$  m/min.

Nous avons calculé les valeurs moyennes de  $R_a$  et  $R_t$  produites par chaque plaquette. Ces valeurs moyennes sont présentées dans les deux tableaux (5.9 et 5.10).

$R_a$ moy $\mu\text{m}$	I1	S1	O2
AA 2017 T4	5.39	5.47	5.08
AA 7075 T651	4.84	4.93	4.67

TABLE 5.9 – Valeurs moyennes de  $R_a$ .

$R_t$ moy $\mu\text{m}$	I1	S1	O2
AA 2017 T4	26	25	22
AA 7075 T651	20	20	18

TABLE 5.10 – Valeurs moyennes de  $R_t$ .

L’étude des pièces usinées montre que l’état de surface des pièces d’alliage d’aluminium AA 7075 T651 est meilleur que celui des pièces d’alliage d’aluminium AA 2017 T4. La comparaison entre les mesures et les modèles ne montre pas de différence importante. Le matériau est ici le paramètre qui influe sur l’état de surface. La comparaison avec l’état de surface à  $V_c=1200$  m/min montre une légère

augmentation de l'état de surface qui est en correspondance avec une légère augmentation du collage sous forme de BUE. Nous pouvons voir que le collage sur l'arête de coupe contribue à augmenter la rugosité sans pour autant dégrader l'état de surface. C'est un paramètre intervenant sans pour autant être prépondérant. Ceci est confirmé dans le matériau AA 7075 où le collage est moindre et la rugosité également.

### 5.2.5 Formation des copeaux

Les deux tableaux (7.19 et 7.20) dans l'annexe (7) présentent l'évolution des copeaux récupérés au cours du temps pendant l'usinage à sec des deux matériaux. Nous avons présenté sur la figure (5.24) les copeaux formés à la fin de l'usinage (après 90 min) avec les trois plaquettes (I1, S1, et O2). Les copeaux obtenus avec les trois plaquettes durant l'usinage de AA 2017 T4 sont présentés sur la figure (5.24 A, B, et C). Les copeaux récupérés lors d'usinage de AA 7075 T651 sont présentés sur la figure (5.24 D, E, et F).

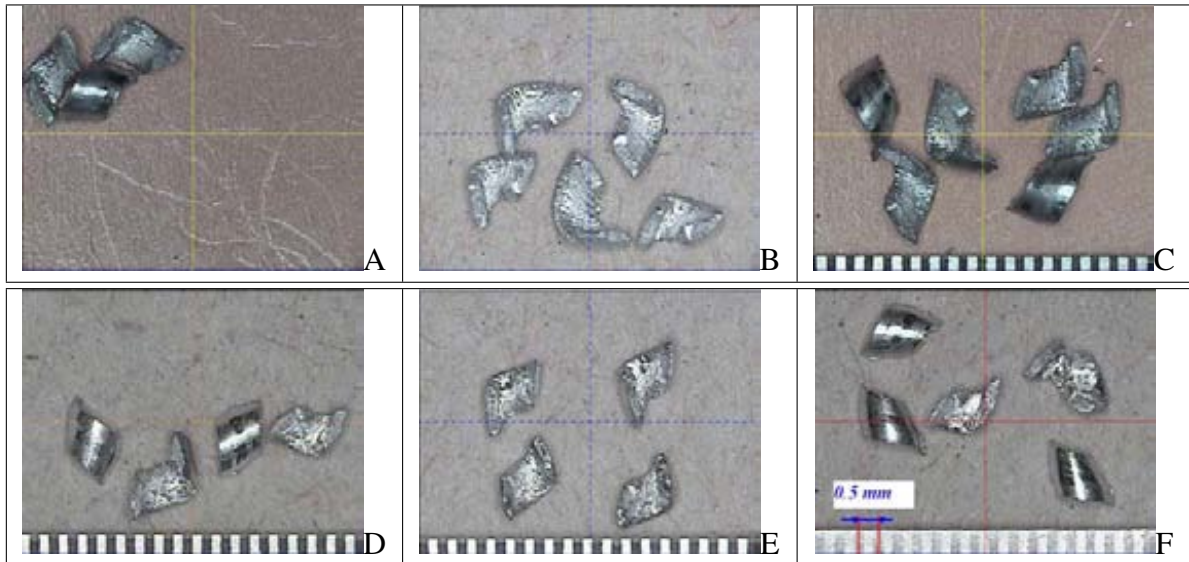


FIGURE 5.24 – Copeaux obtenus après 90 min d'usinage à sec, A. Copeaux obtenus durant l'usinage de AA 2017 T4 avec I1, B. Copeaux obtenus durant l'usinage de AA 2017 T4 avec S1, C. Copeaux obtenus durant l'usinage de AA 2017 T4 avec O2, D. Copeaux obtenus durant l'usinage de AA 7075 T651 avec I1, E. Copeaux obtenus durant l'usinage de AA 7075 T651 avec S1, F. Copeaux obtenus durant l'usinage de AA 7075 T651 avec O2.

La longueur moyenne des copeaux est de l'ordre de 2 mm durant l'usinage à sec de AA 2017 T4 et de l'ordre de 1.5 mm durant l'usinage de AA 7075 T651. Le tableau (5.11) présente les longueurs des copeaux après 90 min d'usinage à sec.

Longueur des copeaux en mm	I1	S1	O2
AA 2017 T4	2	2	2
AA 7075 T651	1.5	1.5	1.5

TABLE 5.11 – Longueur des copeaux durant l'usinage à sec à  $V_c = 800$  m/min.

Afin de regarder l'influence de la vitesse de coupe sur la formation du copeau, il est intéressant de comparer les copeaux obtenus pour les 3 plaquettes dans le matériau AA2017 à  $V_c=800$  m/min et  $V_c=1200$  m/min. Les copeaux sont absolument identiques pour chacune des plaquettes. Chacune ayant sa forme propre de copeaux. Pour une durée d'usinage plus importante, les formes des copeaux se modifient pour la plaquette S1. Ceux ci devenant plus courts. Nous pouvons en conclure que dans cet intervalle de variation de la vitesse de coupe, la formation des copeaux est identique. Cependant l'évolution géométrique d'une plaquette pour des durées d'usinage importante, en l'occurrence la plaquette S1 montre une modification de la coupe. L'analyse de l'évolution de la forme des copeaux pour la plaquette S1 montre une variation de la courbure des copeaux (rayon de courbure grand au début puis diminuant à la fin). Ceci peut être dû à la fois au cratère se formant et à la plaquette qui peu à peu se polit sur la face de coupe. Pour le matériau AA 7075, les copeaux pour les 3 plaquettes ont des rayons de courbure petits conduisant à un fractionnement important sur toute la durée de l'usinage et n'évoluant pas. Pour la plaquette S1, l'évolution de la forme des copeaux est un indicateur de son évolution.

## 5.2.6 Conclusion

Nous avons usiné à sec deux types d'alliages d'aluminium AA 2017 T4 et AA 7075 T651 en utilisant 6 plaquettes rhombiques à  $55^\circ$  d'un rayon de bec 0.4 mm. Les deux alliages ont deux duretés différentes. Les paramètres de coupe utilisés sont ; une vitesse  $V_c = 800$  m/min, une avance  $f = 0.24$  mm/tr, et une profondeur de passe  $a_p = 1$  mm. Le temps total d'usinage est de l'ordre de 90 min.

Nous avons constaté que le matériau usiné influe sur le collage sur la face de coupe (BUL) ainsi que le polissage. L'influence de dureté de matériau usiné apparaît sur la formation de l'arête rapportée. Un matériau moins dur provoque plus de collage sous forme d'arête rapportée et de couche adhérente. Pour l'alliage d'aluminium AA 2017 T4, nous avons constaté que la variation de l'arête rapportée dans l'intervalle (800 et 1200 m/min) est faible d'un point de vue de l'arête rapportée. D'un point de vue de l'usure des plaquettes, nous avons constaté que l'usinage de AA 2017 T4 provoque une usure en dépouille plus importante que l'usinage de AA 7075 T651. Cela peut être expliqué pour deux raisons : le matériau étant moins dur, la matière dans la zone de cisaillement primaire provoque sur l'arête de coupe une température et une pression plus importantes. Une deuxième raison peut être liée au retour élastique de la matière sur la face en dépouille. L'étude de l'usure en cratère ne montre pas une dégradation des plaquettes après 90 min d'usinage à sec. L'état de surface des pièces usinées pour

un même matériau (pour les trois plaquettes) évolue très peu. Nous avons constaté une amélioration de l'état de surface durant l'usinage de AA 7075 T651. Cela peut être dû à la diminution de l'arête rapportée durant l'usinage de ce matériau. Nous pouvons également constater que le comportement global des plaquettes pour l'usinage à sec est bon et ne présente pas une usure importante et rapide des plaquettes ni des surfaces usinées avec des mauvais états de surface.

## 5.3 Usinage à une vitesse $V_c = 400$ m/min

### 5.3.1 Présentation des essais

Dans ces essais, nous avons usiné à une vitesse  $V_c = 400$  m/min des pièces d'alliages d'aluminium AA 2017 T4 et AA 7075 T651 (voir composition chimique en tableau 3.3). Les essais du tournage ont été effectués sur le tour à commande numérique (Cazeneuve CTN 210). Les essais ont été faits à sec et avec lubrification avec une huile soluble (6.5 %) afin de chercher à identifier l'influence du lubrifiant sur l'ensemble des paramètres étudiés. Nous avons utilisé 6 plaquettes rhombiques à  $55^\circ$  avec un rayon de bec théorique de chaque plaquette de  $R\epsilon = 0.4$  mm. La désignation de ces plaquettes est présentée dans le tableau (3.6). Les plaquettes utilisées sont :

1. Quatre plaquettes polies Otelo (O2) pour l'usinage à sec et lubrifié de AA 2017 T4 et AA 7075 T651.
2. Deux plaquettes non polies Sandvik (S1) pour l'usinage à sec de AA 2017 T4 et AA 7075 T651.

Les paramètres de coupe utilisés pour les essais sont : une profondeur de passe  $a_p = 1$  mm, une avance  $f = 0.24$  mm/tr, une vitesse de coupe  $V_c = 400$  m/min. Tous les essais ont été effectués pendant 50 min à sec et lubrifié (valeur correspondante à une quantité de  $4800$  cm<sup>3</sup>, de matière usinée). Le tableau (3.8) présente la géométrie réelle (rayon de bec, les angles de coupe, les angles de dépouille, et les acuités d'arête) des plaquettes neuves. La figure (5.13) présente les images prises au projecteur de profil des faces de coupe des deux plaquettes utilisées pour l'usinage des deux matériaux. Après la découpe des plaquettes par l'électroérosion à une distance de 0.5 mm du point des plaquettes laissant la trace usinée, nous avons mesuré le rayon des acuités d'arête de ces plaquettes. La figure (5.2) présente les images prises au MEB des acuités d'arête des deux plaquettes. Les mesures du rayon d'acuité d'arête  $R\beta$  des plaquettes neuves sont présentées dans le tableau (3.8). Le tableau (5.12) présente les mesures du rayon de l'acuité d'arête après 50 min d'usinage à sec et lubrifié des deux matériaux.

$R\beta$ $\mu\text{m}$	S1	O2
Plaquette neuve	8	7
AA 2017 T4/sec	8	7
AA 7075 T651/sec	6	5
AA 2017 T4/lub	—	7
AA 7075 T651/lub	—	6

TABLE 5.12 – Valeurs mesurées de  $R\beta$  pour les plaquettes neuves et usées après 50 min d’usinage à sec et lubrifié de AA 2017 T4 et AA 7075 T651.

L’étude des acuités d’arête de toutes les plaquettes ne montre pas des différences sensibles pour les deux matériaux. La comparaison entre les trois vitesses de coupe (1200, 800, et 400 m/min) pour un seul matériau, d’un point de vue acuité d’arête montre que la variation de la vitesse de coupe dans l’intervalle (400, 1200 m/min) n’a pas d’influence sensible sur le rayon d’acuité d’arête. Le lubrifiant n’a aucune influence d’un point de vue d’acuité d’arête durant l’usinage de AA 2017 T4 et AA 7075 T651.

### 5.3.2 Le collage de la matière usinée

– Le collage sur la face de coupe :

Le collage de la matière usinée sur la face de coupe des plaquettes dépend du type de matériau à usiner et de condition d’usinage (à sec ou lubrifié). Dans notre cas d’usinage, nous avons analysé la couche brillante collée (BUL) lors de l’usinage à sec et lubrifié des deux matériaux. La figure (5.25) présente les images, prises sur le projecteur de profil, des faces de coupe des plaquettes après 50 min d’usinage à sec et lubrifié des deux matériaux. L’évolution de la couche adhérente (BUL) durant l’usinage des deux matériaux avec le temps est présentée sur les deux tableaux (7.3 et 7.4). Nous avons présenté les courbes de BUL en fonction de quantité de la matière usinée sur la figure (5.26).

Le point le plus important est la non adhérence de la matière sur les faces de coupe des plaquettes O2 pour les 2 matériaux. La lubrification montre clairement qu’elle apporte un film protecteur à la face de coupe facilitant l’écoulement du copeau. Pour les usinages à sec, nous constatons que la création d’une couche adhérente et d’une multicouche derrière le cratère allant au delà de l’arête secondaire. La multicouche n’est pas stable, elle apparaît et disparaît au cours de l’usinage. L’analyse pour le matériau AA2017 montre une importante multicouche. Les surfaces de BUL pour les deux plaquettes O2 et S1 sont similaires. L’analyse comparative entre les trois vitesses de coupe ( $V_c=1200$  m/min,  $V_c=800$  m/min et  $V_c=400$  m/min) montre que les plaquettes Sandvik restent à un niveau élevé de collage alors que les plaquettes polies Otelo ont un niveau de collage augmentant avec la diminution de la vitesse de coupe. Nous voyons ici l’intérêt du polissage pour les plaquettes mais seulement sur des vitesses de coupe élevées. Pour le matériau AA7075, le collage est moindre pour les deux plaquettes lorsque la vitesse de coupe est élevée ( $V_c=800$  m/min) avec de meilleurs résultats pour la

plaquette polie. Pour  $V_c=400$  m/min, les importants collages sont similaires pour les deux plaquettes. Nous pouvons conclure que le polissage apporte un intérêt dans la diminution de BUL quel que soit le matériau lorsque la vitesse de coupe est importante.

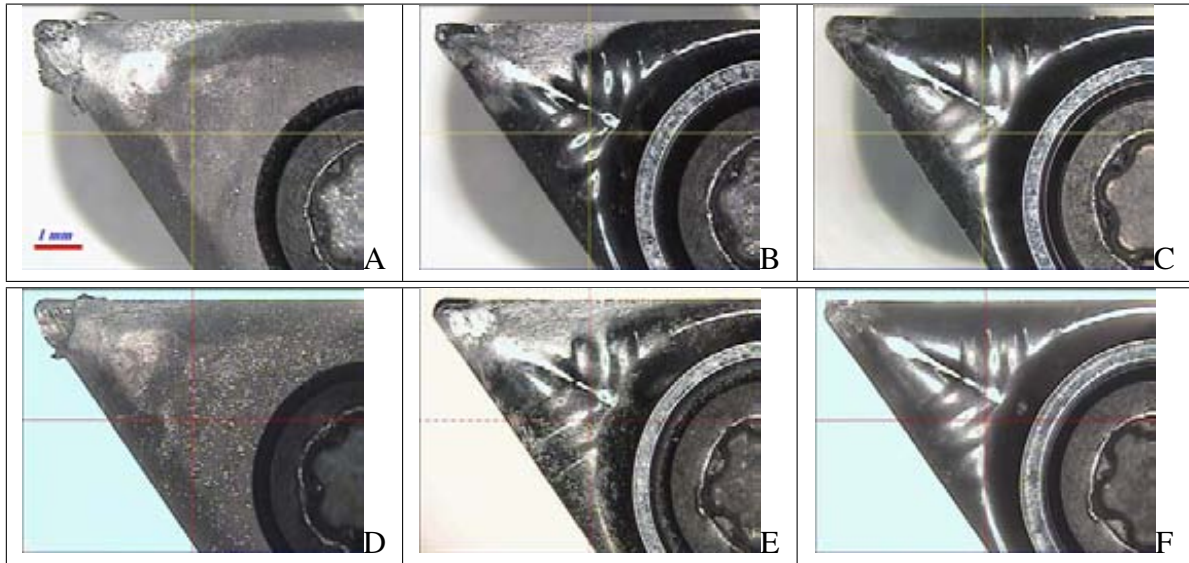


FIGURE 5.25 – Faces de coupe des plaquettes usées après 50 min, A. Usinage à sec de AA 2017 T4 avec S1, B. Usinage à sec de AA 2017 T4 avec O2, C. Usinage lubrifié de AA 2017 T4 avec O2, D. Usinage à sec de AA 7075 T651 avec S1, E. Usinage à sec de AA 7075 T651 avec O2, F. Usinage lubrifié de AA 7075 T651 avec O2.



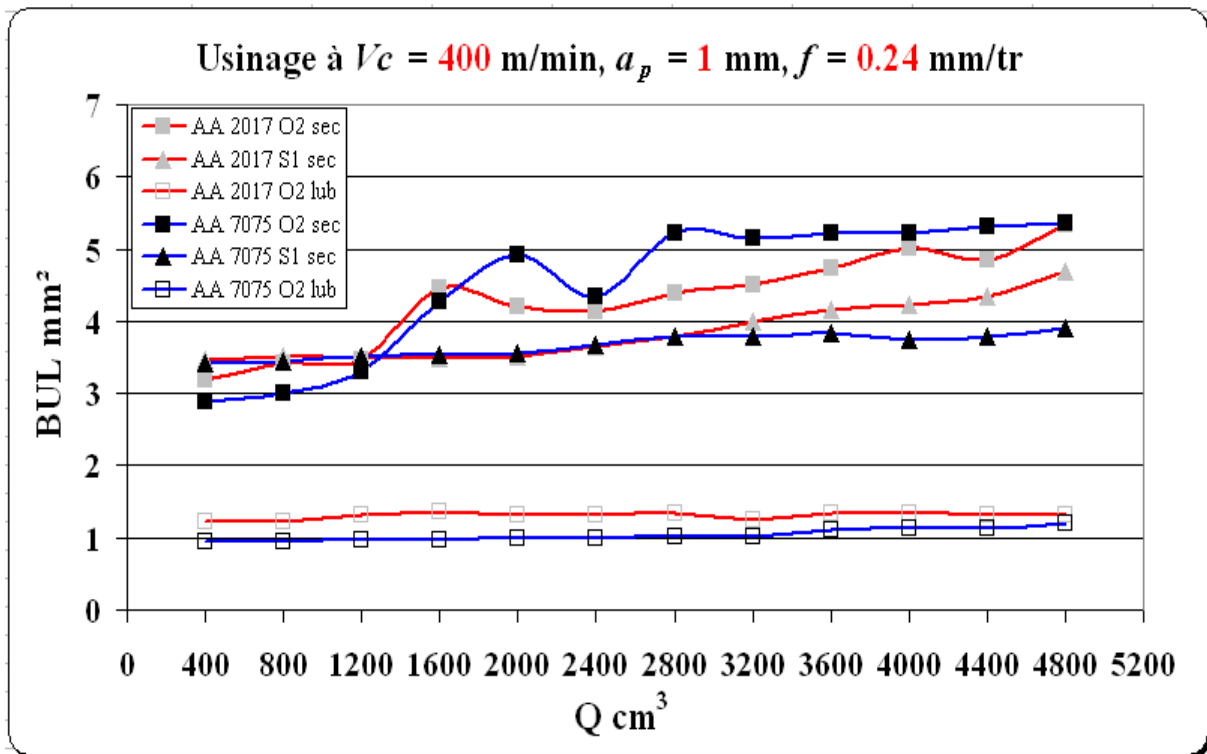


FIGURE 5.26 – Courbes de BUL en fonction de quantité de la matière usinée durant l’usinage à sec et lubrifié à  $V_c = 400$  m/min.

– L’arête rapportée :

La figure (5.27) présente les images des faces de dépouille après 50 min d’usinage à sec et lubrifié dans les deux matériaux. Nous avons mesuré la hauteur des dépôts de matière collée à l’aide de l’échelle présenté sur les images. L’ensemble des images des face de dépouille présentées sur les tableaux (7.10 et 7.11) permet d’étudier l’évolution de l’arête rapportée (BUE) au cours de temps. Les courbes de BUE en fonction de la quantité de matière enlevée sont présentées sur la figure (5.28).

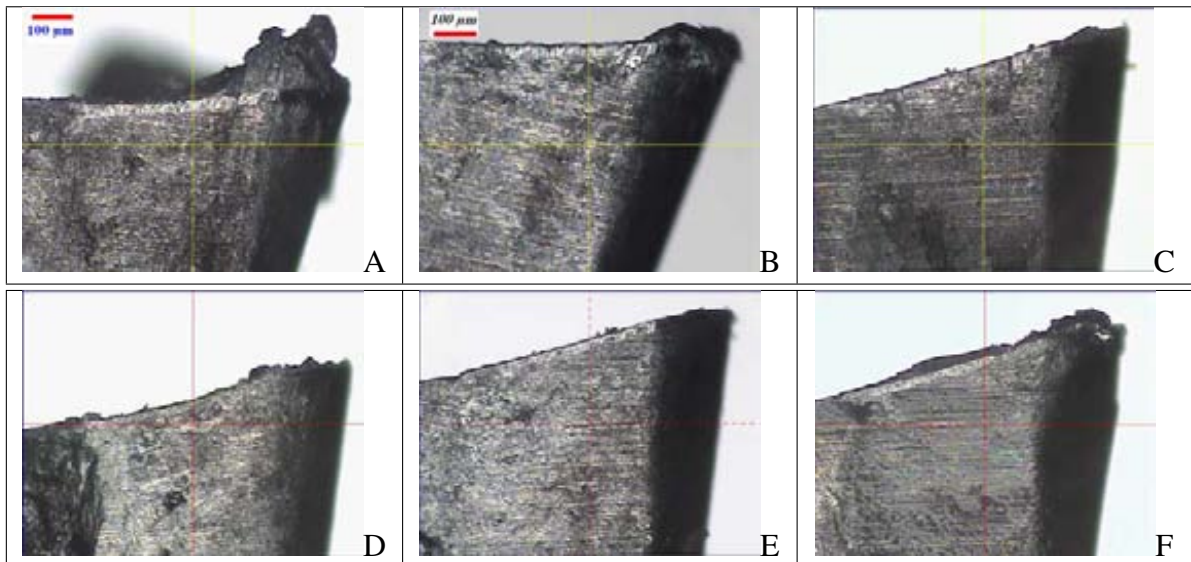


FIGURE 5.27 – Faces de dépouille des plaquettes usées après 50 min, A. Usinage à sec de AA 2017 T4 avec S1, B. Usinage à sec de AA 2017 T4 avec O2, C. Usinage lubrifié de AA 2017 T4 avec O2, D. Usinage à sec de AA 7075 T651 avec S1, E. Usinage à sec de AA 7075 T651 avec O2, F. Usinage lubrifié de AA 7075 T651 avec O2.

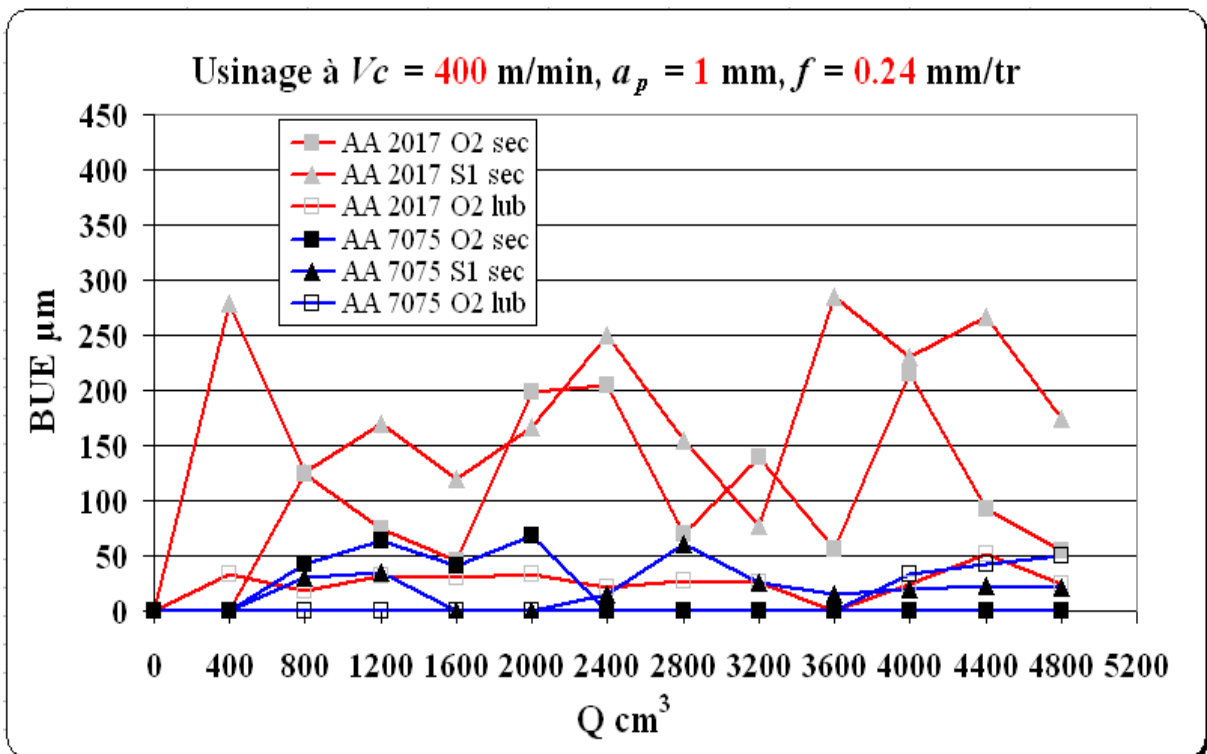


FIGURE 5.28 – Courbes de BUE en fonction de quantité de la matière usinée durant l’usinage à sec et lubrifié à  $V_c = 400$  m/min.

Comme précédemment, nous constatons des différences importantes entre les deux matériaux AA 2017 T4 et AA 7075 T651 d'un point de vue de l'arête rapportée. La BUE reste faible pour le matériau AA 7075 T651 quelle que soit la plaquette dans l'usinage à sec. Pour l'usinage lubrifié, il n'y a pas d'arête rapportée. Pour l'usinage du matériau AA 2017 T4, le collage sous forme d'arête rapportée devient important pour l'usinage à sec surtout pour cette valeur de vitesse de coupe. Les valeurs mesurées sont trois fois supérieures à celles mesurées pour  $V_c=800$  m/min. Nous avons constaté que durant l'usinage à sec de AA 2017 T4, la vitesse de coupe dans l'intervalle (1200 et 800 m/min) n'avait pas d'influence importante sur l'arête rapportée. Cela signifie que le paramètre vitesse de coupe devient important lorsque la vitesse passe une certaine valeur. Comme pour les autres essais, nous constatons que le polissage de la face de coupe des plaquettes n'a aucune influence sur l'arête rapportée durant l'usinage à sec.

### 5.3.3 L'usure des plaquettes

– L'usure en dépouille VBB :

Sur les images des faces de dépouille des plaquettes après 50 min d'usinage à sec et lubrifié de AA 2017 T4 et AA 7075 T651, on constate que l'usure en dépouille varie d'une plaquette à l'autre et selon le matériau usiné (voir figure 5.27). L'usure en dépouille a été mesurée selon l'échelle présentée sur ces images. Au vu des deux tableaux (7.10 et 7.11) nous pouvons analyser l'usure progressive sur toutes les plaquettes. Les courbes de VBB en fonction de quantité de la matière usinée sont présentées sur la figure (5.29).

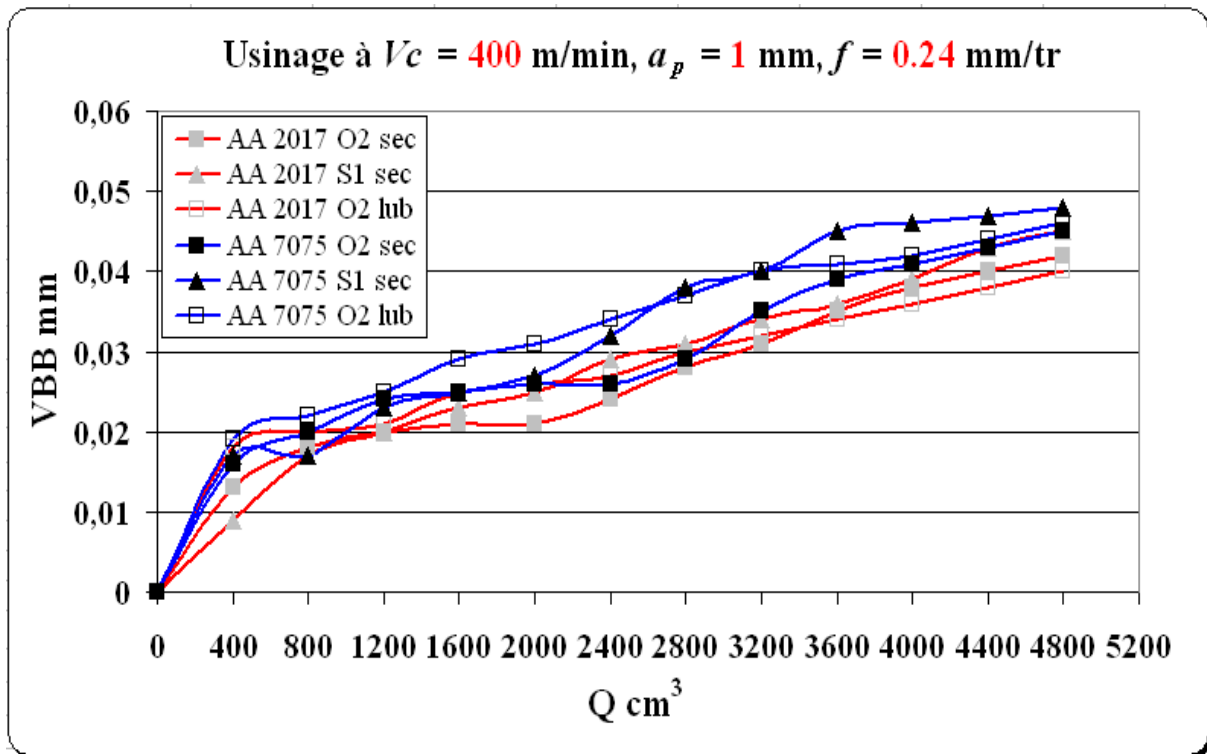


FIGURE 5.29 – Courbes de VBB en fonction de la quantité de matière usinée durant l’usinage à sec et lubrifié à  $V_c = 400$  m/min.

Il apparaît d’après les courbes de VBB que quel que soit le matériau, les 6 plaquettes (S1 et O2 à sec et lubrifié) s’usent de la même façon. La comparaison avec les essais réalisés pour les vitesses de coupe  $V_c=800$  m/min et  $V_c=1200$  m/min pour le matériau AA2017 ne montre aucune différence notable (pour la même quantité de matière usinée). Il est vrai qu’à  $V_c=400$  m/min, la quantité de matière usinée pour  $T=50$  min reste faible et ne permet pas de mettre suffisamment en avant les différences de comportement des plaquettes en terme d’usure.

– L’usure en cratère :

Le frottement des copeaux fragmentés sur la face de coupe des plaquettes fait apparaître une usure en cratère sur la face de coupe. Dans notre cas d’usinage, nous n’avons pas mesuré la profondeur du cratère, mais nous avons mesuré la surface du cratère en utilisant le logiciel Image J. Le tableau (5.13) présente les résultats de mesures de surface de cratère sur chaque plaquette. La figure (5.30) présente les images MEB des plaquettes O2 et S1 après 50 min d’usinage à sec de AA 2017 T4 et AA 7075 T651, toutes ces plaquettes ont été nettoyées dans un bain de soude pour éliminer tout collage de matière usinée.

Surface de cratère mm <sup>2</sup>	S1	O2
Usinage à sec de AA 2017 T4	0.221	0.215
Usinage lub de AA 2017 T4	—	0.204
Usinage à sec de AA 7075 T651	0.209	0.201
Usinage lub de AA 7075 T651	—	0.197

TABLE 5.13 – Valeurs des surfaces de cratère durant l’usinage à sec et lubrifié de AA 2017 T4 et AA 7075 T651 à  $V_c = 400$  m/min.

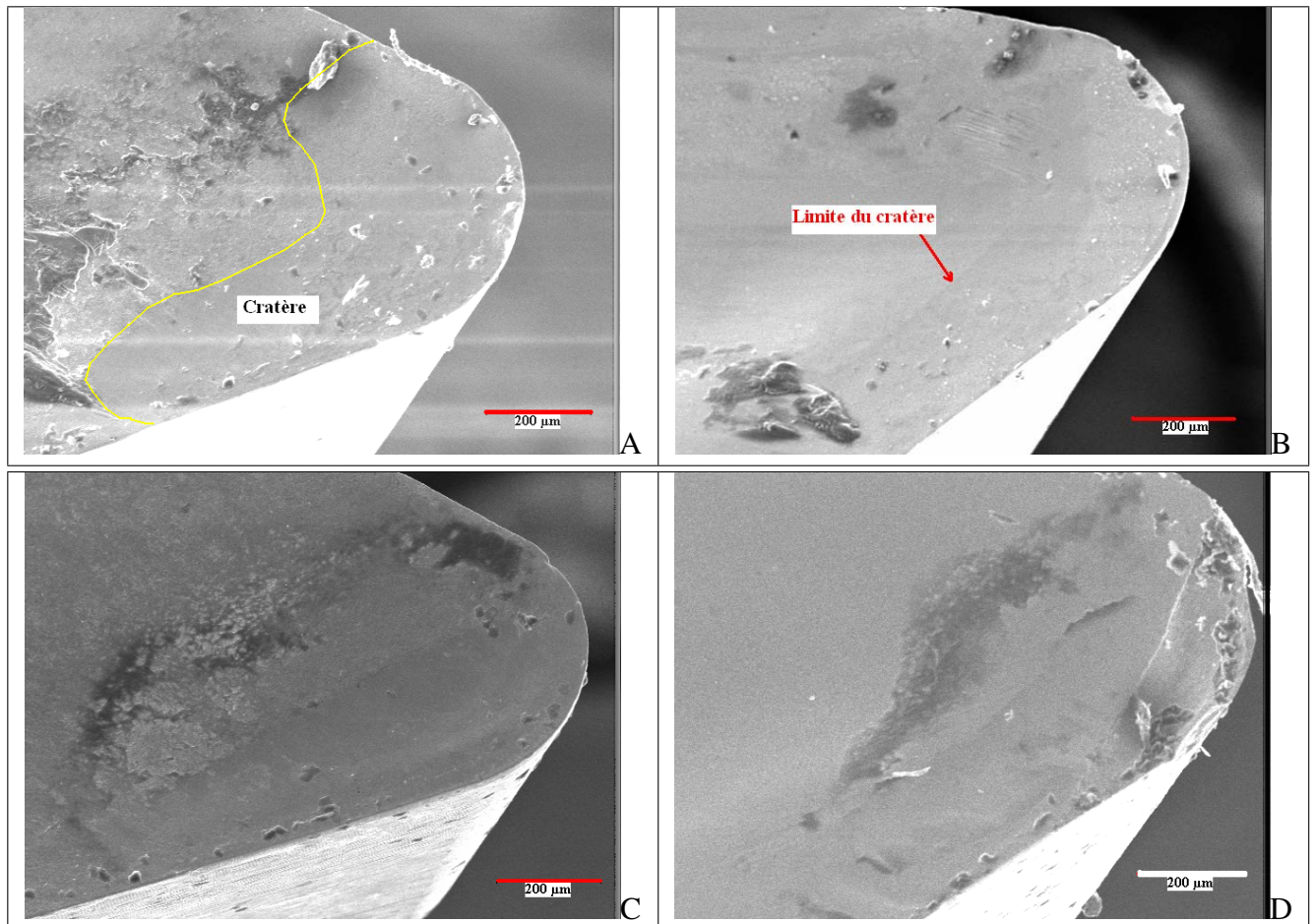


FIGURE 5.30 – Images MEB des plaquettes nettoyées à la soude, A. Plaquette S1 utilisée pour l’usinage à sec de AA 2017 T4, B. Plaquette O2 utilisée pour l’usinage à sec de AA 2017 T4, C. Plaquette S1 utilisée pour l’usinage à sec de AA 7075 T651, D. Plaquette O2 utilisée pour l’usinage à sec de AA 7075 T651.

La zone du cratère ne diffère pas selon le type du matériau usiné et les conditions d’usinage (à sec ou lubrifié). En effet les valeurs mesurées restent dans le même ordre de grandeur dans tous les cas. Il est intéressant de noter que la lubrification a permis la non adhérence de la matière sur la face de coupe mais cela ne contribue pas à diminuer franchement l’usure en cratère.

### 5.3.4 La qualité des pièces usinées

Les figures (5.31 et 5.32) présentent les graphiques des paramètres de la rugosité de surface des pièces produites avec toutes les plaquettes. Les plaquettes utilisées ont des rayons de bec différents (voir tableau 3.8).

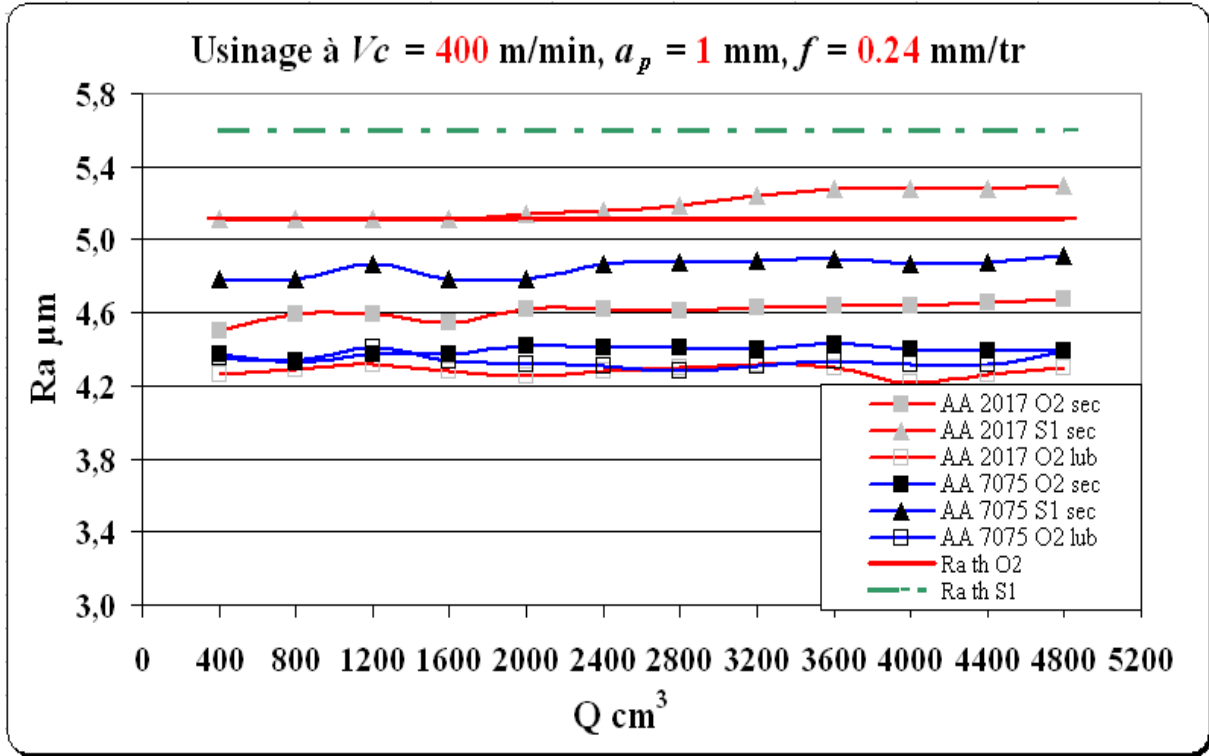


FIGURE 5.31 – Courbes de  $Ra$  en fonction de quantité de la matière usinée durant l’usinage à sec et lubrifié à  $V_c = 400$  m/min.

Nous constatons que durant l’usinage à sec de AA 2017 T4, la plaquette S1 produit des pièces d’une rugosité constante de  $5.1 \mu\text{m}$  jusqu’à une quantité de matière usinée de  $1600 \text{ cm}^3$ . Au delà de  $1600 \text{ cm}^3$ , la rugosité des pièces augmente très légèrement puis se stabilise. La différence des états de surface entre les plaquettes S1 et O2 est due à la différence des rayons réels des plaquettes. Nous constatons, comme pour la vitesse de coupe à  $800 \text{ m/min}$ , des états de surface de meilleure qualité pour le matériau AA7075. La différence notable vient de la mesure des états de surface entre les usinages à sec et lubrifié pour le matériau AA2017. L’usinage lubrifié diminue l’état de surface de l’ordre de 10% dans ce cas. Cela est vrai dans ces conditions de fort collage vu précédemment. Nous pouvons voir ici une corrélation entre collage et rugosité.

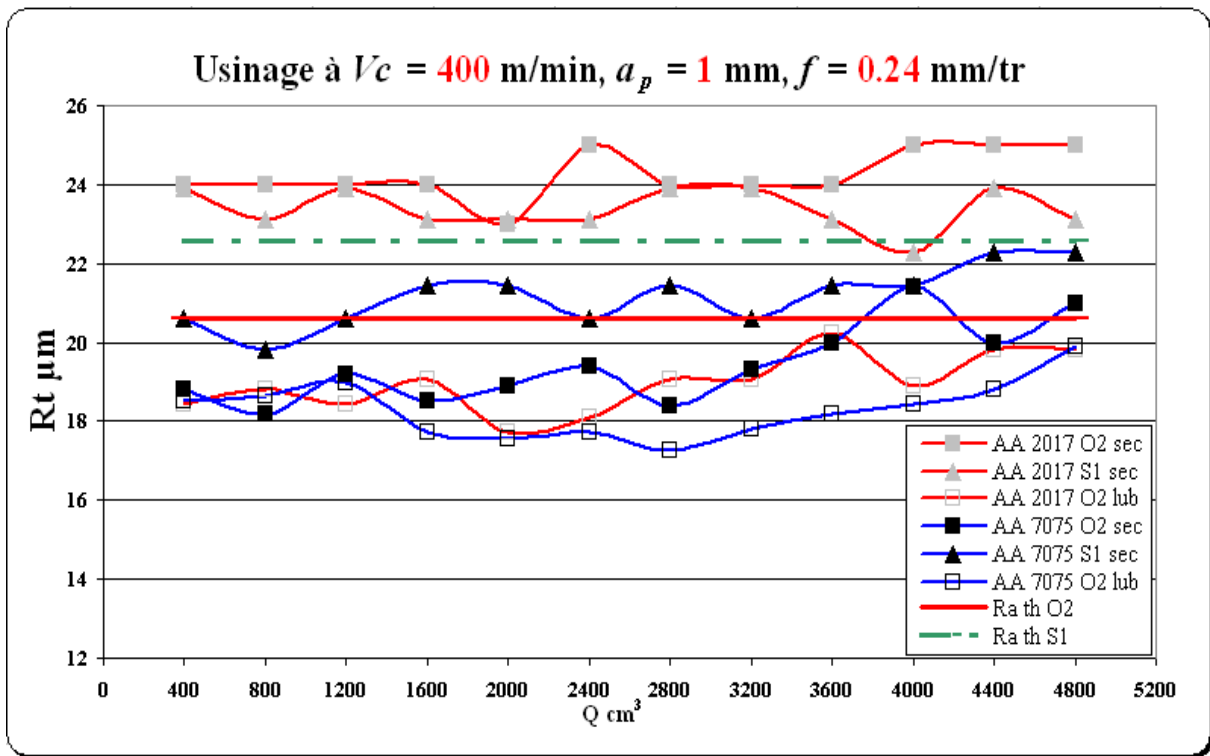


FIGURE 5.32 – Courbes de  $R_t$  en fonction de quantité de la matière usinée durant l’usinage à sec et lubrifié à  $V_c = 400$  m/min.

Nous avons appliqué les modèles de  $R_a$  et  $R_t$  proposés durant l’usinage avec des plaquettes rhombiques à  $55^\circ$  (voir détail en 7.1) pour trouver les valeurs de  $R_a$  et  $R_t$  théoriques. Le tableau (5.14) présente la comparaison entre les valeurs mesurées et théoriques de  $R_a$ .

Plaquette	S1	O2
$R_{ath} \mu\text{m}$	5.60	5.11
$R_a$ mesuré/2017/sec	5.17	4.61
$R_a$ mesuré/2017/lub	—	4.28
$R_a$ mesuré /7075/sec	4.85	4.39
$R_a$ mesuré/7075/lub	—	4.34

TABLE 5.14 – Comparaison entre valeurs mesurées et théoriques de  $R_a$  durant l’usinage à  $V_c = 400$  m/min.

Au vu de l’ensemble des résultats des mesures de la rugosité, il apparaît difficile de prévoir de manière précise l’état de surface en fonction de la géométrie de la plaquette et des paramètres de coupe. Les modèles théoriques établis sont des estimateurs car parfois les mesures ont été supérieures, parfois inférieures aux valeurs calculées. Ceci est dû à la taille de nos pièces qui entraîne une variation importante de vitesse de rotation sur l’ensemble du diamètre usiné (brut : diamètre 150, diamètre

usiné de 30 mm minimal). Avec ces variations de diamètres, nous avons des variations sur la vitesse de rotation d'un rapport 5. Le comportement dynamique de la machine sur cette plage de vitesses est variable. Ce phénomène conduit à obtenir des états de surface différents dans des conditions de coupe identiques (même rayon de bec et paramètres de coupe figés).

### 5.3.5 Formation des copeaux

Nous avons récupéré les copeaux obtenus à chaque 800 cm<sup>3</sup> de la matière usinée avec toutes les plaquettes (voir détail en annexe 7, les deux tableaux 7.17 et 7.18). La figure (5.33) présente les copeaux obtenus après 50 min d'usinage à sec et lubrifié de AA 2017 T4 et AA 7075 T651. Nous avons mesuré la longueur de ces copeaux à l'aide de l'échelle présentée sur la figure, le tableau (5.15) montre la longueur des copeaux après 50 min d'usinage. Pour le matériau AA2017, l'usinage avec les plaquettes Otelo à sec et lubrifié donne des copeaux identiques en forme et taille. Ces copeaux sont un peu différents de ceux obtenus à  $V_c=800$  m/min car ils sont plus enroulés. Nous retrouvons le même phénomène pour la plaquette S1. Nous pouvons voir sur ces essais que la vitesse de coupe dans ce matériau modifie légèrement la forme du copeau mais que la lubrification et donc le collage ne contribuent pas à changer les copeaux. Nous pouvons donc voir dans ces essais que les diagrammes brise-copeaux établis entre l'avance et la profondeur de passe sont une zone simplifiée de l'espace des copeaux fractionnés car il n'apparaît pas la vitesse de coupe alors que celle ci modifie le copeau. Dans la zone centrale d'un brise-copeaux, la vitesse de coupe ne modifiera pas le fractionnement mais sur les limites du domaine, ce paramètre peut devenir important. Ce constat est identique pour le matériau AA7075. Les copeaux sont identiques pour l'usinage à sec ou lubrifié mais sont un peu plus longs au début de l'usinage lorsque la plaquette est neuve. Les copeaux ensuite fractionnent plus et ont alors des dimensions identiques à celles mesurées à  $V_c=800$  m/min. Nous ne pouvons pas attribuer cette modification au collage sous forme de BUE ou BUL car nous avons vu que la lubrification empêchait tout collage. Il semblerait que la cratère même faible agisse comme un brise-copeaux fractionnant beaucoup plus le copeau qu'au début de l'usinage.



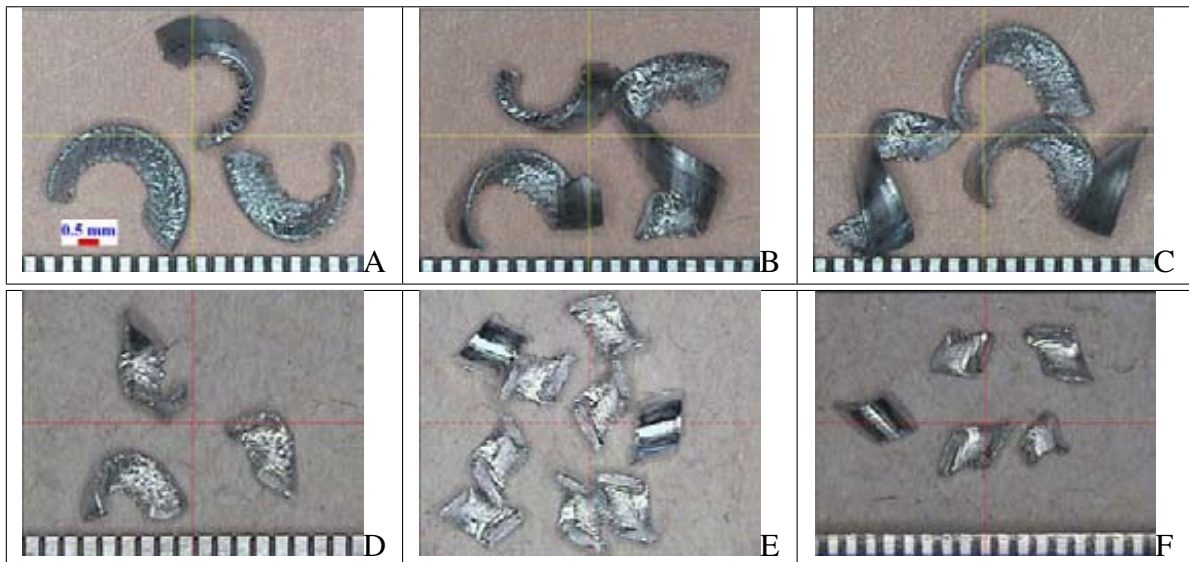


FIGURE 5.33 – Formes des copeaux après 50 min, A. Usinage à sec de AA 2017 T4 avec S1, B. Usinage à sec de AA 2017 T4 avec O2, C. Usinage lubrifié de AA 2017 T4 avec O2, D. Usinage à sec de AA 7075 T651 avec S1, E. Usinage à sec de AA 7075 T651 avec O2, F. Usinage lubrifié de AA 7075 T651 avec O2.

Longueur des copeaux mm	S1	O2
Usinage AA 2017 T4/sec	5	6
Usinage AA 2017 T4/lub	—	6
Usinage AA 7075 T651/sec	2	1.5
Usinage AA 7075 T651/lub	—	1.5

TABLE 5.15 – Longueur des copeaux après 50 min du tournage à sec et lubrifié de AA 2017 T4 et AA 7075 T651 à  $V_c = 400$  m/min.

### 5.3.6 Conclusion

Nous avons usiné les alliages d'aluminium AA 2017 T4 et AA 7075 T651 sans et avec lubrification à l'huile soluble (concentrée à 6.5 %). Six plaquettes rhombiques à 55° d'un rayon théorique 0.4 mm ont été testées. Les paramètres de coupe utilisés sont une vitesse  $V_c = 400$  m/min, une avance  $f = 0.24$  mm/tr et une profondeur de passe  $a_p = 1$  mm. Le temps total d'usinage a été de l'ordre de 50 min.

Nous avons constaté dans cette étude que les acuités d'arête de toutes les plaquettes ne montrent pas de différence sensible pour les deux matériaux et le lubrifiant n'a aucune influence d'un point de vue de la tenue de la plaquette. Les usures constatées (VBB, cratère, rayon d'acuité d'arête) sont quasi identiques. D'un point de vue de collage, nous avons constaté également que le lubrifiant apporte un film protecteur à la face de coupe facilitant l'écoulement du copeau sans adhérence. Pour l'usinage du

matériau AA 2017 T4 à  $V_c=400$  m/min, le collage sous forme d'arête rapportée devient important. Le polissage de la face de coupe des plaquettes n'a pas d'influence sur l'arête rapportée durant l'usinage à sec avec ces vitesses de coupe faibles. Au niveau des états de surface des pièces usinées, les pièces de AA 7075 T651 ont des états de surface meilleurs que ceux-ci des pièces AA 2017 T4. Le lubrifiant améliore l'état de surface d'environ 10 % et au vu des comparaisons effectuées sur tous les critères, cela nous indique qu'il est directement corrélé au collage de la matière.

## 5.4 Conclusion

Nous avons usiné deux types d'alliages d'aluminium AA 2017 T4 et AA 7075 T651, la dureté de ces deux matériaux est de l'ordre de 110 HB pour AA 2017 T4 et 140 HB pour AA 7075 T651. Les essais ont été réalisés avec ou sans lubrification, le but étant d'identifier l'intérêt du lubrifiant vis à vis de l'usure des plaquettes et de la qualité des pièces. L'opération de finition a été étudiée en utilisant une profondeur de passe  $a_p = 1$  mm, une avance  $f = 0.24$  mm/tr, et trois vitesses de coupe  $V_c = 1200, 800,$  et  $400$  m/min. Le temps d'usinage a été de l'ordre de 16 min lors de l'usinage à 1200 m/min, de l'ordre de 90 min lors de l'usinage à 800 m/min, et de l'ordre de 50 min lors de l'usinage à 400 m/min. Les plaquettes utilisées pour les essais sont des plaquettes rhombiques à  $55^\circ$  d'un rayon théorique de 0.4 mm. Nous avons utilisé 15 plaquettes (3 plaquettes Iscar I1, 5 plaquettes Sandvik S1, et 7 plaquettes Otelo O2).

L'étude du phénomène du collage de la matière usinée durant l'usinage en finition a montré que l'alliage d'aluminium AA 2017 T4 colle plus que l'alliage d'aluminium AA 7075 T651. La couche adhérente (sous forme de BUL et BUE) formée durant l'usinage n'a affecté l'état de surface que lorsque la vitesse de coupe a été faible. Pour les vitesses plus importantes, le polissage a montré un intérêt car il a permis de diminuer le collage qui est un paramètre influant sur l'état de surface. Le lubrifiant a montré un réel intérêt pour les faibles vitesses de coupe mais finalement en finition nous chercherons toujours à usiner à vitesse élevée.

D'un point de vue des usures, pour un même matériau, elles sont semblables et faibles entre toutes les plaquettes. Nous constatons une usure évoluant très progressivement. On ne peut pas dire que la différence de température dû à la présence du lubrifiant modifie la tenue de la plaquette. Cela est important à noter car le rôle du lubrifiant agit comme un film protecteur sur la face de coupe empêchant le collage. Ce rôle peut alors en partie être fait par le polissage de la plaquette. Cela s'est vérifié seulement pour les vitesses de coupe élevées.

Nous avons présenté dans le tableau (5.16) un résumé des essais de finition.

AA 2017 T4	Vc = 1200 m/min		
Plaquette	I1/sec	S1/ sec	O2/sec
BUE	+	+	+
BUL	+	+	+
VBB	+	+	+
KT	+	+	+
<i>Ra</i>	+	+	+
<i>Rt</i>	+	+	+

Vc = 800 m/min						
Plaquette	I1/sec/2017	O2/sec/2017	S1/sec/2017	I1/sec/7075	O2/sec/7075	S1/sec/7075
BUE	++	++	++	+	+	+
BUL	+	+	++	+	+	+
VBB	++	++	++	+	+	+
KT	++	++	++	+	+	+
<i>Ra</i>	++	++	++	+	+	+
<i>Rt</i>	++	++	++	+	+	+

Vc = 400 m/min						
Plaquette	S1/sec/2017	O2/sec/2017	O2/lub/2017	S1/sec/7075	O2/sec/7075	O2/lub/7075
BUE	+++	+++	-	+	+	-
BUL	+++	+++	-	++	++	-
VBB	+	+	+	+	+	+
KT	+	+	+	+	+	+
<i>Ra</i>	+++	+++	+	+	+	+
<i>Rt</i>	+++	+++	+	+	+	+

TABLE 5.16 – Résumé des essais en finition.

# Chapitre 6

## Conclusion

### 6.1 Bilan général

Dans cette thèse nous avons abordé trois points principaux : L'étude bibliographique, l'usinage en ébauche d'alliage d'aluminium AA 2017 T4, et l'usinage en finition des deux alliages d'aluminium AA 2017 T4 et AA 7075 T651.

1. L'étude bibliographique : L'étude bibliographique a permis de lister les principaux modes d'endommagement des outils de coupe durant l'usinage des alliages d'aluminium, comme le collage de la matière usinée et l'usure de ces outils. Nous avons remarqué que l'utilisation du lubrifiant devient indésirable pour des raisons environnementales et sanitaires. Car d'un côté, le stockage et la production du lubrifiant provoque des pollutions dangereuses pour la nature, et d'un autre côté, l'utilisation de lubrifiant peut provoquer des maladies respiratoires pour les personnes qui sont souvent en contact avec. Le travail à sec peut répondre à ces problèmes en respectant certaines limites. La durée de vie des outils de coupe peut être allongée en optimisant la géométrie des outils de coupe ou en utilisant des revêtements qui protègent la face de coupe des outils et donnent une meilleure évacuation des copeaux. Nous avons aussi étudié dans cette étude bibliographique les acuités d'arête des outils de coupe. Une faible acuité d'arête permet de limiter les efforts de coupe et d'améliorer la durée de vie des outils ; elle permet aussi de réduire les vibrations dans la machine et d'obtenir des pièces avec un bon état de surface. Le principal endommagement des outils de coupe lors de l'usinage d'alliage d'aluminium est l'usure adhésive qui peut se produire sur une large plage de température de coupe. L'usure adhésive se traduit par des dépôts de la matière usinée qui viennent coller sur l'arête de coupe des outils et forment l'arête rapportée. Cette arête rapportée (BUE) apparaît de façon importante quand les conditions de coupe sont caractérisées par des températures faibles et des pressions de contact élevées. L'arête rapportée dépend du matériau de la pièce à usiner ; plus le matériau à usiner est ductile, plus l'arête rapportée est importante. L'arête rapportée peut être atténuée soit par l'utilisation d'angles de coupe très élevés qui baissent la pression de contact, soit par l'utilisation des

- outils revêtus. La formation et la destruction de l'arête rapportée peuvent se répéter plusieurs fois au cours d'un usinage. Lors de la destruction de l'arête rapportée, des fragments de BUE peuvent passer sous l'arête de coupe et rester collés sur la pièce, ce qui augmente la rugosité de la pièce usinée. Pour éviter le phénomène du collage il est recommandé d'augmenter la vitesse de coupe, sélectionner une géométrie d'outil positive ou usiner avec des plaquettes revêtues.
2. L'usinage en ébauche de AA 2017 T4 : Nous avons sollicité fortement les plaquettes de coupe utilisées durant l'usinage d'alliage d'aluminium AA 2017 T4 pour étudier l'endommagement de ces plaquettes en raison de la haute température dégagée. Nous avons pris des conditions de coupes sévères (une forte profondeur de passe et une forte avance). Nous avons choisi une profondeur de passe de 2 mm et une avance de 0.5 mm/tr pour cette opération d'usinage. Nous avons testé deux vitesses de coupe 100 et 600 m/min. Nous avons utilisé trois plaquettes non polies (Sandvik) et trois plaquettes polies (Otelo), le rayon de ces plaquettes est de l'ordre de 0.8 mm. Cette opération a été réalisée avec et sans lubrification (huile soluble concentrée à 6.5 %). L'intérêt de l'usinage à une faible vitesse de coupe a été d'analyser l'effet unique de la vitesse de coupe sur l'ensemble des paramètres étudiés. Le lubrifiant diminue le coefficient de frottement ce qui permet aux copeaux de s'écouler facilement sans adhérence ainsi diminue la couche adhérente (BUL). Ce lubrifiant n'a pas d'influence ni sur l'usure en dépouille ni sur l'usure en cratère, il n'apporte aucune amélioration de l'état de surface. Le polissage et le revêtement de diamant diminuent le collage sur la face de coupe (BUL). La couche adhérente formée derrière le cratère n'est pas importante car ce n'est pas dans cette zone qu'on constate une dégradation de la plaquette. La plaquette revêtue diamant se comporte beaucoup mieux que les plaquettes non revêtues et non polies vis à vis de l'usure. D'un coté elle diminue le collage de la matière usinée et d'un autre coté elle présente une meilleure résistance à l'usure en dépouille et en cratère. L'apparition et la disparition du collage n'a aucune d'influence sur l'état de surface des pièces usinées. Pour des plaquettes rhombiques à 55°, les valeurs théoriques correspondent aux valeurs mesurées. Pour des plaquettes rhombiques à 80°, il y a un écart important entre les valeurs théoriques et mesurées de l'état de surface. Cette différence est due à une zone de contact importante qui entraîne des phénomènes dynamiques néfastes à la rugosité des pièces.
  3. L'usinage en finition de AA 2017 T4 et AA 7075 T651 : L'opération de finition a été effectuée avec les paramètres suivants : une profondeur de passe  $a_p = 1$  mm, une avance  $f = 0.24$  mm/tr, et trois vitesses de coupe ( $V_c=400$ ,  $V_c=800$  et  $V_c=1200$  m/min). Les deux matériaux ont été usinés à sec et avec lubrification en utilisant 15 plaquettes rhombiques à 55°. Cette étude nous a permis de mieux appréhender les phénomènes d'endommagement des plaquettes aux faibles paramètres de coupe. Nous avons analysé le collage de la matière usinée et l'usure des plaquettes sur le projecteur de profil. L'état de surface des pièces usinées a été le paramètre le plus important à étudier, nous l'avons contrôlé en utilisant le profilomètre. L'étude des frontières entre les faces de coupe et les faces de dépouille (acuité d'arête) nous a montré que le rayon des acuités d'arête reste similaire à l'état neuf. L'alliage d'aluminium AA 2017 T4 colle sur les

plaquettes plus que l'alliage AA 7075 T651. L'analyse de la couche adhérente (BUL) formée sur la face de coupe nous a montré qu'elle provoque une augmentation au niveau du collage des dépôts de la matière sur l'arête de coupe et forme l'arête rapportée (BUE). Cette arête rapportée a une influence sur l'état de surface des pièces produites durant l'usinage à faible vitesse de coupe. L'étude de l'usure a montré qu'à une vitesse de coupe moyenne (800 m/min), les plaquettes utilisées pour l'usinage de AA 2017 T4 s'usent plus que celles utilisées pour l'usinage de AA 7075 T651. Cela peut être dû au retour élastique du matériau moins dur. La différence géométrique entre les plaquettes (angles de coupe, angle de dépouille, rayon d'acuité d'arête) ne montre pas de différence importante pour l'usure des plaquettes (usure en dépouille et usure en cratère). A une faible vitesse de coupe (400 m/min), nous avons constaté que le lubrifiant n'a aucune influence sur l'usure des plaquettes. Mais, il diminue l'arête rapportée de 66 % durant l'usinage de AA 2017 T4 ce qui va améliorer l'état de surface des pièces usinées d'environ 7%. Les pièces d'alliage d'aluminium AA 2017 T4 ont un état de surface moins bon que celles en AA 7075 T651 à cause du phénomène de collage qui est plus prononcé dans le cas d'usinage de AA 2017 T4.

D'après cette étude, en conditions de finition, avec les paramètres de profondeur de passe  $a_p = 1$  mm et d'avance  $f = 0.24$  mm/tr, nous préconisons d'usiner à sec l'alliage d'aluminium AA 7075 avec une vitesse dans l'intervalle [400 et 800] m/min et avec une plaquette polie otelo. Avec les mêmes profondeurs de passe et avance, nous préconisons d'usiner à sec l'alliage d'aluminium AA 2017 avec une vitesse de coupe dans l'intervalle [800 et 1200] m/min et avec une plaquette polie otelo. En ébauche, avec les paramètres de profondeur de passe  $a_p = 2$  mm et d'avance  $f = 0.5$  mm/tr, nous préconisons d'usiner à sec l'alliage d'aluminium AA 2017 avec une vitesse de coupe de 100 m/min.

## 6.2 Perspectives

A court terme, l'étude de la température dans la zone de contact en utilisant une caméra thermique est l'un des points nécessaires pour l'usinage d'alliages d'aluminium. Cette température aide à mieux comprendre les phénomènes de diffusion chimique des atomes entre la pièce et l'outil et en conséquence la formation d'un cratère sur la face de coupe des outils.

A long terme, étudier les contraintes résiduelles qui résultent de la fabrication. Ces contraintes sont présentes dans la pièce mécanique en l'absence de tout effort extérieur et elles influent sur la tenue en fatigue de ces pièces. Pour cela, il est nécessaire de développer des modèles analytiques pour déterminer ces contraintes résiduelles. La présence de rugosité sur les surfaces en contact modifie la distribution normale de pression. Afin de prévoir la durée de vie en fatigue des composants, il est d'abord nécessaire de déterminer ce champ de pression en utilisant soit un modèle numérique soit une approche analytique.

Enfin, il faut envisager des mesures de température dans la zone de contact et étudier le profil de distribution de cette température à l'interface outil copeau. Il est nécessaire aussi d'effectuer une simulation numérique par éléments finis qui montreraient la répartition des pressions le long du contact entre l'outil et la pièce, et ainsi mieux prévoir les modes de frottements existants.

# Bibliographie

- [AB09] D. Jayal ANSHU et A. K. BALAJI : Effects of cutting fluid application on tool wear in machining : Interactions with tool coating and tool surface features. juin 2009.
- [ABKY07] Seref AYKUT, Eyup BAGCI, Aykut KENTLI et Osman YAZICIOGLU : Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool. *Materials & Design*, 28(6):1880–1888, 2007.
- [ACR<sup>+</sup>08] A. ATTANASIO, E. CERETTI, S. RIZZUTI, D. UMBRELLO et F. MICARI : 3D finite element analysis of tool wear in machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1):61–64, 2008.
- [AFM96] J. A. ARSECULARATNE, R. F. FOWLE et P. MATHEW : Nose radius oblique tool : Cutting force and built-up edge prediction. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(5):585–595, mai 1996.
- [AGGR06] A. ATTANASIO, M. GELFI, C. GIARDINI et C. REMINO : Minimal quantity lubrication in turning : Effect on tool wear. *Wear*, 260(3):333–338, février 2006.
- [AMB02] A. H. ADIBI-SEDEH, V. MADHAVAN et B. BAHR : Upper bound analysis of oblique cutting with nose radius tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(9):1081–1094, 2002.
- [AMO95] J. A ARSECULARATNE, P MATHEW et P.L.B OXLEY : Prediction of chip flow direction, cutting forces in oblique machining with nose radius. *Proc. Inst. Mech. Eng.* 209, page 305–315, 1995.
- [ANM09] H.A. ABDEL-AAL, M. NOUARI et M. El MANSORI : Influence of thermal conductivity on wear when machining titanium alloys. *Tribology International*, 42(2):359–372, février 2009.
- [ANT07] A. ALTIN, M. NALBANT et A. TASKESEN : The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining inconel 718 with ceramic tools. *Materials & Design*, 28(9):2518–2522, 2007.



- [APS06] Mark ANDERSON, Rahul PATWA et Yung C. SHIN : Laser-assisted machining of inconel 718 with an economic analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(14):1879–1891, novembre 2006.
- [ASN<sup>+</sup>08] S. AMINI, H. SOLEIMANIMEHR, M.J. NATEGH, A. ABUDOLLAH et M.H. SADEGHI : FEM analysis of ultrasonic-vibration-assisted turning and the vibratory tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 201(1-3):43–47, mai 2008.
- [AST07] V. P ASTAKHOV : Tribology of metal cutting, 2007.
- [AZMM06] J.A. ARSECULARATNE, L.C. ZHANG, C. MONTROSS et P. MATHEW : On machining of hardened AISI d2 steel with PCBN tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 171(2):244–252, 2006.
- [BA08] Sukanta BHOWMICK et Ahmet T. ALPAS : Minimum quantity lubrication drilling of aluminium-silicon alloys in water using diamond-like carbon coated drills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(12-13):1429–1443, octobre 2008.
- [BAR96] M. A. El BARADIE : The effect of varying the workpiece diameter on the cutting tool clearance angle in tool-life testing. *Wear*, 195(1-2):201–205, 1996.
- [BAVT10] Abhay BHATT, Helmi ATTIA, R. VARGAS et V. THOMSON : Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of inconel 718. *Tribology International*, 43(5-6):1113–1121, 2010.
- [BB01] J. BARRY et G. BYRNE : Cutting tool wear in the machining of hardened steels : Part 1 : alumina/Tic cutting tool wear. *Wear* 247, pages 139–151, février 2001.
- [BMC07] K.G. BASAVAKUMAR, P.G. MUKUNDA et M. CHAKRABORTY : Influence of melt treatments and turning inserts on cutting force and surface integrity in turning of Al-12Si and Al-12Si-3Cu cast alloys. *Surface and Coatings Technology*, 201(8):4757–4766, 2007.
- [BRO05] B BROQUERIE : Fluides de coupe, rôle en usinage et classification. *Technique de l'ingénieur*, pages PP1 – 11, 2005.
- [CAH00] CAHPUIS : [http://www.ets-chapuis.fr/F/pages/alliages\\_alu\\_cuivre.htm](http://www.ets-chapuis.fr/F/pages/alliages_alu_cuivre.htm)., 2000.
- [CAU05] A CAUSSE : Captage et traitement des aerosols de fluides de coupe., 2005.
- [CBM<sup>+</sup>08] V.D. CALATORU, M. BALAZINSKI, J.R.R. MAYER, H. PARIS et G. L'ESPÉRANCE : Diffusion wear mechanism during high-speed machining of 7475-T7351 aluminum alloy with carbide end mills. *Wear*, 265(11-12):1793–1800, novembre 2008.

- [CBS<sup>+</sup>02] M. S. CARRILERO, R. BIENVENIDO, J. M. SÁNCHEZ, M. ÁLVAREZ, A. GONZÁLEZ et M. MARCOS : A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning processes of AA2024 Al-Cu alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(2):215–220, 2002.
- [CCM<sup>+</sup>10] J.A. CANTELI, J.L. CANTERO, N.C. MARÍN, B. GÓMEZ, E. GORDO et M.H. MIGUÉLEZ : Cutting performance of TiCN-HSS cermet in dry machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(1):122–128, 2010.
- [CDGB01] O CAHUC, P DARNIS, A GERARD et J BATTAGLIA : Experimental and analytical balance sheet in turning application. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 648–656, 2001.
- [CE98] I. A. CHOUDHURY et M. A. EL-BARADIE : Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength steel (290 BHN). *Journal of Materials Processing Technology*, 77(1-3):319–326, mai 1998.
- [CENE06] L. CHEN, T.I. EL-WARDANY, M. NASR et M.A. ELBESTAWI : Effects of edge preparation and feed when hard turning a hot work die steel with polycrystalline cubic boron nitride tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1):89–92, 2006.
- [CHR03] Pagès CHRISTIAN : *Comportement de revêtement céramique sur outil en tournage à sec de finition*. Thèse de doctorat, novembre 2003.
- [CKK<sup>+</sup>09] C. COURBON, D. KRAMAR, P. KRAJNIK, F. PUSAVEC, J. RECH et J. KOPAC : Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of inconel 718 : An experimental study. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(14):1114–1125, novembre 2009.
- [CNE07] Reginaldo T. COELHO, Eu-Gene NG et M.A. ELBESTAWI : Tool wear when turning hardened AISI 4340 with coated PCBN tools using finishing cutting conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(2):263–272, février 2007.
- [COB03] William COBBETT : *Turning and Chip-breaking Technology*. 2003.
- [COH09] Guillaume COHEN : *Étude des effets thermiques et mécaniques en usinage à sec*. Thèse de doctorat, Paul Sabatier TOULOUSE, 2009.
- [COL96] P COLLIGNON : Evolution des revêtement sur les différents matériaux de coupe : évolution des dépôts en fonction des nouveaux besoins. *Colloque international du cercle d'études des métaux*, novembre 1996.
- [COR05] Sandvik COROMANT : *Guide technique d'usinage*. 2005.

- [CPM04] Zulay CASSIER, Yidney PRATO et Patricia MUÑOZ-ESCALONA : Built-up edge effect on tool wear when turning steels at low cutting speed. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 13(5):542–547, octobre 2004.
- [CRE00] M. N CREPY : *Dermatoses professionnelles aux fluides de coupe.*, volume 83. Documents pour le médecin du travail édition, 2000.
- [CTCG00] Olivier CAHUC, Didier TOULOUSE, Yves COUÉTARD et Alain GÉRARD : Un nouveau modèle de la zone de contact outil copeau. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIB - Mechanics-Physics-Astronomy*, 328(1):1–4, 2000.
- [CTS04] Ibrahim CIFTCI, Mehmet TURKER et Ulvi SEKER : Evaluation of tool wear when machining SiCp-reinforced al-2014 alloy matrix composites. *Materials & Design*, 25(3):251–255, mai 2004.
- [CVL<sup>+</sup>99] S. Lo CASTO, E. Lo VALVO, E. LUCCHINI, S. MASCHIO, M. PIACENTINI et V. F. RUISI : Ceramic materials wear mechanisms when cutting nickel-based alloys. *Wear*, 225-229(Part 1):227–233, avril 1999.
- [CVP<sup>+</sup>94] S. Lo CASTO, E. Lo VALVO, M. PIACENTINI, V.F. RUISI, E. LUCCHINI, S. MASCHIO et P. LONARDO : Cutting temperatures evaluation in ceramic tools : Experimental tests, numerical analysis and SEM observations. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 43(1):73–76, 1994.
- [DBM08] Berend DENKENA, David BOEHNKE et Roland MEYER : Reduction of wear induced surface zone effects during hard turning by means of new tool geometries. *Production Engineering*, 2(2):123–132, 2008.
- [DE04] Patrik DAHLMAN et Marcel ESCURSELL : High-pressure jet-assisted cooling : a new possibility for near net shape turning of decarburized steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(1):109–115, 2004.
- [DFF03] A. E. DINIZ, J. R. FERREIRA et F. T. FILHO : Influence of refrigeration/lubrication condition on SAE 52100 hardened steel turning at several cutting speeds. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(3):317–326, février 2003.
- [DK07] N.R. DHAR et M. KAMRUZZAMAN : Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(5):754–759, avril 2007.
- [DKA06] N.R. DHAR, M. KAMRUZZAMAN et Mahiuddin AHMED : Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(2):299–304, février 2006.

- [DSD<sup>+</sup>07] A. DEVILLEZ, F. SCHNEIDER, S. DOMINIAK, D. DUDZINSKI et D. LARROUQUERE : Cutting forces and wear in dry machining of inconel 718 with coated carbide tools. *Wear*, 262(7-8):931–942, mars 2007.
- [E45] Merchant M. E : Mechanics of the metal cutting process. i. orthogonal cutting and a type 2 chip. *Journal of Applied Physics*, pages 267 – 275, 1945.
- [EBFS05] E.O. EZUGWU, J. BONNEY, D.A. FADARE et W.F. SALES : Machining of nickel-base, inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures. *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163:609–614, mai 2005.
- [EBJ03] K. C. EE, A. K. BALAJI et I. S. JAWAHIR : Progressive tool-wear mechanisms and their effects on chip-curl/chip-form in machining with grooved tools : an extended application of the equivalent toolface (ET) model. *Wear*, 255(7-12):1404–1413, 2003.
- [EM09] A. EBRAHIMI et M.M. MOSHKAR : Evaluation of machinability in turning of microalloyed and quenched-tempered steels : Tool wear, statistical analysis, chip morphology. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2):910–921, 2009.
- [ES98] M. EL-GALLAB et M. SKLAD : Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites : Part i : Tool performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 83(1-3):151–158, novembre 1998.
- [FAN02] N. FANG : Machining with tool-chip contact on the tool secondary rake face–Part i : a new slip-line model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(11):2337–2354, novembre 2002.
- [FF01] P FRIMAT et S FANTONI-QUINTON : La main du travailleur : aspects socio-économiques. quelle réparation ? quel reclassement. *Progrès en dermato-allergologie. John Libbey éd, Paris*, pages 65 – 79, 2001.
- [FM49] M FIELD et M.E MERCHANT : The mechanism of the formation of the discontinuous chip in the metal cutting. *Trans. ASME*, 71, 1949.
- [FMSU07] Luigino FILICE, Fabrizio MICARI, Luca SETTINERI et Domenico UMBRELLO : Wear modelling in mild steel orthogonal cutting when using uncoated carbide tools. *Wear*, 262(5-6):545–554, février 2007.
- [FW05] N. FANG et Q. WU : The effects of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminum alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(10):1178–1187, août 2005.

- [GBN05] W. GRZESIK, M. BARTOSZUK et P. NIESLONY : Finite element modelling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165:1204–1211, mai 2005.
- [GFD<sup>+</sup>04] M. GOLDIN, S. FANTONI, Y. DEJOBERT, A. LEROYER et P. FRIMAT : Les dermatites professionnelles aux fluides de coupe : À propos de 32 cas. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 65(7-8):531–540, décembre 2004.
- [GFJ94] R GHOSH, X. D FANG et I. S JAWAHIR : Estimation of chip side-flow in machining with complex grooved tools using a force ratio method. In : *Proc. Conf. on the Physics of Machining Processes II*, pages 233–255, 1994.
- [GG02] Franck GIROT et Daniel GÉHIN : Perçage à sec des alliages d'aluminium aéronautique Dry drilling of aluminium alloys for aeronautics. *Mécanique & Industries*, 3(4):301–313, 2002.
- [GRZ03] W GRZESIK : Friction behaviour of heat isolating coating in machining : mechanical thermal and energy-based considerations,. *International Journal Of Machine Tools and Manufacture*, pages 145 – 150, 2003.
- [GSSS09] Simranpreet Singh GILL, Rupinder SINGH, Harpreet SINGH et Jagdev SINGH : Wear behaviour of cryogenically treated tungsten carbide inserts under dry and wet turning conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(3-4):256–260, mars 2009.
- [GT07] C. GÉRAUT et D. TRIPODI : Dermatoses professionnelles et aldéhydes. *Revue Française d'Allergologie et d'Immunologie Clinique*, 47(3):144–149, avril 2007.
- [GV95] Denis GELIN et Michel VINCENT : *Element de fabrication*. France, mars 1995.
- [GZ08] W. GRZESIK et Z. ZALISZ : Wear phenomenon in the hard steel machining using ceramic tools. *Tribology International*, 41(8):802–812, août 2008.
- [HAB06] M HABAK : *Etude de l'influence de la microstructure et des parametres de coupe sur le comportement en tournage de l'acier a roulement 100Cr6*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Superieure d'Arts et Metiers, 2006.
- [HCJ09] M. HAGIWARA, S. CHEN et I.S. JAWAHIR : A hybrid predictive model and validation for chip flow in contour finish turning operations with coated grooved tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3):1417–1427, février 2009.
- [HD05] Yong HUANG et Ty G. DAWSON : Tool crater wear depth modeling in CBN hard turning. *Wear*, 258(9):1455–1461, avril 2005.

- [HK97] Zhen Bing HOU et Ranga KOMANDURI : Modeling of thermomechanical shear instability in machining. *International Journal of Mechanical Sciences*, 39(11):1273–1314, novembre 1997.
- [HLLL08] C.Y. HSU, Y.Y. LIN, W.S. LEE et S.P. LO : Machining characteristics of inconel 718 using ultrasonic and high temperature-aided cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1-3):359–365, mars 2008.
- [HLR<sup>+</sup>06] P.Eh. HOVSEPIAN, Q. LUO, G. ROBINSON, M. PITTMAN, M. HOWARTH, D. DOERWALD, R. TIETEMA, W.M. SIM, A. DEEMING et T. ZEUS : TiAlN/VN superlattice structured PVD coatings : A new alternative in machining of aluminium alloys for aerospace and automotive components. *Surface and Coatings Technology*, 201(1-2):265–272, septembre 2006.
- [ISO93] ISO3685 : Tool life testing with single point turning tools. page 48, 1993.
- [JAW91] I. S JAWAHIR : An investigation of three-dimensional chip flow in machining of steels with grooved chip forming tool inserts. *Trans. NAMRI/SME 21*, pages 222–231, 1991.
- [JD01] Bradley H. JARED et Thomas A. DOW : Investigation of the direction of chip motion in diamond turning. *Precision Engineering*, 25(2):155–164, avril 2001.
- [JGFL95] I. S. JAWAHIR, R. GHOSH, X. D. FANG et P. X. LI : An investigation of the effects of chip flow on tool-wear in machining with complex grooved tools. *Wear*, 184(2):145–154, mai 1995.
- [JL93] I.S. JAWAHIR et C.A. VAN LUTTERVELT : Recent developments in chip control research and applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42(2):659–693, 1993.
- [JYW08] Deng JIANXIN, Li YOUSHEG et Song WENLONG : Diffusion wear in dry cutting of Ti-6Al-4V with WC/Co carbide tools. *Wear*, 265(11-12):1776–1783, novembre 2008.
- [KA08] Ahsan Ali KHAN et Mirghani I. AHMED : Improving tool life using cryogenic cooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 196(1-3):149–154, 2008.
- [KB81] R KOMANURI et R.H BROWN : The mechanics of chip segmentation in machining. *ASME Journal of engeneering for industry.*, 1981.
- [KBK93] W. KÖNIG, A. BERKTOLD et K.-F. KOCH : Turning versus grinding - a comparison of surface integrity aspects and attainable accuracies. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42(1):39–43, 1993.
- [KDS03] A Senthil KUMAR, A Raja DURAI et T SORNAKUMAR : Machinability of hardened steel using alumina based ceramic cutting tools. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 21(3-4):109–117, 2003.

- [KDS06] A. Senthil KUMAR, A. Raja DURAI et T. SORNAKUMAR : Wear behaviour of alumina based ceramic cutting tools on machining steels. *Tribology International*, 39(3):191–197, mars 2006.
- [KE97] F KLOCKE et G EISENBLATTER : Dry cutting. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, pages 519 – 526, 1997.
- [KKB07] B.V. Manoj KUMAR, J. Ram KUMAR et Bikramjit BASU : Crater wear mechanisms of TiCN-Ni-WC cermets during dry machining. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 25(5-6):392–399, 2007.
- [KKCS04] Ihsan KORKUT, Mustafa KASAP, Ibrahim CIFTCI et Ulvi SEKER : Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 25(4):303–305, 2004.
- [KKS09] K KATUKU, A KOURSARIS et I SIGALAS : Wear, cutting forces and chip characteristics when dry turning ASTM grade austempered ductile iron with PcBN cutting tools under finishing conditions. *Journal of Materials Processing Technology* 209, pages 2412–2420, mars 2009.
- [KL07] Samir K. KHRAIS et Y.J. LIN : Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel. *Wear*, 262(1-2):64–69, 2007.
- [KOO03] K. KUDOU, T. ONO et S. OKADA : Crater wear characteristics of an Fe-diffused carbide cutting tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 132(1-3):255–261, 2003.
- [KOP04] J. KOPAC : The influence of cr on tool wear by machining. *Journal of Materials Processing Technology* 157-158, pages 354–359, 2004.
- [KR07] Dursun Sedat KILIC et Shivakumar RAMAN : Observations of the tool-chip boundary conditions in turning of aluminum alloys. *Wear*, 262(7-8):889–904, mars 2007.
- [KSK09] Hong-Gyoo KIM, Jae-Hyung SIM et Hyeog-Jun KWEON : Performance evaluation of chip breaker utilizing neural network. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2): 647–656, 2009.
- [KSM07] 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(1-3):100–109, novembre 2007.
- [KY08] Masatsugu KAMIYA et Takao YAKOU : Role of second-phase particles in chip breakability in aluminum alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(6):688–697, mai 2008.

- [LAF08] Yueh-Jaw LIN, Ashutosh AGRAWAL et Yunmei FANG : Wear progressions and tool life enhancement with AlCrN coated inserts in high-speed dry and wet steel lathing. *Wear*, 264(3-4):226–234, février 2008.
- [LIM95] G. H. LIM : Tool-wear monitoring in machine turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 51(1-4):25–36, avril 1995.
- [LIS04] Gautier LIST : *Etude des mecanismes d'endommagement des outils carbure WC-Co par la caractérisation de l'interface Outil-Copeau*. Thèse de doctorat, ENSAM, décembre 2004.
- [LJJ09] J LORENTZON, N JÄRVSTRAT et B. L JOSEFSON : Modelling chip formation of alloy 718. *Journal of Materials Processing Technology 209*, pages 4645–4653, juin 2009.
- [LLW08] H.M. LIN, Y.S. LIAO et C.C. WEI : Wear behavior in turning high hardness alloy steel by CBN tool. *Wear*, 264(7-8):679–684, mars 2008.
- [LSB09] G. LIST, G. SUTTER et X BI : Investigation of tool wear in high speed machining by using a ballistic set-up. juin 2009.
- [LUG03] LUGAND : [WWW.lugand-aciers.com](http://www.lugand-aciers.com)., 2003.
- [MAG07] MAGAZINE : <http://www.magazinemci.com/supmetal/articles/2007/06/tournage.htm>., 2007.
- [MB03] A. MANNA et B. BHATTACHARAYYA : A study on machinability of Al/SiC-MMC. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3):711–716, septembre 2003.
- [MC98] P. MUÑOZ-ESCALONA et Z. CASSIER : Influence of the critical cutting speed on the surface finish of turned steel. *Wear*, 218(1):103–109, 1998.
- [MR06] T MABROUKI et J. -F RIGAL : A contribution to a qualitative understanding of thermo-mechanical effects during chip formation in hard turning. *Journal of Materials Processing Technology 176*, pages 214–221, juin 2006.
- [MSB07] R.P. MARTINHO, F.J.G. SILVA et A.P.M. BAPTISTA : Wear behaviour of uncoated and diamond coated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tools under severe turning conditions. *Wear*, 263(7-12):1417–1422, septembre 2007.
- [NLGG05] M. NOUARI, G. LIST, F. GIROT et D. GÉHIN : Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(12-13):1436–1442, octobre 2005.



- [NVY08] L NING, S. C VELDHUIS et K YAMAMOTO : Investigation of wear behavior and chip formation for cutting tools with nano-multilayered TiAlCrN/NbN PVD coating. *International Journal Of Machine Tools and Manufacture* 48, pages 656–665, mai 2008.
- [OIB96] E. J. OLES, A. INSPEKTOR et C. E. BAUER : The new diamond-coated carbide cutting tools. *Diamond and Related Materials*, 5(6-8):617–624, mai 1996.
- [OKS08] T. OZİL, Y. KARPAT et A. SRIVASTAVA : Hard turning with variable micro-geometry PcBN tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1):73–76, 2008.
- [OZC03] Yusuf OZCATALBAS : Chip and built-up edge formation in the machining of in situ Al4C3-Al composite. *Materials & Design*, 24(3):215–221, mai 2003.
- [PAS06] U PRABHU, P. Malshe AJAY et A. Batzer STEPHAN : Dry machining of aluminium - silicon alloy using polished CVD diamond - coated cutting tools inserts. *Surface and Coatings Technology*, 200:3399–3403, 2006.
- [PC09] Zoltan PALMAI et Gabor CSERNAK : Chip formation as an oscillator during the turning process. *Journal of sound and vibration*, 2009.
- [PMD09] Suresh PALANISAMY, Stuart D. MCDONALD et Matthew S. DARGUSCH : Effects of coolant pressure on chip formation while turning Ti6Al4V alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(9):739–743, 2009.
- [PMDP05] Radu PAVEL, Ioan MARINESCU, Mick DEIS et Jim PILLAR : Effect of tool wear on surface finish for a case of continuous and interrupted hard turning. *Journal of Materials Processing Technology* 170, pages 341–349, décembre 2005.
- [PMJ01] G. POULACHON, A. MOISAN et I. S. JAWAHIR : Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools. *Wear*, 250(1-12):576–586, octobre 2001.
- [RCSM05] E.M. RUBIO, A.M. CAMACHO, J.M. SÁNCHEZ-SOLA et M. MARCOS : Surface roughness of AA7050 alloy turned bars : Analysis of the influence of the length of machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163:682–689, mai 2005.
- [REC05] Joël RECH : *Cutting Edge Preparation And Surface Issues*. Thèse de doctorat, février 2005.
- [RJM07] Leandro L. G. REIS, Washington M. Da Silva JUNIOR et Alisson R. MACHADO : Effect of cutting speed and cutting fluid on the BUE geometry of a SAE 12L14 free machining steel. *Journal of the Braz. Soc. Of Mech. Sci and Engineering*, page 196 – 201, juin 2007.
- [ROG08] M. ROGANTE : Wear characterisation and tool performance of sintered carbide inserts during automatic machining of AISI 1045 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, In Press, Corrected Proof, 2008.

- [ROPA02] Laheurte R, Cahuc O, Darnis PH et Gérard A : Evaluation de l'énergie mise en jeu du comportement des outils de coupe dans l'usinage. *Mise en forme des métaux*, pages 9 – 15, 2002.
- [RR06] Mehdi REMADNA et Jean François RIGAL : Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 178(1-3):67–75, septembre 2006.
- [RYJW04] X. J. REN, Q. X. YANG, R. D. JAMES et L. WANG : Cutting temperatures in hard turning chromium hardfacings with PCBN tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 147(1):38–44, mars 2004.
- [RYS<sup>+</sup>05] J. RECH, Y.-C. YEN, M.J. SCHAFF, H. HAMDI, T. ALTAN et K.D. BOUZAKIS : Influence of cutting edge radius on the wear resistance of PM-HSS milling inserts. *Wear*, 259(7-12):1168–1176, 2005.
- [SC02] Sumit Kanti SIKDAR et Mingyuan CHEN : Relationship between tool flank wear area and component forces in single point turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 128(1-3):210–215, octobre 2002.
- [SCAT07] Giovanni R. DOS SANTOS, Dalberto D. DA COSTA, Fred L. AMORIM et Ricardo D. TORRES : Characterization of DLC thin film and evaluation of machining forces using coated inserts in turning of Al-Si alloys. *Surface and Coatings Technology*, 202(4-7): 1029–1033, décembre 2007.
- [SEN06] A SIMONEAU, M.A ELBESTAWI et E NG : Chip formation during microscale cutting of a medium carbon steel. *International Journal Of Machine Tools and Manufacture* 46, pages 467–481, avril 2006.
- [SLM<sup>+</sup>05] Nicola SCUOR, Elio LUCCHINI, Stefano MASCHIO, Salvatore Lo CASTO et Valter SERGO : Wear mechanisms and residual stresses in alumina-based laminated cutting tools. *Wear*, 258(9):1372–1378, avril 2005.
- [SM01] M. SOKOVIC et K. MIJANOVIC : Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 109(1-2):181–189, février 2001.
- [SR09] H.H. SHAHABI et M.M. RATNAM : Assesment of flank wear and nose wear from work-piece roughness in turning operation using machine vision. *Int J Adv Manuf Technol* 43, pages 11–21, 2009.
- [SRI<sup>+</sup>05] J.M. SÁNCHEZ, E. RUBIO, M. ÁLVAREZ, M.A. SEBASTIÁN et M. MARCOS : Micro-structural characterisation of material adhered over cutting tool in the dry machining of

aerospace aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165:911–918, mai 2005.

- [SSB06] Ramón Quiza SARDIÑAS, Marcelino Rivas SANTANA et Eleno Alfonso BRINDIS : Genetic algorithm-based multi-objective optimization of cutting parameters in turning processes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19(2):127–133, mars 2006.
- [TAN09] Somkiat TANGJITSITCHAROEN : In-process monitoring and detection of chip formation and chatter for cnc turning. *Journal of Materials Processing Technology 209*, pages 4682–4688, juin 2009.
- [TLP<sup>+</sup>09] Z.T. TANG, Z.Q. LIU, Y.Z. PAN, Y. WAN et X. AI : The influence of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(9):4502–4508, mai 2009.
- [TM99] Jeffrey D. THIELE et Shreyes N. MELKOTE : Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 94(2-3):216–226, septembre 1999.
- [TMS01] H. K. TONSHOFF, A. MOHFELD et C. SPENGLER : The coating in manufacturing engineering. 2001.
- [TRA07] TRAMETAL : Usinage à sec : Technologie à prendre en compte. 2007.
- [TRE88] E.M. TRENT : Metal cutting and the tribology of seizure : II movement of work material over the tool in metal cutting. *Wear*, 128(1):47–64, novembre 1988.
- [TY04] Zafer TEKINER et Sezgin YESILYURT : Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 25(6):507–513, septembre 2004.
- [VID94] Société Française Du VIDE : Cours d'obtention des couches minces, 1994.
- [VPC07a] K. A VENUGOPAL, S PAUL et A. B CHATTOPADHYAY : Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling. *Wear 262*, pages 1071–1078, avril 2007.
- [VPC07b] K.A. VENUGOPAL, S. PAUL et A.B. CHATTOPADHYAY : Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy. *Cryogenics*, 47(1):12–18, 2007.
- [WAN01] J. WANG : Development of a chip flow model for turning operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(9):1265–1274, 2001.
- [WM95] J. WANG et P. MATHEW : Development of a general tool model for turning operations based on a variable flow stress theory. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(1):71–90, 1995.

- [XA09] M. Anthony XAVIOR et M. ADITHAN : Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2):900–909, 2009.
- [YAN01] L. J. YANG : Determination of the wear coefficient of tungsten carbide by a turning operation. *Wear* 250, pages 366–375, octobre 2001.
- [YN08] Yakup YILDIZ et Muammer NALBANT : A review of cryogenic cooling in machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(9):947–964, 2008.
- [YT77] Naherheim Y et E. M. TRENT : Diffusion wear of cemented carbide tools when cutting steel at high speeds. pages 548–555, 1977.
- [ÖZ03] Tugrul ÖZEL : Modeling of hard part machining : effect of insert edge preparation in CBN cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 141(2):284–293, octobre 2003.
- [ZHO01] L ZHOU : *Machining Chip-Breaking prediction with Grooved Inserts in Steel Turning*. Worcester polytechnic institute, 2001.



Le modèle de rugosité arithmétique  $Ra$  est donné par l'expression équation 3.1 :

$$Ra_{th} = \frac{1}{L} \int |Y(x)| dx.$$

Soit  $Y(x)$  : est la somme des surfaces,  $L$  est l'avance  $f$ .

Pour trouver le modèle de  $Ra_{th}$  nous devons trouver les surface S1, S2, et S3.

– calcul de surface S1 :

S1 = surface de rectangle ABSD - surface de triangle AMD - surface circulaire ABC.

A partir de la figure (7.1) on trouve que :

$$a = R\varepsilon * \sin(Kr')$$

$$\Delta 1 = R\varepsilon * (1 - \cos(Kr'))$$

La surface S1 devient :

$$S1 = R\varepsilon^2 \left[ \sin(Kr') - \frac{1}{2} \sin(Kr') \cos(Kr') - \frac{Kr'}{2} \right]$$

Nous avons l'expression suivante :  $\sin(2Kr') = 2 * \sin(Kr') * \cos(Kr') \Rightarrow \sin(Kr') * \cos(Kr') = \frac{1}{2} \sin(2Kr')$

Nous obtenons

$$S1 = R\varepsilon^2 \left[ \sin(Kr') - \frac{1}{4} \sin(2Kr') - \frac{Kr'}{2} \right] \quad (7.1)$$

– Calcul de surface S2 :

D'après la figure (7.1), nous avons :

$$\Delta 2 = \Delta 1 + b * \tan(Kr') \quad (7.2)$$

$$\Delta 1 = R\varepsilon (1 - \cos(Kr'))$$

$$\Delta 2 = R\varepsilon (1 - \cos(\xi))$$

$$b = f - R\varepsilon * \sin(Kr') - R\varepsilon * \sin(\xi)$$

En remplissant les équations précédentes dans l'équation 7.2 nous trouvons que :

$$R\varepsilon - R\varepsilon * \text{Cos}(\xi) = R\varepsilon - R\varepsilon * \text{Cos}(Kr') + [f - R\varepsilon * \text{Sin}(Kr') - R\varepsilon * \text{Sin}(\xi)] * \text{Tan}(Kr')$$

$$\text{Tan}(Kr') * \text{Sin}(\xi) - \text{Cos}(\xi) = \frac{f * \text{Sin}(Kr') - R\varepsilon}{R\varepsilon * \text{Cos}(Kr')}$$

Nous avons l'expression suivante :  $A * \text{Sin}(\xi) - B * \text{Cos}(\xi) = C$ , Supposons que :  $r = \sqrt{A^2 + B^2}$ .

La solution de cette équation est de forme :  $\text{Sin}(\xi - C) = \frac{C}{r}$

Nous obtenons l'angle  $\xi$  en fonction des données  $(f, R\varepsilon, Kr')$  :

$$\xi = \text{ArcCos} \left[ 1 - \frac{f * \text{Sin}(Kr')}{R\varepsilon} \right] - Kr' \quad (7.3)$$

La surface S2 est donnée par l'expression suivante :  $S2 = \Delta 1 * b + \frac{b}{2} * (\Delta 2 - \Delta 1) \Rightarrow S2 = \frac{b^2}{2} * \text{Tan}(Kr')$

$$S2 = \frac{[f - R\varepsilon * \text{Sin}(Kr') - R\varepsilon * \text{Sin}(\xi)]^2}{2} * \text{Tan}(Kr') \quad (7.4)$$

– Calcul de surface S3 :

A partir de la figure (7.1), nous remarquons que :

S3 = surface de rectangle EFGH - surface de triangle EFN - surface circulaire FGN.

$$S3 = R\varepsilon * C - \frac{1}{2} * C * (R\varepsilon - \Delta 2) - \frac{R\varepsilon^2 * \xi}{2}$$

$$C = R\varepsilon * \text{Sin}(\xi)$$

$$S3 = R\varepsilon^2 * \text{Sin}(\xi) - \frac{R\varepsilon^2}{2} * \xi - \frac{1}{2} * R\varepsilon^2 * \text{Sin}(\xi) * \text{Cos}(\xi)$$

$$S3 = R\varepsilon^2 * \left[ \text{Sin}(\xi) - \frac{\xi}{2} - \frac{1}{4} * \text{Sin}(2\xi) \right] \quad (7.5)$$

Dans le cas où  $a = R\varepsilon * \text{Sin}(Kr') = \frac{f}{2}$ , alors on a  $S2 = 0$  et  $\xi = Kr'$ .

Pour trouver le modèle de  $Ra$  théorique il faut trouver d'abord la ligne moyenne (origine). Pour cela, nous choisissons un déplacement  $\Psi$  : déplacement de l'origine de repère.

– Cas où  $\Psi < \Delta 1$  :

Nous allons calculer la surface totale en fonction de  $\Psi$  :

L'angle  $\alpha = \text{ArcCos}\left(\frac{R\varepsilon - \Psi}{R\varepsilon}\right)$

$$S_{tot1}(\Psi) = 2 * \left[ \frac{R\varepsilon^2 * \alpha}{2} - \frac{1}{2} * (R\varepsilon - \Psi) * \sqrt{2 * R\varepsilon * \Psi - \Psi^2} \right] + S1 - a * \Psi$$

$$S_{tot2}(\Psi) = S2 - b * \Psi$$

$$S_{tot3}(\Psi) = 2 * \left[ \frac{R\varepsilon^2 * \alpha}{2} - \frac{1}{2} * (R\varepsilon - \Psi) * \sqrt{2 * R\varepsilon * \Psi - \Psi^2} \right] + S3 - c * \Psi$$

- Dans le cas où  $\Psi > \Delta 1$  :

$$S_{tot1}(\Psi) = a * \Psi - S1 \quad (7.6)$$

$$S_{tot2}(\Psi) = S2 - b * \Delta 1 - \left( b - \frac{(\Psi - \Delta 1)}{\text{Tan}(Kr')} \right) * (\Psi - \Delta 1) \quad (7.7)$$

$$S_{tot3}(\Psi) = R\varepsilon^2 \text{ArcCos}\left(\frac{R\varepsilon - \Psi}{R\varepsilon}\right) - (R\varepsilon - \Psi) * \sqrt{2 * R\varepsilon * \Psi - \Psi^2} + S3 - c * \Psi \quad (7.8)$$

Maintenant, nous allons calculer  $\Psi$  :

$\Psi$  se détermine tel que la somme de  $S_{tot1}(\Psi) + S_{tot2}(\Psi) + S_{tot3}(\Psi)$  soit minimale.

Nous calculons les dérivées des surfaces par rapport à  $\Psi$  :

$$\frac{dS_{tot1}}{d\Psi} = a, \quad \frac{dS_{tot2}}{d\Psi} = -b + \frac{2 * (\Psi - \Delta 1)}{\text{Tan}(Kr')} = -b + \frac{2 * \Psi}{\text{Tan}(Kr')} - \frac{2 * \Delta 1}{\text{Tan}(Kr')}.$$

$\frac{d(R\varepsilon^2 \text{ArcCos}(\frac{R\varepsilon - \Psi}{R\varepsilon}))}{d\Psi} = \frac{-R\varepsilon^2}{\sqrt{2 * R\varepsilon * \Psi - \Psi^2}}, \quad \frac{d[(R\varepsilon - \Psi) * \sqrt{2 * R\varepsilon * \Psi - \Psi^2}]}{d\Psi} = \frac{-R\varepsilon^2 - 2 * (2 * R\varepsilon * \Psi - \Psi^2)}{\sqrt{2 * R\varepsilon * \Psi - \Psi^2}}$ . Alors nous trouvons la dérivée de  $S_{tot3}$

$$\frac{dS_{tot3}}{d\Psi} = \frac{+2 * (2 * R\varepsilon * \Psi - \Psi^2)}{\sqrt{2 * R\varepsilon * \Psi - \Psi^2}} - c = \frac{2 * (\sqrt{2 * R\varepsilon * \Psi - \Psi^2} * \sqrt{2 * R\varepsilon * \Psi - \Psi^2})}{\sqrt{2 * R\varepsilon * \Psi - \Psi^2}} - c$$

Nous trouvons que :  $\frac{dS_{tot3}}{d\Psi} = 2 * \sqrt{2 * R\varepsilon * \Psi - \Psi^2} - c$

Pour trouver  $\Psi_0$  il faut que :  $\frac{dS_{tot1}}{d\Psi} + \frac{dS_{tot2}}{d\Psi} + \frac{dS_{tot3}}{d\Psi} = 0$



$$a - b + \frac{2*\Psi}{\tan(Kr')} - \frac{2*\Delta 1}{\tan(Kr')} - c + 2*\sqrt{2*R\epsilon*\Psi - \Psi^2} = 0$$

Nous supposons que :  $a - b - c - \frac{2*\Delta 1}{\tan(Kr')} = D = \text{constant}$ .

$$D = R\epsilon * \sin(Kr') - f + R\epsilon * \sin(Kr') + R\epsilon * \sin(\xi) - R\epsilon * \sin(\xi) - \frac{2*[R\epsilon - R\epsilon * \cos(Kr')]}{\tan(Kr')}$$

Le constant D devient :

$$D = 2 * R\epsilon * \sin(Kr') - f - \frac{2 * [R\epsilon - R\epsilon * \cos(Kr')]}{\tan(Kr')} \quad (7.9)$$

Nous avons  $D - \frac{2*\Psi}{\tan(Kr')} + 2*\sqrt{2*R\epsilon*\Psi - \Psi^2} = 0$

Cette équation est de la forme suivante :  $\left(\frac{4}{\tan^2(Kr')} + 4\right) \Psi^2 + \left(\frac{4*D}{\tan(Kr')} - 8 * R\epsilon\right) \Psi + D^2 = 0$

Cette équation est de la forme de  $A\Psi^2 + B\Psi + M = 0$

On va calculer  $\Delta$  :  $\Delta = B^2 - 4 * A * M \Rightarrow \sqrt{\Delta} = \sqrt{64 * R\epsilon^2 - \frac{64*D*R\epsilon}{\tan(Kr')} - 16 * D^2}$

La solution est donnée par l'expression suivante :

$$\Psi_0 = \frac{-\frac{4*D}{\tan(Kr')} + 8 * R\epsilon \pm \sqrt{64 * R\epsilon^2 - \frac{64*D*R\epsilon}{\tan(Kr')} - 16 * D^2}}{2 * \left(\frac{4}{\tan^2(Kr')} + 4\right)} \quad (7.10)$$

Nous allons remplacer l'expression 7.9 dans l'expression 7.10 pour trouver  $\Psi_0$  en fonction de  $f$ ,  $R\epsilon$ , et  $Kr'$ .

En remplaçant l'expression 7.10 dans les équations 7.6, 7.7, et 7.8 pour trouver  $S_{tot1}(\Psi_0)$ ,  $S_{tot2}(\Psi_0)$ , et  $S_{tot3}(\Psi_0)$ .

L'état de surface est donnée par l'expression :

$$Ra_{th} = \frac{1}{f} * [S_{tot1}(\Psi_0) + S_{tot2}(\Psi_0) + S_{tot3}(\Psi_0)] \quad (7.11)$$

Pour trouver  $Rt_{th}$ , nous avons  $\Delta 2 = Rt_{th}$ .

$$Rt_{th} = R\epsilon - R\epsilon * \sin(\xi) \quad (7.12)$$

– Cas d'usinage avec une plaquette  $55^\circ$  :

La figure (7.2) montre les détail de la zone de coupe durant l'usinage avec une plaquette  $55^\circ$  où il y a que la section circulaire qui intervient dans le profil de  $Ra$  et  $Rt$ .

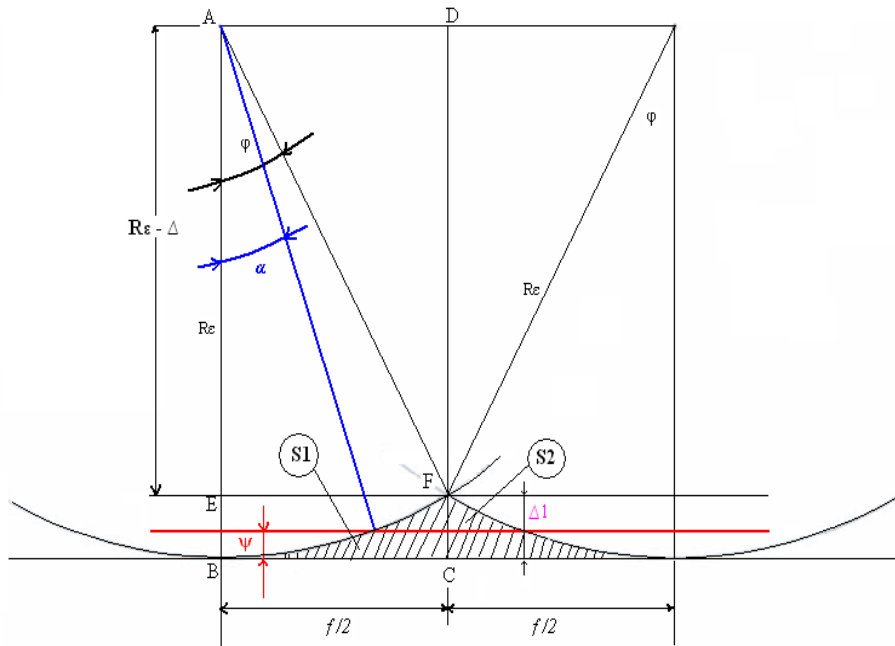


FIGURE 7.2 – Détails de la zone de coupe durant l’usinage avec une plaquette 55°.

Le modèle théorique de  $Ra_{th}$  est donné par l’équation 3.1 :

$$Ra_{th} = \frac{1}{L} \int |Y(x)| dx$$

A partir de cette figure, on va calculer l’angle  $\varphi$  :

$$\sin(\varphi) = \frac{\frac{f}{2}}{R\epsilon} \Rightarrow \varphi = \text{ArcSin}\left(\frac{f}{2 * R\epsilon}\right) \quad (7.13)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{(R\epsilon - \Delta 1)}{R\epsilon} \Rightarrow (R\epsilon - \Delta 1) = R\epsilon * \cos(\varphi)$$

$$\Delta 1 = R_{th} = R\epsilon * [1 - \cos(\varphi)]$$

$$R_{th} = R\epsilon * \left[1 - \cos\left(\text{ArcSin}\left(\frac{f}{2 * R\epsilon}\right)\right)\right] \quad (7.14)$$

Pour trouver la rugosité arithmétique  $Ra_{th}$ , Nous devons calculer les deux surfaces S1 et S2.

Nous avons  $S1 = S2$

$S1 =$  Surface de rectangle [ABCD] - surface circulaire [ABG] - surface de triangle [AGD].

$$S1 = \frac{R\epsilon * f}{2} - \frac{R\epsilon^2 * \varphi}{2} - \frac{f}{4} * (R\epsilon - R_{th})$$

$$S1 = \frac{R\epsilon * f}{2} - \frac{R\epsilon^2 * \varphi}{2} - \frac{f}{4} * R\epsilon * \cos(\varphi)$$

$$S1 = \frac{R\epsilon}{2} * \left[ f - R\epsilon * \varphi - \frac{f}{2} * \cos(\varphi) \right] \quad (7.15)$$

Pour trouver le modèle théorique de  $Ra_{th}$  il faut trouver d'abord la ligne moyenne (origine). Nous allons choisir un déplacement  $\Psi$  ce déplacement crée un angle  $\alpha$ .

$$\alpha = \text{ArcCos} \left( \frac{R\epsilon - \Psi}{R\epsilon} \right)$$

Nous allons calculer la surface  $S_{tot1}$  et  $S_{tot2}$

$$S_{tot1} = S_{tot2} = R\epsilon^2 * \alpha - (R\epsilon - \Psi) * \sqrt{2 * R\epsilon * \Psi - \Psi^2} + S1 - \Psi * \frac{f}{2}$$

$$S_{tot1} = S_{tot2} = R\epsilon^2 * \text{ArcCos} \left( \frac{R\epsilon - \Psi}{R\epsilon} \right) - (R\epsilon - \Psi) * \sqrt{2 * R\epsilon * \Psi - \Psi^2} + S1 - \Psi * \frac{f}{2} \quad (7.16)$$

Nous allons calculer  $\frac{d(S_{tot1})}{d\Psi}$  :

$$\frac{d(S_{tot1})}{d\Psi} = \frac{-R\epsilon^2}{\sqrt{2 * R\epsilon * \Psi - \Psi^2}} + \frac{R\epsilon^2 + 2 * (2 * R\epsilon * \Psi - \Psi^2)}{\sqrt{2 * R\epsilon * \Psi - \Psi^2}} - \frac{f}{2} = \frac{d(S_{tot1})}{d\Psi}$$

Pour trouver  $\Psi_0$  il faut que :  $\frac{d(S_{tot1})}{d\Psi} + \frac{d(S_{tot1})}{d\Psi} = 0$

$$2 * \frac{d(S_{tot1})}{d\Psi} = 0$$

$$4 * \sqrt{2 * R\epsilon * \Psi - \Psi^2} - f = 0$$

$$2 * R\epsilon * \Psi - \Psi^2 = \frac{f^2}{16}$$

La solution de cette équation de deuxième degré est

$$\Psi_0 = R\varepsilon \pm \sqrt{R\varepsilon^2 - \frac{f^2}{16}} \quad (7.17)$$

Nous allons remplacer l'équation 7.17 dans l'équation 7.16 pour trouver  $S_{tot1}(\Psi_0)$  et  $S_{tot2}(\Psi_0)$

La rugosité arithmétique  $Ra_{th}$  de surface se calcul par l'expression suivante :

$$Ra_{th} = \frac{1}{f} * [2 * S_{tot1}(\Psi_0)] \quad (7.18)$$

### Calcul de l'angle d'écoulement du copeau

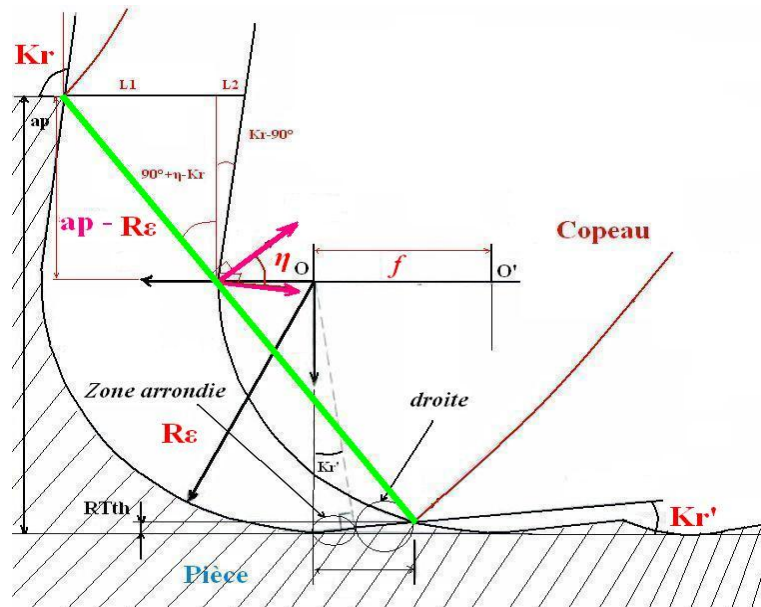


FIGURE 7.3 – Démonstration de l'angle d'écoulement du copeau.

– Cas où  $a_p > R\varepsilon$  :

D'après la figure (7.3), nous trouvons que :

$$\tan \left[ Kr - \frac{\pi}{2} \right] = \frac{L2}{a_p - R\varepsilon} \Rightarrow L2 = \tan \left[ Kr - \frac{\pi}{2} \right] * (a_p - R\varepsilon)$$

$$\tan \left[ \frac{\pi}{2} + (\eta - Kr) \right] = \frac{L1}{a_p - R\varepsilon} \Rightarrow L1 = \tan \left[ \frac{\pi}{2} + (\eta - Kr) \right] * (a_p - R\varepsilon)$$

Nous avons aussi  $L1 + L2 = f$ .

Nous obtenons :  $(a_p - R\epsilon) * \left[ \text{Tan} \left[ \frac{\pi}{2} + (\eta - Kr) \right] + \text{Tan} \left[ Kr - \frac{\pi}{2} \right] \right] = f$

$$\frac{\pi}{2} + \eta - Kr = \text{ArcTan} \left[ \frac{f}{a_p - R\epsilon} - \text{Tan} \left[ Kr - \frac{\pi}{2} \right] \right]$$

L'expression de l'angle d'écoulement du copeau devient :

$$\eta = Kr - \frac{\pi}{2} + \text{ArcTan} \left[ \frac{f}{a_p - R\epsilon} - \text{Tan} \left[ Kr - \frac{\pi}{2} \right] \right] \quad (7.19)$$

Ce modèle est validé pour les deux cas d'usinage (plaquettes rhombiques à 55° et 80°) à condition que  $a_p > R\epsilon$ .

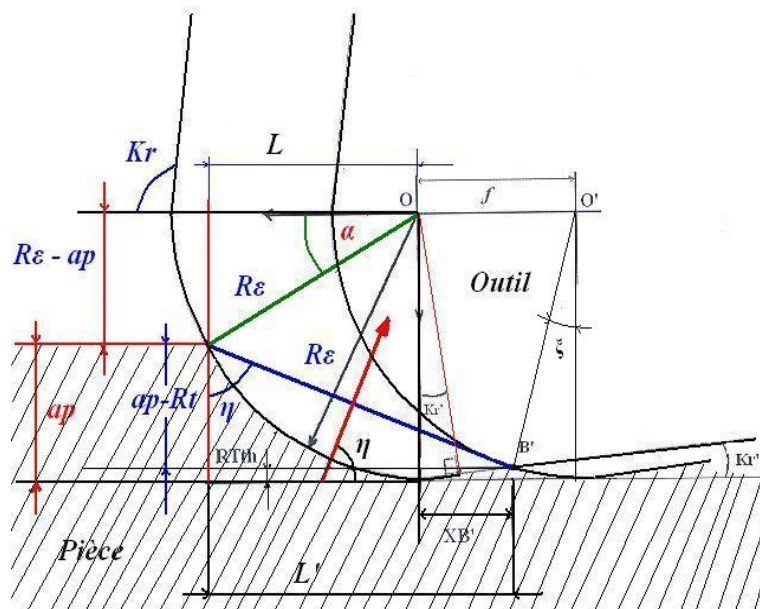


FIGURE 7.4 – Démonstration de l'angle d'écoulement du copeau cas  $a_p < R\epsilon$ .

– Cas où  $a_p < R\epsilon$  :

D'après la figure (7.4), on va calculer l'angle  $\alpha$  :

$$\text{Sin}(\alpha) = \frac{R\epsilon - a_p}{R\epsilon} \Rightarrow \alpha = \text{ArcSin} \left[ \frac{R\epsilon - a_p}{R\epsilon} \right]$$

En appliquant la théorie de Pythagore, on trouve que :

$$L = \sqrt{2 * R\epsilon * a_p - a_p^2}$$

Aussi, nous pouvons calculer la distance  $L$  par l'équation suivante :

$$L = R\varepsilon * \text{Cos} \left[ \text{ArcSin} \left[ \frac{R\varepsilon - a_p}{R\varepsilon} \right] \right]$$

$$L' = L + XB'$$

$$\text{Tan}(\eta) = \frac{L'}{a_p - R_{t_{th}}} = \frac{\sqrt{2 * R\varepsilon * a_p - a_p^2} + XB'}{a_p - R_{t_{th}}}$$

En regardant la figure (7.1) on remarque que :  $XB' = a + b = R\varepsilon * \text{Sin}(Kr') + f - R\varepsilon * \text{Sin}(Kr') - R\varepsilon * \text{Sin}(\xi)$

Nous trouvons :

Dans le cas où  $\xi > Kr'$ , on a  $XB' = f - R\varepsilon * \text{Sin}(\xi)$ . Ce cas est appliqué dans notre cas où les plaquettes utilisées sont des plaquettes rhombique à  $80^\circ$

Mais dans le cas où  $\xi = Kr'$ , on a  $XB' = \frac{f}{2}$

En remplissant  $R_{t_{th}}$  de l'équation 7.12 nous trouvons dans le cas de  $\xi > Kr'$  que :

$$\eta = \text{ArcTan} \left[ \frac{\sqrt{2 * R\varepsilon * a_p - a_p^2} + f - R\varepsilon * \text{Sin}(\xi)}{a_p - R\varepsilon + R\varepsilon * \text{Cos}(Kr')} \right] \quad (7.20)$$

Mais dans l'autre cas où  $\xi = Kr'$  (cas de la plaquette rhombique à  $55^\circ$ ) et ( $a_p < R\varepsilon$ ) on obtient le modèle suivant de l'angle d'écoulement des copeaux :

$$\eta = \text{ArcTan} \left[ \frac{2 * \sqrt{2 * a_p * R\varepsilon - a_p^2} + f}{2 * [a_p - R\varepsilon + R\varepsilon * \text{Cos}(Kr')]} \right]$$

## **7.2 Faces de coupe des plaquettes**

– Usinage de AA 2017 T4 à  $V_c = 600$  m/min :















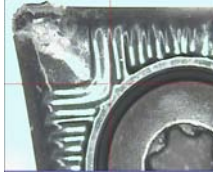









Vc = 600 m/min, $a_p$ = 2 mm, $f$ = 0.5 mm/tr		Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	S4 / sec	O1 / sec	O1 / lub	
6.02				
12.93				
18.44				
24.30				
30.58				
36.55				
40.49				
49				

TABLE 7.1 – Faces de coupe des plaquettes (O1 et S4) durant l’usinage de AA 1070 T4 à une vitesse Vc = 600 m/min.

– Usinage de AA 1070 T4 à Vc = 100 m/min :



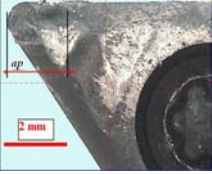
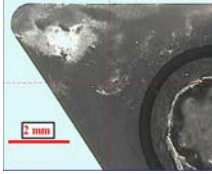

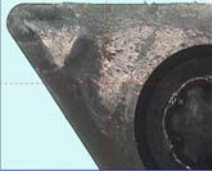
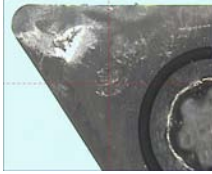

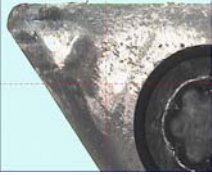
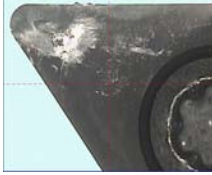

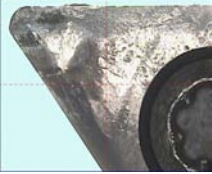
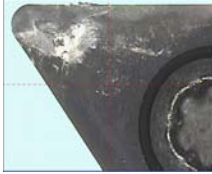

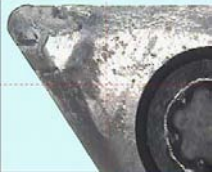
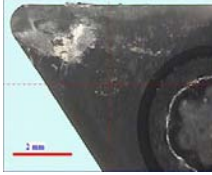

$V_c = 100 \text{ m/min}, a_p = 2 \text{ mm}, f = 0.5 \text{ mm/tr}$	Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	S2 / sec	S3 / sec	O1 / sec
3.74			
11.21			
18.69			
26.16			
30			

TABLE 7.2 – Faces de coupe des plaquettes (S2, S3, et O1) durant l’usinage de AA 2017 T4 à une vitesse  $V_c = 100 \text{ m/min}$ .

– Usinage de AA 2017 T4 et AA 7075 T651 à  $V_c = 400 \text{ m/min}$  :

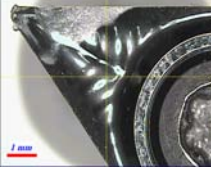

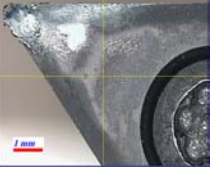






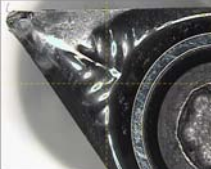
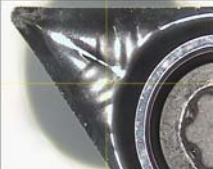







Vc = 400 m/min	Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	O2 / sec	O2 / lub	S1 / sec
8			
16			
25			
33			
41			
50			

TABLE 7.3 – Faces de coupe des plaquettes (I1, O2, et S1) durant l’usinage de AA 2017 T4 à une vitesse Vc = 400 m/min.


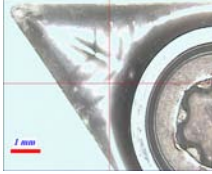
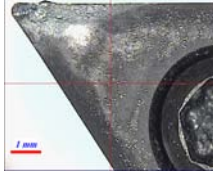


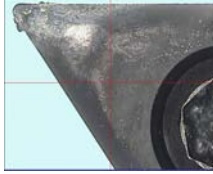

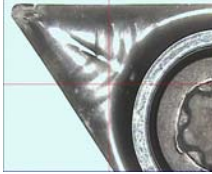





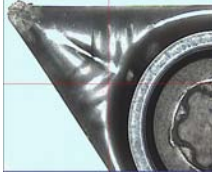
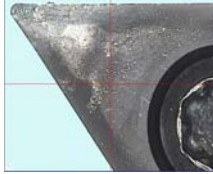


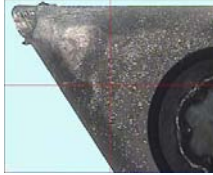
Vc = 400 m/min, ap = 1 mm, f = 0.24 mm/tr		Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	O2 / sec	O2 / lub	S1 / sec	
8				
16				
25				
33				
41				
50				

TABLE 7.4 – Faces de coupe des plaquettes (O2 et S1) durant l’usinage de AA 7075 T651 à une vitesse Vc = 400 m/min.

– Usinage de AA 2017 T4 et AA 7075 T651 à Vc = 800 m/min :

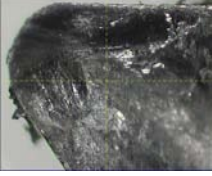
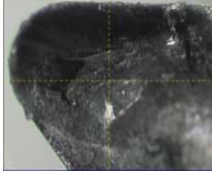
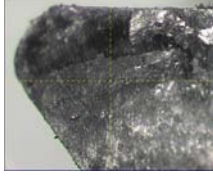
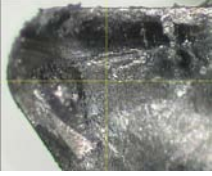
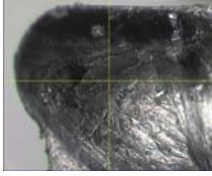
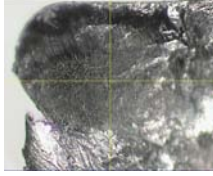
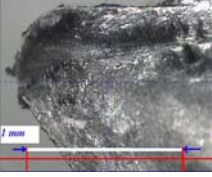
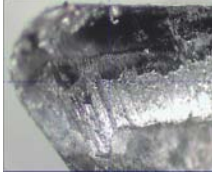

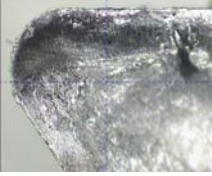
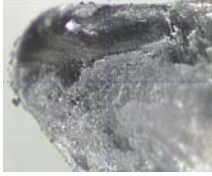
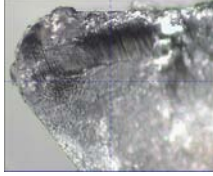

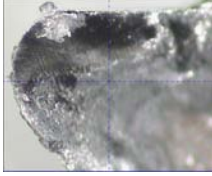
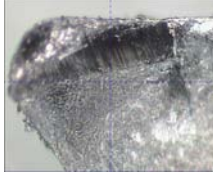
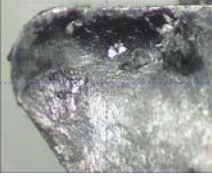
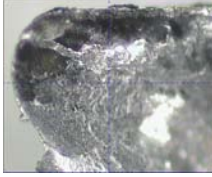
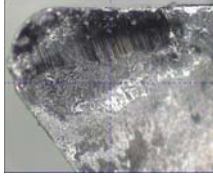
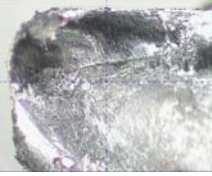
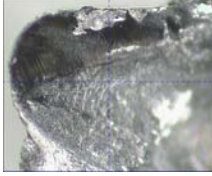

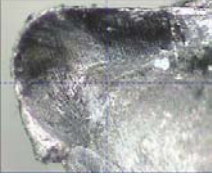

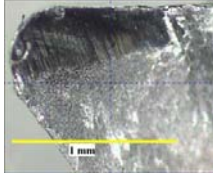
Vc = 800 m/min, $a_p$ = 1 mm, $f$ = 0.24 mm/tr		Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	I1 / sec	O2 / sec	S1 / sec	
10				
20				
30				
50				
60				
70				
80				
90				

TABLE 7.5 – Faces de coupe des plaquettes (I1, O2, et S1) durant l’usinage de AA 2017 T4 à une vitesse Vc = 800 m/min.

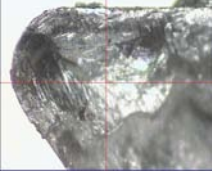
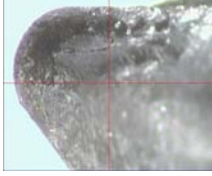
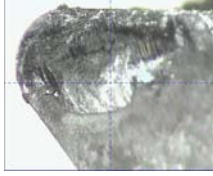
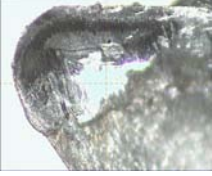
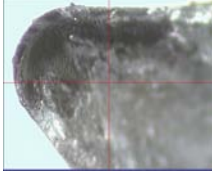


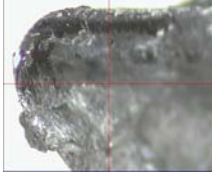

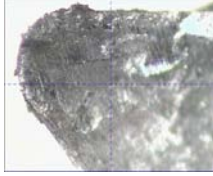
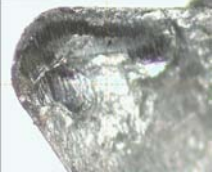
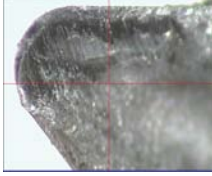

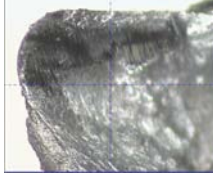
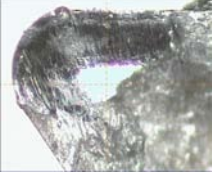

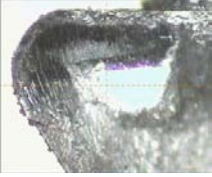
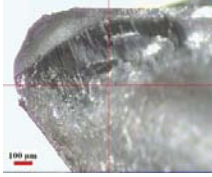
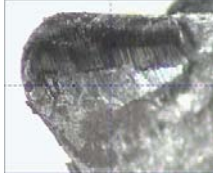
Vc = 800 m/min, $a_p$ = 1 mm, $f$ = 0.24 mm/tr		Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	I1 / sec	O2 / sec	S1 / sec	
10				
20				
30				
50				
60				
70				
80				
90				

TABLE 7.6 – Faces de coupe des plaquettes (I1, O2, et S1) durant l’usinage de AA 7075 T651 à une vitesse Vc = 800 m/min.

– Usinage de AA 2017 T4 à Vc = 1200 m/min :

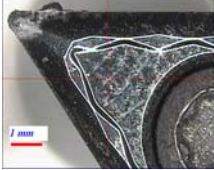
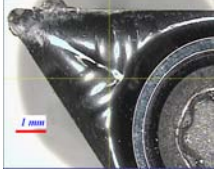

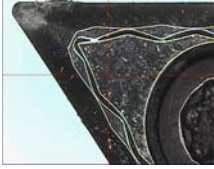





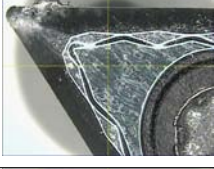





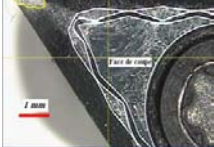
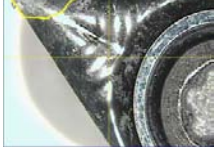

$V_c = 1200 \text{ m/min}$ , $a_p = 1 \text{ mm}$ , $f = 0.24 \text{ mm/tr}$	Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	I1 / sec	O2 / sec	S1 / sec
2.70			
5.15			
7.97			
10.54			
13.36			
16			

TABLE 7.7 – Faces de coupe des plaquettes (I1, O2, et S1) durant l’usinage de AA 2017 T4 à une vitesse  $V_c = 1200 \text{ m/min}$ .

### **7.3 Faces de dépouille des plaquettes**

– Usinage de AA 2017 T4 à  $V_c = 600$  m/min :

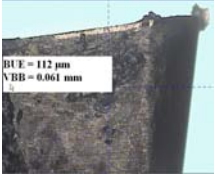
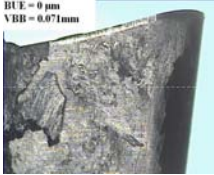

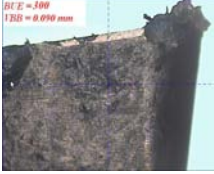








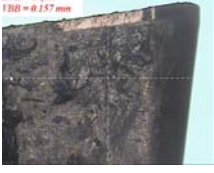








Vc = 600 m/min, $a_p$ = 2 mm, $f$ = 0.5 mm/tr		Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	S4 / sec	O1 / sec	O1 / lub	
6.02				
12.93				
18.44				
24.30				
30.58				
36.55				
40.49				
49				

TABLE 7.8 – Faces de dépouille des plaquettes (O1 et S4) durant l’usinage de AA 2017 T4 à une vitesse Vc = 600 m/min.

– Usinage de AA 2017 T4 à Vc = 100 m/min :



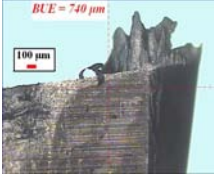
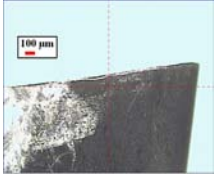

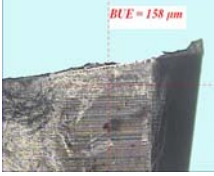
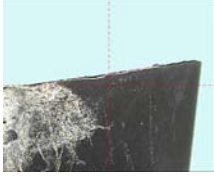
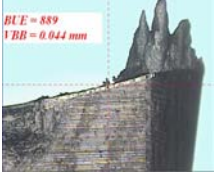

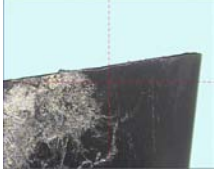
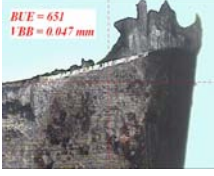

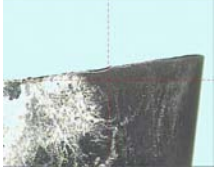
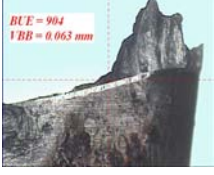

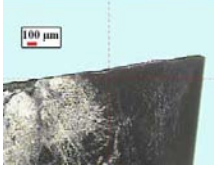

$V_c = 100 \text{ m/min}, a_p = 2 \text{ mm}, f = 0.5 \text{ mm/tr}$	Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	S2 / sec	S3 / sec	O1 / sec
3.74			
11.21			
18.69			
26.16			
30			

TABLE 7.9 – Faces de dépouille des plaquettes (S2, S3, et O1) durant l’usinage de AA 2017 T4 à une vitesse  $V_c = 100 \text{ m/min}$ .

– Usinage de AA 2017 T4 et AA 7075 T651 à  $V_c = 400 \text{ m/min}$  :

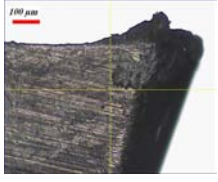
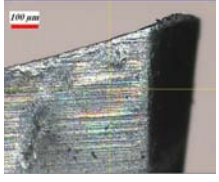

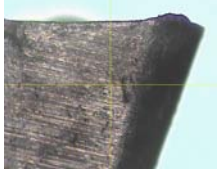
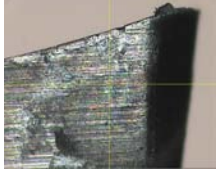
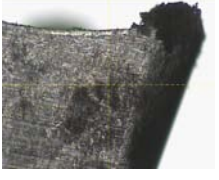

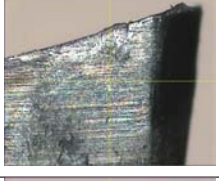


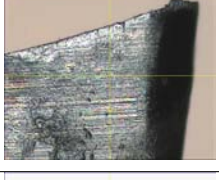


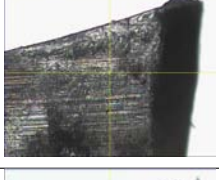


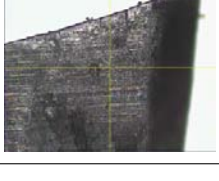

Vc = 400 m/min, $a_p = 1$ mm, $f = 0.24$ mm/tr			
Tc min	O2 / sec	O2 / lub	S1 / sec
8			
16			
25			
33			
41			
50			

TABLE 7.10 – Faces de dépouille des plaquettes (I1, O2, S1) durant l’usinage de AA 2017 T4 à une vitesse Vc = 400 m/min.

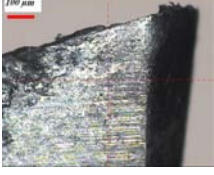
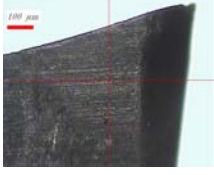

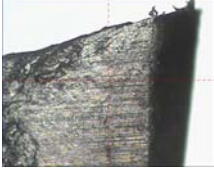
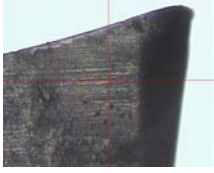
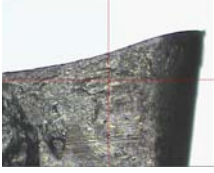
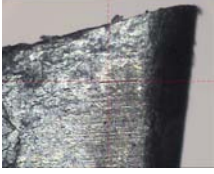
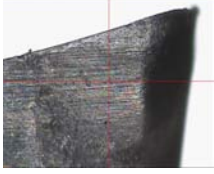
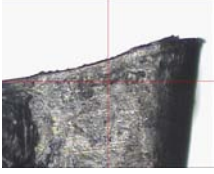
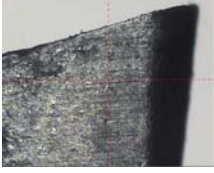
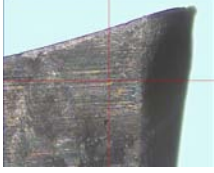
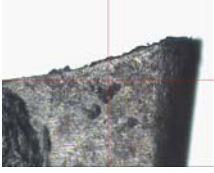
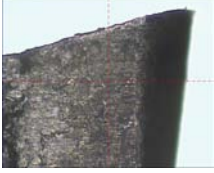
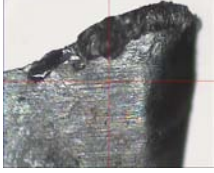
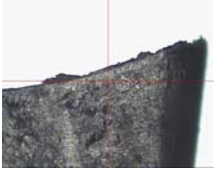

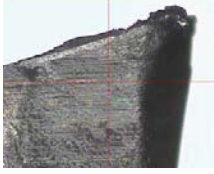

$V_c = 400 \text{ m/min}$ , $a_p = 1 \text{ mm}$ , $f = 0.24 \text{ mm/tr}$	Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	O2 / sec	O2 / lub	S1 / sec
8			
16			
25			
33			
41			
50			

TABLE 7.11 – Faces de dépouille des plaquettes (O2 et S1) durant l’usinage de AA 7075 T651 à une vitesse  $V_c = 400 \text{ m/min}$ .

– Usinage de AA 2017 T4 et AA 7075 T651 à  $V_c = 800 \text{ m/min}$  :

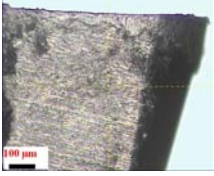

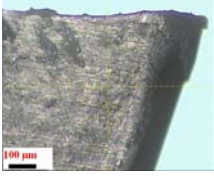
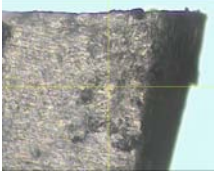
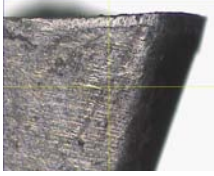
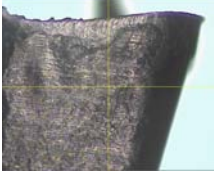
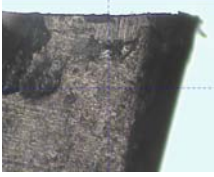
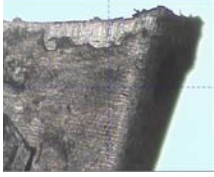
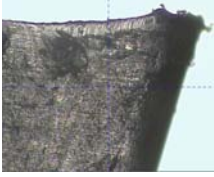
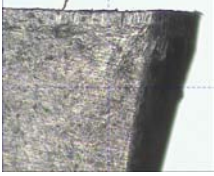
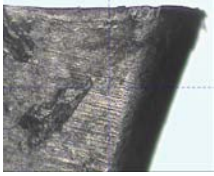

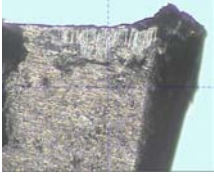

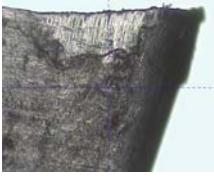
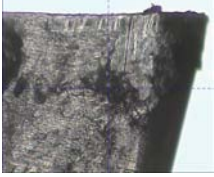
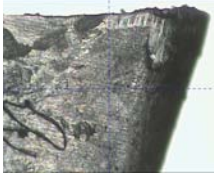

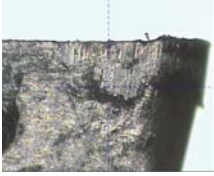



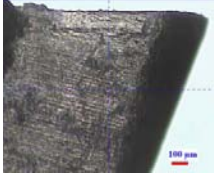

Vc = 800 m/min, $a_p$ = 1 mm, $f$ = 0.24 mm/tr		Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	I1 / sec	O2 / sec	S1 / sec	
10				
20				
30				
50				
60				
70				
80				
90				

TABLE 7.12 – Faces de dépouille des plaquettes (I1, O2, et S1) durant l’usinage de AA 1070 T4 à une vitesse Vc = 800 m/min.

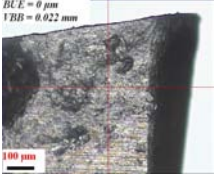
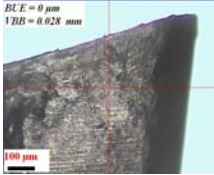
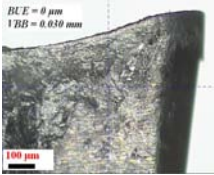
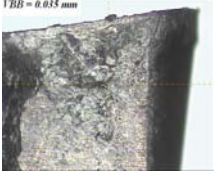
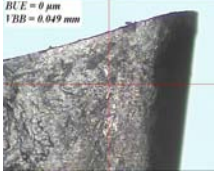
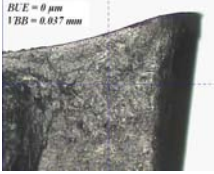
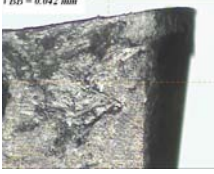
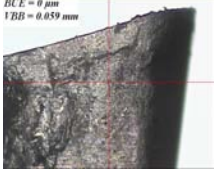
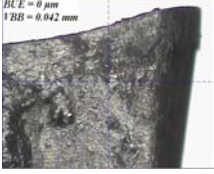
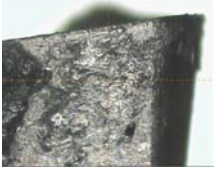
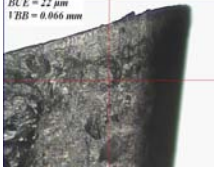
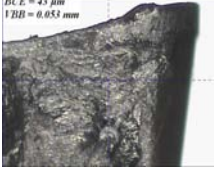

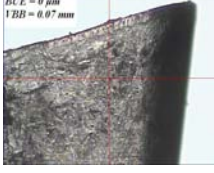
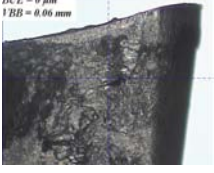

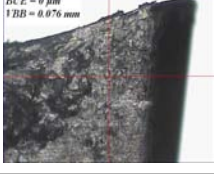
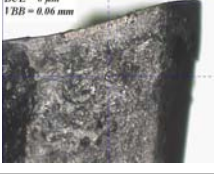

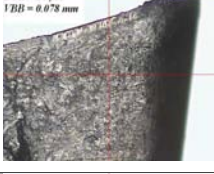
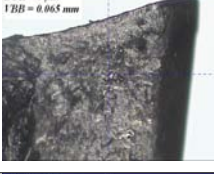



Vc = 800 m/min, ap = 1 mm, f = 0.24 mm/tr		Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	I1 / sec	O2 / sec	S1 / sec	
10				
20				
30				
50				
60				
70				
80				
90				

TABLE 7.13 – Faces de dépouille des plaquettes (I1, O2, et S1) durant l’usinage de AA 7075 T651 à une vitesse Vc = 800 m/min.

– Usinage de AA 2017 T4 à Vc = 1200 m/min :


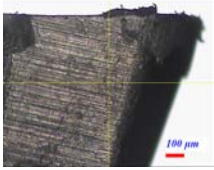
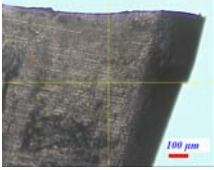
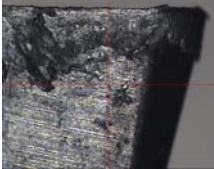
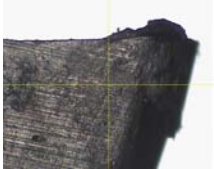
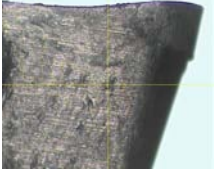
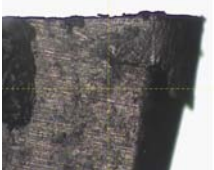


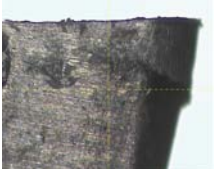
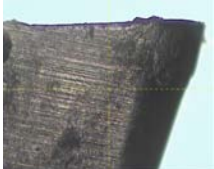
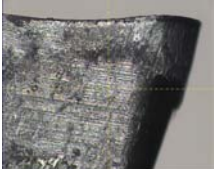

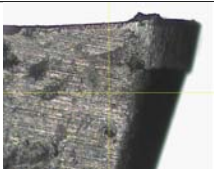
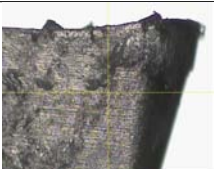

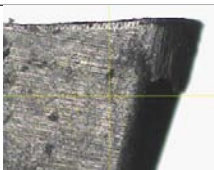
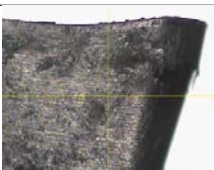
$V_c = 1200 \text{ m/min}$ , $a_p = 1 \text{ mm}$ , $f = 0.24 \text{ mm/tr}$	Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	I1 / sec	O2 / sec	S1 / sec
2.70			
5.15			
7.97			
10.54			
13.36			
16	 <i>Face de dévissage</i>		

TABLE 7.14 – Faces de dépouille des plaquettes (I1, O2, et S1) durant l’usinage de AA 2017 T4 à une vitesse  $V_c = 1200 \text{ m/min}$ .

## **7.4 Forme des copeaux**

– Usinage de AA 2017 T4 à  $V_c = 600$  m/min :

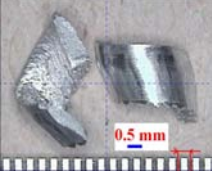
















Vc = 600 m/min, ap = 2 mm, f = 0.5 mm/tr		Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	S4 / sec	O1 / sec	O1 / lub	
6.02				
12.93				
18.44				
24.30				
30.58				
36.55				
40.49				
49				

TABLE 7.15 – Forme des copeaux durant l’usinage de AA 2017 T4 avec les plaquettes (S4, O1) à une vitesse Vc = 600 m/min.

– Usinage de AA 2017 T4 à Vc = 100 m/min :













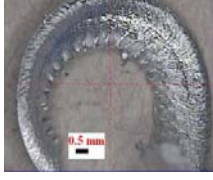

$V_c = 100 \text{ m/min}, a_p = 2 \text{ mm}, f = 0.5 \text{ mm/tr}$	Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	S2 / sec	S3 / sec	O1 / sec
3.74			
11.21			
18.69			
26.16			
30			

TABLE 7.16 – Forme copeaux durant l’usinage de AA 2017 T4 avec les plaquettes (S2, S3, et O1) à une vitesse  $V_c = 100 \text{ m/min}$ .

– Usinage de AA 2017 T4 et AA 7075 T651 à  $V_c = 400 \text{ m/min}$  :

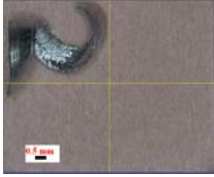











Vc = 400 m/min	Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	O2 / sec	S1 / sec	O2 / lub
8			
16			
25			
33			
41			
50			

TABLE 7.17 – Forme des copeaux durant l’usinage de AA 2017 T4 avec les plaquettes (I1, O2, et S1) à une vitesse Vc = 400 m/min.













$V_c = 400 \text{ m/min}, a_p = 1 \text{ mm}, f = 0.24 \text{ mm/tr}$	Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	O2 / sec	O2 / lub	S1 / sec
8			
16			
25			
33			
41			
50			

TABLE 7.18 – Forme des copeaux durant l’usinage de AA 7075 T651 avec les plaquettes (I1, O2, et S1) à une vitesse  $V_c = 400 \text{ m/min}$ .

– Usinage de AA 2017 T4 et AA 7075 T651 à  $V_c = 800 \text{ m/min}$  :




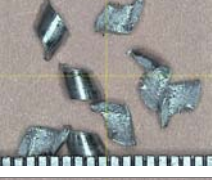




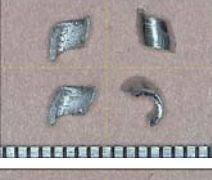

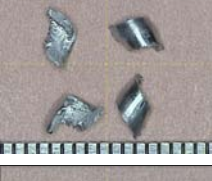
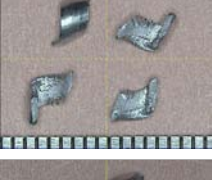







Vc = 800 m/min, $a_p$ = 1 mm, $f$ = 0.24 mm/tr		Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	I1 / sec	O2 / sec	S1 / sec	
10				
20				
30				
50				
60				
70				
80				
90				

TABLE 7.19 – Forme des copeaux durant l’usinage de AA 2017 T4 avec les plaquettes (I1, O2, et S1) à une vitesse Vc = 800 m/min.

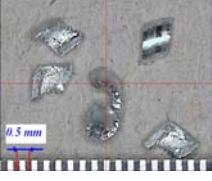















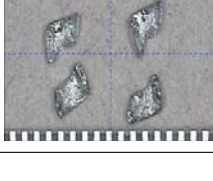
Vc = 800 m/min, $a_p$ = 1 mm, $f$ = 0.24 mm/tr		Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	I1 / sec	O2 / sec	S1 / sec	
10				
20				
30				
50				
60				
70				
80				
90				

TABLE 7.20 – Formes des copeaux durant l’usinage de AA 7075 T651 avec les plaquettes (I1, O2, et S1) à une vitesse Vc = 800 m/min.

– Usinage de AA 2017 T4 à Vc = 1200 m/min :







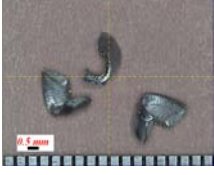






$V_c = 1200 \text{ m/min}$ , $a_p = 1 \text{ mm}$ , $f = 0.24 \text{ mm/tr}$	Images prises sur le projecteur de profil		
Tc min	I1 / sec	O2 / sec	S1 / sec
2.70			
5.15			
7.97			
10.54			
13.36			
16			

TABLE 7.21 – Forme des copeaux durant l’usinage de AA 2017 T4 avec les plaquettes (I1, O2, et S1) à une vitesse  $V_c = 1200 \text{ m/min}$ .

**ACMA 2010****12 - 14 Mai, 2010****Marrakech, Morocco.***Study On Parameters Affecting The Quality Of AA 2014 Parts And The Tool Service Life In Dry Turning*

---

*MOHAMMAD Rami, MONIES Frédéric, SEGONDS Stéphane, RUBIO Walter.*

Université de Toulouse ; INSA, UPS, Mines Albi, ISAE, ICA (Institut Clément Ader).  
Bât 3R1, 118 Route de Narbonne, F-31062 Toulouse Cedex 9.

---

*Résumé*

Le contexte de travail se situe dans l'usinage sans lubrification de l'alliage AA 2017 couramment utilisé dans l'industrie aéronautique. L'usinage sans lubrification occupe une place de plus en plus grande aujourd'hui car il présente un intérêt en supprimant la phase de dégraissage avant le traitement des copeaux. L'objectif principal de cette étude vise à étudier les phénomènes d'endommagement des outils de coupe par le collage de la matière usinée. Les fournisseurs d'outils proposent des plaquettes avec des géométries spécifiques à l'usinage des alliages d'aluminium (souvent un angle de coupe important et une nuance adaptée). Les plaquettes proposées dans le marché sont des plaquettes polies, non polies, revêtues, ou non revêtues. Cette étude donne une idée pour mieux appréhender le rôle de ces préparations de faces de coupe dans la qualité des pièces finies obtenues. L'étude de l'usure des plaquettes dans des conditions de collage très variables montre la création d'un cratère constant prouvant une usure par abrasion plutôt que par diffusion.

*Mots clés*

Usinage à sec, tournage, collage (BUE, BUL), usure d'outil, rugosité.

---