

**Université du 8 mai 1945 – Guelma**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de Génie Mécanique**



**Mémoire de fin D'études**  
**Pour l'obtention du diplôme de Master**

Option : conception et production industriel

Présenté par : FAKHET Mohamed Ouissem

=====

***Analyse et optimisation des efforts de coupe  
et qualité des pièces lors de l'usinage  
d'alliage d'aluminium 6061-T6***

=====

Sous la Direction de :

**Dr. Riad KHETTABI**

**Année universitaire 2014/2015**

## ***Remerciement***

*Je remercie dieu de ma avoir donné la force et le courage Ainsi que la volonté  
d'effectuer mon projet de fin de cycle.*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance au docteur **Riad KHETTABI** qui a  
su diriger ce mémoire avec intérêt et compétences, et qui a su me conseiller tout au  
long de cette période.*

*J'adresse aussi aux enseignantes de notre département de Génie mécanique toute ma  
reconnaissance pour m'avoir offert tout leur savoir et apporter leur soutien pour  
réaliser se travaille.*

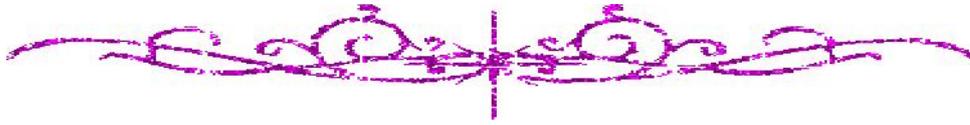
*J'exprime ma gratitude et mes remerciements à mes parents et toute ma famille pour  
leurs encouragements.*

*Je tiens à remercier vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font  
en acceptant de juger ce travail.*

*Merci à tous.....*



# Dedicace



*J'ai toujours pensé faire où offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti comme efforts, rien que pour me voir réussir, et voilà, l'occasion est venue.*

*A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.*

*A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance.*

- *A mes parents.*
- *A mon oncle **Rachid** et ma tante **Malika** qui ont eu un impacte important sur ma vie vous resterais tout jours dans mon cœur.*
  - ***Halima** le nouveau bout de choux de la famille.*
- *A Ma sœur **hind** et mes amis et cousins notamment **fares** et **ghafour** cousin et amis je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées.*
  - *A toute la famille **fakhet** ainsi que la famille **brahimi***
- *A tous mes oncles et tantes particulièrement **karima** et **mounira***
  - *A tous mes Amis **reda, abdou ; moundji et djambo** .*

*Fakhet mohamed wissem*



Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## **Chapitre I recherche bibliographiques**

I-1-Problématique.....	2
I-2-Objectifs.....	2
I-3-Méthodologie.....	2
I-4-Etat de l'art.....	3
I-5-Travaux de recherche sur l'usinage MQL et à sec.....	17
I-6- Conclusion.....	24

## **Chapitre II études expérimentales**

II-1-Introduction.....	25
II-2-Matériels utilisés.....	25
II-3-Le Montage Experimental.....	32
II-4-Système MQL tecnolub.....	32
II-5-Procédé MQL.....	35
II-6-Conclusion.....	38

## **Chapitre III discussion et résultats**

III-1-Introduction.....	39
III-2-Approche.....	39
III-3-Principe d'optimisation.....	39
III-4-résultats et analyse.....	40

### **A. Usinage conventionnel**

III-5-Résultat des expériences a sec et avec lubrification.....	41
-----------------------------------------------------------------	----

### **B. usinage a grande vitesse**

III-6-Essais MQL.....	43
III-7-Conclusion.....	46
Conclusion générale et perspectives.....	47
Références bibliographiques	

## **Introduction générale**

L'usinage par enlèvement de matière est une famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques. Le principe est d'enlever de la matière de manière à donner à la pièce brute la forme voulue, à l'aide d'une machine-outil. L'intérêt de cette technique est d'obtenir des pièces d'une grande précision. L'usinage est peut être couteux en terme de procédé et la perte de la matière à enlever. Le coût de fabrication peut se traduire : temps de cycle, surépaisseur de matière à enlever, usure de la machine-outil, consommables (outil, lubrifiant, énergie).

Le procédé d'usinage par enlèvement de copeaux se fait par action mécanique d'un outil coupant. La force appliquée induit la formation, d'un ou plusieurs copeaux. L'outil va mettre en forme la pièce usinée par passes successives. Cette opération d'usinage est réalisée sur une machine-outil.

Afin de demeurer compétitif, il est nécessaire d'optimiser en continue les techniques de fabrication. Les lubrifiants sont supposés d'améliorer la qualité des pièces, évacuer les copeaux et réduire l'usure des outils. Par contre, les liquides de coupe coutent plus cher et peuvent êtres nocifs pour la santé et l'environnement. La réduction des fluides de coupe devient donc compliquée et nécessite une étude plus approfondie.

Ce travaille vise principalement l'usinage à sec et MQL afin de répondre aux exigences économiques, industrielles et environnementales. La problématique qui nous incite à développer ce travail ainsi que les objectifs visés et la méthodologie adoptée sont discutés dans le chapitre I. Dans le chapitre II le travaille sera réservai pour la recherche expérimentale soit le mâtèreau utilisé dans nos essais ainsi que le matériel et les paramètres d'usinage . Dans le dernier chapitre on va parler des résultats des expériences effectué sur le matériau d'aluminium 6061-T6 .

## **I-1-Problématique**

Les fluides de coupe sont utilisés en l'usinage pour réduire la friction, refroidir outil/pièce, évacuer le copeau et même protéger le couple outil/pièce contre la corrosion. L'application de fluide de coupe vise donc la réduction de l'usure de l'outil et la production des pièces de qualité meilleure. Cependant, l'application des fluides de coupe représente de 7 à 17% du cout de fabrication de la pièce, ce qui touche le coté économique. De plus, il a été prouvé par des études épidémiologiques que l'utilisation de fluides de coupe présente un danger énorme sur la sante des opérateurs et sur l'environnement en général.

La première solution proposée dans ce sens était de développer des fluides de coupe non toxiques et biodégradable. Malgré cela, il a été trouvé que les fluides de coupe augmentent la génération des aérosols fines et ultrafines lors de l'usinage qui cause des maladies plus au moins grave. De plus, le recyclage des copeaux lubrifiés nécessite des opérations additionnelles et ennuyeuses qui coutent plus cher en économie et en environnement. Il est donc nécessaire de penser à trouver d'autres alternatifs.

## **I-2-Objectifs**

Afin de résoudre cette problématique l'utilisation l'usinage à sec ou MQL peut être la meilleure solution afin d'avoir une productivité élevé ainsi que les performances et la qualité. Cependant l'usure et la qualité peut être pénalisés. Une optimisation pour chercher moins de cout et respecter santé et environnement tout en restant compétitif, doit être l'objectif principal.

## **I-3-Méthodologie**

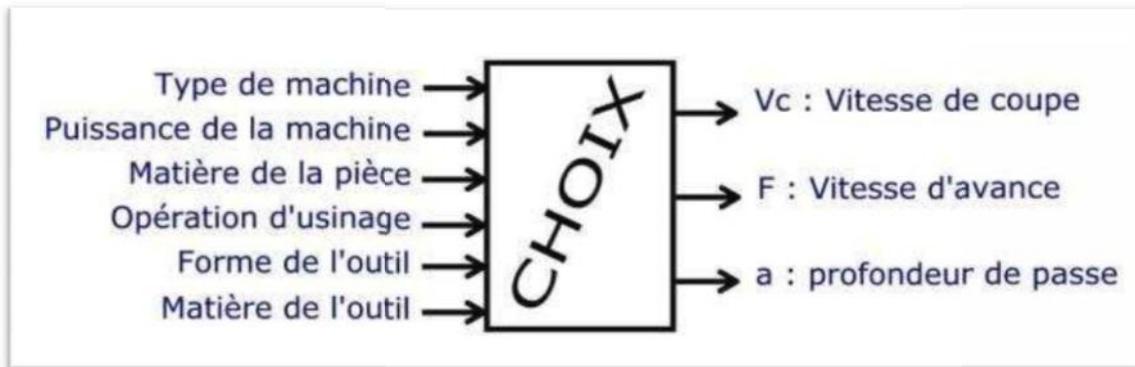
La méthodologie adoptée dans ce travail est d'aider à prendre la décision si on supprime le fluide complètement ou de le réduire au minimum. Un plan de travail doit être développé pour contrôler le débit de fluide de coupe afin de produire des pièces de qualité et de réduire la maximum de fluide.

Les étapes à suivre doivent passer par une bonne recherche bibliographique sur l'usinage écologique, à sec et MQL avant de d'effectuer des manipes en faisant varier le débit de fluide avec les différent paramètres de coupe. Les efforts de coupe ainsi que la rugosité seront mesurés afin de comparer les résultats. Une analyse sera donc nécessaire afin de développer des stratégies de coupe qui vise a produire des pièces de qualité tout en réduisant la consommation de l'énergie et les effets néfastes sur l'environnement et la santé.

## **I-4-Etat de l'art**

### **1-Paramètres de coupes**

Les paramètres de coupe sont, d'une part, des valeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres de coupe cinématiques) et, d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres de coupe géométriques). Les conditions de coupe sont une notion plus large qui inclut les paramètres géométriques et cinématiques de coupe en plus d'autres facteurs qui influencent l'usinage tels que le matériau usiné, le matériau et la géométrie de l'outil, le type de machine, la puissance de la machine et le type de l'opération. . [1]



**Figure I-1- Procès de coupe.[1]**

### **1.1-Vitesse de coupe**

Dans le cas du tournage, la vitesse de coupe constitue la grandeur cinématique de base du couple outil / pièce, elle correspond au déplacement (en mètres) effectué par un point de la pièce pendant une minute. La formule de calcul de la vitesse de coupe est donnée par la relation suivante :

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \text{ [m/min]}$$

D : diamètre de la pièce à usiner en (mm)

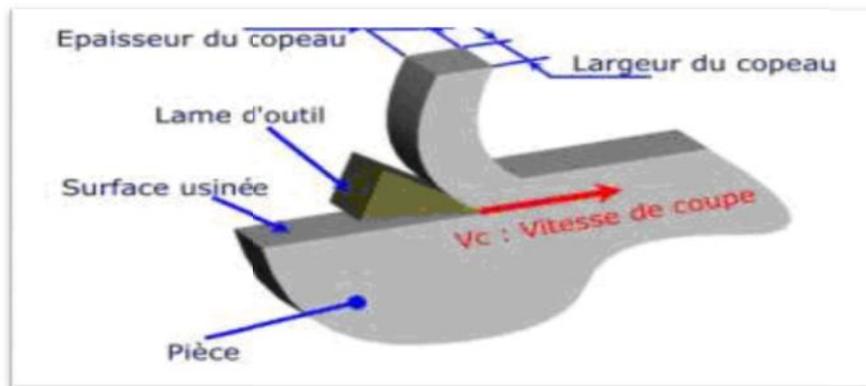
n : vitesse de rotation en (tr/min)

### **1.2-Vitesse d'avance**

Est la vitesse de déplacement de l'outil sur la trajectoire d'usinage. C'est cette trajectoire qu'il faut suivre afin que l'outil usine la forme souhaitée. Elle est exprimée en [mm/min]

### **1.3-Profondeur de passe**

La profondeur de passe est le volume de la matière enlevée qui dépend de l'engagement de l'outil dans la pièce. Elle est exprimée en [mm].



**Figure-I-2- Paramètres de coupe. [1]**

## **2. Indicateurs de performances en usinage**

### **2.1-Rugosité de surface**

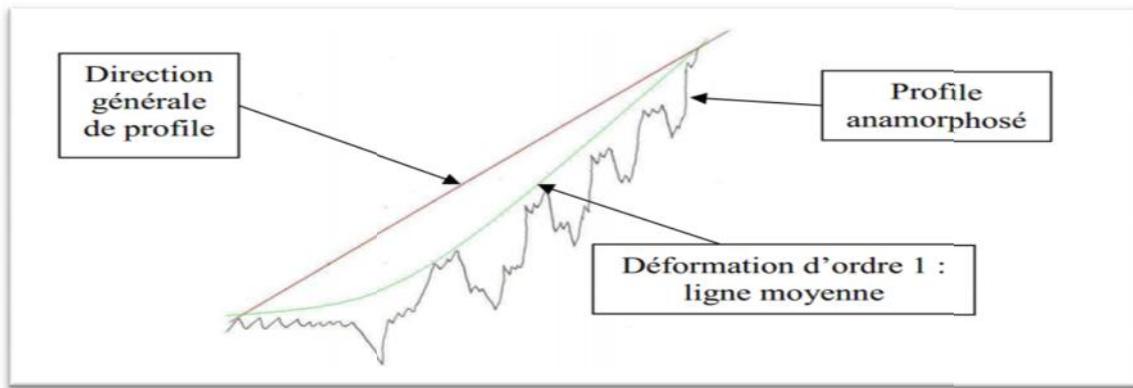
La rugosité est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont jamais parfaites, elles présentent au contraire des défauts de toutes sortes dus aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, à la rigidité du montage et de la machine, à la formation des copeaux, aux efforts de coupe,...etc.

On sait depuis longtemps que ces défauts influent profondément sur le fonctionnement et la tenue en service des mécanismes et la bonne exécution de leurs fonctions : guidage, étanchéité,...etc. Plus la qualité d'une surface est proche de la perfection, plus elle est difficile à obtenir et plus son coût est élevé. Des surfaces inutilement précises causent des pertes économiques qui peuvent être considérables. [1]

#### **✓ Défauts de surface**

Pour caractériser l'état de surface, il existe 4 ordres

- ❖ **Ordre1:** écart de forme ou de position (ligne moyenne), il est représenté par la ligne moyenne.

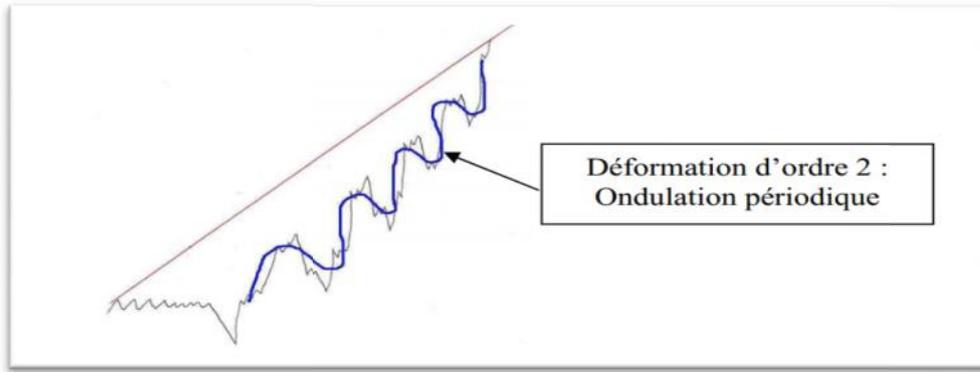


**Figure-I-3-Ordre 1. [1]**

Les différents types de défauts représentés par l'ordre 1 sont :

- Les défauts de planéité.
- Les défauts de rectitude.
- Les défauts de circularité. Les causes de ces défauts sont :
  - La déformation de la pièce avant usinage dans son système d'ablocage
  - La déformation de la pièce au cours de l'usinage due à l'effort exercé par l'outil sur la pièce ou due à la mauvaise inclinaison de l'outil.
  - La déformation de la pièce après démontage (contraintes internes (ex : température))
  - La déformation de l'outil machine due à l'action de la pièce sur l'outil.
- Les défauts au niveau des guidages. [1]

❖ **Ordre 2** : ondulations périodiques ; l'influence de ces défauts est le même que pour l'ordre 1.



**Figure -I-4- Ordre 2. [1]**

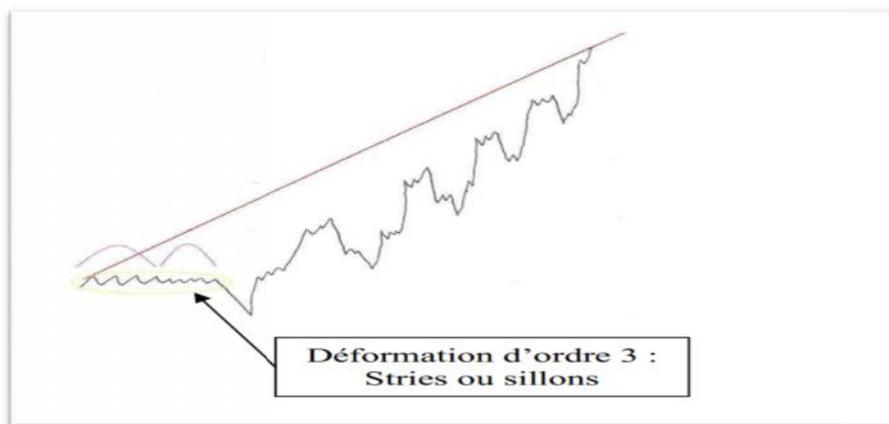
Les causes de ces défauts sont : - Les phénomènes vibratoires basse fréquence :

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{K}{m}} \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Ces phénomènes se traduisent par un manque de rigidité au niveau de :

- La pièce, dû à un mauvais équilibrage du montage sur le porte pièce.
- L'outil, dû à une dent cassée au niveau de la fraise par exemple.
- La machine. [1]

❖ **Ordre 3** : stries ou sillons :



**Figure -I-5- Ordre 3. [1]**

L'influence de ces défauts a lieu au niveau de :

- L'étanchéité : Statique (pas de mouvement entre les pièces). Dynamique (mouvement entre deux pièces).

- Les frottements fluides.

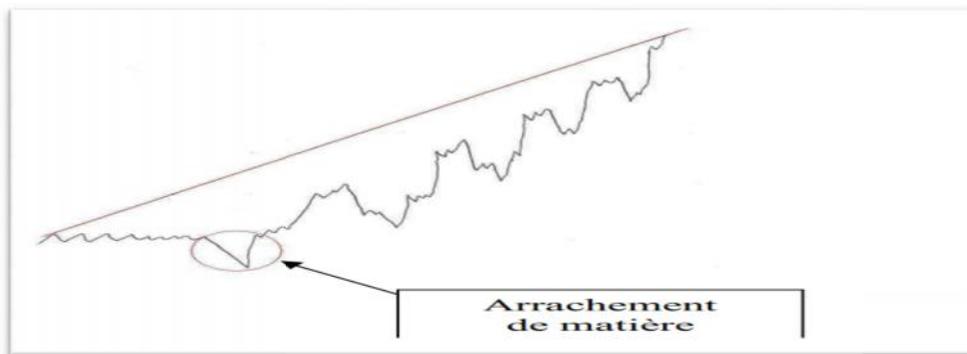
- Les problèmes de revêtement (peinture...).

Les causes de ces défauts sont :

- Les phénomènes vibratoires hauts fréquence.

- Les stries ou sillons dus au passage de l'outil ( $r$ ). [1]

❖ **Ordre 4:** arrachement de matière ; l'influence de ces défauts est le même que pour l'ordre 3.



**Figure -I-6 Ordre-4 [1]**

Les causes de ces défauts sont :

- le mauvais affûtage de l'outil.

- chocs de l'outil sur la pièce (au montage par exemple).

- empreintes du système de serrage. [1]

## 2-2-Vibration et instabilité d'usinage

De nombreuses opérations existent en usinage par outil coupant : fraisage tournage perçage... Elles sont toutes soumises au problème des vibrations d'usinage, initiées par la coupe elle-même. Ceci fait de l'étude des vibrations d'usinage une thématique consistante. Une quantité considérable de travaux a été publiée, comprenant pour la plupart un aspect modélisation, des essais de validation et parfois la simulation d'états de surface. [2]

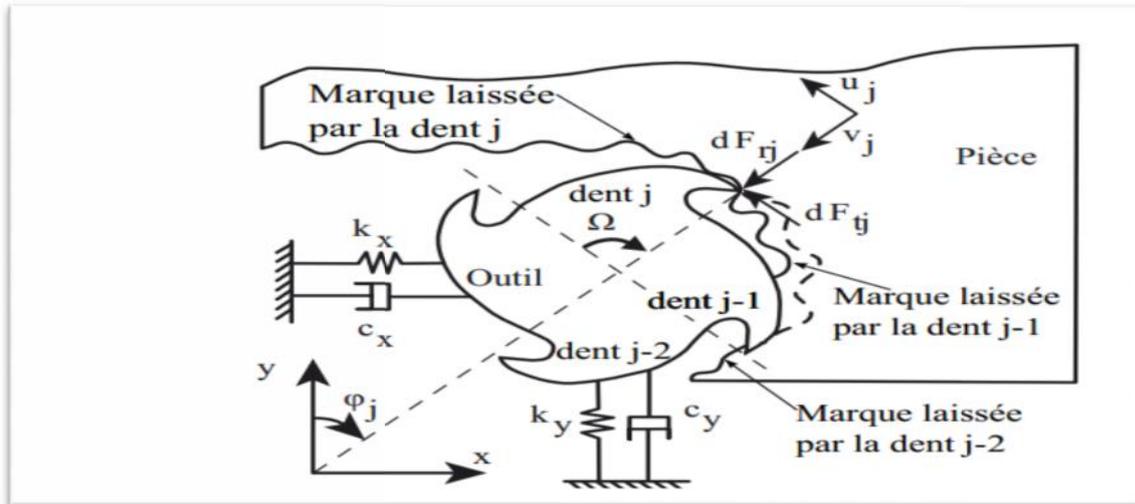


Figure I-7- Fraisage radial modélisé par altintas. [2]

### 2-3-Les vibrations d'usinage

Dans le cadre des travaux sur les vibrations d'usinage, trois types de vibrations sont recensées.

#### \*Vibrations libres

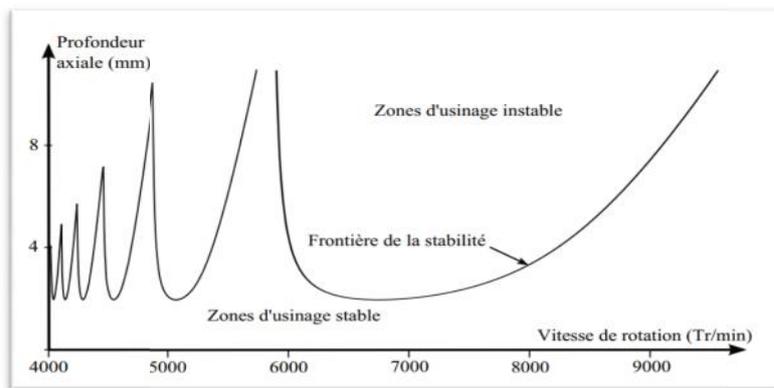
Il s'agit de vibrations d'une structure (outil, broche, pièce) en réponse à un choc ou un lâcher. Ce type de vibrations n'intervient généralement pas pendant l'usinage. Elles sont par contre mises à profit lors des sondages, afin de déterminer les caractéristiques dynamiques de la structure.

#### \*Vibrations forcées

Qui apparaissent en réponse à un chargement cyclique Elles sont très présentes en coupe interrompue. En tournage continu où le chargement nominal est constant, elles peuvent être induites par un défaut d'excentricité de la pièce lors de son montage, ou par une pièce ébauchée en « patatoïde ». En fraisage, elles sont plus inhérentes à l'opération, puisque par définition l'effort de fraisage est cyclique à la fréquence de dent. En plus de l'état de surface qui est dégradé, ces vibrations induisent des défauts d'ordre géométrique sur les pièces.

### \*vibrations auto-entretenues

Elles sont également connues sous le nom de « **broutement** » ou de « **chatter** » en anglais. Celles-ci interviennent suite à une perturbation du système, qui peut parfois s'auto-entretenir et mener à des amplitudes importantes. À la différence des vibrations forcées, la structure vibre à des fréquences distinctes de la fréquence de dent en fraisage ou de broche en tournage. Lorsqu'elles surviennent, ces vibrations affectent la rugosité des pièces, induisent des chocs sur les arêtes de coupe et les broches. Pour toutes ces raisons, elles sont fortement redoutées des industriels. [2]



**Figure I-8- Allure des lobes de stabilité pour un mode**

La méthode des lobes de stabilités présente les avantages de simplicité et de rapidité de mise en œuvre. Elle permet rapidement de trouver des conditions d'usinage sans vibrations. Un des inconvénients majeurs réside dans les simplifications effectuées lors des calculs, notamment sur l'effort de fraisage. Ces simplifications la rendent délicate à utiliser en calculs prédictifs. Pour résumer, les lobes de stabilité analytiques se basent sur des hypothèses suivantes :

- La loi de coupe est linéaire que l'on soit en usinage conventionnel ou en Usinage Grande Vitesse, et ce, quelle que soit l'épaisseur coupée.
- La zone de coupe est localement rigide. Cette configuration ne prend pas en compte les déformations de la pièce ou de l'outil selon la hauteur de coupe. Le mouvement relatif pris en compte est une translation.
- L'immersion de l'outil est supposée constante, même pour les faibles engagements radiaux.
- Les modes sont indépendants. Les transitions entre modes ne sont pas abordées par cette modélisation.

– Les caractéristiques dynamiques du système usinant sont constantes. [2]

### 3-Effort de coupe

#### 3-1-Effort de coupe en tournage

L'étude et l'évaluation des forces de coupe présente un intérêt en usinage principalement :

- pour dimensionner les outils et les éléments de machine-outil,
- pour évaluer la puissance de coupe et permettre ainsi le choix rationnel d'une machine-outil.

L'action de l'outil sur la pièce peut être décomposée en trois efforts simples :

- l'effort de coupe  $F_c$ ,
- l'effort d'avance  $F_f$ ,
- l'effort de pénétration  $F_p$ . [3]

D'une manière générale :

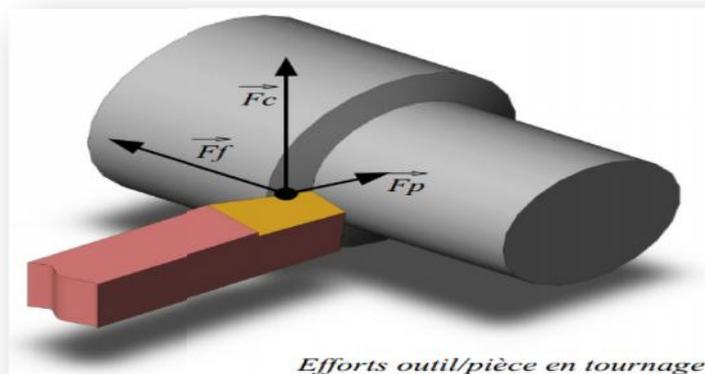
$$\vec{F}_f \approx \left(\frac{1}{2} \text{ à } \frac{2}{3}\right) \vec{F}_c \text{ et } \vec{F}_p \approx 0,3 \vec{F}_c$$

**Calcul de  $F_c$**  La valeur de l'effort de coupe est donné par la formule :

$$F_c = k_c A D$$

Avec :

- $k_c$  : pression spécifique de coupe dépendant du matériau et de l'épaisseur moyenne du copeau.
- $AD$  : section du copeau.



### Figure-I-9 efforts outil/pièce en tournage

Pour cela on fait l'hypothèse que l'effort de coupe est réparti uniformément sur tout le copeau et que la variation de la vitesse de coupe sur la surface du copeau est négligeable. [3]

#### 3-2-Effort de coupe en perçage

Si on considère une pression spécifique de coupe uniformément répartie le long de l'arête de coupe, on trouve :

##### ❖ Perçage sans avant-trou

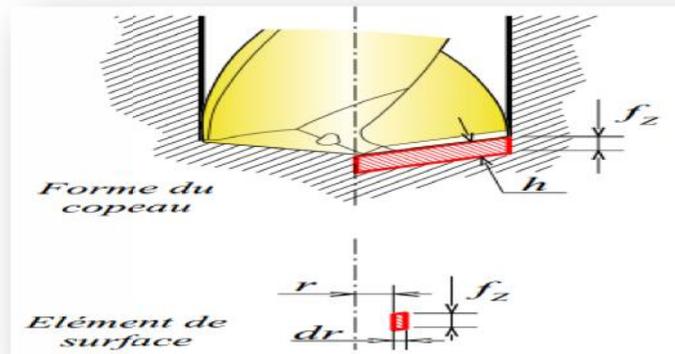


Figure I-10 Perçage sans avant-trou

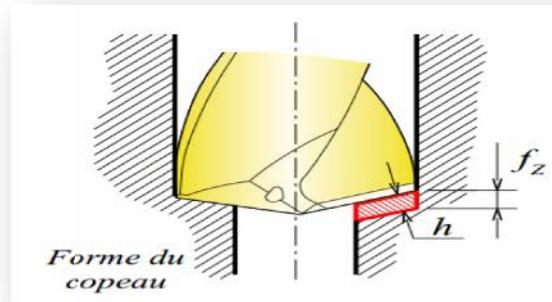
$$P_c = \frac{k_c \cdot V_c \cdot f_z \cdot Z \cdot D}{4} = \frac{k_c \cdot V_c \cdot f \cdot D}{4} \quad (\text{avec les unités SI})$$

##### ❖ Formule finale :

$$P_c = \frac{k_c \cdot f \cdot D \cdot V_c}{240 \cdot 10^3}$$

- $k_c$  : pression spécifique de coupe en  $N/mm^2$  ,
- $f$  : avance en  $mm/tr$ ,
- $D$  : diamètre du foret en  $mm$ ,
- $V_c$  : vitesse de coupe périphérique (pour un diamètre  $D$ ) en  $m/min$ ,
- $P_c$  : puissance de coupe en  $kW$ . [3]

##### ❖ Perçage avec avant-trou



**Figure I-11-Perçage avec avant-trou**

$$P_c = \frac{kc \cdot f \cdot V_c}{4} \times \frac{D^2 - d^2}{D} \quad (\text{avec les unités SI})$$

❖ **Formule finale**

$$P_c = \frac{kc \cdot f \cdot V_c}{240 \cdot 10^3} \times \frac{D^2 - d^2}{D}$$

- $kc$  : pression spécifique de coupe en  $N/mm^2$ ,
- $f$  : avance en  $mm/tr$ ,
- $D$  : diamètre du foret en  $mm$ ,
- $d$  : diamètre de l'avant-trou en  $mm$ ,
- $V_c$  : vitesse de coupe périphérique (pour un diamètre  $D$ ) en  $m/min$ ,
- $P_c$  : puissance de coupe en  $kW$  [3]

#### **4-La lubrification**

Les fluides de coupe sont utilisés dans l'usinage pour réduire la friction et refroidir la pièce, et laver les puces. Avec l'application de fluide de coupe, l'usure de l'outil est réduite et la qualité de surface usinée est améliorée. Souvent les fluides de coupe protègent également la surface usinée de la corrosion.

Ils réduisent également les forces de coupe qui permet d'économiser l'énergie. Ces avantages de l'utilisation des fluides de coupe dans l'usinage sont accompagnés par un certain nombre d'inconvénients. Parfois, les coûts de fluides de coupe sont plus de deux fois les coûts

liés aux outils. La plupart des fluides de coupe sont une menace pour l'opérateur au travail. Celui-ci assure trois fonctions pendant l'usinage. [4]

#### 4-1- minimum quantité de lubrification (MQL) a sec et semi Lubrifié

##### \*Définition de la minimum quantité de lubrification MQL

La démarche MQL consiste à remplacer l'arrosage de liquide de coupe par la pulvérisation, dans la zone de coupe et uniquement lorsque cela est nécessaire, d'un brouillard d'air et d'huile. Cette technologie a été développée à partir des années 1990 en Allemagne sous l'impulsion du gouvernement.

Les premières applications dans l'industrie automobile datent du début 2000. Le but de la démarche MQL est de réduire au strict minimum la quantité d'huile nécessaire à la réalisation d'un usinage. Les débits d'huile utilisés sont généralement inférieurs à 50 ml / h. L'air est pulsé avec un débit de 150 L/min. En arrosage, conventionnel, la pièce est arrosée sous un débit d'environ 100 L/min. [5]

**Tab I-1- Applications possibles de l'usinage à sec et de l'usinage MQL, d'après Weinert et al. [5]**

	Alu		Acier		Fonte
	Alliages coulés	Alliages travaillés	Aciers fortement alliés	Aciers de décolletage, trempés ou durcis	De GG20 à GGG70
Perçage	MQL	MQL	MQL	MQL / Sec	MQL / Sec
Alésage	MQL	MQL	MQL	MQL	MQL
Taraudage	MQL	MQL	MQL	MQL	MQL
Taraudage par déformation	MQL	MQL	MQL	MQL	MQL
Perçage profond	MQL	MQL		MQL	MQL
Fraisage	MQL / Sec	Sec	Sec	Sec	Sec
Tournage	MQL / Sec	MQL / Sec	Sec	Sec	Sec
Taillage d'engrenage			Sec	Sec	Sec
Sciage	MQL	MQL	MQL	MQL	MQL
Brochage			MQL	Sec	Sec

Le tableau 1, proposé par Weinert et al. présente les applications possibles pour cette technologie. L'auteur distingue les usinages réalisables à sec des usinages réalisables avec MQL.

On remarque que le domaine d'application du MQL ou de l'usinage à sec est très vaste. De nombreuses études ont démontré la faisabilité de l'usinage MQL / sec sur différents matériaux, principalement pour les opérations d'usinage à arête de coupe définie.

Ces études ont permis de démontrer que les outils de coupe disponibles actuellement permettent d'assurer la production de petites et de grandes séries de pièces.

Cependant, il reste encore à travailler sur les fonctions de maintien en température et d'évacuation des copeaux assurées par le liquide de coupe. [5]

#### **4.2-Usinage à sec**

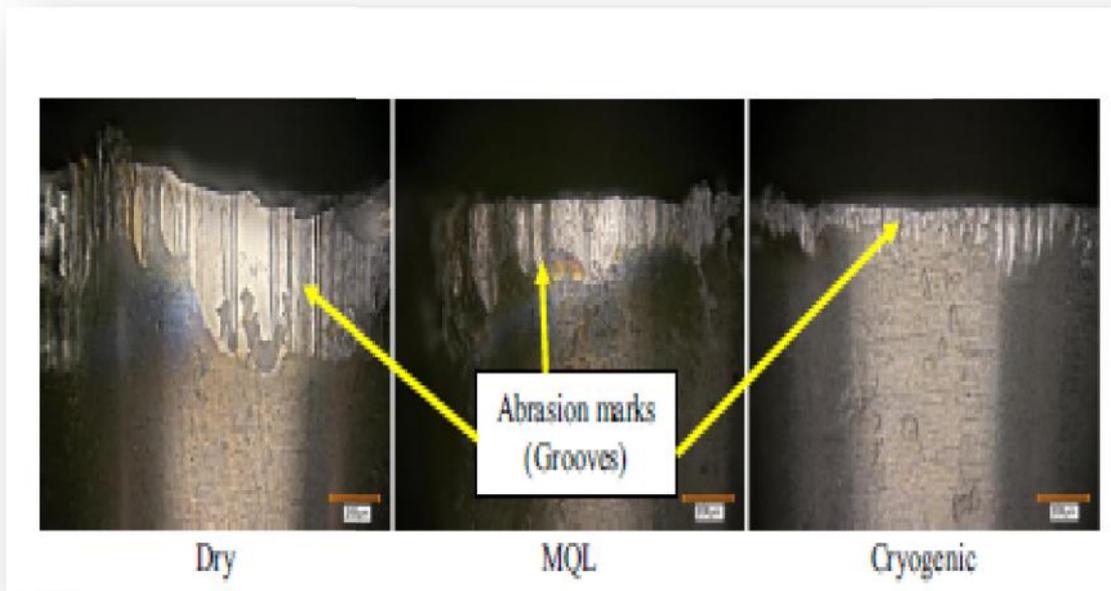
Les considérations sanitaires et environnementales poussent depuis une dizaine d'années à l'usinage à sec. Les brouillards de lubrifiants générés lors des opérations d'usinage représentent des risques significatifs pour la santé des personnes travaillant dans l'atelier de production, Gunter et Sutherland [Gunter 1999].

Les fluides de coupe ou lubrifiants d'usinage sont des mélanges complexes de différentes substances chimiques, certaines substances peuvent être toxiques, irritantes ou allergéniques. De plus, des bactéries et des champignons peuvent se développer dans les réserves de fluides de coupe et être alors des sources de toxines microbiennes. En conséquence, il en résulte des effets particulièrement négatifs sur l'environnement, la santé et la sécurité des personnes travaillant dans les ateliers d'usinage.

De par les progrès réalisés dans la conception des machines outils, des broches, des outils et des revêtements, l'usinage à sec a montré sa pertinence. Cette approche écologique de l'usinage de l'Inconel 718 est rendue possible pour des vitesses de coupe modérées. Une étude comparative en fraisage sur une pièce cible [SNECMA ; étude du fraisage] montre que les performances de l'usinage écologique dépassent ou égalent dans tous les cas l'usinage traditionnel à l'huile soluble. [5]

#### **4-3-Comparaison entre l'usinage sec et MQL**

L'utilisation de la MQL permet aussi d'obtenir une rugosité améliorée par rapport à un usinage à sec mais aussi permet de limiter l'altération microstructurale du matériau. la profondeur de la sous couche affectée par l'usinage à sec, les grains sont déformés jusqu'à une profondeur de 70  $\mu\text{m}$  alors que sous MQL cette affectation est réduite de 40  $\mu\text{m}$ . La lubrification minimale est alors une solution alternative intéressante intégrant un respect de l'environnement, un aspect économique et permettant d'obtenir des pièces finies de qualité. La MQL combine en effet les deux fonctions de refroidissement et de lubrification avec une quantité extrêmement faible de lubrifiant, elle a donc le potentiel suffisant pour combler l'intervalle entre lubrification classique et usinage à sec. [6]



**Figure I-12 abrasifs d'usure de l'outil sur le visage de flanc de l'outil de coupe**

#### **4-4-santé Productivité et environnement**

L'introduction de l'usinage à sec est, dans de nombreux cas, le résultat de la prise de conscience que la technique d'usinage à l'aide de fluides de coupe entraînant des coûts liés à la pièce bien supérieurs à ceux liés à l'outil même. Les fluides de coupe sont en outre à l'origine d'un nombre croissant de problèmes, qui affectent notamment les hommes et l'environnement.

La disparition du circuit des fluides de coupe dans le processus de création de valeur se traduit par une diminution directe des coûts. Les expériences faites montrent que l'on réalise parallèlement une augmentation significative de la productivité. Suivant l'opération d'usinage et l'outil utilisé, le temps de fabrication peut diminuer de moitié. La suppression du nettoyage des pièces réduit la chaîne du processus et permet ainsi d'autres économies. Le passage de l'usinage sous arrosage à l'usinage à sec a pour effet interne de motiver le personnel et pour effet externe d'améliorer l'image de l'entreprise. De plus, le législateur et les organismes patronaux d'assurance contre les accidents du travail réagissent aux risques émanant des fluides de coupe par un durcissement des lois et des règlements. Pour les entreprises, ceci se traduit non seulement par un accroissement de leurs responsabilités et de leurs obligations envers leurs employés, mais aussi par une augmentation de leurs charges financières.

La diffusion à grande échelle de l'usinage à sec dans l'industrie permet de prévenir les problèmes économiques et environnementaux liés à l'usinage sous arrosage. [7]

#### **\*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. [7]

#### **\*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. [7]

#### **\*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 (17 % du total qui résulte des prix La réduction du lubrifiant a des avantages économiques sur le cycle de vie. 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. [7]

### **I-5-Travaux de recherche sur l'usinage MQL et à sec**

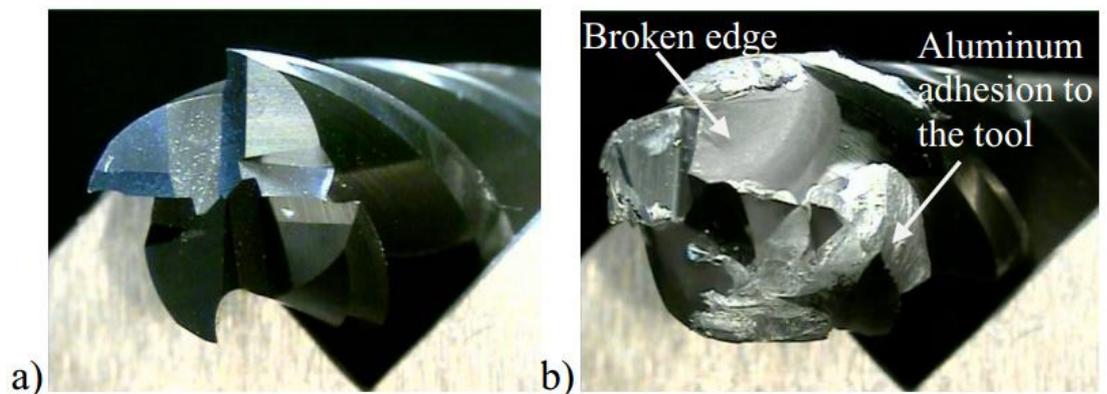
#### **I-5-1-Influence de MQL sur la température de l'outil**

Pendant le processus de coupe, le travail s'effectue dans trois zones : (1) l'outil effectue l'action de coupe en surmontant la force de cisaillement du matériau usiné; (2) le copeau se forme et se déforme lors du mouvement sur la face de coupe de l'outil; (3) la surface finie de la pièce rentre en contact avec la face de dépouille de l'outil.

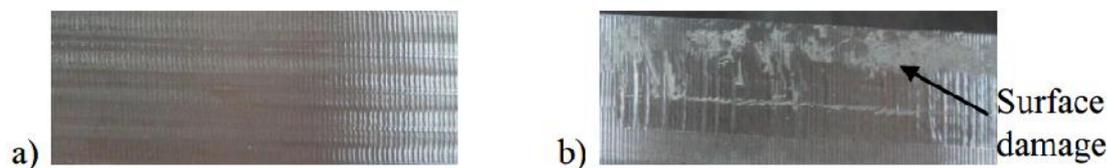
Ainsi Afin de réduire la problématique de l'utilisation de liquide de coupe en termes de santé des employés et la pollution environnementale **N.R. Dhar et al [8]** ont effectués une étude expérimentales sur le rôle de MQL sur la température , la formation des copeaux et de

la qualité du produit de coupe en tournage de AISI-1040 et les résultats ont été comparés avec l'usinage à sec et l'usinage d'huile soluble comme agent de refroidissement. et leur résultats expérimentaux indiquent que cette MQL permet une réduction substantielle de la température de coupe. Il a également été noté que la formation de copeaux et l'interaction outil devienne plus favorable dans des conditions MQL. et basé sur les résultats de l'enquête expérimentale ils ont puees tirées les conclusions suivants :

- La performance de coupe d'usinage MQL est mieux que celle de l'usinage conventionnel avec le fluide de coupe d'inondation approvisionnement.
- MQL réduits la température de coupe, ce qui améliore l'interaction surface de coupe- outil et conserve la netteté des bords de coupe.
- avec MQL la forme et la couleur les copeaux d'acier sont devenu favorable pour le refroidissement et plus efficace dans l'amélioration nature de l'interaction à l'interface surface de pièce - outil.
- Précision dimensionnelle améliorée, essentiellement due à la réduction d'usure et les dommages à la pointe de l'outil par l'application de MQL.



a) Outil utilisé pour MQL, b) outil brisé avec la coupe à sec [8]



a) surface entraîné avec MQL, b) la coupe à sec [8]

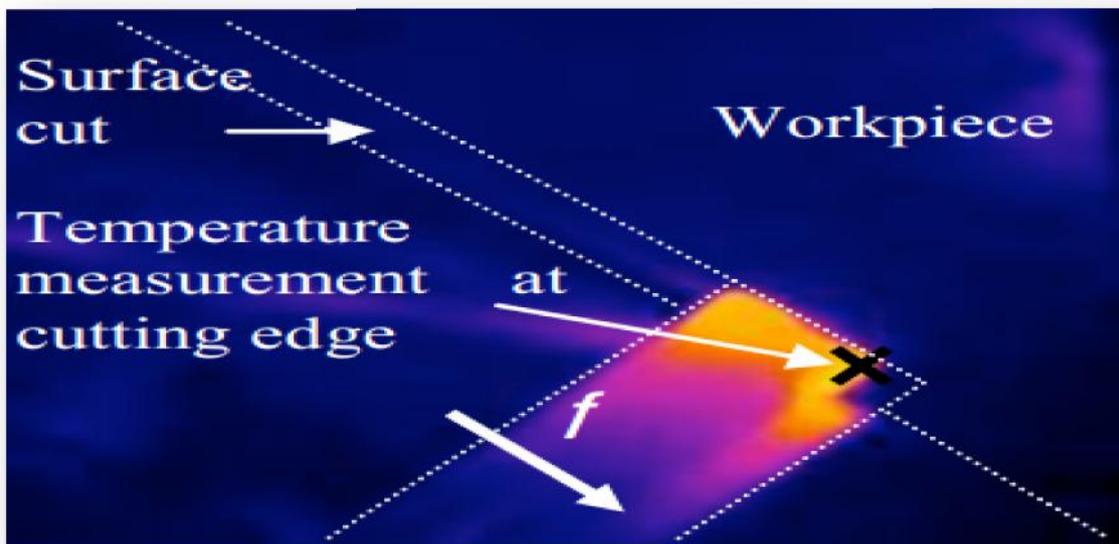
-Une étude comparative réalisée par **Ahmed Damir et al** [9] sur la performance de la quantité minimale de lubrification MQL dans le fraisage de l'aluminium 6061. Dans cette étude, l'effet de la vitesse de coupe, la profondeur de coupe et le débit de lubrification ont été étudiés afin

d'évaluer la performance d'usinage en terme de température de l'outil, rugosité de surface et forces de coupe. Les résultats de cette étude montrent une amélioration remarquable de la performance d'usinage à l'aide de MQL par rapport à la coupe à sec.

- la diminution de la température de coupe et la rugosité de surface de 25%.

- L'application de MQL a permis d'atteindre des vitesses coupe et des profondeurs de coupe plus élevées.

Ce résultat a conclu que le liquide de refroidissement d'inondation a montré de meilleures performances et la qualité des produits à haute vitesse de coupe tandis MQL améliore la qualité de surface à des vitesses modérées indiquant un fort potentiel pour la MQL à être utilisé dans les opérations finitions.



**Figure I-13 Influence de MQL sur la température de coupe [9]**

#### **I-5-2-Influence de MQL sur l'usure des outils de coupes revêtu et non couchée**

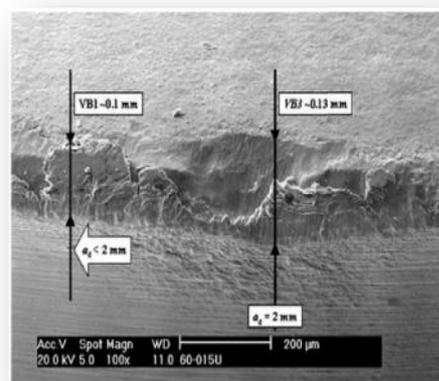
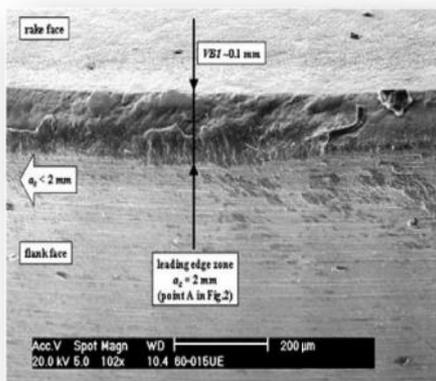
Lors de rainurage à haute vitesse d'un acier au carbone (C 0,45 %) avec un outil en carbure revêtu de TiC / TiCN / TiN couches de revêtement triple, **Toshiyuki Obikawa et al [10]**, ont évalué la performance de la quantité minimale de lubrification (MQL).

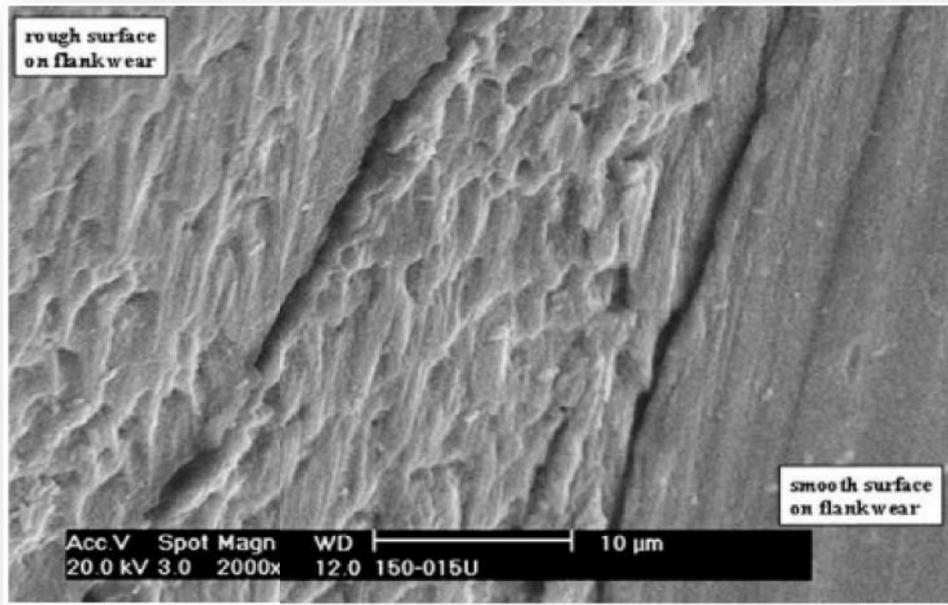
Il a été prouvé dans cette étude que, l'usure diminue considérablement avec l'augmentation de la pression d'air. La méthode d'alimentation en air et la direction de brouillard d'huile contrôlée a un rôle important dans le transport du brouillard d'huile à l'interface entre la face de dépouille et la surface usinée. Il a été trouvé aussi que le bec et le flanc s'usent dans MQL et l'effort de coupe diminue avec l'augmentation de la pression d'air de manière drastique.

Cependant, il a été montré que le mécanisme de transport d'huile à l'interface entre la face de dépouille et la surfaces usinée est d'une importance significative sur l'usure de l'outil.

- une étude qui a examiné la pertinence des outils non couchés en carbure cémenté dans le fraisage de l'alliage de titane aérospatiale Ti - 6242S a été présenté par **Ginting et M. Nouari [11]** .En termes de mode de défaillance, il a été constaté que la Localité usure en dépouille à la pointe de l'outil est le principal mode de détermination de la durée de vie de l'outil qui est généralement suivie par la rupture fragile comme la fissuration, l'écaillage et la desquamation.

Les auteurs ont en déduis par leur observations expérimentales par rapport aux résultats numériques que la forme de l'outil et les paramètres d'usinage sont d'importante paramètres déterminant la performance de l'alliage carbure des outils de coupe dans un endroit sec fraisage de la fin de alliage de titane de l'aérospatiale Ti - 6242S.





**Figure I-14 Usure des outils de coupe [11]**

### **I-5-3-performances usinage a sec MQL et avec lubrifiant solide**

Un examine sur les caractéristiques et les performances tribologiques coupe de carbure de chrome ( Crx % de C ) d'outils en carbure revêtu dans l'usinage à sec étant effectué par **Y.L. Su et al [12]** .des revêtements CRX % C ont été déposés auprès de différente surveillance d'émission optique , des valeurs de consigne , x % des chrome cible " empoisonnement " par déséquilibrée pulvérisation magnétron . Mesurées par des expériences de microscopie électronique à balayage (MEB) et l'adhérence nano indentation les résultats expérimentaux ont indiqué que la microstructure de revêtement, des propriétés mécaniques et résistance à l'usure varient selon la valeurs de consigne.

Inserts de CR10 %de C et montré la meilleure résistance à l'usure en AISI 1045 test de tournage de l'acier. CR50 % outils de C. des essais par trous de forage réalisé des performances exceptionnelles dans les deux tournant de cuivre et la carte de circuit imprimé (PCB ) ainsi La durée de vie de l'outil de CR50 % C revêtu est quatre fois plus élevé que celui d'un non couché outil dans le test PCB trou de forage .

Les résultats des recherches sont arrivés aux conclusions suivantes :

- 1-La microstructure de CR10 % C revêtement semble amorphe et la topographie de la surface est très lisse et sans relief tant dis que La microstructure de CR30 % C et CR50 revêtements % de C sont mince et en forme de colonne la microstructure du revêtement

CR70 % C est grossier et de colonne et la topologie de surface est cristallin est spécialement rugueuse. à noter que CR50 % C revêtements montrent une colonne très dense par rapport aux autres revêtements.

2-La dureté de surface et une augmentation du module d'élasticité que le OEM a mis en valeur augmente avec l'augmentation de chrome.

3. les résultats du Rockwell C essais d'indentation montrent que l'adhérence de CR10 % de C, CR30 et CR50 % C % C sur le substrat WC est bon alors que, l'adhérence de CR50 % de C, CR60 et CR70 % C % C revêtements est faible.

4-Dans les expériences de retournement, tous les revêtements CRX % de C donnent de mauvais résultats. . Les Outils de coupe 3 m CR10 % film C ont la meilleure résistance à l'usure dans la transformation AISI 1045 acier. D'autre part, le revêtement 3 % C m CR50 permet une augmentation de deux fois la durée de vie du outil carbure.

5-Dans PCB trou traversant test de forage, CRX % C revêtements possède une meilleure performance à l'usure. Micron – perceuses de 3 m pellicule CR50 % C ont la meilleure résistance à l'usure, la durée de vie de cet outil est quatre fois plus élevé que celui d'un outil non revêtu dans le test de forage de PCB.

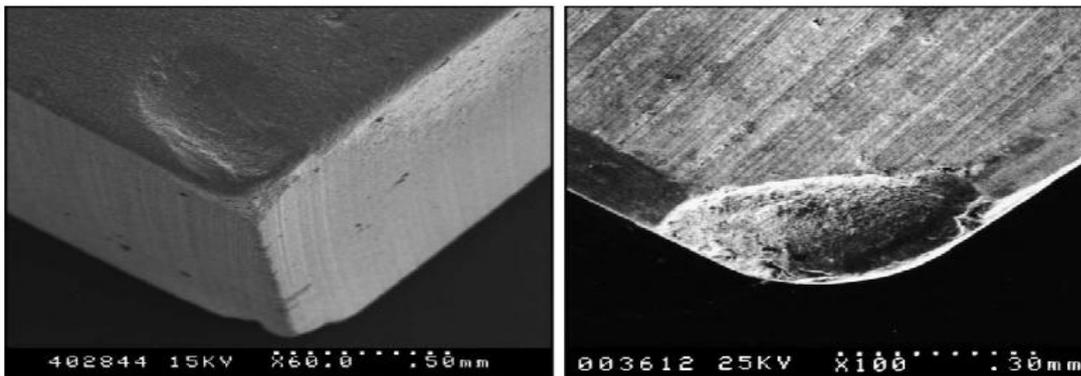
Les propriétés fondamentales d'un outil de coupe céramique  $Al_2O_3$  avec les ajouts de  $CaF_2$  lubrifiant solide qui a été produit par pressage à chaud ont été examinés par **Deng Jianxin et al [13]** Avec des essais d'usinage à sec sur acier trempé et la fonte et ont mesurés L' usure de l'outil , la force de découpe et le coefficient de frottement entre l'interface outil – pièce et en montrent que le coefficient de friction à l'outil puce interface dans la coupe à sec en acier trempé et la fonte avec de l' $Al_2O_3$  / TIC /  $CaF_2$  outil en céramique a été réduite par rapport à celle de l'outil  $Al_2O_3$  / TiC  $CaF_2$  sans lubrifiant solide et Les mécanismes responsables ont été déterminés comme étant la formation d'un film auto-lubrifiant sur l'interface outil coupeau, et la composition de ce film auto-lubrifiant s'est révélé être principalement  $CaF_2$  lubrifiant solide , qui a été libéré et étalé sur la piste d'usure de la face de coupe de l'outil agissant comme additif lubrifiant entre l'outil et le coupeau.

Il a été prouvé par les auteurs que :

1-Le coefficient de frottement calculé à l'interface outil-coupeau dans l'usinage à sec en acier trempé et coulé fer avec des outils de coupe en céramique  $Al_2O_3$  / TIC /  $CaF_2$  était réduite par rapport à celle des outils  $Al_2O_3$  / TiC sans  $CaF_2$  lubrifiant solide.et la formation d'un film auto- lubrifiante sur l'interface outil – puce était Le mécanisme responsable.

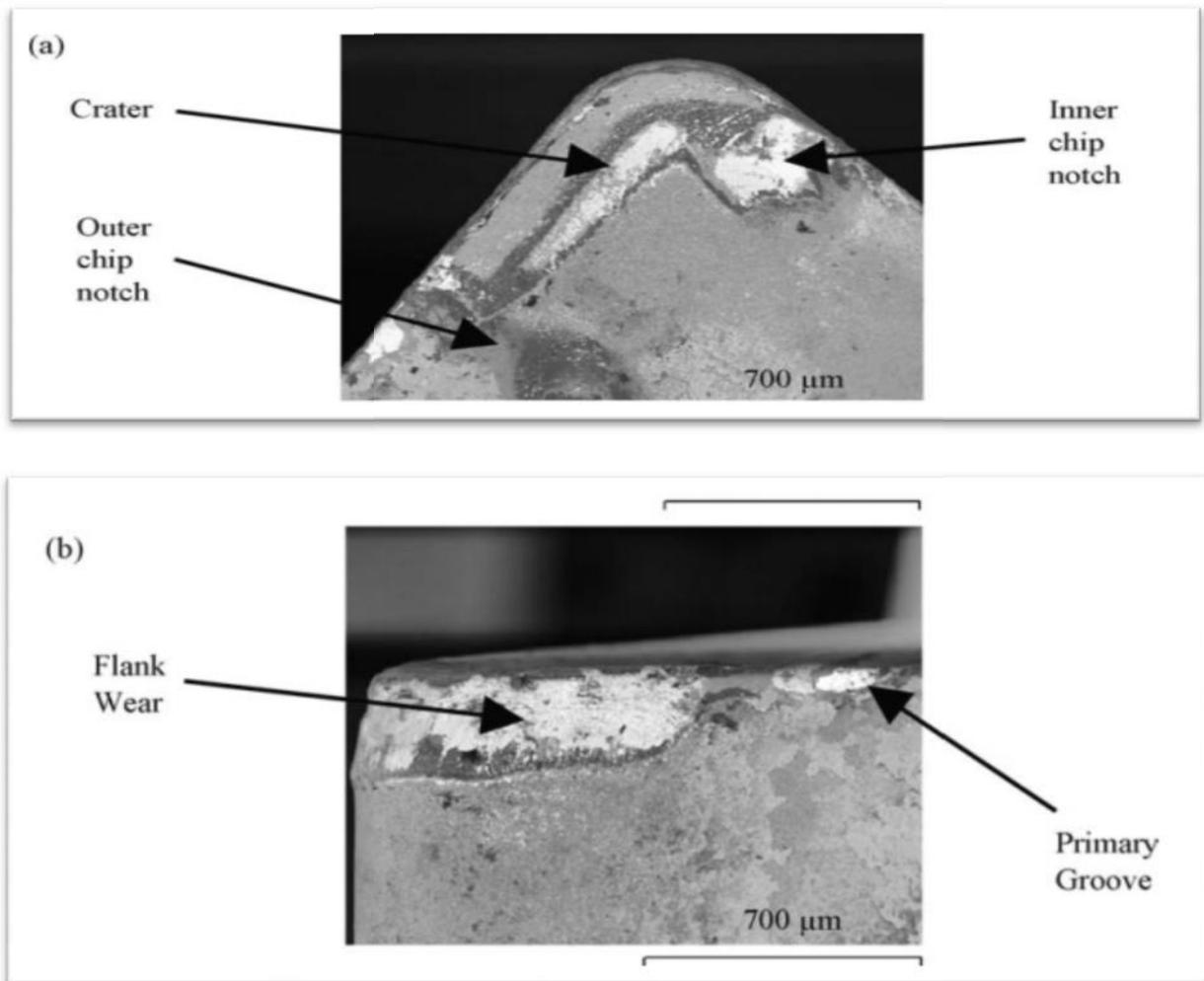
2-La composition de la pellicule auto-lubrifiant a été trouvé  $\text{CaF}_2$ , qui a été principalement publié et étalé sur la porter la trace et de la face de dégagement d'outil dans le processus d'usinage.

3-la Vitesse de coupe s'est révélé avoir un effet profond sur les comportements auto - lubrifiant . Le  $\text{CaF}_2$  de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / - TIC /  $\text{CaF}_2$  matériau d'outil peut être adoucie, libéré et barbouillé sur le visage outil de coupe en vertu des conditions de vitesse de coupe élevée



**Figure I-15 outils de coupe en céramique  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / TIC /  $\text{CaF}_2$  b) outils  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / TiC sans  $\text{CaF}_2$  [13]**

- Un travaille sur la détermination des avantages de la micro lubrification en terme de la réduction de l'usure de l'outil en tournage réalisé par **A.Attanasio et al[14]** sachant que MQL est une technique qui pourrait réduire de nombreux problèmes provenant de consommations élevées de lubrifiant, comme l'hypertension ainsi que le coût d'usinage ou des problèmes de santé environnementale et des travailleurs.les auteurs ont montrés comment MQL peut être avantageux lors de la coupe d'acier 100Cr6 normalisée. Et que la Lubrification de la surface de flanc d'une pointe par la technique MQL réduit l'usure de l'outil et augmente sa durée de vie. La technique MQL donne quelques avantages, mais elle présente des limites en raison de la difficulté du lubrifiant pour arriver à la surface de coupe.



**Figure I-16 Analyse SEM (flanc MQL) : (a) la surface de coupe et (b) surface de flanc. [14]**

## **I-6- Conclusion**

L'étude de la diminution des fluides de coupes en utilisant la quantité minimale de lubrification aide énormément dans le développement de nouvelles stratégies de coupe afin d'améliorer l'usinabilité et la protection de l'environnement ainsi que la santé des travailleurs,

En diminuant le fluide de coupe et tout en cherchant les paramètres qui assurent une meilleure qualité et moins d'efforts répondent parfaitement aux exigences économiques, environnementales et sanitaires, Ceci rentre dans le but du développement durable de secteur sensible de l'industrie moderne.

## II-1-Introduction

Dans ce chapitre le montage ainsi que les principaux équipements qui ont servis pour la réalisation des expériences sont présentés. Un rugosimètre est utilisé pour la mesure des critères de rugosité de la surface usinée. Egalement, le plan adopté ainsi que les conditions générales sont présentés.

Les essais d'usinage de l'aluminium 6061-T6 à sec et lubrifié sont réalisés sur une fraiseuse verticale au sein du Laboratoire de coupe des métaux à l'université 08 Mai 1945 de Guelma. Les essais d'usinage avec minimum quantité de lubrification ont été réalisés au laboratoire LIPPS de l'Ecole de Technologie de Montréal par le Docteur Khettabi.

## II-2-Matériels utilisés

### II-2-1-Machine-outil

La fraiseuse qui a servi pour effectuer nos essais est une fraiseuse verticale ALMO FV 1.5 (Fig. II. 17). Dans ces essais nous avons utilisé trois vitesses de coupe pour l'usinage a sac ainsi que trois pour l'usinage lubrifié soit 157 m/min, 220 m/min, 314 m/min. Le débit de lubrification est de 0.02 l/s.



Figure II-17- Machine-outil (Fraiseuse ALMO FV1.5)

### II-2-2-Matériaux utilisés

Le matériau d'outil utilisé est le carbure non revêtu pour l'ensemble des essais de coupe lubrifiée, a sec et MQL. Pour le matériau de la pièce, nous avons utilisé l'alliage d'aluminium 6061-T6. Cet alliage est très utilisé dans divers domaines d'industrie, notamment l'aéronautique. La famille d'aluminiums 6000 (6060, 6082, 6101) propose de très bonnes aptitudes à la déformation et une bonne soudabilité. Ils offrent, par ailleurs, une forte résistance à la corrosion.

L'**alu 6061** est principalement utilisé pour les structures (type charpente, par exemple) ou bien dans le fuselage d'avion en aéronautique. Le tableau suivant (Tab. II. 2) résume la composition chimique des alliages 6061 [15].

**Tableau II-2**

**Composition chimique du matériau ainsi que les spécifications relatives à l'AA6061. [15]**

<i>AA6061 (wt.%)</i>	<i>Si (%)</i>	<i>Mg (%)</i>	<i>Fe (%)</i>	<i>Cr (%)</i>	<i>Cu (%)</i>	<i>Mn (%)</i>	<i>Zn (%)</i>	<i>Ti (%)</i>
Min (spécification 6061)	0,4	0,8		0,04	0,15			
Max (spécification 6061)	0,8	1,2	0,7	0,35	0,4	0,15	0,25	0,15
<b>Mat. forgés (FL et FLM)</b>	0,65	1,01	0,24	0,18	0,30	0,09	0,20	0,02

L'alliage d'aluminium 6061 est un alliage d'aluminium à durcissement structural. Les alliages de la série 6xxx sont enrichis en Mg et Si. Ces éléments forment des précipités nanométriques de type « Mg<sub>x</sub>Si<sub>y</sub> » et constituent la phase majoritaire assurant le durcissement structural. En plus de ces phases nanométriques, des précipités plus grossiers sont également présents dans cet alliage. Nous commençons par une présentation rapide de chacune des phases cristallographiques présentes dans cet alliage. Les précipités nanométriques Mg<sub>x</sub>Si<sub>y</sub>

La formation des précipités de type Mg<sub>x</sub>Si<sub>y</sub> nanométriques suit la séquence suivante :

Amas de solutés et/ou zones de Guinier-Preston, cohérents avec la matrice;

- précipités métastables β'', en forme d'aiguille, cohérents avec la matrice;
- précipités métastables β' en forme de bâtonnets, semi-cohérents avec la matrice;
- précipités stables β-Mg<sub>2</sub>Si, sous forme de plaquettes, incohérentes avec la matrice.

Le magnésium et le silicium sont présents au sein de la solution solide sursaturée.

Ils se combinent en amas de solutés riches en Mg et Si. Ces fluctuations de composition, sans interface définie, auraient un diamètre compris entre 1 et 5nm. Leur étude est délicate du fait de leur petite taille. Une question reste à soulever quant à leur dénomination en zones de Guinier-Preston. Ces dernières, visibles dans plusieurs alliages d'aluminium, présentent une structure interne propre, une composition et des interfaces bien définies. Plusieurs auteurs affirment, dans leurs récents travaux, avoir détecté des amas de Mg ou de Si (homo-amas) ou de MgSi (hétéro-amas). Ces amas formeraient, très probablement, des sites de nucléation des phases

La poursuite du réarrangement des solutés lors d'un vieillissement thermique transforment les zones GP en précipités, sous forme d'aiguilles, mesurant entre 1 à 5 nm de diamètre et entre 10 à 50 nm de longueur. Du point de vue cristallographique, certains auteurs proposent une structure C2/m (monoclinique), avec un motif Mg<sub>5</sub>Si<sub>6</sub>.

Les paramètres de maille seraient  $a = 1,516 \text{ nm}$  ;  $b = 0,405 \text{ nm}$  ;  $c = 0,674 \text{ nm}$  et  $\beta = 105,3^\circ$ . Du fait de leur forte densité et de leur cohérence avec la matrice (champ de contrainte induit par la différence de paramètre de maille précipité / matrice), ces précipités rendent difficile le mouvement des dislocations.

Lors de la poursuite du vieillissement thermique, les précipités  $\beta''$  se transforment en précipités  $\beta'$  sous forme de bâtonnets de taille comprise entre 5 à 15 nm de diamètre. Du fait de leur plus grosse taille, la structure cristallographique de la phase  $\beta'$  est mieux connue : réseau hexagonal de type P63/m de paramètres  $a = 0,705 \text{ nm}$  et  $c = 0,405 \text{ nm}$ . Cette dernière valeur, très proche également du paramètre du réseau g-Al garantit la semi-cohérence des précipités  $\beta'$  avec la matrice. Les précipités  $\beta'$  participent également au durcissement structural de l'alliage mais dans une moindre mesure. Les résultats des études les plus récentes montrent qu'en fonction de la composition chimique de l'alliage et des traitements thermiques d'autres types de précipités de type B', U1, U2 peuvent coexister avec les précipités  $\beta'$ . [15].

Thermodynamiquement, les phases  $\beta''$  et  $\beta'$  sont métastables. Si le vieillissement thermique se prolonge suffisamment longtemps, les solutés Mg et Si se retrouvent in fine dans des précipités  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si. Cette phase a une structure cristallographique cubique à faces centrées de paramètre de maille  $a = 0,639 \text{ nm}$ . Cette phase n'est donc pas cohérente avec la matrice. Les précipités  $\beta$  se trouvent dans l'alliage sous forme de plaquettes carrées de quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur et de quelques centaines de nanomètres de

longueur de côté. Leur participation au durcissement structural est beaucoup plus faible que celle des précipités  $\beta''$  et  $\beta'$ .

### \*Les précipités $Mg_2Si$ grossiers

Des phases stables  $Mg_2Si$ , dites « grossières » de taille micrométrique se forment lors de la solidification et du refroidissement de l'alliage après coulée. Ces phases n'ont aucun apport en termes de durcissement structural et sont pénalisantes en termes de ténacité. Les traitements à haute température d'homogénéisation et de mise en solution permettent de dissoudre une partie de ces précipités et remettent donc le silicium et le magnésium en solution solide. Les solubilités du Mg et du Si augmentent avec la température, la fraction de  $Mg_2Si$  grossiers diminue donc jusqu'à une dissolution totale pour des températures généralement comprises entre 550 et 600°C comme représenté sur le diagramme pseudo-binaire Al- $Mg_2Si$

Plus les teneurs en Mg et Si sont élevées, plus la température nécessaire pour la dissolution de tous les précipités est élevée. Cette température ne doit pas dépasser le

Solidus de l'alliage, pour éviter la fusion des phases ayant les plus bas points de fusion (brûlures).

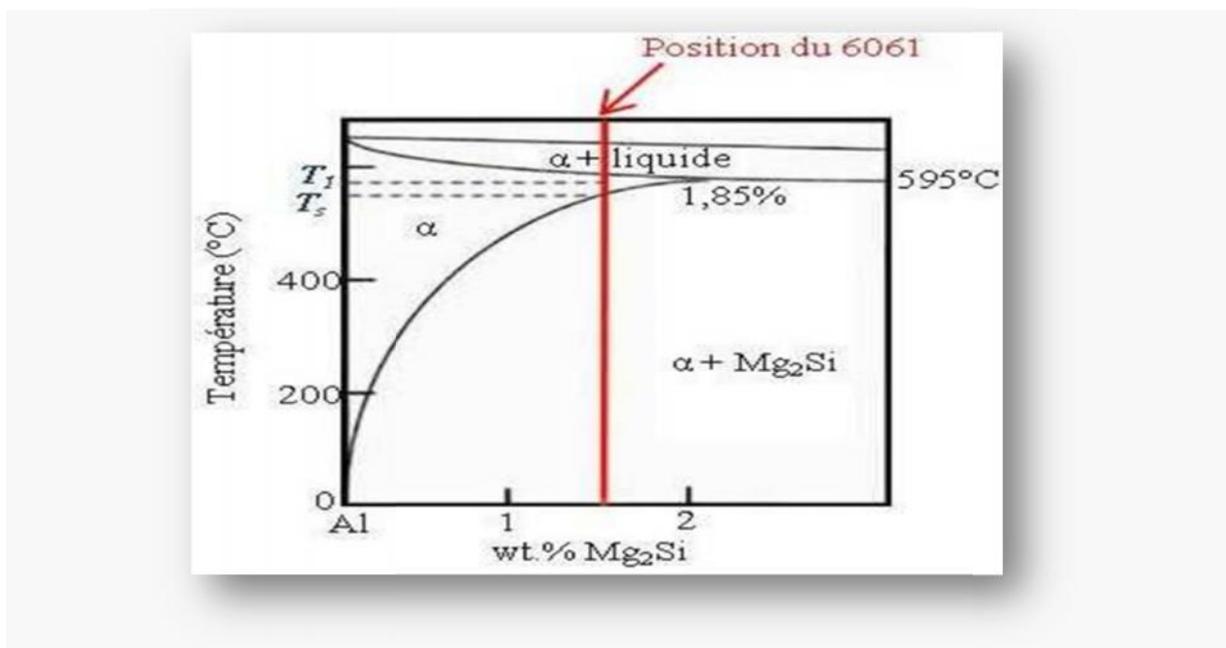


Figure II-18 Diagramme de phase pseudo-binaire Al- $Mg_2Si$ . [15]

### \*Les intermétalliques au fer (IMF)

Le fer est présent dans les alliages d'aluminium 6xxx en tant qu'impureté. Sa limite de solubilité dans une matrice d'aluminium est très faible (0,002 % à 20°C). La quasi-totalité du fer présent lors de l'élaboration du métal liquide se retrouve après solidification sous forme de précipités grossiers, appelés intermétalliques au fer : AlFe, AlFeSi et Al (Mn,Cr,Fe)Si principalement. Lassance et Kuijpers ont indiqué la présence de deux types d'intermétalliques au fer, de forme et de composition différentes :

- Phases  $\beta$ , monoclinique, qui sont en forme de plaquette avec une longueur de 20  $\mu\text{m}$  et une épaisseur de 0,1-2  $\mu\text{m}$ . La stœchiométrie de cette phase est  $\text{Al}_5\text{FeSi}$ . Cette phase apparaît lors de la coulée.

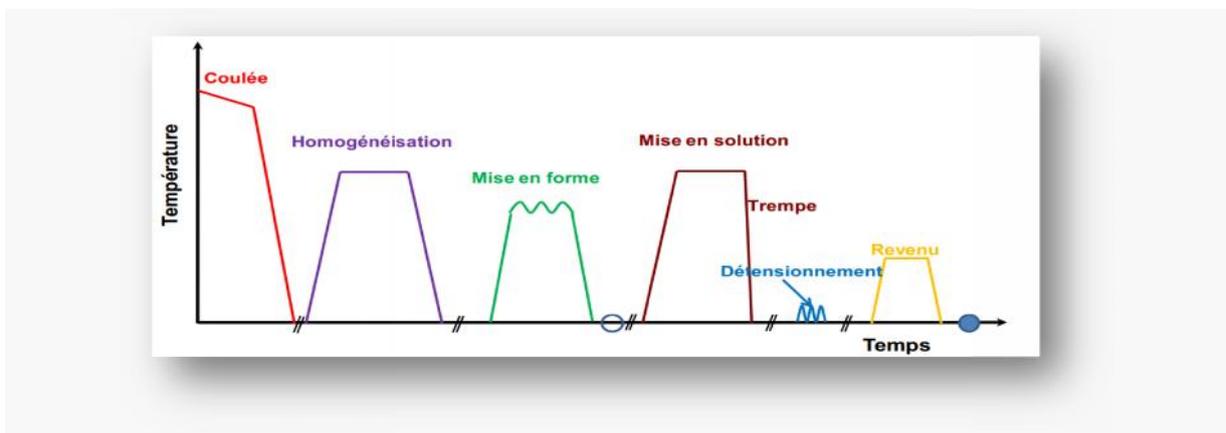
- Phases  $\alpha$  cubiques qui ont une stœchiométrie  $\text{Al}_{12}(\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x})_3\text{Si}$ . Trois types de phases  $\alpha$  sont identifiés dans cet alliage :

- (1) Les phases  $\alpha$  formées après la transformation  $\beta$ - $\alpha$  ont une taille d'environ 1  $\mu\text{m}$  et se présentent comme une chaîne de particules rondes situées à l'ancien emplacement des phases  $\beta$ ;
- (2) les phases  $\alpha$  formées pendant la coulée ont une forme ellipsoïdale avec une large variation de longueur et une épaisseur de l'ordre de 5  $\mu\text{m}$ . Ces phases ont un rapport Fe/Mn élevé;
- (3) Les phases  $\alpha$  formées dans la matrice d'aluminium durant l'homogénéisation sont uniformément réparties avec une taille moyenne d'environ 50-200 nm. La stœchiométrie pourrait être  $\text{Al}_{12}\text{Mn}_3\text{Si}$ . Ces phases présentent un rapport Fe/Mn faible. Du fait de leur faible teneur en fer, ces phases sont parfois classées dans la catégorie des dispersoïdes au Mn. Tout comme les précipités  $\text{Mg}_2\text{Si}$  grossiers de coulée, les précipités grossiers d'intermétalliques au fer peuvent avoir un impact néfaste sur la ductilité et la ténacité de l'alliage. Les dispersoïdes au chrome et au manganèse

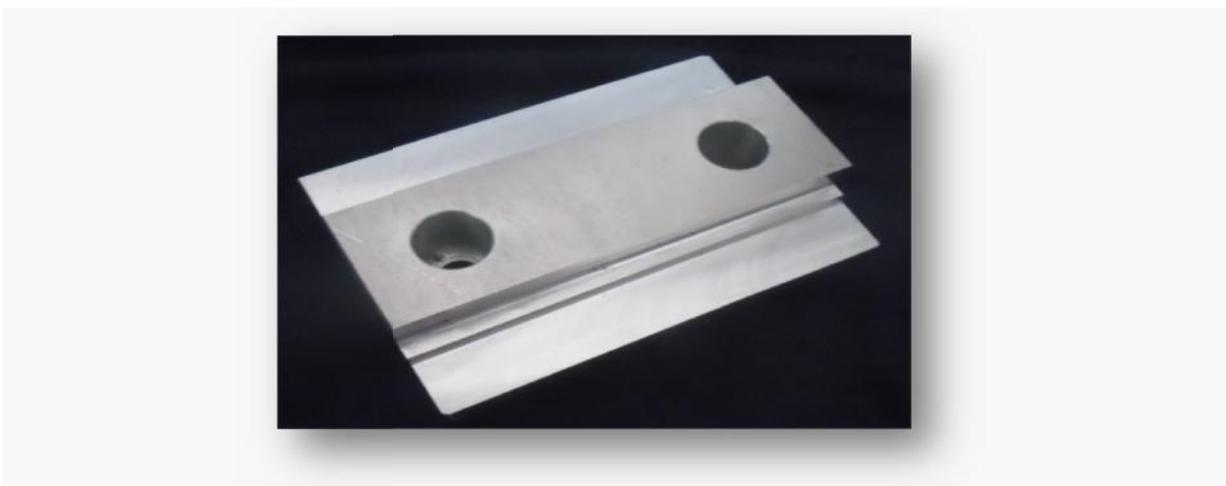
Les dispersoïdes au chrome et au manganèse constituent la quatrième classe de précipités. Ces derniers se forment lors de l'étape d'homogénéisation. Ils sont incohérents et répartis de façon homogène. Leur diamètre varie entre 50 et 500nm. Ces derniers existent sous deux formes :

- $\alpha$ -Al(Cr-Mn,Fe)Si de structure cubique simple ou cubique centrée. La littérature tend à montrer que lorsque la valeur du rapport des teneurs Fe/Mn ou Fe/Cr est faible la structure cubique simple est privilégiée et inversement pour la structure cubique centrée. La valeur du paramètre de maille vaut entre 12,5 et 12,7Å
- $\beta$ '-AlCrSi de structure cubique faces centrées dont le paramètre de maille vaut 10,9Å

Les dispersoïdes présentent une bonne stabilité thermique. Ils jouent un rôle d'ancrage des joints de grain ce qui permet d'améliorer la résistance à la recristallisation et à la croissance de grains.

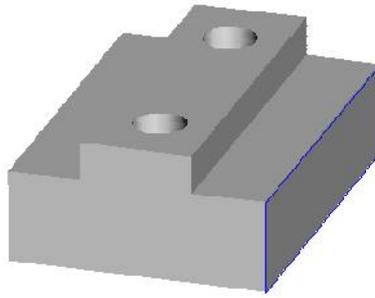


**Figure II-19** Différentes étapes de la fabrication pour l'AA6061. [15]

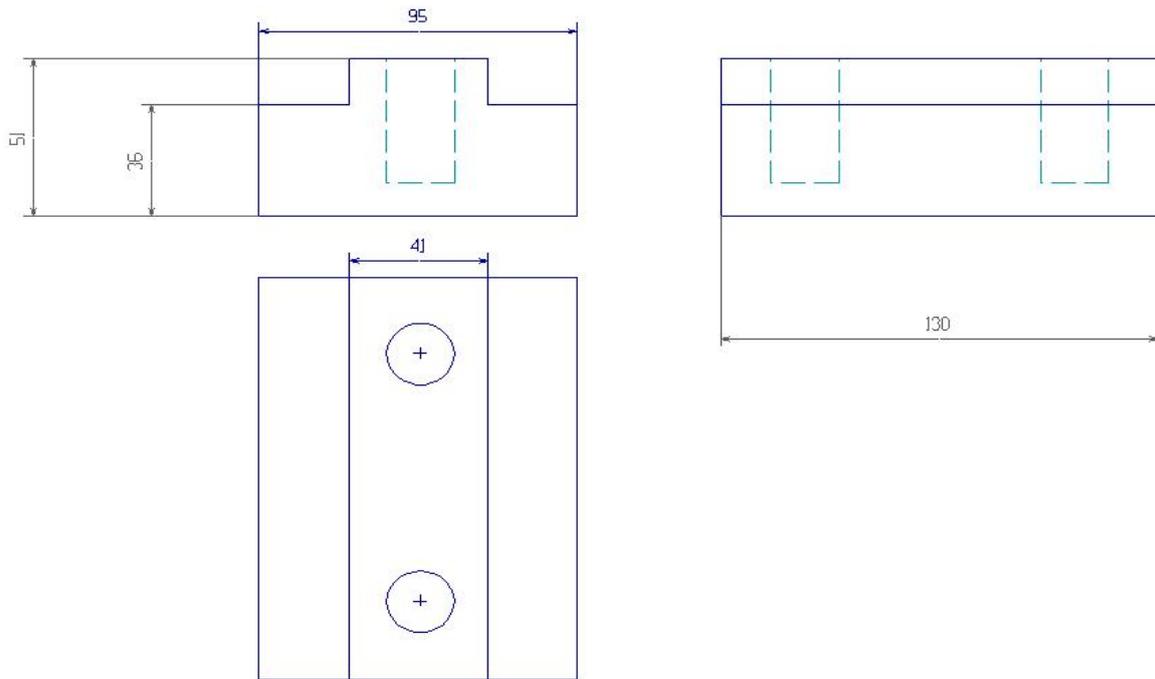


**Figure II-20** Photo de la pièce usinée

Dans la partie de modélisation ont utilisé le logiciel **solide concept** afin de dessiner et déterminer les différentes faces et dimensions de la pièce usinée (Figure II-21) et la mise en plan dimensionnel de cette dernière.



**Figure II-21 pièce usinée en 3d**



Université du 08 mai 1945 guelma

Méthode :eur	Pièce rainuré en aluminium 6061 T6	Fakhet
Echèle		2 eme master
Aluminium		C P I

### II-2-3-Appareillages de mesure utilisés

**-Rugosimètre pour la mesure de la rugosité**

Pour la mesure des différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ), un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo), a été utilisé. La plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à  $40\mu\text{m}$ ) pour  $R_a$  et (0.3 à  $160\mu\text{m}$ ) pour  $R_z$  et  $R_t$ , la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce.



**Figure II-22- Rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo)**

### **II-3-Le Montage Expérimental**

#### **II-3-1-Conditions de coupe**

L'étude expérimentale consiste à conduire des essais de fraisage sur l'aluminium 6061 avec un traitement thermique T6. Cette étude vise à investiguer l'influence des conditions de coupe ( $V_c$ ) et le mode de lubrification sur la qualité de la pièce et les efforts de coupe. L'ensemble des essais a été réalisé en deux parties à savoir le régime conventionnel  $V_c$  (0-300 m/min) et le régime d'usinage à grande vitesse (300-1500 m/min).

#### **II-4-Système MQL tecnolub**

Les essais réalisés avec la micro lubrification ont été effectués avec du matériel de marque Tecnolub. C'est un système d'accessoire qu'on peut le faire monter sur différents types de machine-outil. C'est un système qui peut fonctionner en tournage qu'en fraisage. Il demande juste un réglage du débit et ajustement des canaux de lubrification sur la zone de coupe. La figure suivante montre une photo du système du micro-pulvérisateur utilisé en MQL.



**Figure II-23-système MQL TecnoLub**

-Conceptions de TecnoLub, développe et fabrique trois types de systèmes de micro - lubrification :

#### **II-4-1-Micro pompes**

Les micros pompes volumétriques, en utilisant un piston pneumatique, injectent des quantités minuscules de lubrifiant à travers un tube capillaire à une buse de sortie. En parallèle, un second tube capillaire fournit à basse pression une pulvérisation d'air. Un réservoir contenant du lubrifiant, alimenté soit par gravité, soit par un ou plusieurs micro-pompes. Le système peut être actionné manuellement, électriquement ou pneumatiquement. Une fois qu'ils sont mis en place, les micros pompes sont puisées soit par un séquenceur pneumatique qui permet de 1 à 180 coups par minute, ou par une électrovanne commandée par un signal externe (automate programmable, commande numérique). L'air de pulvérisation est contrôlé par un réducteur de pression qui peut être ajusté entre 0 et 2,5 bars. [16]

#### **\*Applications**

- ❖ Lubrification dans les opérations d'usinage avec enlèvement de métal : fraisage, portail HSM, multibroches Portail fraisage, le brochage, le sciage, le perçage, taraudage, ...
- ❖ Lubrification dans les opérations d'emboutissage : pression à froid, emboutissage, la découpe, l'emboutissage, progressive Systèmes d'outillage, ...
- ❖ Lubrification pour entretien : huiler les chaînes, convoyeurs huilage, ...
- ❖ L'application d'agents de démoulage, les produits anti- corrosion, ...

#### **II-4-2- Réservoirs sous pression**

Un liquide est maintenu sous pression dans le réservoir, et pompé à travers le système de buses de micro- pulvérisation. Un air avec réglage indépendant pulvérise le liquide sur la zone de travail requis. Ce processus est adapté à tous les types de produits, même les plus agressifs et les viscosités allant de 5-320 cts.

Les paramètres suivants peuvent être ajustés :

- ❖ La pression du réservoir Pression d'air
- ❖ Pulvérisation
- ❖ Réglage manuel de la vitesse d'écoulement de produit

### **Applications**

- ❖ Bande d'huilage laissant laminoirs
- ❖ Petite passe humide dans les laminoirs
- ❖ Bande d'huilage entré dans une presse d'emboutissage
- ❖ Huiler rouleaux sur des lignes de profilage
- ❖ Adapté aux robots pour appliquer un agent de démoulage dans les machines d'injection plastique
- ❖ Les projections de produits dans l'industrie agro-alimentaire

### **II-4-3- Pompes volumétriques**

Ce système entièrement automatisé est principalement installé sur les nouvelles machines de fraisage ou pendant une refonte des modèles plus anciens. Il permet jusqu'à 16 broches à être alimenté à partir d'une station centrale, en utilisant soit une pompe à engrenages ou d'un pneumatique, Pompe à membrane.

Ce système de micro- lubrification est également particulièrement adapté à la distribution de produits à travers un réseau d'approvisionnement afin d'assurer une lubrification continue. La méthode peut gérer tous les types de produits, y compris les produits composés et toutes les viscosités. Le volume de lubrifiant est déterminé par la pompe la vitesse ou la pression de l'air.

### **\*Applications**

- ❖ Système de micro- lubrification sur un portail de HSM.
- ❖ Système Micro - lubrification sur une machine d'usinage multibroche.
- ❖ Huiler à la sortie du laminoir, de 2 à 20 g / m<sup>2</sup>.
- ❖ Feuille d'huilage à l'entrée à la presse d'emboutissage automatique.
- ❖ Huiler pour le profilage et les opérations de refendage. . [16]

### **II-5-Procédé MQL**

Comme son nom l'indique, le principe consiste à utiliser un produit lubrifiant en très petites quantités. Nous pouvons ainsi définir micro - lubrification comme suit:

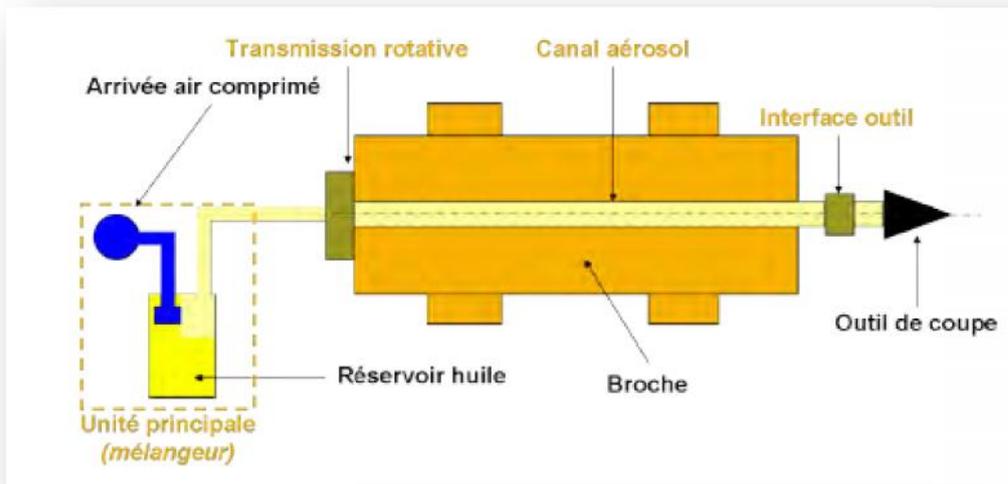
- ❖ Le Bon Produit
- ❖ Au Lieu Droit
- ❖ Au Bon Moment
- ❖ Dans La Bonne Quantité

Les procédés MQL et à sec sont des procédés plus prometteurs dans le secteur industriel d'avenir et environnemental. Réduire ou éliminer complètement le lubrifiant peut améliorer les performances d'usinage, qualité de l'air et de réduire les coûts d'usinage. Le liquide de refroidissement utilisé dans MQL doit être respectueux de l'environnement.

L'usinage à sec pourrait être utile dans le premier temps, mais si l'usure de l'outil et de la qualité de pièces sont considérés il sera utilisé avec prudence. Toutefois, lorsque l'usinage à sec n'est pas possible, une quantité minimale de lubrifiant pourrait être utilisée pour maintenir une vie de l'outil et une qualité de pièce raisonnable Il a été constaté que la déformation thermique et l'erreur de surface sont affectées par le fluide de coupe. L'usinage à sec et l'usinage inondé de 6061 alliages d'aluminium, a constaté que la MQL peut remplacer la lubrification inondée ou conventionnelle, si elle est correctement utilisée.

### **II-5-1 Création du brouillard MQL**

Il existe principalement deux systèmes permettant de créer le mélange air-huile. Ces deux systèmes se différencient par le lieu de production du mélange.



**Figure II-24 Système MQL mono canal [4]**

Dans le premier système (mono canal), le mélange est fait à l'extérieur de la machine puis amené au niveau de la zone de coupe par un canal unique. Ce système est décrit sur la figure. Il présente l'avantage de pouvoir être facilement mis en place sur une machine non conçue (au départ) pour réaliser des usinages MQL.

Cependant, ce type de système est assez peu réactif lors d'un changement d'outil à cause de la longueur des canaux séparant l'unité principale de l'outil de coupe. La mise en service du dispositif MQL n'entraîne pas une distribution immédiate de brouillard à la pointe de l'outil. Un autre système existe : le système bi-canal il permet de réaliser le mélange air / huile au plus près du corps de l'outil.

Ce type de système nécessite une modification de la broche mais offre un meilleur temps de réponse lors des changements d'outils. Le tableau présente les avantages et inconvénients des deux technologies permettant de réaliser le brouillard air huile. On notera que pour certaines applications (notamment lorsque la vitesse de rotation de la broche est supérieure à 15 000 tr/min) seul le système bi-canal permet d'assurer une distribution du brouillard air huile dans de bonnes conditions (c'est à dire en assurant une bonne homogénéité du mélange air huile en pointe d'outil). [4]

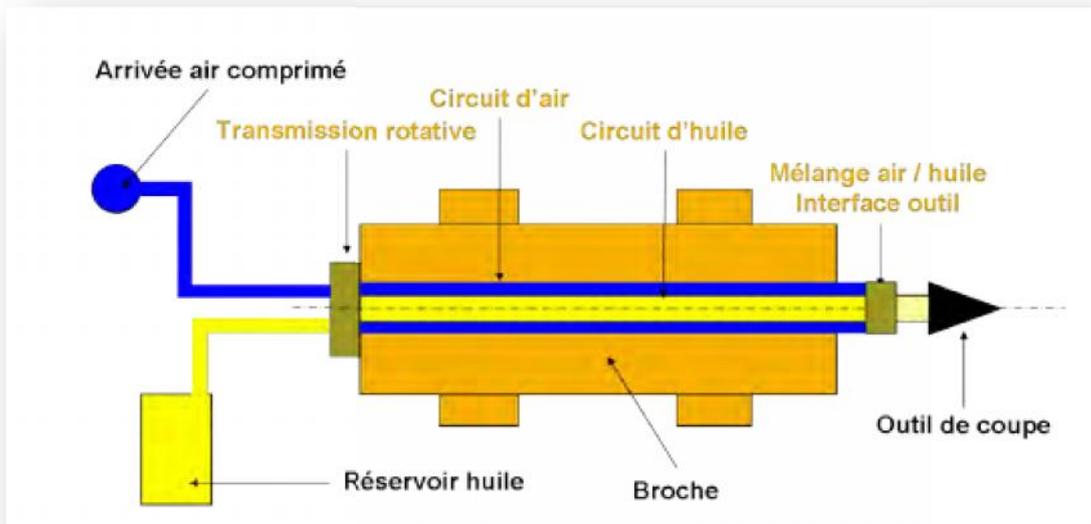


Figure II-25 Système MQL bi canal [4]

#### Avantages et inconvénients des systèmes MQL mono et bi canal

Les avantages et les inconvénients des systèmes mono et bi canal sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II-3 Avantages et inconvénients des systèmes MQL mono et bi canal

Système mono canal	Système bi canal
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rotation broche limitée à 16 000 tr/min</li> <li>- Influence de la vitesse de rotation de la broche sur la qualité du brouillard</li> <li>- Temps de réaction important</li> <li>- Viscosité de l'huile <math>&lt; 50 \text{ mm}^2/\text{s}</math> préconisée</li> <li>- Influence faible de la géométrie des canaux internes de l'outil</li> <li>- Pression de l'air <math>&gt; 5 \text{ bar}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rotation broche jusqu'à 40 000 tr/min</li> <li>- Pas d'influence de la rotation de la broche sur la qualité du brouillard</li> <li>- Temps de réaction réduit : mélange créé proche de la géométrie de coupe</li> <li>- Système indépendant de la viscosité de l'huile et de sa température</li> <li>- Forte influence de la géométrie des canaux internes de l'outil</li> <li>- Pression de l'air <math>&gt; 4 \text{ bar}</math></li> </ul>

## **II-6-Conclusion**

Le matériel et l'équipement utilisé ont permis de réaliser des essais de coupe dans les conditions souhaitées. Ces essais vont permettre de bien investiguer l'impact du mode de lubrification sur la qualité des pièces ainsi que sur les efforts de coupe. Ceci aide a mieux cerner la problématique afin d'atteindre les objectifs cibles.

### **III-1-Introduction**

Dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière, l'objectif des chercheurs en général est de rechercher les conditions optimales d'usinage, qui permettent d'atteindre deux types d'objectifs, soit économiques soit technologiques ou les deux à la fois. Dans le cas présent; cette étude propose de déterminer un régime optimal permettant d'atteindre des objectifs technologiques et économique à la fois.

### **III-2-Approche**

Le fluide de coupe utilisé lors d'un processus d'usinage doit être évaluée à l'aide des facteurs mesurables qui peuvent être aussi appelé indicateurs. Dans ce sens, le procédé d'usinage peut être considéré comme étant lubrifié ou à sec. Au niveau d'entrée / sortie on trouve le processus qualité de surface; fluide coupe et effort de coupe doivent être minimisés. Selon la combinaison des vitesses de coupe et le mode de lubrification, on cherche des pièces de qualité en fournissant moins d'effort de coupe.

### **III-3-Principe d'optimisation**

D'ordre général, il est nécessaire de minimiser les fluides de coupe, les efforts de coupe et la rugosité avec un minimum de cout. Les trois paramètres prise en charge dans notre étude sont : fluides de coupe, les efforts de coupe et la rugosité.

L'efforts de coupe est confondu avec l'énergie ou la puissance de coupe. Quant à la rugosité, signifie la qualité de pièce usinée en général. La meilleure stratégie est d'usiner à sec ou avec le minimum de fluide avec meilleur fini de surface et meilleure productivité.

### **III-4- Résultats et Analyse**

#### **III-4-1-Puissance de coupe**

Lors d'une opération d'usinage la connaissance de la puissance de coupe est nécessaire afin de s'assurer que les organes de la machine permettent la transmission de cette puissance et qu'elle soit inférieure à la puissance disponible sur la broche de la machine.

Elle est donnée par la relation suivante :

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3}, kW$$

- ❖  $P_c$ : puissance de coupe (kW).
- ❖  $F_c$ : effort principal de coupe (N).
- ❖  $V_c$ : vitesse de coupe (m/min).

### III-4-2-Optimisation des conditions de coupe

Dans notre étude nous recherchons le régime de coupe optimal, qui satisfait les objectifs suivants :

- ❖ Meilleure productivité
- ❖ Bon état de surface ( $R_a$ ,  $R_t$  mini)
- ❖ Fluide moindre
- ❖ Faible puissance de coupe ( $P$  mini)

Les valeurs des paramètres de coupe optimales, obtenues sont présentées dans (le tableau III-4) Le débit de lubrification était de 0.2 l/s. Les moyennes et basses vitesses ont été testées au laboratoire de construction mécanique de l'université de Guelma.

Pour des vitesses relativement basses le mode lubrifier peut être intéressant du point de vue rugosité et efforts de coupe. Par contre, quand la vitesse augmente le mode à sec devient de plus en plus avantageux.

## C. Usinage conventionnel

### III-5-Résultat des expériences a sec et avec lubrification

Les paramètres Pour réalisée les essais de rainurage à sec et avec lubrification sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau III-4 Paramètres des essais à sec et avec lubrification**

Opération	Fraisage (rainurage)
Vitesses de coupe (m/min)	157 - 220 – 314
Profondeur de passe ( Ap ) mm	1
Avance (m/min)	16
Lubrification	A sec – lubrifier
Matériau	Aluminium 6061 T6

Les résultats de rugosité (Ra, Rq , Rt ) obtenues pour les rainurage a sec et avec lubrification sont présentés dans les tableaux 2 et 3

✓ à sec

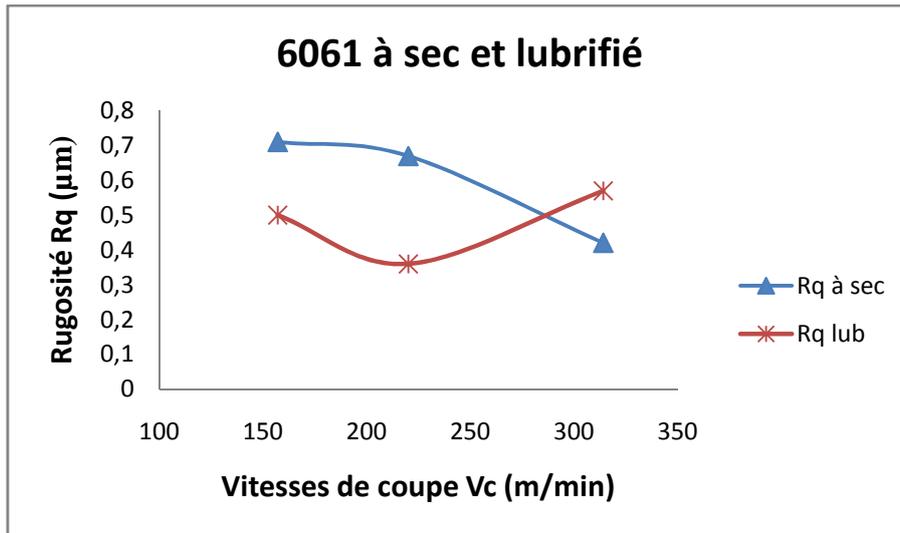
**Tableau III-5 rugosité et vitesses de coupe (essais à sec)**

Vc (tr/min)	157			220			314		
Rugosités	Ra	Rq	Rt	Ra	Rq	Rt	Ra	Rq	Rt
	0.59	0.71	3.58	0.53	0.67	3.04	0.35	0.42	2.20

✓ Lubrifier avec débit de 0.2 l/s

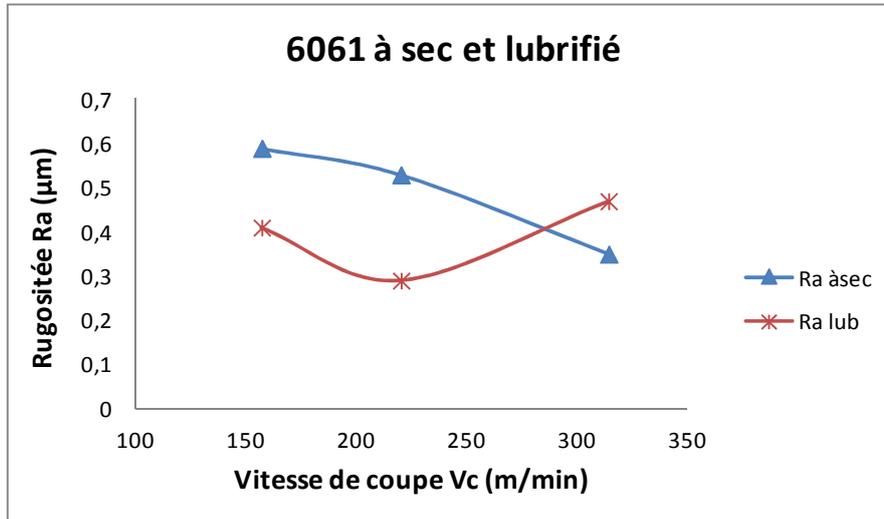
**Tableau III-6 rugosité et vitesses de coupe (essais avec lubrification)**

Vc (tr/min)	157			220			314		
Rugosités	Ra	Rq	Rt	Ra	Rq	Rt	Ra	Rq	Rt
	0.41	0.50	2.91	0.29	0.36	2.03	0.47	0.57	3.36



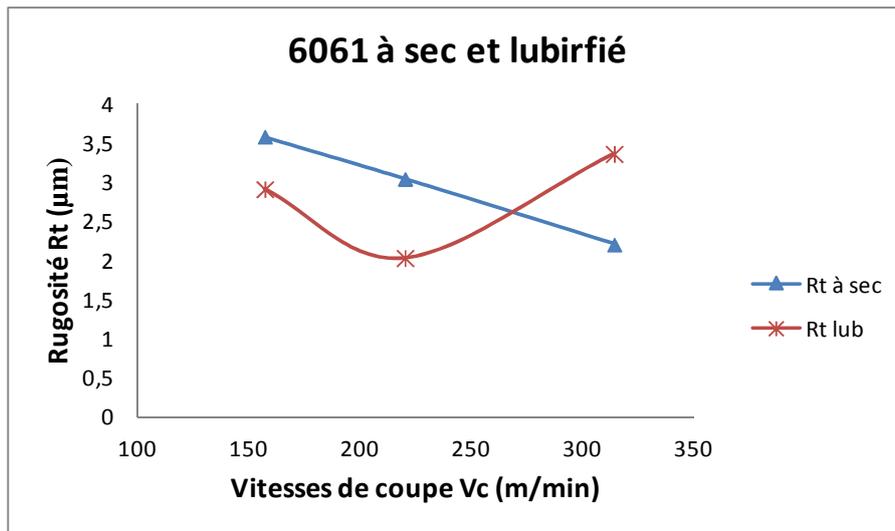
**Figure III-26 la rugosité Rq à sec et avec lubrifiant**

Il a été trouvée selon la figure III. 25 une diminution remarquable de la rugosité avec l'augmentation de la vitesse au mode à sec. Tant dit qu'en mode lubrifier la rugosité diminue en augmentant la vitesse puis remonte par la suite. Par contre la différence n'est pas très significative. Cependant, à haute vitesse, l'usinage à sec est nettement plus avantageux du point de vue rugosité. .



**Figure III-27 la rugosité Ra à sec et avec lubrifiant**

La rugosité Ra à sec diminue quand la vitesse de coupe augmente comme on le constate sur ce graphe à 157 la rugosité est de 0.59 et à 220 elle diminue à 0.53 et à 315 elle est à 0.35 tant dis que Ra lubrifier diminue à une vitesse moyenne de 220 et augmente juste après.



**Figure III-28 la rugosité Rt a sec et avec lubrifiant**

Comme pour Ra et Rq la rugosité Rt diminue remarquablement à sec avec l'augmentation de la vitesse de coupe mais pour l'usinage lubrifié Rt diminue en moyenne vitesse et reviens en hausse à haute vitesse.

### III-5-1-Discussion des résultats a sec et avec lubrification

Après les essais effectués au laboratoire de construction mécanique de l'université de Guelma et après avoir effectué des essais de fraisage à sec a des vitesses de 157,220 et 314 tr/min ,et des essais avec lubrifiant aux mêmes vitesses en ajoutant un débit d'écoulement de lubrifiant de 0.2 litres/seconde nous avons notées une chute de rugosité (Ra ,Rq ,Rt) en usinage à sec avec l'augmentation de la vitesse de coupe tandis qu'en usinage avec lubrifiant , la rugosité est grande a 157 tr/min et chute a 220 tr/min pour remontée remarquablement a 314 tr/min .

## D. USINAGE A GRANDE VITESSE

### III-6-Essais à sec et MQL

Une étude expérimentale a été effectuée par Khettabi et al sur l'aluminium 6061-T6 en fraisage. Cette étude a été réalisé avec de très grandes vitesses tout en utilisant le mode de lubrification MQL et le mode à sec afin de voire l'influence du mode de lubrification sur les efforts de coupe.

**Tableau III-7- Condition et paramètres utilisés lors de l'essai à sec et MQL**

Opération	Tournage
Avance (mm/tr)	0.055
Profondeur de coupe (mm)	1.0
Vitesse de coupe (m/min)	300-600-900-1200-1500
Le matériau des outils	Carbure non revêtue
Lubrification	A sec et MQL
Matériaux de pièce	Alliage aluminium 6061

### III-6-1-Résultat expérimentaux HSM

#### \* Forces

Les expériences réalisées pour l'alliage d'aluminium montrent que la force de coupe est sensiblement affectée par la vitesse et les matériaux de la pièce lors de la coupe. Généralement, lorsque la vitesse de coupe augmente la force de coupe diminue. Ceci confirme les différents travaux de la littérature (Y. Zedan et al. 2011 et 2010 J. Kouam et al, 2011). Il a été observé qu'il y a une différence importante dans la force de coupe dans l'alliage d'aluminium 6061 pour les différentes conditions. Ceci est dû au mode de déformation au cours des processus de coupe. La force de coupe enregistrée était plus élevée pour le mode MQL 7 mm<sup>3</sup>/s. Généralement, lorsque la vitesse du système d'écoulement MQL augmente, la force de coupe diminue. En tous cas, plus la vitesse augmente, plus la force diminue et à très grande vitesse, la force de coupe semble être la même. À très grande vitesse il n'y a pas d'influence du mode de lubrification et toute la chaleur générée lors de la déformation est évacuée par le copeau sans avoir du temps suffisant pour se transférer à la pièce ou à l'outil de coupe. Dans cette condition, le procédé à sec peut être avantageux par rapport à tous les modes de lubrification. [17].

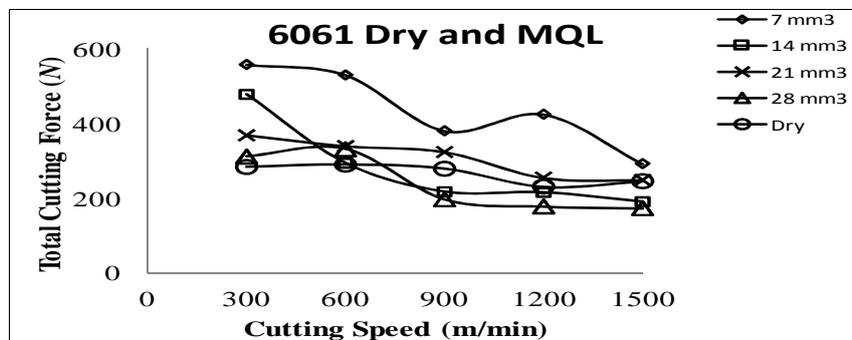


Figure III-29 efforts de coupes a de très grandes vitesses à sec et MQL

#### \*Rugosité

Selon les résultats expérimentaux à haute vitesse soit 300, 600, 900,1200 et 1500 m/min les valeurs de la rugosité Ra en mode MQL sont présentées dans le tableau suivant (Tab III-8).

**Tableau III-8 résultats de rugosité avec procédé MQL**

Vitesses (m/min)	Rugosités ( $\mu\text{m}$ )	Débit $\text{mm}^3/\text{s}$
300	0,42	7
600	0,24	
900	0,16	
1200	0,17	
1500	0,19	
300	0,22	14
600	0,18	
900	0,24	
1200	0,22	
1500	0,21	
300	0,26	21
600	0,14	
900	0,43	
1200	0,32	
1500	0,28	
300	0,23	28
600	0,25	
900	0,18	
1200	0,24	
1500	0,23	
300	0,35	A SEC
600	0,23	
900	0,14	
1200	0,19	
1500	0,16	

Après l'analyse des résultats de la rugosité Ra la figure III-29 montre la variation de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe et le mode de lubrification. Les essais réalisées de

l'usinage à très grandes vitesses a sec ou MQL ont montré que d'ordre général, la rugosité diminue quand la vitesse augmente. D'autre part, a des vitesses relativement basses l'usinage a sec ou avec le plus bas débit de lubrification MQL présente la rugosité la plus élevée, bien que la diminution devient plus importante quand la vitesse augmente. A très grande vitesse la rugosité des différents débits ainsi que celle de l'usinage a sec semble presque identique.

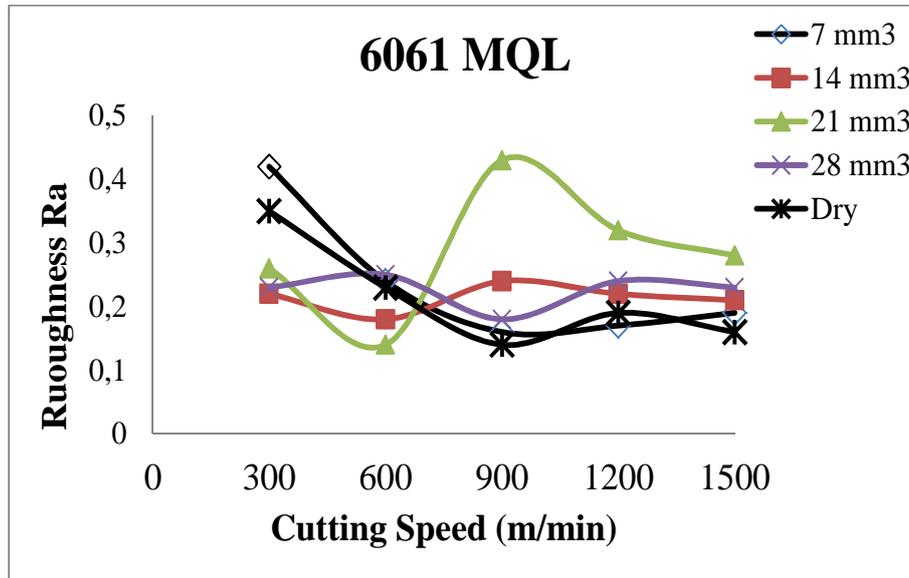


Figure III-30 la rugosité Ra en essais MQL

Et dans ces conditions l'usinage à sec peut être avantageux par rapport a tous les modes de lubrification.

### III-7-Conclusion

D'après l'étude des résultats obtenue en usinage à sec et lubrifier ainsi qu'en mode MQL les résultats obtenus prouvent que l'usinage à sec et MQL avec le plus bas débit d'écoulement de l'aluminium 6061-T6 donne de meilleurs performances en fini de surface et efforts de coupe.

## **Conclusion générale**

D'après l'analyse développée dans le cadre de ce travail et en se basant sur l'expérimentation réalisée sur l'aluminium 6061-T6, il a été conclu que :

- ✓ L'usinage à sec ou MQL donne des meilleurs résultats que l'usinage lubrifié dans des conditions similaires.
- ✓ L'usinage MQL peut être la seule alternative si la lubrification est inévitable (usure accélérée de l'outil).
- ✓ La stratégie qu'il faut adopter c'est d'augmenter la vitesse de coupe et diminuer la lubrification au possible.
- ✓ Le fini de surface et l'effort de coupe sont sensiblement influencés par la vitesse de coupe que par le mode de lubrification.

## **Perspectives et travaux futurs**

L'usure des outils est un élément important dans les études de performance des procédés de fabrication. En termes de productivité, il est nécessaire d'étudier l'usure.

Il est aussi important de généraliser cette étude sur d'autres matériaux qui possèdent un comportement différent ou un mode de durcissement différent.

L'usinage à sec et MQL est en cours d'émergence et nécessite l'apprentissage et la formation du personnel qualifié

N° de la fig.	Nom de la figure	N° page
I-17	Procès de coupe	3
I-18	Paramètres de coupe	4
I-3	Ordre 1	5
I-4	Ordre 2	6
I-5	Ordre 3	6
I-6	Ordre-4	7
I-7	Fraisage radial modélisé par altintas.	8
I-8	Allure des lobes de stabilité pour un mode	9
I-9	efforts outil/pièce en tournage	10
I-10	Perçage sans avant-trou	10
I-11	Perçage avec avant-trou	11
I-12	abrasifs d'usure de l'outil sur le visage de flanc de l'outil de coupe	15
I-13	Influence de MQL sur la température de coupe	19
I-14	Usure des outils de coupe	20
I-15	outils de coupe en céramique $Al_2O_3$ / TIC / $CaF_2$ b) outils $Al_2O_3$ / TiC sans $CaF_2$	23
-I-16	Analyse SEM (flanc MQL)	24
II-17	Machine-outil (Fraiseuse ALMO FV1.5)	25

II-18	Diagramme de phase pseudo-binaire Al-Mg <sub>2</sub> Si	28
II-19	Différentes étapes de la fabrication pour l'AA6061	30
II-20	Photo de la pièce usinée	30
II-21	pièce usinée en 3d	31
II-22	rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo)	32
II-23	Système MQL TecnoLub	33
II-24	Système MQL mono canal	38
II-25	Système MQL bi canal	37
III-26	la rugosité Rq a sec et avec lubrifiant	42
III-27	la rugosité Ra a sec et avec lubrifiant	42
III-28	la rugosité Rt a sec et avec lubrifiant	43
III-29	efforts de coupes a de très grandes vitesses à sec et MQL	44
III-30	la rugosité Ra en essais MQL	46

<b>N° du tab</b>	<b>Nom du tableau</b>	<b>N° page</b>
I-1	Applications possibles de l'usinage à sec et de l'usinage MQL, d'après Weinert et al.	13
II-2	composition chimique du matériau ainsi que les spécifications relatives à l'AA6061.	26
II-3	Avantages et inconvénients des systèmes MQL mono et bi canal	37
III-4	Paramètres des essais a sec et avec lubrification	41
III-5	rugosité et vitesses de coupe (essais à sec)	41
III-6	rugosité et vitesses de coupe (essais avec lubrification)	41
III-7	Condition et paramètres utilisés lors de l'essai à sec et MQL	44
III-8	résultats de rugosité avec procédé MQL	45

## résumé

MQL et procédés secs deviennent des enjeux les plus importants dans le secteur manufacturier avenir. Réduire ou éliminer complètement le lubrifiant peut améliorer les performances d'usinage, qualité de l'air et de réduire les coûts d'usinage. Le liquide de refroidissement utilisé dans MQL doit être respectueux de l'environnement. Le débit doit être également optimisée en vue d'améliorer la performance d'usinage et réduit les émissions de particules. Notre étude a été menée dans le but d'optimiser le processus de MQL sec et. Il a été constaté que le procédé MQL peut réduire les forces de coupe, la friction et l'usure par rapport à la coupe à sec. Chip morphologie montre que l'utilisation du liquide de refroidissement pendant le processus MQL fragilise la puce. Cependant, dans des situations particulières, le procédé à sec peut être compétitif par rapport à l'humide ou les processus de MQL. Dans cet article, une étude d'enquête a été réalisée sur la performance de MQL (quantité minimale de lubrifiant) et sec fraisage à grande vitesse de trois types d'alliages d'aluminium 7075, 6061 et 2024.

Quatre taux de brouillard d'écoulements différents sont testés au cours des processus d'usinage MQL. Les effets de la vitesse de coupe, le mode de lubrification et de matériel sur la qualité de la pièce ont été étudiées. La performance d'usinage est évaluée selon la force de coupe, émission de particules et la finition de surface. Les résultats expérimentaux ont montré que le fraisage de MQL peut être intéressé en termes de force ou de la finition de surface, mais si l'émission de particules est considéré comme l'usinage à sec seront mieux. Pour les différents modes de lubrification à des vitesses très élevées, les résultats semblent converger. Dans ce cas, l'usinage à sec devrait être avantageux.

## INTRODUCTION

MQL et procédés à sec sont des procédés les plus prometteurs dans le secteur industriel avenir et l'environnement. Réduire ou éliminer complètement le lubrifiant peut améliorer les performances d'usinage, qualité de l'air et de réduire les coûts d'usinage. Le liquide de refroidissement utilisé dans MQL doit être respectueux de l'environnement. Le débit doit être également optimisée en vue d'améliorer la performance d'usinage et réduit les émissions de particules.

L'utilisation de lubrification représente jusqu'à 20% du coût d'usinage [Weinert et al. 2004]. L'usinage à sec pourrait être utile dans le premier temps, mais si l'usure de l'outil et de la qualité de partie sont considérés comme il sera utilisé avec prudence. Toutefois, lorsque l'usinage à sec est pas possible, une quantité minimale de lubrifiant pourrait être utilisée pour maintenir une vie de l'outil et une partie qualité raisonnable. Il a été constaté que la déformation thermique et l'erreur de surface sont affectées par le fluide de coupe [Cozzens et al., 1995].

Une étude menée par Sreejith (2008) comparent la MQL, le sec et l'usinage inondée de 6061 alliages d'aluminium, a constaté que la MQL peut remplacer le liquide de refroidissement inondée si elle est correctement utilisée. Dhar et al., (2006) ont constaté que la rotation de MQL affecte significativement la température, la puce et la précision dimensionnelle de coupe par l'amélioration de l'état de surface et de la vie de l'outil. Il a été indiqué également lors d'un travail de recherche mené sur les processus de fin de fraisage à haute vitesse des alliages d'aluminium que MQL est très efficace [Lopez et al., 2001].

La méthode MQL est confirmée par différentes études de recherche comme une technique écologique et économique (Weinert 2004; Weinert 1994; McCabe et Ostraff 2001; Makiyama 2002; Suda 2002; Makiyama et Yamane 2004; Wakabayashi, Inasaki et al., 2006). Néanmoins, MQL est susceptible de générer de la poussière sèche et humide en plus de nécessiter un équipement supplémentaire. Par conséquent, dans certaines conditions, l'usinage à sec pourrait être une bonne alternative. Les fluides de coupe peuvent être toxiques

et augmenter les émissions de particules ( Sutherland et al 2000, Weinert et al 2004, Zaghbani et al 2008) . En outre , les fluides de coupe entraînent des coûts supplémentaires tels que l'achat et le traitement des fluides utilisés ( Rossmoore et Rossmoore 1991; Sondossi , Rossmoore et al., 2001 ) . Usinage à sec est l'un des processus les plus importants de la nouvelle tendance de l'usinage propre.

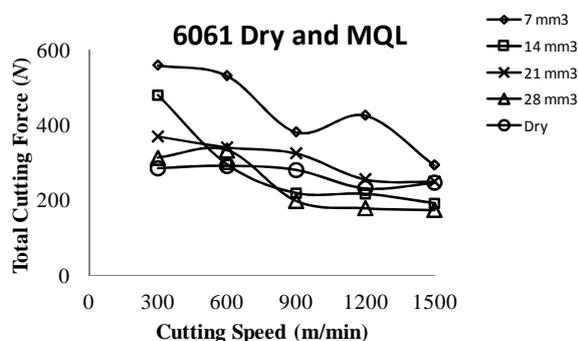
La présence de particules lors de l'usinage de coupe affecte la performance des processus , la qualité de l'air et aussi la machine-outil en fonction de la taille , la nature et la forme des particules . Les particules peuvent être dans l'usinage avantage si ils ont la nature du lubrifiant. En outre , dans le lubrifiant solide l'utilisation de petites particules de lubrifiant est plus efficace et améliore la performance des processus d'usinage , de réduire les forces de coupe et l'usure outil de flanc ( D. NageswaraRaoa et al ., 2008) . Il a été trouvé que le matériau ductile produit plus de particules que le matériau cassant ( Khettabi et al 2007 , 2008 , 2009 ; Songmene et al 2008 , Balout , Masounave 2003 ) . Il a été également constaté que la condition de coupe ( vitesse et l'alimentation ) et de la géométrie de l'outil ( angle de coupe et de l'angle de plomb ) ont de l'influence sur la quantité de particules produites lors des processus ( Khettabi et al 2007, 2008 et 2009 a, b de coupe , et c).

Dans cet article , une étude d'enquête a été réalisée sur la performance de MQL ( quantité minimale de lubrifiant ) et sec fraisage à grande vitesse de trois types d'alliages d'aluminium 7075 , 6061 et 2024. Quatre taux de brouillard d'écoulement différents sont testés au cours des processus d'usinage MQL . Les effets de la vitesse de coupe , le mode de lubrification et de matériel sur la qualité de la pièce ont été étudiées . La performance d'usinage est évaluée selon la force , les émissions de particules et de la finition de la surface de coupe .

#### - Forces

Les expériences réalisées pour les trois alliages d'aluminium montrent que la force de coupe est sensiblement affectée par la vitesse et les matériaux de la pièce de travail (fig. 2 ) de coupe. Généralement, lorsque la vitesse de coupe augmenter la diminution de la force de coupe qui confirment différents résultats de la littérature ( Y. Zedan et al . , 2011 et 2010 J. KOUAM & 2011) . Il a été observé qu'il ya une différence insignifiant dans la force de coupe entre 7075 et 6061 alliages d'aluminium , mais la pour alliage d'aluminium 2024 la force semble très élevé par rapport aux deux autres alliages en particulier pour les vitesses faibles et intermédiaires (fig . 2 ) . Ceci est dû au mode de déformation au cours des processus de coupe. Pour tous les matériaux de la pièce de travail , la force de coupe enregistré était plus élevé pour le mode MQL 7 mm<sup>3</sup> . Généralement, lorsque la vitesse du système augmente MQL d'écoulement,

la force de coupe diminue . En tout cas, à très grande vitesse , la force de coupe semble être le même . À très grande vitesse il n'y a pas d'influence du mode de lubrification et la puce évacue toute la chaleur générée lors de la déformation . Dans cette condition, le procédé par voie sèche peut être avantageux par rapport à tous les modes de lubrification .



Total des forces pendant la mouture sèche et MQL des alliages d'aluminium 6061

## CONCLUSION

Cette étude examine l'MQL et les procédés à sec afin d'améliorer la performance des processus de coupe. On a constaté que:

- L'augmentation de la lubrification de débit du système MQL diminue la force de coupe au cours du processus de broyage.
- L'augmentation de la lubrification de débit du système MQL augmente les émissions de particules au cours du processus de broyage.
- L'utilisation de la lubrification au cours des processus de coupe n'est généralement pas nécessaire à très grande vitesse, même pour le système MQL.
- La taille moyenne de particules produite pendant le processus de coupe n'a pas été régulièrement touchée par la vitesse de coupe, le débit de lubrification de taux et le matériau de la pièce de travail.
- Le diamètre moyen est relativement plus faible autour de vitesses de coupe de 900 m / min. Le broyage de MQL peut être intéressé en termes de force ou de finition de surface. Mais si l'émission de particules est considérée comme l'usinage à sec sera avantageux. Pour les différents modes de lubrification à des vitesses très élevées, les résultats semblent converger. Dans ce cas, l'usinage à sec devrait être bénéfique.

- [1] CHOUIKHI NADJETTE .Diagnostic des états de surface par analyse vibratoire dans les procédés d'usinage thèse de magister, Annaba, 2008.81p
- [2] Toufic WEHBE Étude des vibrations de pièce mince durant l'usinage par stéréo corrélation d'images. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse,2010,108p
- [3] cour efforts de coupes BTS pm première année,2010
- [4]Henry François Boyer. Usinage à sec ou MQL Quantification et prise en compte des dilatations thermiques durant le processus. Thèse de doctorat, ParisTech, 2013 ,128
- [5] Gaël LE COZ. Usinage de l'inconel 718 : intégrité de surface, mesure de température et modèle analytique du fraisage périphérique.Thèse doctorat, université de lorraine,2012 ,237p)
- [6] . Y.Kaynak, H.E.Karaca , R.D.Noebe , I.S.Jawahir . Outil d'analyse à l'usure dans l'usinage cryogénique de NiTi alliages à mémoire de forme: Une comparaison des performances outil usure avec l'usinage à sec et MQL. Journal wear,2013)
- [7] Rami MOHAMMAD, 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. Thèse de doctorat, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2011, 191p
- [8] N.R. Dhar , M.W. Islam , S. Islam , M.A.H. Mithu .The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel, Journal of Materials Processing Technology 171 (2006) 93–99
- [9] Ahmed Damir, Sophie Lancereau, Helmi Attia, Patrick Hendrick. On th e Performance of Minimum Quantity Lubrication in Milling Al 6061
- [10] Toshiyuki Obikawa, , Yasuhiro Kamata, Jun Shinozuka High-speed grooving with applying MQL, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1854 – 1861
- [11] A. Ginting, M. Nouari Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 758–768
- [12] Y.L. Su , T.H. Liu , C.T. Su , S.H. Yao , W.H. Kao , K.W. Cheng , Wear of CrC-coated carbide tools in dry machining Journal of Materials Processing Technology 171 (2006) 108–117

- [13] Deng Jianxin, Cao Tongkun, Yang Xuefeng, Liu Jianhua , Self-lubrication of sintered ceramic tools with CaF<sub>2</sub> additions in dry cutting, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 957–963
- [14] A. Attanasio , M. Gelfi, C. Giardini, C. Remino, Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear, *Wear* 260 (2006) 333–338
- [15] Yang chan, comportements et endommagements des alliages aluminium 6061-t6 Thèse de doctorat , l'École nationale supérieure des mines de Paris, 2012, 223p
- [16] documentations Tecnohub site internet [www.Tecnohub.com](http://www.Tecnohub.com)
- [17] Khettabi et al, ‘‘Effect of MQL and dry processes on the particle emission during milling of aluminum alloys’’ *Journal of Material processing Technology*, under submission, 2015.