

M (S3).660

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***

Présenté par : BOUDJELLAL Reda

Option : Maintenance Industrielle

=====

***Optimisation de l'usinage à sec et minimum
quantité de lubrification***

=====

Sous la Direction de :

Dr. KHETTABI Riad

Année universitaire 2013/2014

Remerciement

14/3028

*Je remercie tout d'abord Dieu de m'avoir gracié pour vivre,
apprendre, d'avantage, découvrir, et de m'avoir donné la Force et la patience
nécessaire pour mener le présent travail à terme.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur **KHATTABI RIAD** pour
son assiduité, ses conseils avisés, sa rigueur scientifique
et sa direction éclairée du travail qui m'a
été d'une aide inestimable.*

*A ces remerciements je souhaite associer toutes
Les personnes qui ont contribué de près ou de loin
A la réalisation de ce modeste travail*

*Je remercie également les examinateurs de cet humble travail
Aussi un grand merci à tous mes enseignants du département de génie
mécanique de l'université 08 Mai 1945 Guelma
Merci à mes parents pour m'avoir soutenu dans cette voie.*

Merci à tous... ..



DÉDICACE

*Je Dédie ce modeste travail aux êtres les plus chers de ma vie, mon père **Abdallah** qui a fait de moi un homme et ma Mère **Rabha** qui n'a pas cessé de m'encourager pour donner le meilleur de moi-même.*

*A mes très chers frères et sœurs
Mouhammed, Amir, Djamil
sans oublier mon neveu **Anisse, Akram.***

A toute ma grande famille.

A toutes les enseignantes et enseignants qui ont contribué à ma formation, du seuil du primaire jusqu'à l'université.

*Je tiens à le dédier aussi mes amis sans exception, et spécialement à **Jombo, Minou, Razak, Abdou, Wissam, Japoni, Bobe, Mouh et pakhe** à tous ceux qui sèment le Bonheur dans mon chemin.*

B. Reda



LISTES DES FIGURES

FIG I-1 : Principe et caractéristiques fondamentales des procédés de coupe.....	5
FIG I- 2 : Principaux acteurs de la modélisation analytique des procédés d'usinage.....	6
FIG I-3 : Approche de Merchant.....	8
FIG I-4-1 : Système MQL mono canal.....	9
FIG I-4-2 : Système MQL bi canal.....	10
FIG -I- 5 : Consommation mondiale des lubrifiants.....	11
FIG I- 6 : Le lubrifiant pénètre à l'interface copeau/outil.....	12
FIG I -7- : Composition générale du lubrifiant.....	13
FIG I-8 : Les régimes de lubrification.....	15
FIG I-9 : Usage des modèles dans l'usinage sec de NiTi.....	16
FIG I-10 : Modèles abrasifs d'usure de l'outil sur le visage de flanc de l'outil de coupe..	17
FIG I-11 Rugosité extérieure avec le progrès de l'usinage dans des conditions,.....	20
FIG I-12 les longueurs de coupes.....	20
FIG II-1 : Exemple de prémisses et les conclusions de Fuzzy-Floue.....	26
FIG III-1 :Présentation des différentes prémisses avec la conclusion adoptée.....	32
FIG III-2 : La schématisation des règles selon le logiciel.....	34
FIG III-3 : présentation et conclusion adopté sur l'usinage à sec.....	36
FIG III-4 :schématisation des règles selon le logiciel (mode à sec).....	38
FIG III-5 : présentation et conclusion adopté sur l'usinage MQL.....	38
FIG III-6 : schématisation des règles selon le logiciel (mode MQL).....	40
FIG III-7 : présentation et conclusion adopté sur l'usinage lubrifié.....	40
FIG III-8 : schématisation des règles selon le logiciel (mode lubrifié).....	42

LISTE DES TABLEAU

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients des systèmes MQL mono et bi canal.....	10
Tableau I-2-: Comparaison de propriétés de différents types de fluides de coupe.....	14
Tableau II-1 - feux de signalisation.....	23
Tableau III-1- Paramètre de coupe et leur niveau.....	35

SOMMAIRE

Introduction générale

Introduction générale.....	1
Problématique.....	1
Objectifs.....	2
Méthodologie.....	2

Chapitre I : La recherche bibliographique

I-Définition et classification des procédés d'usinage.....	3
I-1 Définition de l'usinage.....	3
I-2 Principaux procédés	3
I-2-1 Procédés de coupe.....	4
I-2-2 Procédés par abrasion.....	4
I-2-3 Procédés physico-chimiques.....	4
I-3 Modélisation.....	5
I-3-1 Historique de la modélisation analytique.....	5
I-3-2 Résumé du modèle de Merchant (1945).....	6
I-4 Minimum Quantité Lubrification	8
I-4-1 Définition.....	8
I-4-2 Création du brouillard MQL.....	9
I-4-3 Huiles utilisées en MQL	10
I-5 La lubrification.....	11
I-5-1 Rôle et composition des fluides de coupe.....	11
I-5-2 Régimes de lubrification.....	14
I-6 Usinage à sec.....	15
I-6 -1 Comparaison entre l'usinage sec et MQL	16
I-7 Optimisation	17

SOMMAIRE

I-7-1 Méthode.....	17
I-8 Travaux de recherche sur l'usinage MQL et à sec.....	18
Chapitre II : historiques de la logique flou	
II-1 Historique	22
II-1-1 Bref historique: le début	22
II-1-2 Bref historique: la maturité.....	22
II-2 Le concept de la logique floue	24
II-3 Exemple d'application	24
Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL	
III-1 Introduction	27
III-1-2 Problématique	27
III-1-3 Objectif.....	27
III-1-4 Méthodologie	27
III-1-5 Approche	27
III-2 Développement du programme d'optimisation de l'MQL.....	28
III-2-1 Principe	28
III-2-2 Programme	28
III-2-3 Définition des règles	29
III-3 Étude expérimentale	34
III-3-1 Application et validation	34
Conclusion générale.....	43

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

L'usinage est de nos jours un secteur fortement concurrentiel : les demandes du client en termes de coût économique et de performances sont de plus en plus importantes. Ce secteur connaît une course à l'innovation dans la conception de produit mais aussi dans les procédés de fabrication afin d'améliorer son efficacité industrielle. Une voie de travail possible est la diminution des coûts associés à l'usinage des pièces mécaniques sans pénaliser la qualité des pièces.

Actuellement, la grande majorité des productions de pièces par usinage se fait avec l'utilisation de liquide de coupe. Cependant la majorité des entreprises de fabrication cherche à réaliser le maximum de gain afin de demeurer concurrentielle. Ceci est devenu actuellement possible avec les outils d'optimisation et le développement de l'usinage et des techniques connexe. L'usinage à sec ou MQL est l'une des techniques en cours d'émergence qui ne cesse de se développer. L'usage par micro lubrification (ou Minimum Quantité de Lubrification, MQL) consiste à pulvériser dans la zone de travail de l'outil, et uniquement lorsque cela est nécessaire.

Ce travail 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 travail il sera réservé pour l'historique de la logique flou et les chercheurs qui ont développé ce travail et l'application quand peut utiliser. Dans le dernier chapitre on va discuter d'Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL et sec dans le matériau d'aluminium 6061-T6 et en va présenter le logiciel de la logique flou (outil travaille, machine d'application).

Problématique

Les fluides de coupe sont utilisés dans 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 jusqu'à 20% du cout de fabrication, 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

Introduction générale

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 lubrifiant nécessite des opérations additionnelles qui coutent plus cher en économie et en environnement.

Objectifs

Afin de résoudre cette problématique l'usinage à sec ou MQL peut être la meilleure solution. Cependant l'usure et la qualité peut être pénalisés. Une optimisation pour chercher moins de cout et respecter santé et environnement.

Méthodologie

La méthodologie adoptée dans ce travail est d'utiliser la logique flouc pour aider à prendre la décision si on supprime le fluide complètement ou de le réduire au minimum. Un programme 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.

Chapitre

I-Définition et classification des procédés d'usinage

I-1 Définition de l'usinage

L'usinage consiste à enlever de la matière sur une pièce afin de lui donner une forme, des dimensions et un état de surface définis. Ce procédé de fabrication est primordial pour la réalisation de nombreuses pièces destinées à l'industrie automobile, aéronautique, aérospatiale, de l'énergie et récemment à l'industrie biomédicale et microélectronique ou à l'industrie de luxe (montres, bijouterie).

Grâce aux développements dans le domaine des matériaux, principalement pour l'outillage, le travail des métaux par coupe a connu un progrès incontournable au cours de la dernière décennie. L'événement le plus important dans l'historique des procédés de coupe est sans doute l'apparition des outils en carbures métalliques (dans les années 30). A l'époque, cette démarche innovatrice a révolutionné le rendement économique des opérations de coupe. La vitesse de coupe a pu être augmentée de 20 m/min jusqu'à plus de 200 m/min.

L'évolution des matériaux pour les outils coupants et de leur géométrie, entraîne actuellement de manière très importante, comme elle l'a fait par le passé, l'essor technologique d'autres secteurs liés à ce procédé de fabrication. Il s'agit donc : du progrès dans la construction des machines outils (puissance, rigidité, moyen de lubrification), de l'usinage de nouveaux matériaux mais aussi de l'optimisation de l'usinage des matériaux connus (inclusions dans les aciers pour une meilleure usinabilité), de l'amélioration de fluides de coupe (baisse de toxicité et des coûts liés à la maintenance et au traitement des fluides de coupe usagés, formulation chimique) ou de la réduction de temps d'usinage par automatisation et informatisation du travail. [1]

I-2 Principaux procédés

Les procédés d'usinage sont extrêmement variés. Le terme « usinage » employé par abus de langage est consacré par l'usage pour tous les procédés qui suivent. Il est utilisé pour les procédés sans présence d'outil, mais avec intervention d'un milieu agressif. On distingue assez souvent les procédés d'usinage mécaniques dits traditionnels des procédés d'usinage non traditionnels (non traditional machining processes) ; cette dernière appellation désigne des procédés qui sont apparus après 1945 en grande partie pour usiner des matériaux se prêtant difficilement aux techniques d'usinage classiques. On peut également, schématiquement, classer les procédés d'usinage, selon les phénomènes physiques correspondants, en trois catégories principales. [2]

I-2-1 Procédés de coupe

L'enlèvement de matière se fait par action mécanique d'un outil coupant ; la force appliquée induit la formation, à l'échelle macroscopique, d'un ou plusieurs copeaux. Il existe un grand nombre de procédés, dont on peut les classer sous deux grandes classes:

- les procédés à forte vitesse (15 m / min) et grand débit de matière (fraisage, tournage, perçage) .
- les procédés de vitesse plus faible (sciage, rabotage, mortaisage, brochage, taraudage et alésage...). [2]

I-2-2 Procédés par abrasion

L'enlèvement de matière est dû à l'action mécanique d'un grand nombre de *grains d'abrasifs* de petite taille et de haute dureté. Ces grains agissent selon deux modalités différentes ; ils sont :

- soit liés à un support solide (abrasion à deux corps) : rectification, meulage ;
- soit transportés par un milieu fluide (abrasion à trois corps) : rodage et polissage à la pâte abrasive, usinage par ultrason, par un jet de fluide abrasif, ces deux derniers procédés étant classés parmi les procédés non traditionnels. [2]

I-2-3 Procédés physico-chimiques

Ils sont tous qualifiés de non traditionnels. L'enlèvement de matière est réalisé (à l'exception de l'impact d'un jet d'eau) par des actions non mécaniques :

- action thermoélectrique d'un arc électrique (électroérosion), d'un plasma ou d'un faisceau de lumière cohérente (laser) ou d'électrons ;
- action thermochimique de la flamme d'un chalumeau (oxycoupage) ;
- réaction électrochimique dans un électrolyte (usinage électrochimique) ;
- -réaction chimique avec un liquide (usinage chimique). [2]

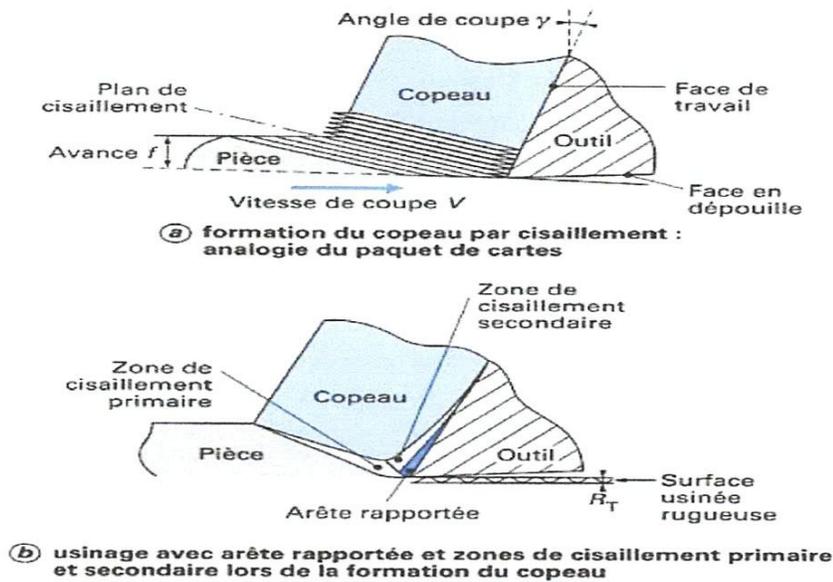


FIG I-1 : Principe et caractéristiques fondamentales des procédés de coupe [2]

I-3 Modélisation

I-3-1 Historique de la modélisation analytique

Afin de modéliser des procédés de coupe industriels tels que le tournage, le fraisage ou le perçage, il est nécessaire de comprendre les phénomènes existants dans des opérations de coupe simples telles que la coupe orthogonale ou oblique avec une arête droite. De nombreux auteurs se sont appliqués à étudier l'usinage et développer des modèles analytiques. De Zvorykin à Molinari et al. En passant par Merchant, Oxley ou Gilormini, tous se sont intéressés à la modélisation de la coupe (Figure-I-2). [3]

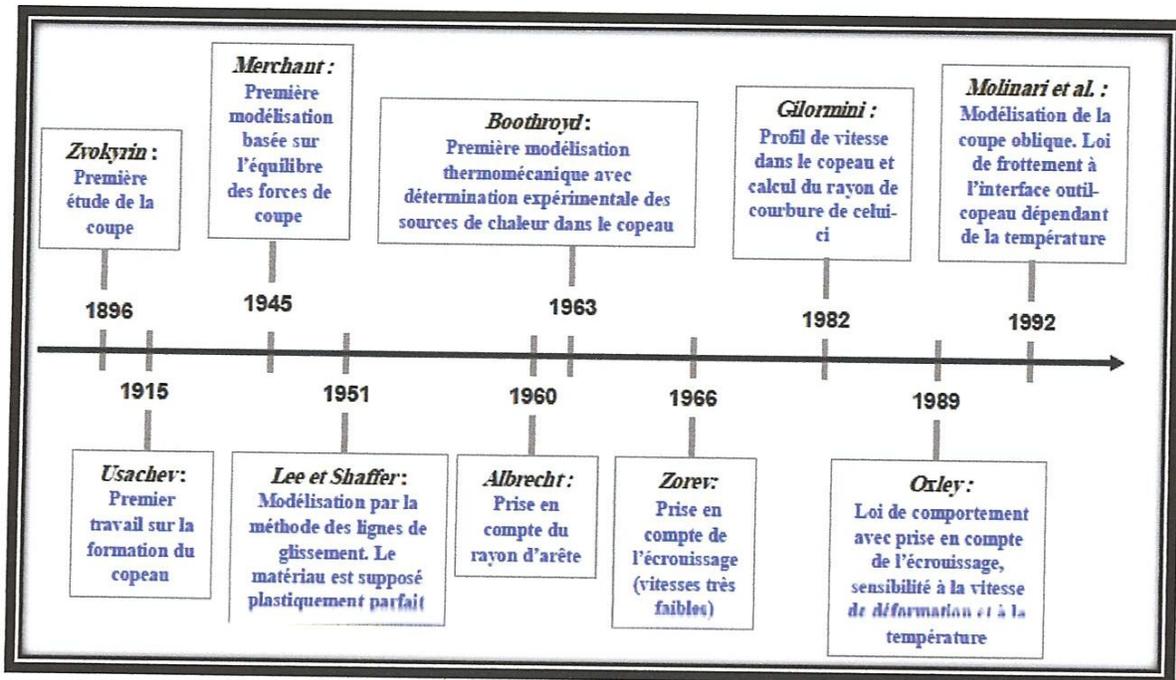


FIG I- 2 : Principaux acteurs de la modélisation analytique des procédés d'usinage
Merchant (1945) s'est intéressé au procédé de coupe orthogonal stationnaire avec un copeau non segmenté. Son approche purement mécanique est basée sur l'équilibre des efforts appliqués au copeau. [3]

I-3-2 Résumé du modèle de Merchant (1945)

Merchant est l'un des précurseurs de la modélisation de la coupe. Dans son modèle, la formation du copeau est supposée être due à un intense cisaillement le long d'un plan incliné d'un angle appelé coupe V (Figure I-3). L'auteur suppose également que l'on se place dans des conditions stationnaires en déformation plane. L'objet de l'étude est de prédire les efforts de coupe lors d'une opération simple de coupe orthogonale avec une arête droite.

Le modèle est basé sur les principales hypothèses suivantes : (i) le matériau usiné a un comportement parfaitement plastique, (ii) la zone de cisaillement primaire est assimilée à un plan, (iii) l'interface outil-copeau est le siège d'un frottement de type Coulomb (angle de frottement λ) suppose constant quelles que soient les conditions de coupe, (iv) le contact est supposé glissant. En supposant, la contrainte de cisaillement τ uniforme dans le plan de cisaillement, l'effort de cisaillement F_s , dans la zone de cisaillement primaire est donné par la relation: [3]

Recherche bibliographiques

$$F_s = w l_{OA} \tau = \frac{w t_1}{\sin\varphi} \tau$$

Ou w désigne la largeur de coupe, t_1 la profondeur de coupe (ou avance) et l_{OA} la longueur de OA (Figure I-3).

Les efforts de coupe sont alors calculés à partir de l'équilibre du copeau :

$$\begin{aligned} N_s &= F_s \tan(\varphi + \lambda - \alpha) \\ F_p &= F_s \cos\varphi + N_s \sin\varphi \\ F_q &= -F_s \sin\varphi + N_s \cos\varphi \end{aligned}$$

ou F_p et F_q représentent respectivement les efforts de coupe et d'avance et N_s la résultante des contraintes normales le long du plan de cisaillement OA . L'angle α est l'angle de coupe (Figure-I-3). L'angle de cisaillement φ est déterminé en minimisant la puissance totale P dissipée pendant la coupe :

$$P = F_p V = \tau V w t_1 \frac{\cos(\lambda - \alpha)}{\sin\varphi \cos(\varphi + \lambda - \alpha)}$$

La recherche du minimum de P , en supposant que la contrainte de cisaillement τ et l'angle de frottement λ sont constants, donne la relation :

$$\varphi = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha - \lambda}{2}$$

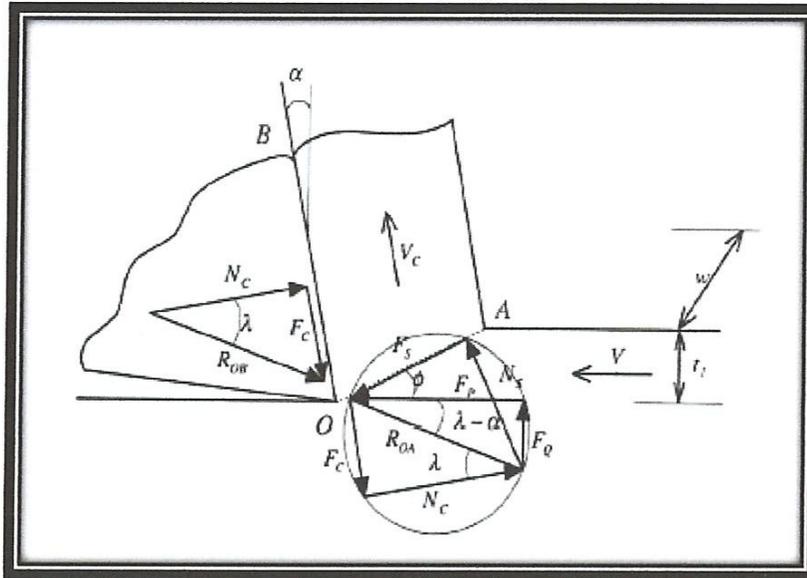


FIG I-3 : Approche de Merchant (1945) [3]

Les relations précédentes permettent alors de donner les expressions des efforts de coupe (3)

$$F_p = 2 \tau w t_1 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\lambda - \alpha}{2}\right)$$

$$F_q = 2 \tau w t_1 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\lambda - \alpha}{2}\right) \tan(\lambda - \alpha)$$

L'épaisseur du copeau est calculée en écrivant la conservation du flux de matière avec l'hypothèse que la vitesse est uniforme de part et d'autre du plan de cisaillement. L'hypothèse du comportement parfaitement plastique induit l'uniformité de la contrainte normale le long de la face OA. En écrivant l'équilibre des moments appliqués au copeau isolé (OA étant la frontière par rapport à la pièce), Merchant détermine la longueur de contact l_c entre l'outil et le copeau :

$$l_c = \frac{t_1}{\cos \lambda} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\lambda - \alpha}{2}\right)$$

I-4 Minimum Quantité Lubrification

I-4-1 Définition

Comme nous l'avons vu en introduction, 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 de 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. [4]

I-4-2 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.

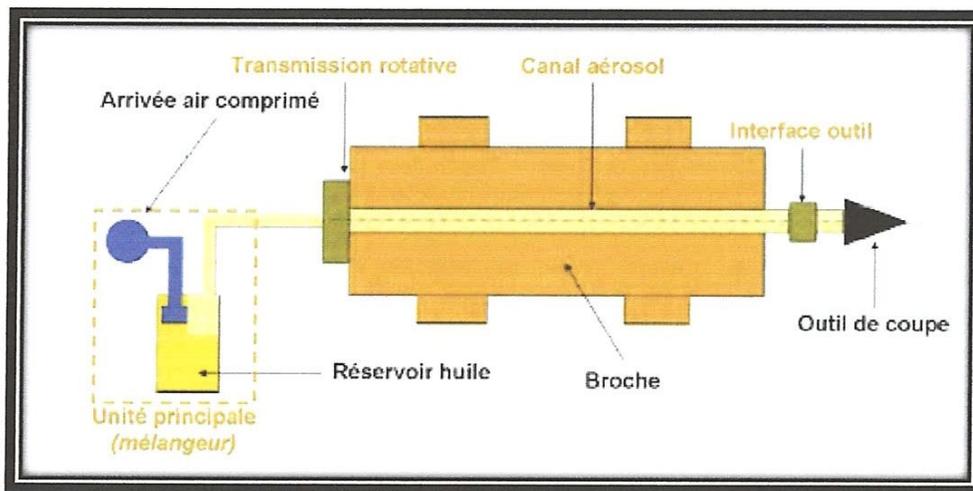


FIG I-4-1 : Système MQL mono canal [4]

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 I-4-1. 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 (figure I-4-2). Ce type de système nécessite une modification de la broche mais offre un meilleur temps de réponse lors des changements d'outils. Le tableau 4.1 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

Recherche bibliographiques

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).

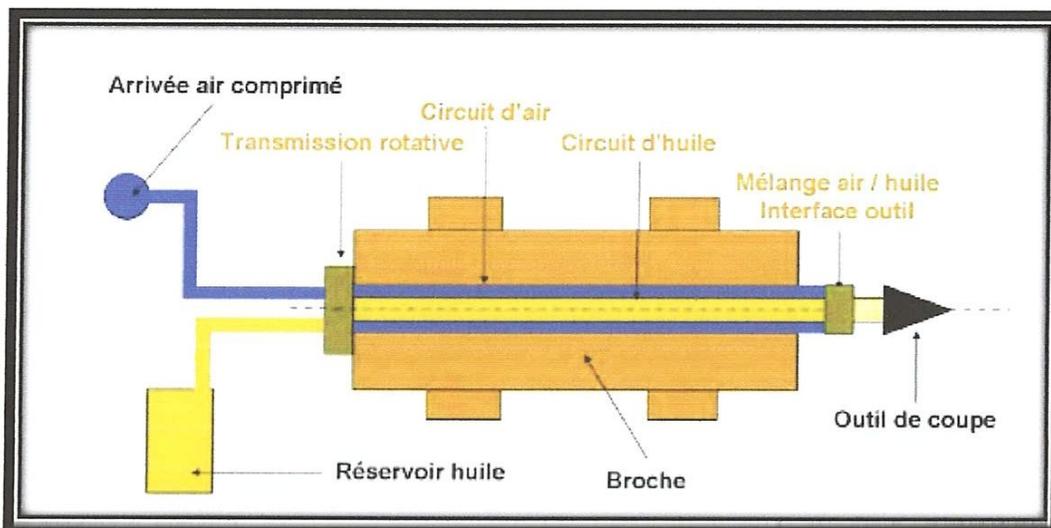


FIG I-4-2 : Système MQL bi canal [4]

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients des systèmes MQL mono et bi canal [4]

Système mono canal	Système bi canal
<ul style="list-style-type: none">- Rotation broche limitée à 16 000 tr/min- Influence de la vitesse de rotation de la broche sur la qualité du brouillard- Temps de réaction important- Viscosité de l'huile < 50 mm²/s préconisée- Influence faible de la géométrie des canaux internes de l'outil- Pression de l'air > 5 bar	<ul style="list-style-type: none">- Rotation broche jusqu'à 40 000 tr/min- Pas d'influence de la rotation de la broche sur la qualité du brouillard- Temps de réaction réduit : mélange créé proche de la géométrie de coupe- Système indépendant de la viscosité de l'huile et de sa température- Forte influence de la géométrie des canaux internes de l'outil- Pression de l'air > 4 bar

I-4-3 Huiles utilisées en MQL

Le choix d'une huile de coupe en arrosage est guidé par son influence sur les performances de coupe. De nombreuses études ont été menées depuis une vingtaine d'années pour améliorer les performances des liquides de coupe et permettre de guider le choix du

liquide en fonction de l'usinage à réaliser. Il existe deux principales familles d'huile de coupe utilisées en MQL : les esters synthétiques et les alcools gras. [4]

I-5 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 permettent 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]

- Faciliter l'évacuation des copeaux : à la fois à l'extérieur de la zone de travail de l'outil et vers une unité de collectage.
- Lubrifier les interfaces outil / pièce et outil / copeau : afin de réduire l'usure de l'outil avec le temps, améliorer la qualité des surfaces usinées et réduire les échauffements de la pièce et de l'outil.
- Assurer une régulation et une stabilisation thermique : on cherche à maîtriser les variations au cours du temps de la température de la machine, de l'outil mais aussi de la pièce afin notamment de limiter les dilatations de ces différents éléments.

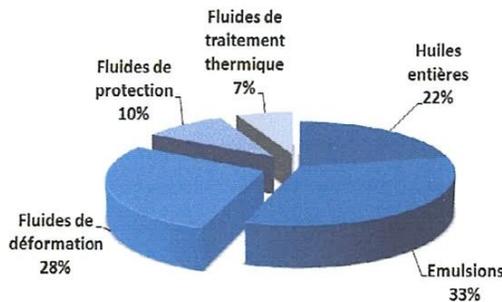


FIG -I- 5 : Consommation mondiale des lubrifiants 2004[4]

I-5-1 Rôle et composition des fluides de coupe

L'évacuation de la chaleur du copeau, de l'outil, de la pièce usinée et de la machine d'autre part. La lubrification consiste à réduire la quantité de chaleur produite par la diminution du frottement métal/métal et en facilitant l'écoulement du copeau sur l'outil. Le

Recherche bibliographiques

lubrifiant engendre des réactions physico-chimiques dans la zone de coupe, sur l'outil, sur les copeaux et la pièce usinée. Les produits de ces réactions à l'interface copeau-outil, sous forme d'une couche facilement cisailable par exemple, éviteront la soudure des surfaces, protégeront contre l'usure, diminueront le frottement et par conséquent le travail nécessaire pour enlever la matière et la chaleur générée à cette interface. [2]

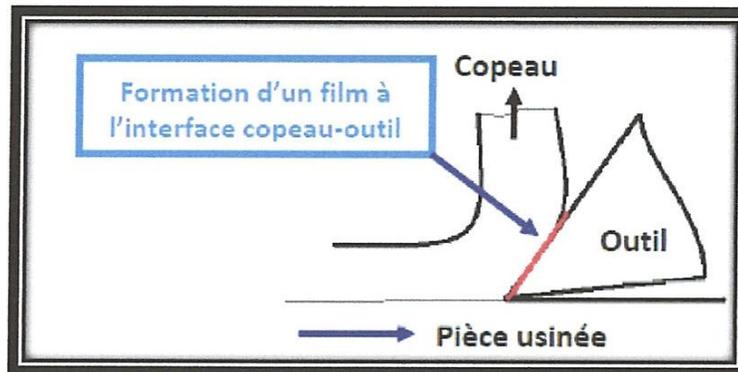


FIG I- 6 : Le lubrifiant pénètre à l'interface copeau/outil [2]

On distingue deux grandes familles parmi les fluides de coupe : les huiles de coupe entières et les fluides de coupe à base d'eau (fluides aqueux appelés souvent émulsions). Les huiles de coupe entières sont des produits qui ne contiennent pas d'eau.

Elles se composent d'huile de base (minérale, végétale, animale ou synthétique) à laquelle on ajoute différents additifs (antioxydant, antibrouillard, anti-usure (AU), extrême-pression (EP), onctuosité etc.) dans le but d'améliorer ses propriétés naturelles et de lui en conférer de nouvelles. Les bases d'origine minérale sont le plus souvent utilisées pour les huiles entières de coupe traditionnelles. Les bases d'origine végétale, pas encore bien appliquée dans les formulations traditionnelles à cause de leur stabilité thermique inférieure par rapport aux huiles minérales, sont souvent utilisées dans la micro-lubrification (cf. I.2.5. Performances actuelles – besoins de futur). Les lubrifiants d'aujourd'hui (toutes catégories confondues) sont constitués d'environ 93% d'huile de base et 7% d'additifs en moyenne [2] (Figure I-6). Ce sont les additifs qui sont la clé de la performance chimique du lubrifiant. En ce qui concerne les fluides de coupe à base d'eau, ce sont des produits que l'on obtient par la dispersion d'huile minérale ou synthétique (et d'additifs) dans l'eau stabilisée par des émulsifiants. Il existe aussi des solutions qui sont entièrement à base d'eau, auxquelles on ajoute des agents anticorrosion, des agents mouillants ainsi que des additifs (biocides, extrême pression (EP), anti mousse, etc.).

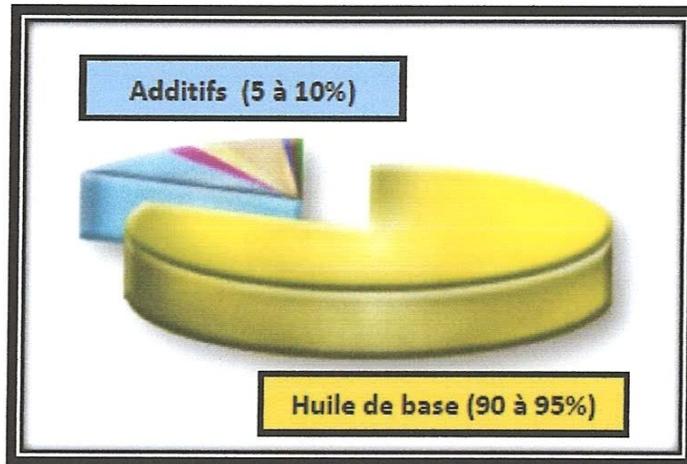


FIG I -7- : Composition générale du lubrifiant [2]

Il est admis qu'un seul lubrifiant polyvalent pour toutes les applications d'usinage n'existe pas. Le choix de l'utilisation des différents fluides se fait par rapport à la fonction du fluide recherchée pour l'application donnée et à la sévérité des sollicitations envisagée. Les fluides de coupe à base d'eau ont un très grand pouvoir de réfrigération car ils contiennent de l'eau (la capacité thermique de l'eau est égale à 4,2 J/gK alors que celle de l'huile est de 1,9 J/gK). Ils sont utilisés par exemple pour les opérations à grandes vitesses de coupe où la fonction de refroidissement est prépondérante. Les huiles entières, fortement concentrées en additifs chimiques, sont utilisées dans les applications où la fonction lubrifiante permettra d'améliorer la qualité de l'usinage. Le **Tableau I-2-** compare les propriétés des deux types de fluides de coupe. En fonction du matériau usiné, de l'outil coupant et des paramètres de coupe, le choix du fluide de coupe adéquat pour une application donnée peut être réalisé entre les huiles entières de coupe ou les fluides aqueux.

Tableau I-2-: Comparaison de propriétés de différents types de fluides de coupe
(+ Effet positif, - effet négatif, 0 effet indifférent) [2]

	Huiles de coupe entières	Fluides de coupe aqueux
Prix	- - -	+++
Coûts d'élimination	++	- / 0
Coûts de maintenance	+	- - -
Stabilité	+++	- - -
Bio stabilité	+++	- - -
Protection contre la corrosion	+++	++
Capacité de refroidissement	- - -	+++
Propriétés EP/AU	+++	+
Risque d'inflammabilité	- - -	+++
Consommation d'additifs	+ / 0	- -
Consommation d'huile	- - -	- / 0

I-5-2 Régimes de lubrification

On parle de lubrification lorsque l'on cherche à séparer deux corps solides en contact par un troisième corps, le lubrifiant, qui peut être liquide, solide ou gazeux. La courbe de Steinbeck permet de représenter les tendances d'évolution du coefficient de frottement global en fonction de la sévérité des conditions de chargement et de la vitesse au contact. On y distingue trois régimes de lubrification: [2]

✦ **Lubrification hydrodynamique et élastohydrodynamique par un film fluide épais :**

Le paramètre le plus important est la viscosité du lubrifiant qui définit, avec la vitesse, l'épaisseur du film d'huile (l'usure est inexistante),

✦ **Lubrification mixte (limite et hydrodynamique) :**

Les contacts solides sont plus nombreux que dans le cas du régime hydrodynamique,

✦ **lubrification limite :**

L'épaisseur du film d'huile devient négligeable par rapport à la rugosité des surfaces ; la viscosité de l'huile n'intervient plus, ce sont les additifs présents dans l'huile, en particulier les additifs anti usure et extrême pression qui joueront un rôle prépondérant.

La **Figure I-8** présente la courbe de Steinbeck et les quatre régimes de lubrification en fonction de la sévérité du contact.

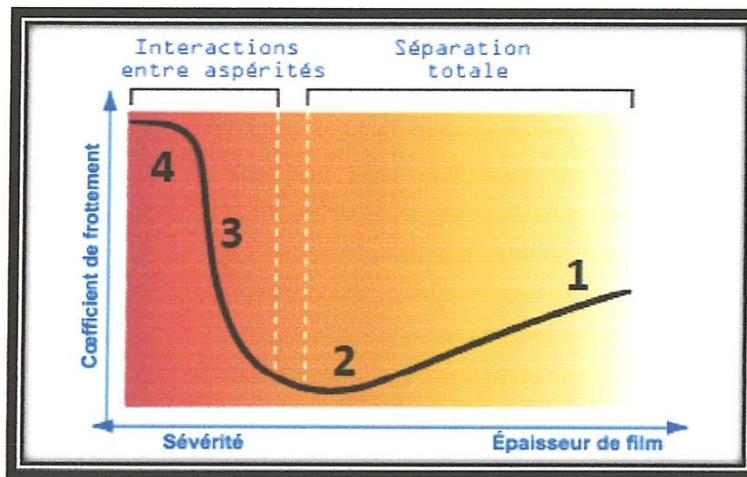


FIG I-8 : Les régimes de lubrification [Source : Tribologie CD-ROM, LTDS – Ecole Centrale de Lyon] 1 – Régime hydrodynamique, 2 – Régime élastohydrodynamique 3 – Régime mixte limite/hydrodynamique, 4 – Régime limite [2]

I-6 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]

Les avantages de l'usinage à sec de l'Inconel 718 peuvent être résumés ainsi [Dudzinski 2004] :

- Non pollution de l'atmosphère ou de l'eau, réduisant les dangers pour la santé en particulier les problèmes de peau et respiratoires.
- Absence de lubrifiant sur les composants usinés, réduisant les coûts de nettoyage et les énergies associées.
- Absence de lubrifiant sur les copeaux permettant une valorisation plus importante des déchets.
- Suppression de l'achat, de la préparation, de la maintenance et du retraitement des fluides de coupe.

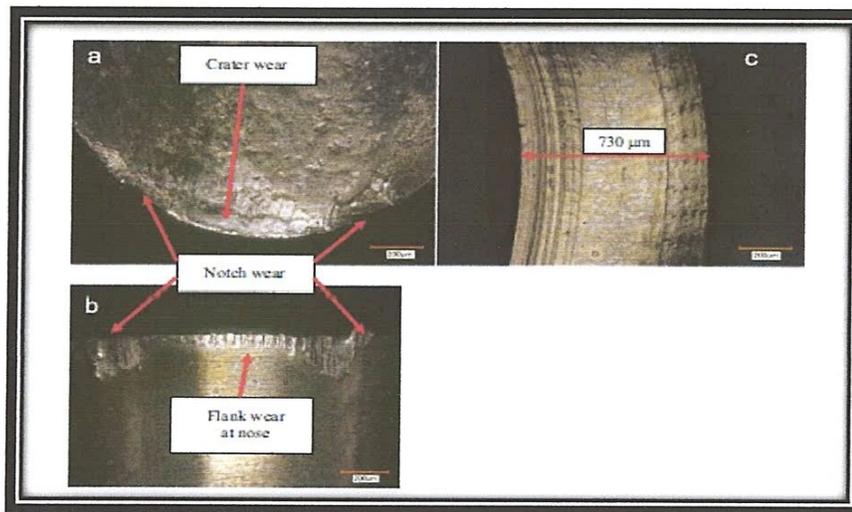


Fig I-9 : Usage des modèles dans l'usinage sec de NiTi [6]

I-6-1 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 figure 10 montre la profondeur de la sous couche affectée par l'usinage à sec, les grains sont déformés jusqu'à une profondeur de 70 µm alors que sous MQL cette affectation est réduite de 40 µm. 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]

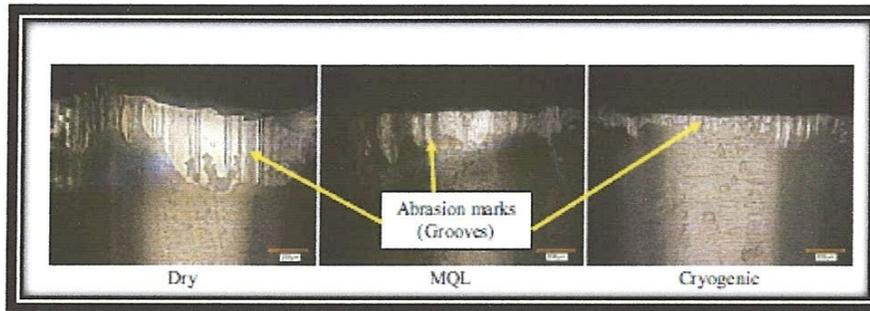


FIG I-10 : Modèles abrasifs d'usure de l'outil sur le visage de flanc de l'outil de coupe[6]

I-7 Optimisation

L'**optimisation** est une branche des mathématiques, cherchant à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à déterminer le meilleur élément d'un ensemble, au sens d'un critère quantitatif donné. Ce mot vient du latin optimum qui signifie le meilleur. L'optimisation joue un rôle important en recherche opérationnelle (donc en économie et microéconomie), dans les mathématiques appliquées (fondamentales pour l'industrie et l'ingénierie), en analyse et en analyse numérique, en statistique pour l'estimation du maximum de vraisemblance d'une distribution, pour la recherche de stratégies dans le cadre de la théorie des jeux, ou encore en théorie du contrôle et de la commande. Aujourd'hui, tous les systèmes susceptibles d'être décrits par un modèle mathématique sont optimisés. La qualité des résultats et des prédictions dépend de la pertinence du modèle, de l'efficacité de l'algorithme et des moyens pour le traitement numérique. [7]

I-7-1 Méthode

Pour cette méthode on a choisi la méthode de la logique floue : La **logique floue** (fuzzy logic, en anglais) est une extension de la logique classique aux raisonnements approchés. Par ses aspects numériques, elle s'oppose aux logiques modales. Formalisée par Lotfi Zadeh en 1965, outil de l'intelligence artificielle, elle est utilisée dans des domaines aussi variés que l'automatisme (freins ABS, conduite de processus), la robotique (reconnaissance de formes), la gestion de la circulation routière (feux rouges), le contrôle aérien (gestion du trafic aérien), l'environnement (météorologie, climatologie, sismologie, analyse du cycle de vie), la médecine (aide au diagnostic), l'assurance (sélection et prévention des risques) et bien d'autres. Elle s'appuie sur la théorie mathématique des ensembles flous. Cette théorie de : Zadeh est une extension de la théorie des ensembles classiques aux

ensembles définis de façon imprécise. Partant d'un concept de fonction d'appartenance à valeur dans $[0, 1]$.

La logique floue présente aussi l'intérêt d'être plus facile et moins chère à implémenter qu'une logique probabiliste, bien que cette dernière seule soit stricto sensu cohérente (voir Théorème de Cox-Jaynes). Par exemple la courbe $Ev(p)$ peut être remplacée par trois segments de droite sans perte excessive de précision pour beaucoup d'applications considérées ci-dessus.

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965 en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, nous permettons à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux. La logique floue confère ainsi une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes. Un des intérêts de la logique floue pour formaliser le raisonnement humain est que les règles sont énoncées en langage naturel. [7]

I-8 Travaux de recherche sur l'usinage MQL et à sec

Riad Khettabi et al [8]. Ont développé un nouveau modèle de fabrication durable dont l'objectif est d'accroître la productivité, réduire la puissance et l'énergie utilisée pendant l'opération de coupe, et réduire les impacts néfastes de l'usinage sur la santé des opérateurs et sur l'environnement au travail. La méthode d'évaluation adoptée combine la recyclabilité de l'énergie et les émissions d'aérosols. Les auteurs ont utilisé la méthode de la logique floue qui aide à prendre des décisions sur l'évaluation de la durabilité des procédés d'usinage. Ils ont validés le modèle par l'utilisation des résultats des essais expérimentaux de différents procédés à savoir le fraisage, le perçage et le tournage.

Il a été prouvé par les auteurs que :

1. La durabilité de l'usinage est fortement influencée par les paramètres de coupe des procédés qui doivent être optimisés.
2. La viabilité du modèle d'usinage proposée aide au recyclage, la toxicité et la réduction du coût et de la puissance, tout en améliorant la productivité.
3. L'usinage à très grande vitesse respecte la durabilité car il prend en compte la puissance, le coût des matériaux et la toxicité en générale.

4. Ce nouveau concept de la durabilité en utilisant la logique floue est très intéressant et peut être généralisée à d'autres procédés d'usinage et de formage.

D. P. Adler et al [9]. Ont présenté un modèle pour la formation et le comportement de brouillard des fluides de coupe. Les auteurs ont discutés des problèmes de santé associés à l'exposition au brouillard des fluides de coupe. Adler et al ont réalisés plusieurs Comparaisons entre les opérations d'usinage humides et sec afin de sortir avec des résultats qui permettent la réduction ou même l'élimination des fluides de coupe pour certains procédés d'usinage. Il a été trouvé par les auteurs que :

-Une Nouvelle approche a été identifiée qui peuvent être utilisés pour éliminer ou réduire la quantité de liquide nécessaire pour une opération d'usinage.

Dixit et al. (2012) [10] .Ont passé en revue quelques moyens importants pour réduire la demande de fluide et de leur impact sur les performances de l'usinage.les auteurs ont trouvé que les systèmes MQL possèdent de nombreux avantages sur le système de refroidissement d'inondation.

Les conclusions tirées par les auteurs sont les suivantes :

1. Ils ont exigé également quelques modifications de machines-outils pour l'obtention de la meilleure performance d'entre eux.
2. les machines-outils doivent être équipées avec un système d'évacuation des copeaux.
3. Une analyse coûts-avantages est nécessaire avant La mise en œuvre du système MQL.

N.R. Dhar et al [11]. Ont travaillé sur le rôle de MQL sur l'usure de l'outil et de la rugosité de surface en tournage de l'acier AISI - 4340, Dhar et al (2005) ont combiné la vitesse d'avance par plaquette de carbure non revêtue. Ils ont trouvé des résultats encourageants qui permettent la réduction significative du taux d'usure de l'outil et la rugosité de surface en prouvant que le MQL offre des avantages principalement de réduction de la température de coupe, ce qui améliore l'interaction entre pièce-outil, et de maintenir la netteté de la coupe en offrant une amélioration de la vie de l'outil et un meilleur fini de surface.

Il a été prouvé par les mêmes auteures que :

- La performance de fabrication MQL est une meilleure que la fabrication classique.
- Les surfaces améliorées due à la réduction de l'usure lors de la coupe.

Recherche bibliographiques

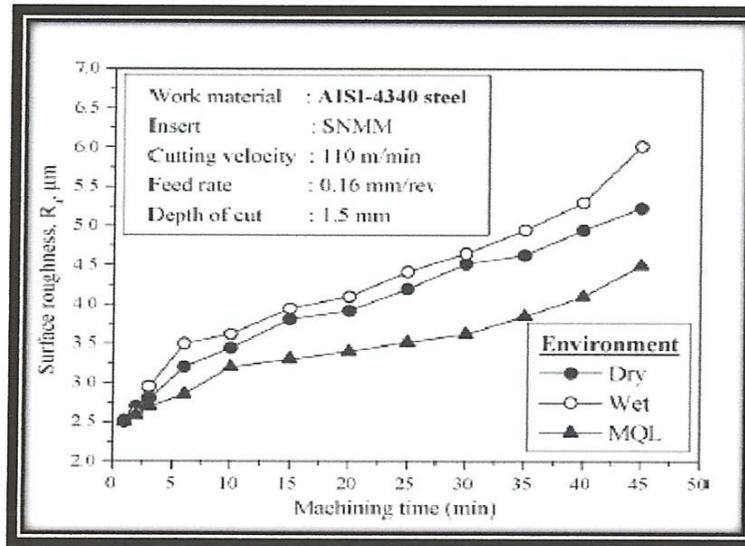
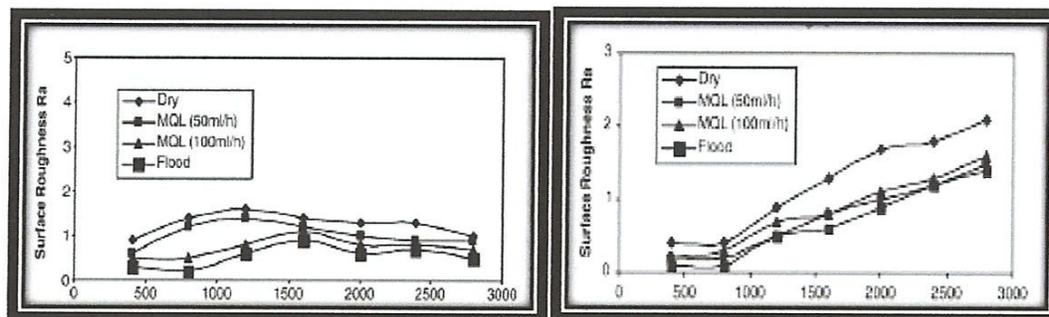


FIG I-11 Rugosité extérieure avec le progrès de l'usinage dans des conditions sèches, humides, et de MQL.

Un travail réalisé par P.S. Sreejith[12] porte sur l'effet de différents modes de lubrification affectant l'environnement lors l'alliage d'aluminium 6061 avec un outil de diamant revêtu de carbure. Il a constaté que la condition MQL sera une très bonne alternative comparé à l'usinage inondé de liquide lubrifiant. Par conséquent, il a été trouvé que si le MQL est correctement utilisé, il peut remplacer l'usinage lubrifié actuellement utilisé dans la plupart des applications d'usinage. Il a été prouvé par le même auteur que l'usinage a sec sera respectueux de l'environnement mais aussi permettra d'améliorer les caractéristiques d'usinabilité et a obtenue plusieurs avantages économiques. Le même auteur prévoit que le MQL au cours d'une opération d'usinage était capables de produire des résultats comparables avec celles des conditions de lubrifications.



Longueur de coupe (m) Vc 50m/h

longueur de coupe (m) Vc 400m/min

FIG I-12 les longueur de coupes

Victor Songmene et al [13] présentent les exigences de l'usinage à sec et son effet sur la productivité, et la qualité de la pièce. Les auteurs ont montré quelques stratégies pour limiter la génération de particules tout en demeurant compétitif. Les chercheurs ont montré aussi que la fabrication à sec est devenue aujourd'hui possible. Ils ont pu développer de nouvelles stratégies dans le but de réduire les coûts et de protéger l'environnement et la santé des travailleurs. Les travaux de laboratoire présentés par Victor Songmen et al ont également montré qu'il est possible de réduire la production de poussière lors de l'usinage à sec sans avoir des effets négatifs sur la productivité. Les stratégies présentées comprennent le choix de la géométrie de l'outil approprié et l'utilisation de la bonne combinaison de la vitesse de coupe et d'avance.

Il a été prouvé par les auteurs que :

- L'Usinage de petites avances combinées à des vitesses de coupe élevées réduit l'émission de poussière tout en augmentant la productivité et la qualité de la pièce ;
- le Démarrage de fabrication avec une vitesse de coupe de plus faible puis l'augmenter lorsque l'outil est complètement engagé dans le matériau de la pièce de travail est une bonne façon pour réduire considérablement l'émission de poussière sans sacrifier la productivité
- L'usinage à sec n'est pas toujours possible, en particulier pour les matériaux collants. Dans ce cas, l'utilisation de l'MQL est recommandée afin de limiter les coûts de lubrifiant (d'achat et de traitement).

Chapitre

II-1 Historique

La logique floue sert à représenter des connaissances incertaines et imprécises. La commande floue sert à prendre une décision même si l'on ne peut pas estimer les entrées/sorties qu'à partir de prédicats vagues ou lorsque ses entrées/sorties sont entachées d'erreurs que l'on peut évaluer que grossièrement.

On conçoit l'intérêt de faire entrer l'approche floue dans la régulation ou l'asservissement des processus industriels, pour lesquels les informations disponibles sont souvent imprécises, incertaines et parfois qualitatives, dans des boucles de régulation parfois incomplètes. Le savoir faire de l'opérateur, constitué entre autres souvent des règles simples, lui permet de conduire chaque machine plus correctement parfois qu'un algorithme classique. [7]

L'évolution historique de la logique floue est passée d'un début préliminaire à une maturité plus émergente.

II-1-1 Bref historique: le début

- 1965: Concept introduit par Pr. Lotfi Zadeh (Berkeley): « Fuzzy set theory »: Définition des ensembles flous et opérateurs associés
- 1970: Premières applications: Systèmes experts, Aide à la décision en médecine, commerce...
- 1974: Première application industrielle. Régulation floue d'une chaudière à vapeur réalisée par Mamdani.
- 1985: Les premiers se sont les japonais qui ont introduit des produits grand public « Fuzzy Logic Inside ». [7]

II-1-2 Bref historique: la maturité

1990: Généralisation de l'utilisation de cette technique.

- Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs,...etc.),
- Systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs,...)
- Systèmes automobiles embarqués (BVA, ABS, suspension, climatisation,... etc.),
- Systèmes autonomes mobiles,
- Systèmes de décision, diagnostic, reconnaissance,
- Systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production.

Chapitre II : Historique de la logique floue

De plus, il existe de processeurs et des interfaces de développement spécifiques (Cf doc 68HC12 de Motorola en Annexe) tel que la famille des processeurs WARP (Weight Associative Rule Processor) de SGS--THOMSON dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- ✓ Nombre de règles traitées : 256
- ✓ Nombre d'entrées : 16
- ✓ Nombre de sorties : 16
- ✓ Méthode de composition des règles : Centre de gravité
- ✓ Vitesse de traitement : 200 microsecondes pour 200 règles. [7]

Un exemple très pratique dans l'application de la logique floue est la conduite automobile à l'approche d'un carrefour contrôlé par des feux de signalisation. Le tableau ci-après présente les règles générales.

Tableau II-1 - feux de signalisation [7]

Si le feu est rouge	Si ma vitesse est élevée	Et si le feu est proche	Alors je freine fort
Si le feu est rouge	Si ma vitesse est faible	Et si le feu est loin	Alors je maintiens ma vitesse
Si le feu est orange	Si ma vitesse est moyenne	Et si le feu est loin	Alors je freine doucement
Si le feu est vert	Si ma vitesse est faible	Et si le feu est proche	Alors j'accélère

- Transposition de notre exemple selon un modèle plus mathématique « moins flou ».

Si le feu est rouge, si ma vitesse dépasse 85,6 Km/H et si le feu est à moins de 62,3 mètres, alors j'appuie sur la pédale de frein avec une force de 33,2 Newtons !!!

Notre cerveau fonctionne en logique floue.

Elle apprécie les variables d'entrées de façon approximative (faible, élevée, loin, proche), fait de mêmes pour les variables de sorties (freinage léger ou fort) et édicte un ensemble de règles permettant de déterminer les sorties en fonction des entrées. [7]

II-2 Le concept de la logique floue

Le principe de la logique floue est de considérer des classes d'objets dont les frontières ne sont pas clairement déterminées, par l'introduction d'une fonction caractéristique (fonctions d'appartenance des objets à la classe) prenant des valeurs courantes entre 0 et 1, contrairement aux ensembles «booléens», dont la fonction caractéristique ne prend que deux valeurs possibles 0 et 1.

Ces ensembles flous ont le grand avantage de constituer une représentation mathématique de labels linguistiques largement utilisés dans l'expression de connaissances expertes, qualitatives et manipulées dans le raisonnement approché qui sera fait à partir de cette connaissance.

Ils apparaissent donc comme un moyen de réaliser l'interface entre l'information numérique (quantitative) et l'information symbolique (linguistique, qualitative). [7]

II-3 Exemple d'application

Afin de mieux appréhender la problématique envisagée, nous proposons, avant l'étude rigoureuse des divers aspects relatifs à la commande floue, d'exposer un exemple afin de donner une idée de la commande floue en vue de mieux comprendre l'intérêt pratique des développements mathématiques utilisés dans la logique floue. Cet exemple repose sur l'utilisation de deux robinets pour mélanger l'eau froide et chaude. Température de l'eau froide est 40° F et la température de l'eau chaude est 140° F. Lorsque les robinets sont complètement ouverts, le débit d'eau est la même pour les deux et égale à 1 US gallons / minute.

- Nous voulons estimer, en utilisant Fuzzy-Flou, le débit de la température de l'eau et de l'eau lorsque les robinets sont ouverts à différentes positions.
- Analyse du problème
- Le problème de décision doit être analysé avant une base de connaissances est créé.

Dans notre exemple, deux locaux et deux conclusions doivent être définis. Les deux locaux sont les positions ouvertes pour les robinets d'eau froide et chaude. Une échelle de 0 à 10 sera utilisée pour expliquer l'ouverture du robinet. Notez que si Fuzzy-Flou est utilisé dans l'application Ergo seule conclusion pourrait être utilisé. Une valeur 0 signifie que le robinet est fermé et 10 indiquent que le robinet est complètement ouvert. Pour chaque principe trois ensembles flous sont définis. (Le

Chapitre II : Historique de la logique floue

nombre de sous-ensembles flous définis pour chaque local dépend de la complexité du problème. Pour les problèmes linéaires seulement quelques ensembles flous sont nécessaires pour assurer une bonne précision.

Pour des problèmes complexes, non linéaires, le nombre de sous-ensembles flous doit être supérieure). Trois ensembles flous définissant les positions ouvertes des robinets sont: fermé, moitié ouvert et ouvert.

Maintenant, les conclusions doivent être définies. Si possible devrait définir un ensemble de conclusions qui décrivent de façon réaliste les conditions qui peuvent résulter de différentes combinaisons de sous-ensembles flous pour les locaux.

Par exemple, lorsque les deux robinets sont à moitié ou complètement ouverts, la température de l'eau est de 90 ° C. Pour la combinaison différente d'ouvertures de prises, nous pouvons définir 5 ensembles flous des conclusions concernant la température de l'eau. La même procédure est utilisée pour définir le débit d'eau. Selon l'expérience ou des essais, nous pouvons définir 5 ensembles flous des conclusions pour l'écoulement de l'eau. **La figure II-1** présente des ensembles flous de prémisses et les conclusions de notre problème.

Chapitre II : Historique de la logique floue

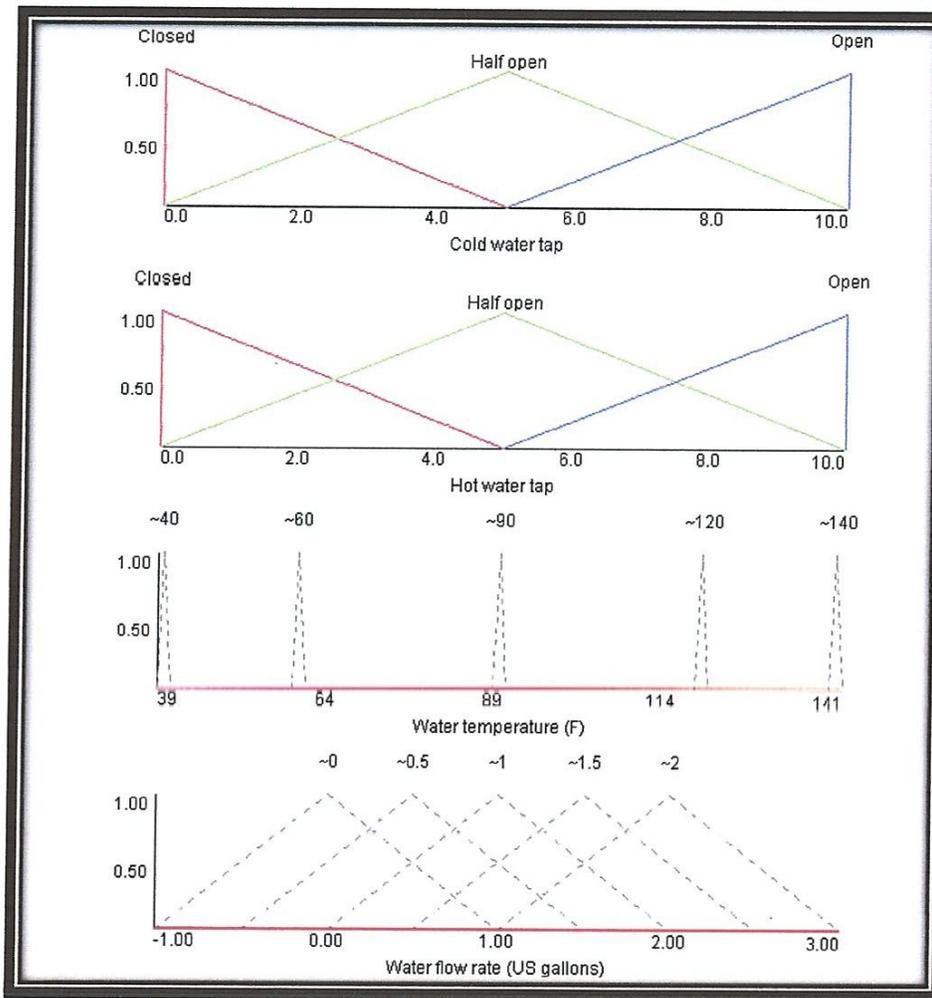


FIG II-1 : Exemple de premisses et les conclusions de Fuzzy-Flou

Chapitre

Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL

III-1 Introduction

Les fluides de coupe sont utilisés dans l'usinage pour réduire la friction, refroidir outil/pièce, évacuer le copeau et même protéger le couple outil/pièce contre la corrosion. Toute fois, il a été montré par plusieurs chercheurs que la réduction des fluides de coupe est bénéfique sur tous les niveaux (économique, écologique et sante et sécurité).

III-1-2 Problématique

Il a été montré que les fluides de coupe occupent presque 20% des coûts de fabrication des pièces. De plus, l'utilisation des fluides de coupe peut nuire à la santé des opérateurs et à l'environnement industriel. Du point de vue recyclabilité des copeaux, l'usage des fluides de coupe complique la situation et rajoute des frais additionnels lors de la décontamination et la gestion des déchets.

III -1-3 Objectif

Afin de résoudre cette problématique l'usinage à sec ou MQL peut être la meilleure solution. Afin de ne pas sacrifier la qualité de la pièce, la durée de vie des outils et la productivité, il est nécessaire de développer un outil de d'optimisation et d'aide à la décision.

III -1-4 Méthodologie

La méthodologie adoptée dans ce travail est d'utiliser la logique floue pour aider à prendre la décision si on supprime le fluide complètement ou de le réduire au minimum sans pénaliser les autres indicateurs de performance.

III -1-5 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 en étant lubrifié, semi-lubrifié ou à sec. Au niveau d'entrée / sortie les indicateurs (fluide coupe, effort de coupe et qualité de surface) doivent être minimisé. Ces trois indicateurs ne sont pas totalement dépendants et dépendent tous généralement, des facteurs suivants :

- l'opération d'usinage
- le matériau de pièce à usiner
- le matériau de l'outil de coupe et sa la géométrie

Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL

- les paramètres de coupe
- le mode de lubrification.

III-2 Développement du programme d'optimisation de l'MQL

III-2-1 Principe

Dans le domaine de fabrication, il est nécessaire de minimiser les fluides de coupe, les efforts de coupe, la rugosité et le cout tout en restant compétitif.

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.

III-2-2 Programme

La logique floue a été utilisée comme outil d'aide à la prise de décision dans le but de l'optimisation.

Trois premises, correspondant aux trois paramètres cités plus haut, ont été choisies.

Trois ensembles flous pour chaque paramètre et de forme trapézoïdale ont été sélectionnés. Trois niveaux donc pour chaque indicateur.

- fluide de coupe : varie de a sec, MQL et jusqu'à lubrification abondante.
- efforts de coupe : elle varie de bas, moyenne et va jusqu'à la grande vitesse
- Qualité de surface : C'est la rugosité qui est prise en charge. Elle varie de faible rugosité qui signifie une bonne qualité, puis moyenne et si la rugosité est plus importante, la qualité devient mauvaise.

En se servant de ces trois premises, on obtient la conclusion sur l'optimisation. Si les trois indicateurs sont au minimum, la conclusion doit être bonne. La combinaison des différentes situations des trois indicateurs selon leurs trois niveaux donne selon le logiciel à 27 règles qui se génèrent automatiquement.

Ces règles ont été réajustées en fonction de l'expertise imposée afin d'atteindre notre objectif.

La figure III-1 présente la disposition des différentes premises adoptées avec la conclusion d'optimisation.

Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL

III-2-3 Définition des règles

La schématisation des règles selon le logiciel est présentée dans la figure III-2
Ces règles sont définies comme suit :

Règle 1 : Si le mode de lubrifié est sec et la vitesse de coupe est faible et la qualité de surface est mauvaise. Alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

Règle 2 : Si le mode de lubrifié est sec et la vitesse de coupe est faible et la qualité de surface est moyenne. Alors l'optimisation de condition est moyenne (1.000 certitude).

Règle 3 : Si le mode de lubrifié est sec et la vitesse de coupe est faible et la qualité de surface est bonne. Alors l'optimisation de condition est en bon état (1.000 certitude).

Règle 4 : Si le mode de lubrifié est sec et la vitesse de coupe est moyenne et la qualité de surface est mauvaise alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

Règle 5 : Si le mode de lubrifié est sec et la vitesse de coupe est moyenne et la qualité de surface est moyenne. Alors l'optimisation de condition est moyenne (1.000 certitude).

Règle 6 : Si le mode de lubrifié est sec et la vitesse de coupe est moyenne et la qualité de surface est bonne. Alors l'optimisation de condition est en bon état (1.000 certitude).

Règle 7 : Si le mode de lubrifié est sec et la vitesse de coupe est élevée et la qualité de surface est mauvaise. Alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

Règle 8 : Si le mode de lubrifié est sec et la vitesse de coupe est élevée et la qualité de surface est moyenne. Alors l'optimisation de condition est moyenne (1.000 certitude).

Règle 9 : Si le mode de lubrifié est sec et la vitesse de coupe est élevée et la qualité de surface est bonne. Alors l'optimisation de condition est moyenne (1.000 certitude).

Règle 10 : Si le mode de lubrifié est MQL et la vitesse de coupe est faible et la qualité de surface est mauvaise. Alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

Règle 11 : Si le mode de lubrifié est MQL et la vitesse de coupe est faible et la qualité de surface est moyenne. Alors l'optimisation de condition est moyenne (1.000 certitude).

Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL

Règle 12 : Si le mode de lubrifiée est MQL et la vitesse de coupe est faible et la qualité de surface est bonne. Alors l'optimisation de condition sont en bon état (1.000 certitude).

Règle 13 : Si le mode de lubrifié est MQL et la vitesse coupe est moyenne et la qualité de surface est mauvaise. Alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

Règle 14 : Si le mode de lubrifié est MQL et la vitesse coupe est moyenne et la qualité de surface est moyenne. Alors l'optimisation de condition est moyenne (1.000 certitude).

Règle 15 : Si le mode de lubrifié est MQL et la vitesse coupe est moyenne et la qualité de surface est bonne. Alors l'optimisation de condition est en bon état (1.000 certitude).

Règle 16 : Si le mode de lubrifié est MQL et la vitesse de coupe est élevée et la qualité de surface est mauvaise. Alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

Règle 17 : Si le mode de lubrifié est MQL et la vitesse coupe est élevée et la qualité de surface est moyenne. Alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

Règle 18 : Si le mode de lubrifié est MQL et la vitesse coupe est élevée et la qualité de surface est bonne. Alors l'optimisation de condition est en moyenne (1.000 certitude).

Règle 19 : Si le mode de lubrifié est lubrifiée et la vitesse de coupe est faible et la qualité de surface est mauvaise. Alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

Règle 20 : Si le mode de lubrifié est lubrifiée et la vitesse de coupe est faible et la qualité de surface est moyenne. Alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

Règle 21 : Si le mode de lubrifié est lubrifiée et la vitesse de coupe est faible et la qualité de surface est bonne. Alors l'optimisation de condition est en bon état (1.000 certitude).

Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL

Règle 22 : Si le mode de lubrifié est lubrifiée et la vitesse coupe est moyenne et la qualité de surface est mauvaise. Alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

Règle 23 : Si le mode de lubrifié est lubrifié et la vitesse coupe est moyenne et la qualité de surface est moyenne. Alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

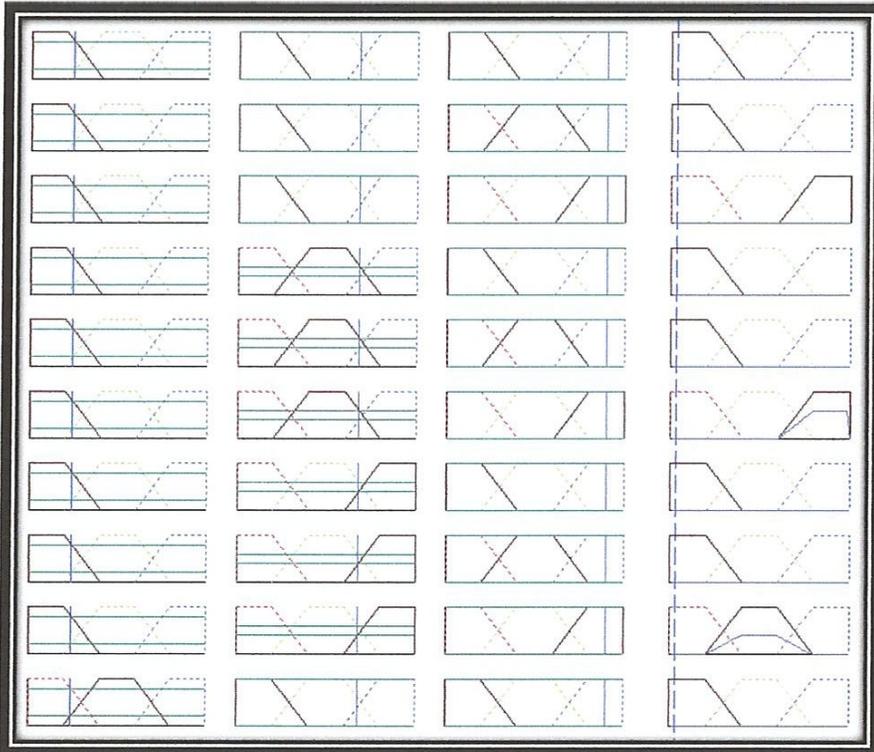
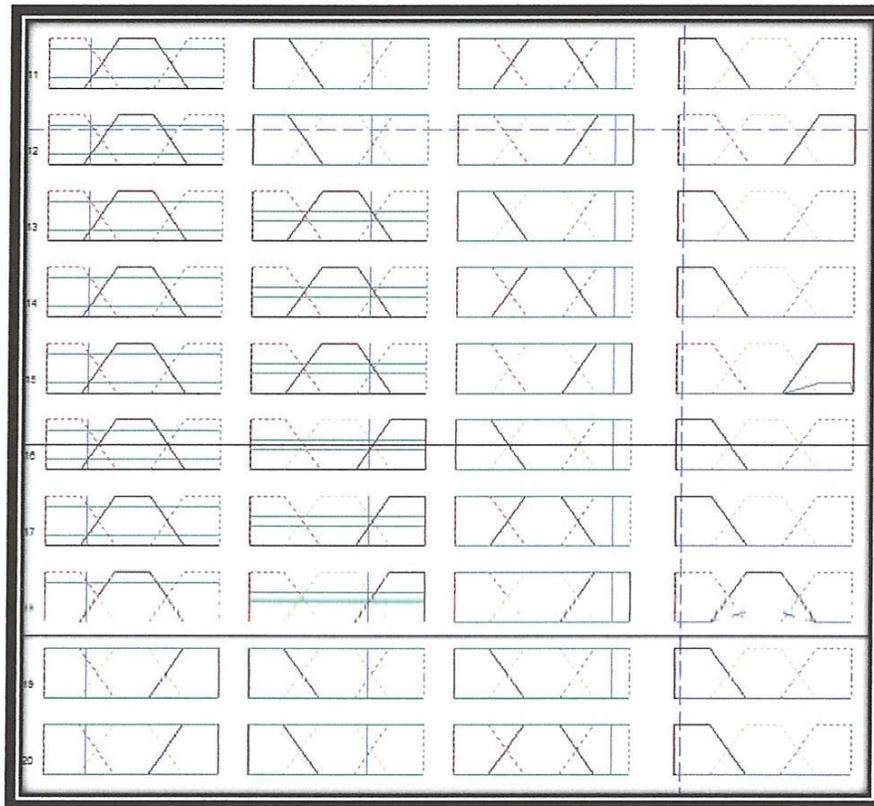
Règle 24 : Si le mode de lubrifié est lubrifiée et la vitesse coupe est moyenne et la qualité de surface est bonne. Alors l'optimisation de condition est moyenne (1.000 certitude).

Règle 25 : Si le mode de lubrifié de lubrifiée et la vitesse coupe est élevée et la qualité de surface est mauvaise. Alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

Règle 26 : Si le mode de lubrifié est lubrifiée et la vitesse coupe est élevée et la qualité de surface est moyenne. Alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

Règle 27 : Si le mode de lubrifié est lubrifiée et la vitesse coupe est élevée et la qualité de surface est bonne. Alors l'optimisation de condition est mauvaise (1.000 certitude).

Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL



Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL

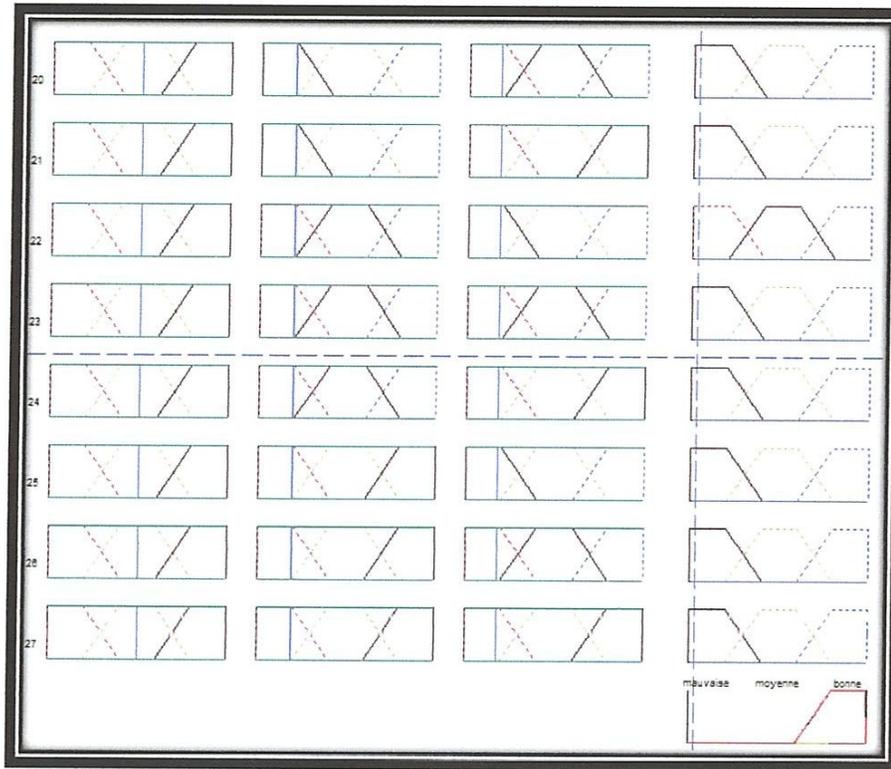


FIG III-2 : La schématisation des règles selon le logiciel

III-3 Étude expérimentale

Dans le cadre de ce travail, il a été possible d'exploiter les données expérimentales de Zidan et Khettabi (2012). Un travail réalisé pour étudier l'effet des différentes méthodes d'application de liquide de refroidissement lors du perçage des alliages d'aluminium 6061-T6 ont été effectués sur une machine CNC à grande vitesse la HURON 3 axes.

III-3-1 Application et validation

Matériau : aluminium 6061-T6

Procédé : fraisage

Machine : Cnc Huron GV 3axe

Vitesse de coupe (m/min) : V30, 60, 120, 180, 240 et 300m/min.

Avance (m/tr) : 0.15mm/rev. Profondeur de passe : 3mm.

Le tableau III-1 nous m'entres les paramètres de coupe et leur niveau.

Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL

Tableau III-1- Paramètre de coupe et leur niveau [14]

No	Vitesse m/min	alimentation	Fluide	Fz	Ra
1	60	-1	1	604,75	1,85
2	180	-1	1	619	0,65
3	240	-1	1	574,75	0,77
4	-1	0	1	850,75	2,23
5	0	0	1	837,67	0,68
6	1	0	1	798	0,66
7	-1	1	1	1042	1,93
8	0	1	1	1029,67	1,16
9	1	1	1	964	0,55
10	60	-1	2	589,75	2,05
11	180	-1	2	620,75	0,9
12	240	-1	2	580,75	0,9
13	-1	0	2	850,75	2,11
14	0	0	2	835,25	1,18
15	1	0	2	790,75	0,95
16	-1	1	2	1040	2,5
17	0	1	2	1014,67	1,3
18	1	1	2	966,25	0,99
19	60	-1	3	594,25	3,02
20	180	-1	3	621,25	2,01
21	240	-1	3	586,5	1,65
22	-1	0	3	856,25	2,89
23	0	0	3	839,5	1,95
24	1	0	3	789,5	1,94
25	-1	1	3	1084,5	2,77
26	0	1	3	1018,33	2,94
27	1	1	3	949,75	2,08

❖ Application :

On utilise quelques données expérimentales du tableau III-1 afin de valider le programme développé. Les trois indicateurs concernés sont choisis et introduit dans le programme pour donner en résultat sous forme de conclusion d'optimisation.

❖ Définition des règles :

La figure III-3/III-5/III-7 présente la disposition des différentes prémisses adoptées avec la conclusion d'optimisation sur l'usinage à sec et MQL et lubrifier, la figure III-4/III-6/III-8 montre une schématisation de l'usinage sec et MQL et lubrifier selon le logiciel.

Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL

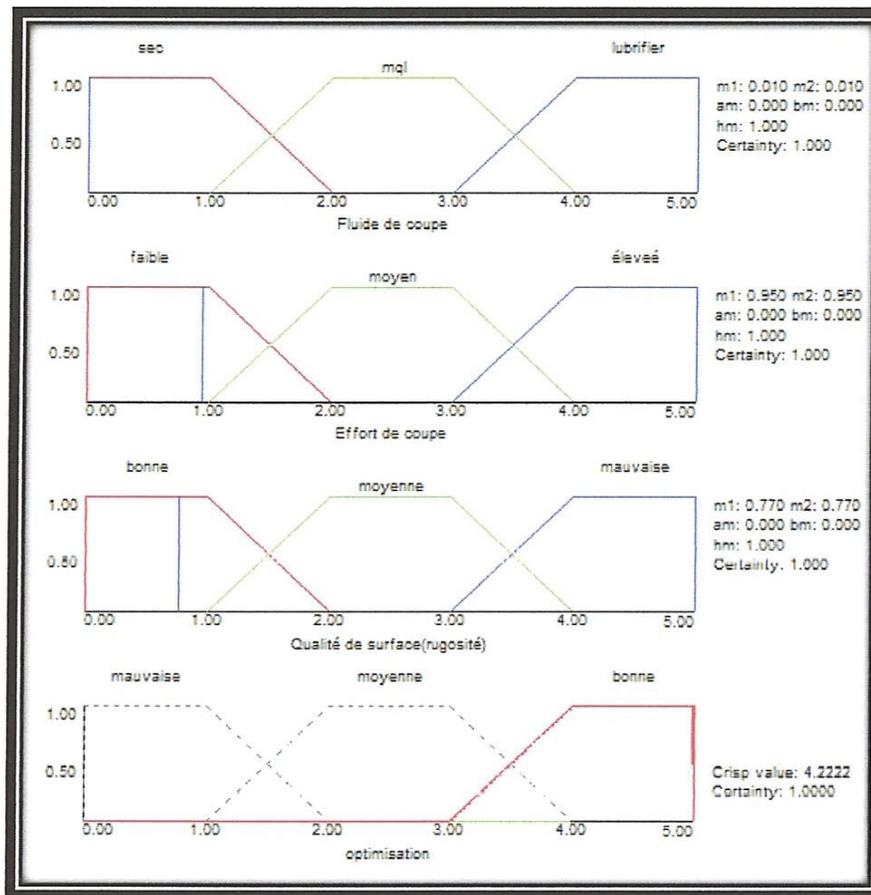
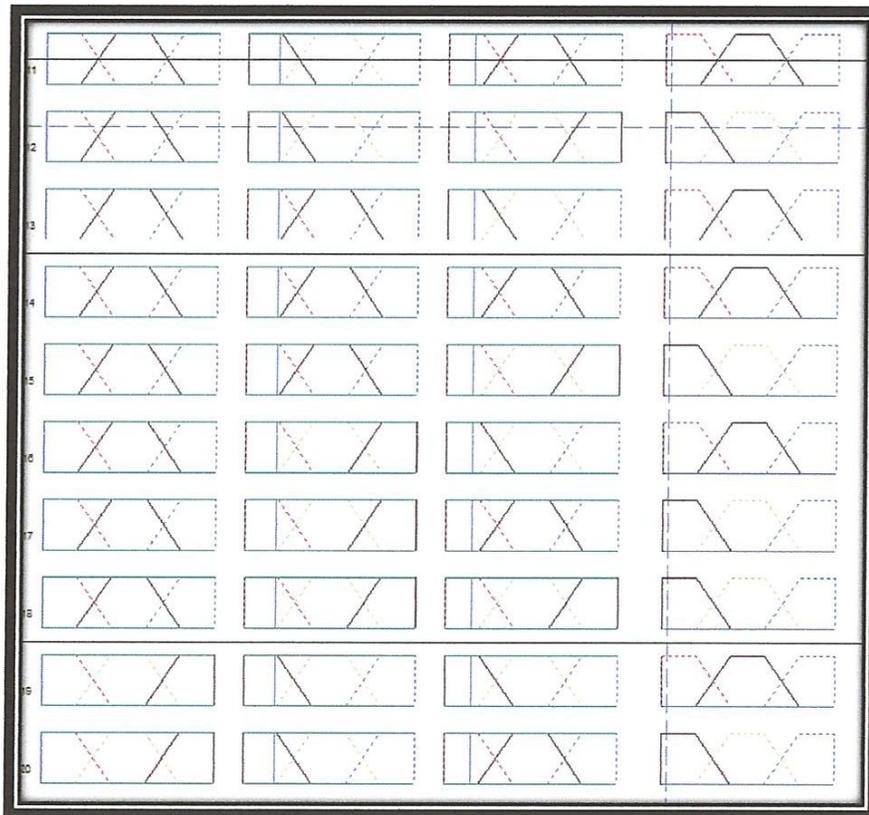
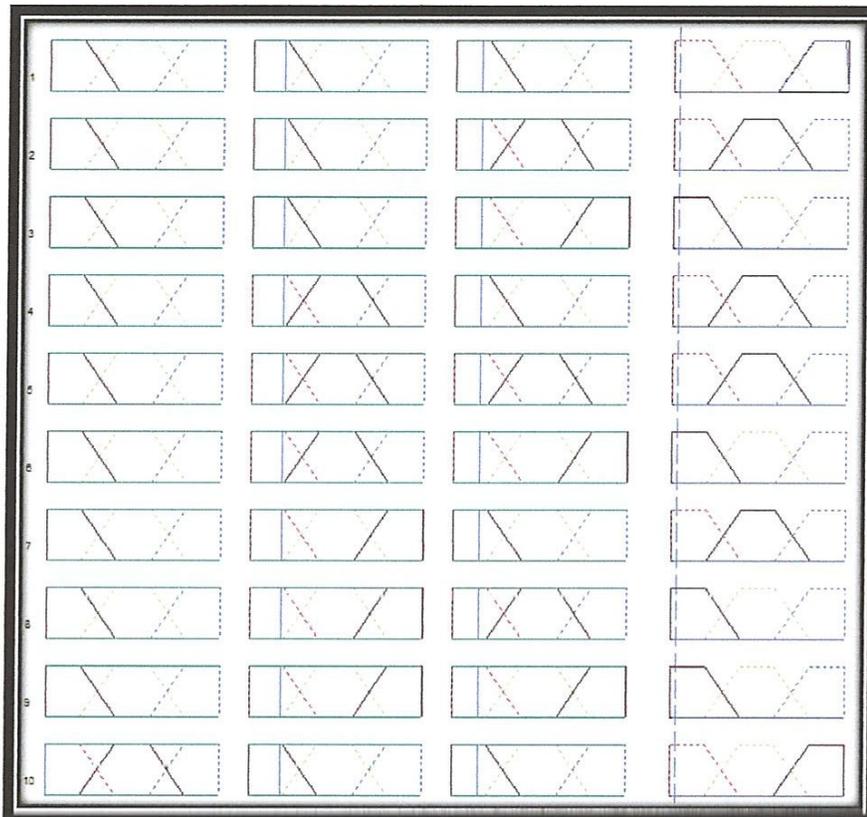


FIG III-3 : présentation et conclusion adopté sur l'usinage à sec

Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL



Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL

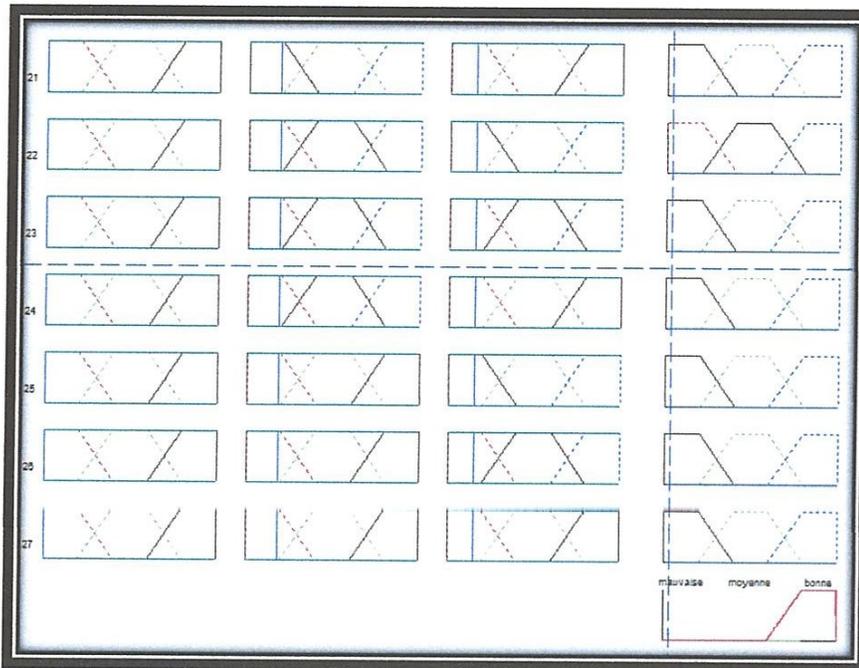


FIG III-4 : schématisation des règles selon le logiciel (mode à sec)

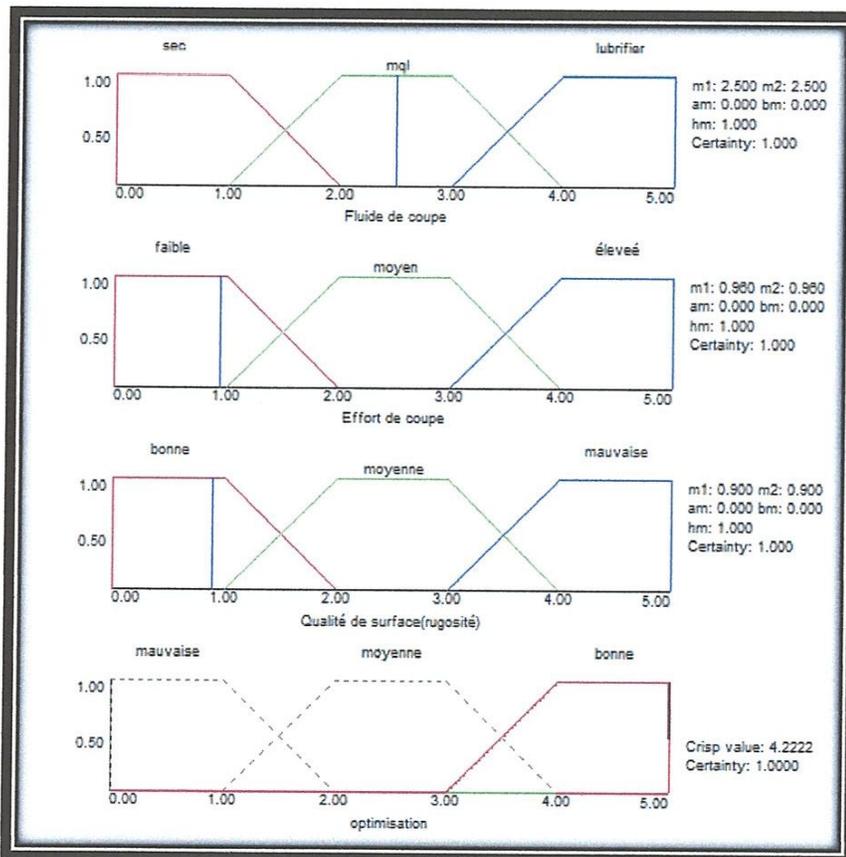
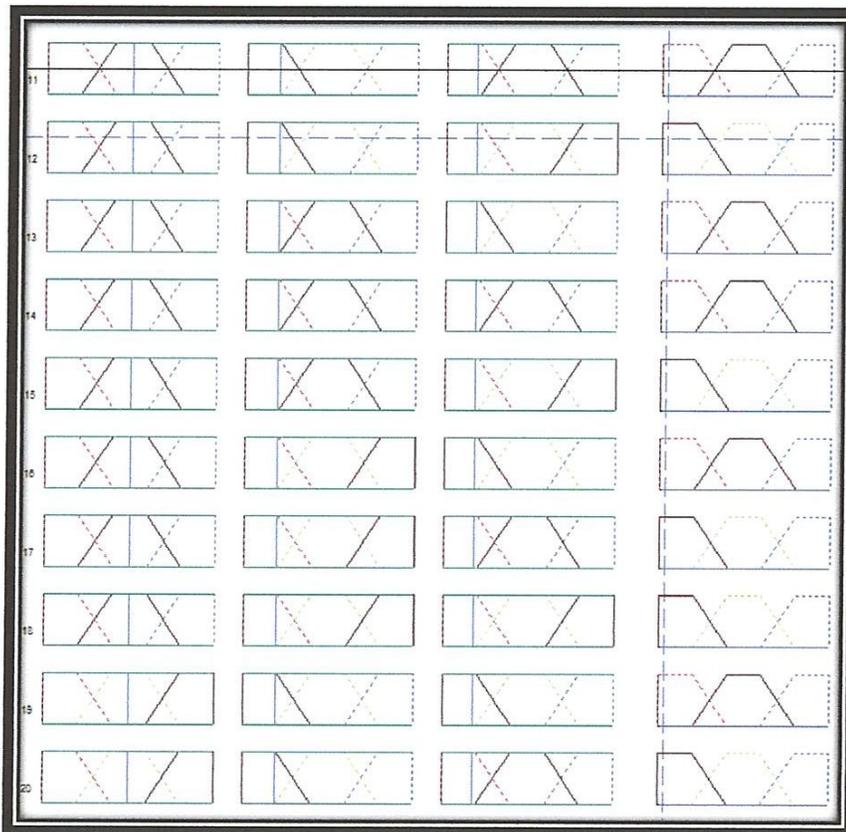
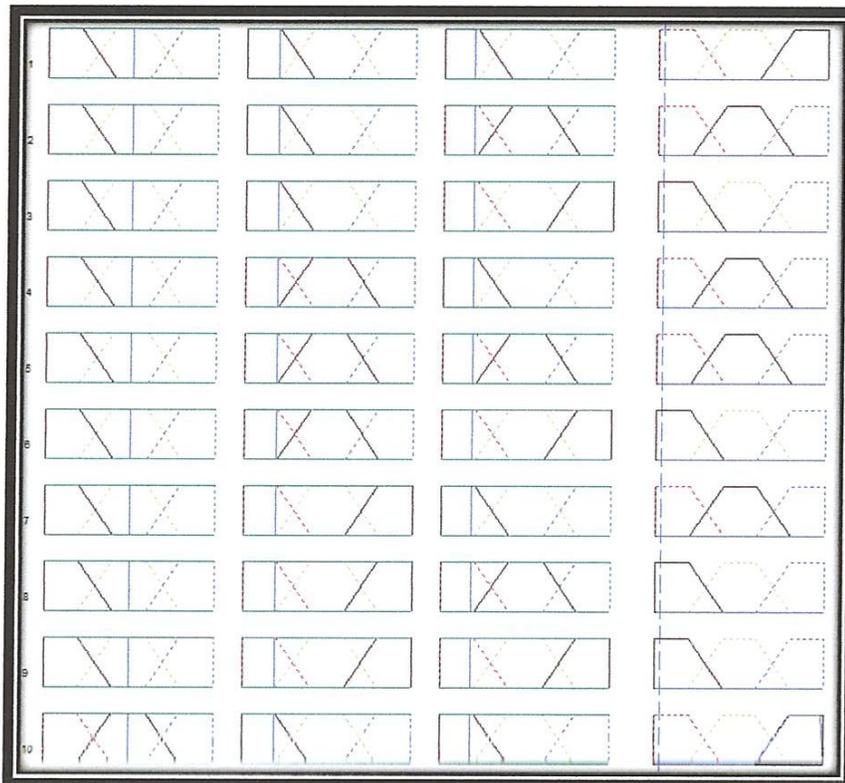


FIG III-5 : présentation et conclusion adopté sur l'usage MQL

Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL



Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL

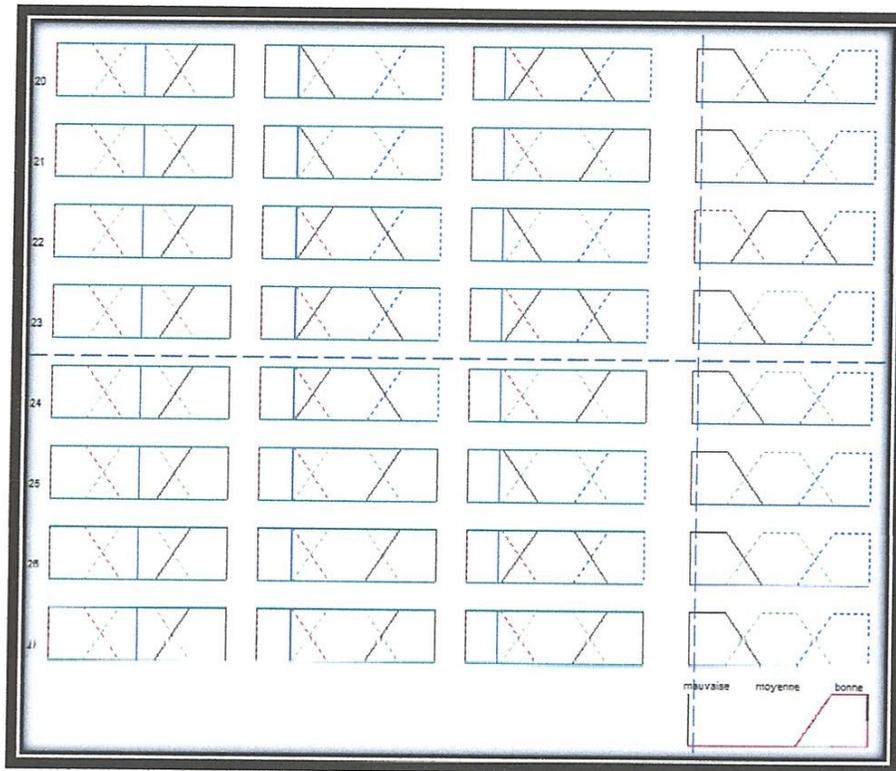


FIG III-6 : schématisation des règles selon le logiciel (mode MQL)

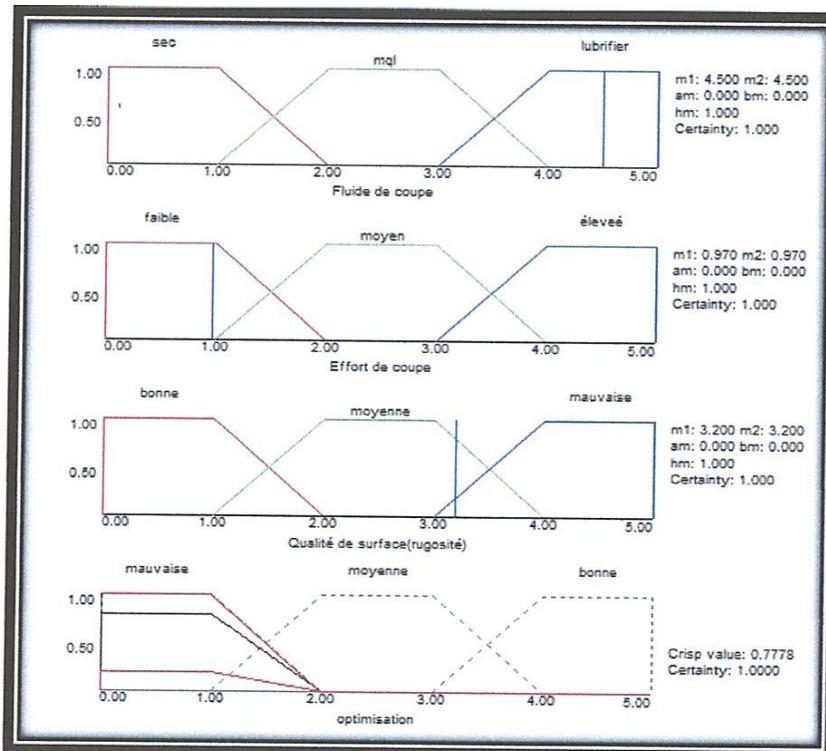
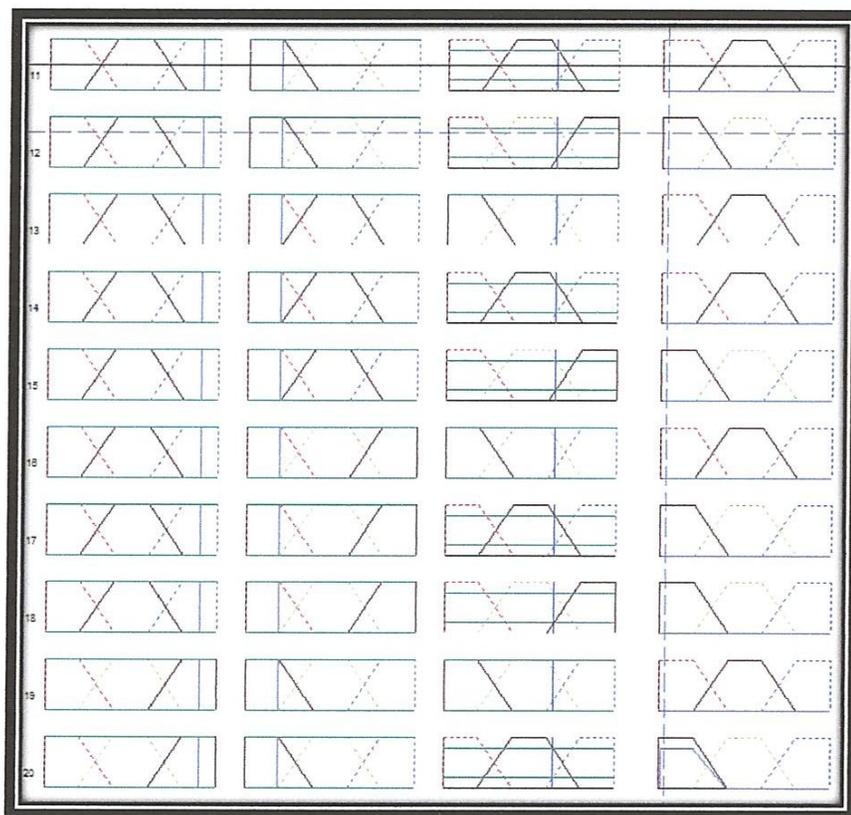
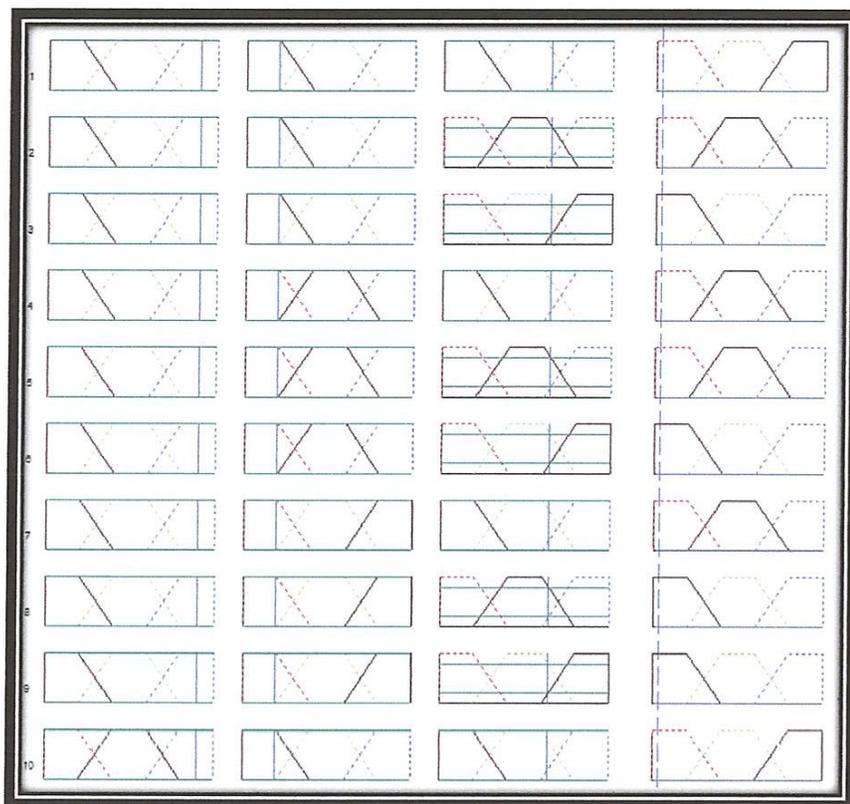


FIG III-7 : présentation et conclusion adoptée sur l'usage lubrifié

Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL



Chapitre III : Etude pratique du développement d'outil d'optimisation de l'MQL

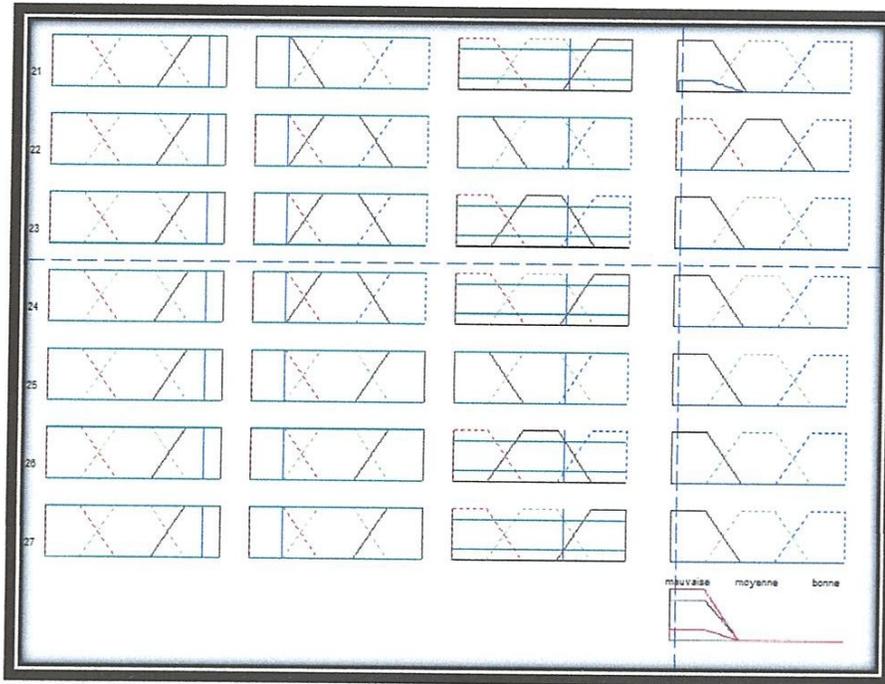


FIG III-8 : schématisation des règles selon le logiciel (mode lubrifié)

❖ Conclusion :

- D'après l'analyse en se servant du programme de la logique floue développé dans le cadre de ce travail et en se basant sur l'expérimentation réalisée sur l'aluminium 6061-T6 par Zidan et khattabi (2012), il a été conclu que :
- la logique floue est un outil très utile qui aide à améliorer la qualité des produits manufacturés tout en restant compétitif sur les plans productique, économique et réduction de l'énergie.
- l'usinage à sec ou l'usinage MQL donne des meilleurs résultats que l'usinage lubrifier dans des conditions similaires.
- L'usinage MQL peut être la seule alternative si la lubrification est inévitable (usure accéléré 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.

CONCLUSION

Conclusion générale

Conclusion général

Ce travail a permis de conclure qu'il est possible de réduire les fluides de coupe tout en améliorant la qualité de surface, la productivité et la consommation d'énergie par la diminution des efforts de coupe. Ceci signifie que l'usinage à sec ou MQL est peut être considéré comme étant un procédé écologique, environnemental et économique. Cependant, il faut respecter certaines règles afin de ne pas accélérer l'usure et le changement fréquent de l'outil et de ne pas dégrader le fini de surface des pièces usinées. En général, usiner à grande vitesse peut réduire les efforts de coupe, la rugosité de surface des pièces et d'éviter l'utilisation abondante des fluides de coupe. L'usage de la logique floue aide à identifier les meilleures stratégies de coupe qui assurent une meilleure performance.

Dans de travaux futurs, il sera possible à l'industrie moderne d'exploiter ce programme de la logique floue dans le contrôle adaptif en temps réel afin de produire des pièces de qualité supérieure avec un minimum de lubrification ou complètement sans lubrification.

Références bibliographiques

- [1] : Aleksandra BIERLA. Usinage des aciers prétraités à l'huile entière -effets physico-chimiques des additifs soufre. Thèse doctorat, paristech, 2009 ,206p.
- [2] : Technique de l'ingénieur, traité des génies mécaniques, B7000, PDF
- [3] : XAVIER SOLDANI. Modélisation analytique de l'usinage à grande vitesse et étude de l'usure en cratère – application au tournage. Thèse doctorat, université de Metz, 2008 ,166p.
- [4] : Henry François Boyer. Usinage à sec ou MQL Quantification et prise en compte des dilatations thermiques durant le processus. Thèse doctorat, ParisTech, 2013 ,128p.
- [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 . Tool-wear analysis in cryogenic machining of NiTi shape memory alloys: A comparison of tool-wear performance with dry and MQL machining. Journal wear, 2013.
- [7]: <http://fr.wikipedia.org/wiki/optimasation> .
<http://fr.wikipedia.org/wiki/méthode> de la logique floue.
<http://fr.wikipedia.org/wiki/couure> de la logique floue.
- [8] : Riad Khettabi*, Imed Zaghbani, Abdelhakim Djebara, Jules Kouam and Victor Songmene. A new sustainability model for machining processes. Int. J. Business Continuity and Risk Management, Vol. 2, No. 3, 2011.
- [9]: D. P. Adler, W. W-S Hii, D. J. Michalek, and J. W. Sutherland. Examining the Role of Cutting Fluids in Machining and Efforts to Address Associated Environmental/Health Concerns.
- [10] : U.S. Dixit et al. Machining with Minimal Cutting Fluid. Environmentally Friendly Machining, Springer Briefs, LLC 2012.

Références bibliographiques

[11]: N.R. Dhar, M. Kamruzzaman, Mahiuddin Ahmed. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005.

[12]: P.S. Sreejith. Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions. *P.S. Sreejith / Materials Letters* 62 (2008) 276–278.

[13]: Victor Songmene et al. dry machining has high speed. 2013

[14]: Y. Zidan, R. Khettabi, J. Kouam, A. Djebara, J. Masounave and V. Songmene experimental investigation of cutting fluid and machining parameters influence on drilled aluminum part quality.2012.