

M/531.665

**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 : Maintenance Industrielle

Présenté par : SAIDI Nourredine

=====

***Effet du mode de lubrification sur l'usinage  
des composites***

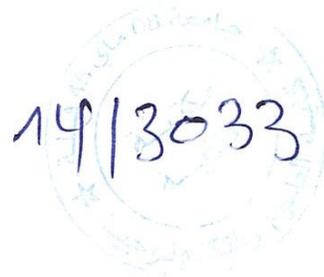
=====

Sous la Direction de :

**Dr. KHETTABI Riad**

**Année universitaire 2013/2014**

**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 : Maintenance Industrielle**

**Présenté par : SAIDI Nourredine**

=====

***Effet du mode de lubrification sur l'usinage  
des composites***

=====

Sous la Direction de :

**Dr. KHETTABI Riad**

**Année universitaire 2013/2014**

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail à:

Ma très cher Mère et mon très cher père qui sont sans cesse à mes côtés;

Mes très chers frères et mes très chères sœurs qui m'ont toujours soutenu;

Toute ma famille;

Tous mes amis.

# Remerciements

Je remercie Allah tout puissant pour la volonté, la santé, la patience, et le courage qu'il m'a donné pour initier et finir ce travail.

Le travail effectué dans cette thèse, a été effectué avec l'aide, et le soutien de Monsieur Khettabi Riad Docteur, Maître de conférences, et mon encadreur, un chaleureux remerciement à lui pour avoir assuré la direction de ce mémoire, pour ces conseils et soutien.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Docteur \_\_\_\_\_, Maître de conférences, université de Guelma, pour avoir présidé le jury de ce mémoire ainsi qu'à :

Monsieur \_\_\_\_\_, Maître de conférences, université de Guelma.

Monsieur \_\_\_\_\_, Maître de conférences, université de Guelma.

Mes remerciements vont également à :

Mes amis, enseignants, et doctorants pour leur soutien et leur aide à finaliser et à présenter ce travail,

Ma profonde reconnaissance toujours à :

Mes parents, mes frères et mes sœurs, et :

Qu'Allah nous garde tous.

## Sommaire

<b>I - Introduction générale .....</b>	<b>6</b>
<b>II - Etat de l'art .....</b>	<b>8</b>
<b>II.1. Usinage .....</b>	<b>8</b>
<b>II.1.1. Usinage par procédés mécaniques .....</b>	<b>8</b>
<b>II.1.1.1. Usinage par abrasion .....</b>	<b>8</b>
<b>II.1.1.2. Usinage par procédé de coupe .....</b>	<b>8</b>
<b>II.1.1.3. Le procédé de tournage et formation de copeaux .....</b>	<b>8</b>
<b>II.2. Etat de l'art de la modélisation analytique .....</b>	<b>10</b>
<b>II.2.1. Modélisation analytique de l'usinage .....</b>	<b>10</b>
<b>II.2.2. Modèle de Merchant (1945) .....</b>	<b>11</b>
<b>II.2.3. Résumé du modèle d'Oxley .....</b>	<b>12</b>
<b>II.3. Développement durable des procédés d'usinage .....</b>	<b>12</b>
<b>II.3.1. Introduction .....</b>	<b>12</b>
<b>II.3.2. Lubrifiant .....</b>	<b>14</b>
<b>II.3.3. Santé et environnement .....</b>	<b>16</b>
<b>II.3.4. Emission d'aérosols .....</b>	<b>17</b>
<b>II.3.5. Coût de la lubrification .....</b>	<b>18</b>
<b>II.3.6. Perspectives économiques pour l'usinage .....</b>	<b>19</b>
<b>II.3.7. Usinage à sec et presque à sec (dry and near-dry machining) .....</b>	<b>19</b>
<b>II.3.7.1. Principe de base des systèmes industrialisés de la micro-</b>	
<b>lubrification.....</b>	<b>24</b>
<b>II.3.7.1.1. Principe de fonctionnement de l'aérosol .....</b>	<b>25</b>
<b>II.3.7.1.2. Principe de fonctionnement .....</b>	<b>26</b>
<b>II.3.7.1.3. Buses de projection .....</b>	<b>26</b>
<b>II.3.7.1.4. Avantages .....</b>	<b>27</b>
<b>III – Littérature et objectifs de l'étude .....</b>	<b>28</b>
<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>28</b>
<b>III.2. Approche .....</b>	<b>28</b>
<b>III.3. Critères de performances en usinage .....</b>	<b>29</b>
<b>III.3.1. Puissance .....</b>	<b>29</b>
<b>III.3.2. Matériel .....</b>	<b>30</b>
<b>III.3.3. Emission d'Aérosol .....</b>	<b>30</b>
<b>III.3.4. Coût d'usinages .....</b>	<b>31</b>
<b>III.4. Introduction sur la logique floue .....</b>	<b>32</b>
<b>III.4.1. A titre d'information .....</b>	<b>32</b>
<b>III.4.2. Le Principe, à travers un exemple .....</b>	<b>33</b>
<b>III.4.3. La commande floue à travers un exemple .....</b>	<b>34</b>
<b>III.4.4. Discussion de théories .....</b>	<b>35</b>
<b>III.5. Définition des fonctions d'appartenance et règles .....</b>	<b>36</b>
<b>III.6. Application .....</b>	<b>39</b>
<b>III.7. Conclusion de la revue de littérature .....</b>	<b>43</b>

Dans le chapitre III, une étude de littérature a été présentée, pour illustrer un modèle de développement durable en matière d'usinage appliqué à trois processus différents, tournage, perçage et fraisage. Différemment au modèle développé par Zaghbani et al., (2010) conçu spécialement pour l'acier de moule et n'intègre pas l'émission de particules métalliques, l'approche illustrée donc, intégrant l'émission de particules, et un algorithme de logique floue est proposé pour prendre une décision et pour permettre une comparaison entre les différents processus. La méthode s'est montrée utile pour évaluer une augmentation de la productivité, recyclage, en réduisant les effets néfastes de l'usinage sur les opérateurs, et l'environnement.

Ce concept de développement durable dans le domaine de l'usinage intégrant l'émission d'aérosols, puissance, coût et matériel, permet de développer une nouvelle classification d'usinage.

Dans le chapitre IV, nous avons essayé de comparer les résultats expérimentaux, des différents modes de lubrification, mode d'usinage à sec, MQL (lubrification minimale), et lubrification abondante, en termes, de performances de coupe, coût, et avantages environnementaux, de vérifier ces modes de lubrification avec le programme de la logique floue, en se basant sur des données pratiques, et sur des connaissances développées dans ce sens, d'utiliser le programme de la logique floue comme étant une nouvelle méthodologie d'optimisation du processus d'usinage en tenant compte des critères de performances de coupe, et de l'efficacité des différents modes de lubrification, et pour terminer, dans le chapitre V, on a conclu notre étude par maitre en évidence les conditions optimales du processus d'usinage issues de l'évaluation par la logique floue.

## **II - 'Etat de l'art**

### **II.1. Usinage**

Généralement l'usinage est une action exercé par un outil sur un matériau, cette action se traduit par l'enlèvement de matière pour obtenir une nouvelle forme. Il utile de rappeler que l'enlèvement de matière se fait aussi pas d'autre moyens non mécaniques. Faisant appel à des processus physico-chimiques qui produisent l'énergie nécessaire à l'enlèvement de la matière usinée, à savoir.

- Procédé d'oxycoupage, par l'action thermo-chimique de la flamme d'un chalumeau.
- Procédé chimique ou électrochimique, à l'aide d'un liquide abrasif ou d'un électrolyte.
- Procédé électroérosion, par l'action thermoélectrique d'un arc électrique, d'un faisceau de lumière cohérente (Laser).

#### **II.1.1. Usinage par procédés mécaniques**

##### **II.1.1.1. Usinage par abrasion**

L'enlèvement de matière dans ce cas, est effectué par l'action mécanique de particules abrasives de différentes géométries, qui peuvent êtres en forme.

- Solide, liés à un support solide, type meule, outil de rectification.
- Dans un fluide plus ou moins visqueux, type abrasion à trois corps, rodage et polissage à la pâte abrasive, usinage par jet d'eau à haute pression, ou fluide abrasif.

##### **II.1.1.2. Usinage par procédé de coupe**

Ce procédé de coupe par enlèvement de copeaux, est le plus utilisé au monde, est se fait à l'aide d'un outil coupant permettant d'enlever une quantité de matière donnée.

Les procédés d'usinage caractérisés par l'enlèvement de copeaux en grande quantité souvent utilisés, sont le tournage, le fraisage et perçage, dans notre cas suivant, nous allons se pencher sur quelques littératures concernant le procédé de tournage.

##### **II.1.1.3. Le procédé de tournage et formation de copeaux**

Le tournage consiste à donner une forme à une pièce donnée à l'aide d'un outil coupant en mouvement souvent rectiligne, ce mouvement d'avance de l'outil, combinée avec un mouvement de rotation de la pièce, permettant de donner le profil voulu à la pièce.

secondaire de cisaillement, la vitesse d'écoulement, quasiment nulle au contact de l'outil, croit rapidement pour atteindre la valeur de la vitesse du copeau en dehors de la zone (2). Les pressions et températures à l'interface outil-copeau sont très importantes. Elles peuvent atteindre respectivement des valeurs de l'ordre du GPa à la pointe de l'outil et de la température de fusion du matériau usiné. La zone en dépouille (3) correspond à la zone de contact entre l'outil et la pièce usinée. Il est extrêmement difficile de quantifier les pressions et températures régnant dans la zone tertiaire de cisaillement. Néanmoins, il a été montré que leur valeur est sensiblement plus faible que dans la zone secondaire. Il est à noter que la qualité de surface de la pièce finale est fortement influencée par le contact dans cette zone.

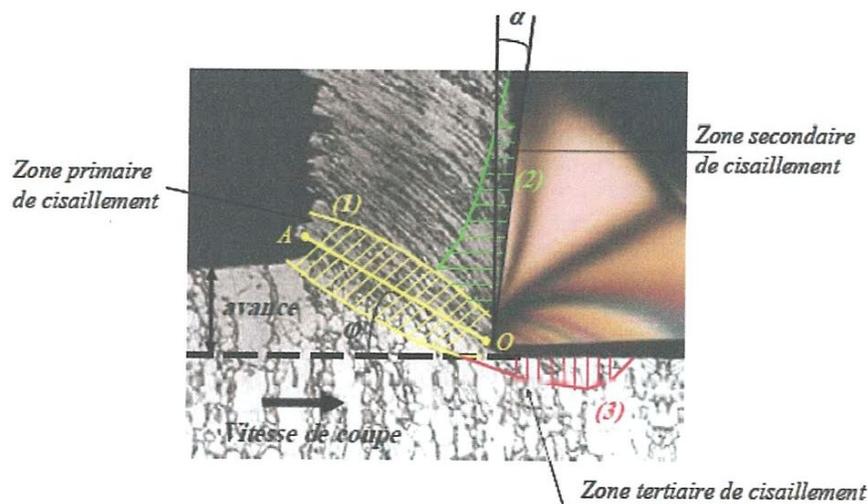


Figure II.3: Zones de cisaillement en usinage, image réalisée par Trent et Wright (2000), [1].

## II.2. Etat de l'art de la modélisation analytique

### II.2.1. Modélisation analytique de l'usinage

Pour comprendre mieux les phénomènes existants dans les opérations de coupe (orthogonale ou oblique), plusieurs auteurs ont étudié l'usinage pour développer des modèles analytiques.

Zvokyrin (1896, Première étude de la coupe), Usachev (1915, Premier travail sur la formation du copeau), Merchant (1945, Première modélisation basée sur l'équilibre des forces de coupe),

Lee et Shaffer (1951, Modélisation par la méthode des lignes de glissement. Le matériau est supposé plastiquement parfait), Albrecht (1960, Prise en compte du rayon d'arête), Boothroyd (1963, Première modélisation thermomécanique avec détermination expérimentale des sources de chaleur dans le copeau), Zorev (1966, Prise en compte de l'érouissage, vitesses très faibles), Gilormini (1982, Profil de vitesse dans le copeau et calcul du rayon de courbure de celui-ci), Oxley (1989, Loi de comportement avec prise en compte de l'érouissage, sensibilité à la vitesse de déformation et à la température),

Molinari et al. (1992, Modélisation de la coupe oblique. Loi de frottement à l'interface outil copeau dépendant de la température) [1].

## II.2.2. Modèle de Merchant (1945)

Selon le modèle de Merchant, la formation du copeau est due à un cisaillement fort le long d'un plan incliné d'un angle ( $\phi$ ) (appelé angle de cisaillement) par rapport à la direction de la vitesse de coupe  $v$ . (Figure II.4).

L'étude avait pour objectif la prédiction des efforts de coupe durant un travail de coupe orthogonale avec une arête droite. Le modèle de Merchant a pour hypothèses (i) la pièce à usiner, a un matériau qui se comporte parfaitement plastique lors de l'usinage, (ii) la zone de cisaillement primaire est considérée comme un plan, (iii) l'interface outil-copeau est une zone de frottement (avec un angle de frottement  $\lambda$ , toujours constant quelles que soient les conditions de coupe), (iv) le contact est supposé glissant.

En supposant, la contrainte de cisaillement  $\tau$  uniforme dans le plan de cisaillement, l'effort de Cisaillement  $F_s$ , dans la zone de cisaillement primaire est donné par la relation :

$$F_s = w l_{OA} \tau = \frac{w t_1}{\sin\phi} \tau \quad (II.1)$$

Où  $w$  désigne la largeur de coupe,  $t_1$  la profondeur de coupe (ou avance) et  $l_{OA}$  la longueur de OA (Figure II.4).

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

$$\begin{aligned} F &= F \sin\phi + N \cos\phi \\ F &= F \cos\phi + N \sin\phi \\ N &= F \tan(\phi + \lambda - \alpha) \end{aligned} \quad (II.2)$$

Où  $F_p$  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  $\alpha$  est l'angle de coupe (Figure II.4).

L'angle de cisaillement  $\phi$  est déterminé en minimisant la puissance totale  $P$  dissipée pendant la coupe :

$$P = F_p V = \tau V w t_1 \frac{\cos(\lambda - \alpha)}{\sin\phi \cos(\phi + \lambda - \alpha)} \quad (II.3)$$

La recherche du minimum de  $P$ , en supposant que la contrainte de cisaillement  $\tau$  et l'angle de frottement  $\lambda$  sont constants, donne la relation :

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

(II.4)

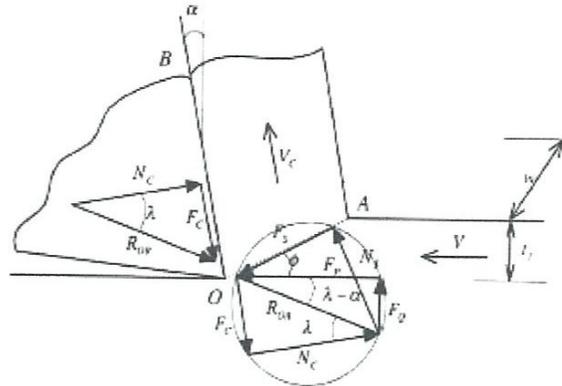


Figure II.4: Approche de Merchant (1945)

Les relations précédentes permettent alors de donner les expressions des efforts de coupe (II.5)

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

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

(II.5)

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 :

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

(II.6)

### II.2.3. Résumé du modèle d'Oxley

Oxley est le premier à présenter une approche thermomécanique de l'usinage. Le modèle donne, en fonction des conditions de coupe, les efforts et les températures moyennes dans les zones primaires et secondaires ainsi que la géométrie du copeau (longueur de contact et épaisseur du copeau).

Son modèle comprend une partie mécanique et une partie thermique issue des travaux de Boothroyd (1963). Le modèle s'appuie sur deux observations fondamentales faites à partir de micrographies : (i) le cisaillement primaire s'effectue dans une zone d'une

d'usinage, état de surface usinée, formation de copeau, et émission de particules métalliques [7].

Le problème principal de l'utilisation du lubrifiant, malgré son effet de réduire la température dans la zone de coupe, est l'émission des aérosols durant l'usinage, et le risque qui porte à la santé de l'opérateur et l'environnement [2, 5, 7].

L'industrie manufacturière est l'un des facteurs principaux de pollution de l'environnement, donc est devenu urgent pour les industriels de réduire cet impact sur l'environnement. Un nouveau mode de fabrication « Green Manufacturing (GM) », est devenu nécessaire, et il est très demandé pour soutenir le développement des nouveaux procédés d'usinage [2, 10].

Plusieurs auteurs ont travaillé sur des procédés d'usinage, à savoir, usinage à sec (dry cutting – DC), presque à sec (near-dry machining – NDM, ou quantité minimale de lubrifiant (Minimum Quantity Lubrication – MQL), et l'usinage écologique ou environnemental (green manufacturing – GM) [2, 3, 10].

Le nouveau concept de développement durable, est celui de créer de produits et services, utilisant des procédés et systèmes non polluants, en plus d'économiser les ressources naturelles et l'énergie, tel modèle doit être économiquement viable, sûr et sain pour les employés et attrayant pour les consommateurs et les communautés [9, 10].

Un lubrifiant de coupe pour MQL devrait être choisi non seulement sur la base de ses caractéristiques principales (performances de coupe), mais aussi en raison de ses caractéristiques secondaires, tels que la biodégradabilité, stabilité à l'oxydation, la stabilité de stockage et la pollution de l'eau-sol-air. Bien que l'action tribologique d'une très petite quantité de lubrifiant est certainement d'une grande importance en usinage MQL, on devrait aussi considérer la relation entre la performance de coupe MQL et le comportement tribologique des lubrifiants [10].

### **II.3.2. Lubrifiant**

Les demandes croissantes pour une productivité élevée de l'usinage à grande vitesse, et débit élevé de lubrifiant, tel usinage produit une haute température de coupe, ce qui réduit non seulement la vie de l'outil, mais aussi nuit à la qualité du produit. Les fluides lubrifiants changent la performance des opérations d'usinage en raison de leurs fonctions, de lubrification, de refroidissement et de dégagement de copeaux, mais l'utilisation du fluide de coupe est devenue plus problématique en termes de santé des employés et de la pollution de l'environnement [4].

Classification du lubrifiant:

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

– Huile minérale : plus stable et qui ne s'oxyde pas à l'air, son pouvoir mouillant et lubrifiant est amélioré par l'incorporation d'une petite quantité de soufre (1 à 3%) ou de graphite.

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

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

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

Le fluide cryogénique (à base d'azote liquide) est une autre technique des fluides de coupe utilisée pour le refroidissement de la zone de coupe [18]. On trouve aussi le réchauffage des matériaux durs par un faisceau laser qui permet de diminuer leurs niveaux de caractéristiques mécaniques [19], mais les outils s'usent très vite [20].

Tableau II.1: Additifs et leurs fonctions

Additifs	Fonction	Composés chimiques
Agents émulsionnants	Ils offrent de la stabilité à l'émulsion.	Cationiques. Anioniques (sulfonates) Non ioniques (triéthanolamine, polyglycoether, Allylphenol, oxyéthyl)
Inhibiteurs de corrosion	Ils protègent la pièce et l'outil de la Corrosion.	Nitrites. Amines. Borates
Biocides	Ils empêchent le développement de micro-organismes dans le fluide.	Aldéhydes formiques. Phénols. Triazines. Isothiazolinones
Extrême pression (EP)	Ils forment une couche intermédiaire entre deux surfaces métalliques, ils améliorent la lubrification et évitent l'usure.	Paraffines chlorées. Composés soufrés. Composés phosphorés. Huiles minérales et graisses Alcools
Humectant ou stabilisants	Ils stabilisent le concentré.	Alcools. Phosphates. Polyglycols
Anti-mousses	Ils évitent la formation de mousses.	Silicones. Esters gras. Hydrocarbures à poids moléculaire élevé
Complexants	Ils éliminent et préviennent la formation d'incruste.	Composés organiques divers (EDTA)
Divers (détergents, dispersants, etc.)		Composés divers

Tableau II.2: Différents types de fluide de coupe

Fluide de base du concentré	Fluide de coupe	% Volumique les éléments			Avantages	Désavantages
		Eau	Huile	Additifs		
Non aqueux	Huile de coupe	----	80-96	4-20	Lubrification excellente. Contrôle de rouille excellent. Longue durée de vie. Facile à gérer.	Remplacement cher. Excès de chaleur. Brouillard et fumée d'huile élevé. Danger de feu et de glissement.
Aqueux	Huile soluble	< 10	30-80	< 30	Lubrification physique excellente. Réduction de chaleur moyenne. Facile à gérer.	Résidus d'huile. Affectés par l'eau dure. Brouillard et fumée
	Solution synthétique	40-60	----	40-60	Très propre. Réduction de chaleur excellente. Pas affecté par l'eau dure. Peu moussant. Sans risque de feu	Lubrification physique pauvre. Pas de film de la protection par l'huile
	Émulsion semi-synthétique	30-50	5-40	20-60	Lubrification physique. Bonne réduction de chaleur. Propre. Bon contrôle de rouille	Pouvoir moussant. Affecté par l'eau dure

### II.3.3. Santé et environnement

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 des bonnes conditions de santé des opérateurs. Les huiles entières ou fluides aqueux, sont potentiellement en contact avec les mains et les avant-bras des opérateurs. Les études menées par l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité - France) montrent que ces parties du corps humain sont les plus exposées aux atteintes cutanées.

Le remplacement progressif des huiles minérales par les fluides synthétiques ou semi synthétiques a inversé les pathologies, avec actuellement une prépondérance des dermatites eczématiformes et irritatives, qui sont d'ailleurs le plus souvent liées à l'adjonction de substances afin d'augmenter les capacités intrinsèques du fluide [21, 22]. La survenue d'une dermatose professionnelle induite par les fluides de coupe est le plus souvent de pronostic très réservé à la fois sur les plans professionnel et médical [23].

Les dermatites de contact constituent la grande majorité des maladies professionnelles d'origine dermatologique. Leur incidence est estimée entre 0,5 et 0,7 cas pour 1000 travailleurs et elles affectent 1 à 2 des salariés selon Goldin [21]. Parmi elles, ce sont les dermatites eczématiformes qui sont majoritaires. Selon les chercheurs, les dermatoses observées sont réparties en 26 cas d'eczéma de contact. Les dermatites issues de la manipulation des fluides de coupe sont dans la majorité des cas de très mauvais pronostics et nécessitent la mise en place de moyens de prévention individuelle et collective rigoureux permettant ainsi la réduction. D'autres études [36] sont aussi en cours pour mettre en évidence la participation des "poussières" dans

l'apparition de maladies liées au travail des métaux. L'étude de la formation de micro particules métalliques est étudiée. Suivant les matériaux et les conditions de coupe nous pouvons observer des évolutions, tant sur le volume, que sur la dimension de ces poussières. Durant l'usinage la température augmente dans la zone de coupe et devient importante pour générer un certain nombre d'aérosols par la gazéification du fluide de coupe [25].

L'élimination des fluides de coupe est souhaitable pour éviter les pollutions réellement ou potentiellement générées par ces produits. La production d'huiles minérales est réalisée dans les raffineries très polluantes. Le stockage de ces huiles nécessite des installations très coûteuses pour assurer un niveau de sécurité acceptable (feu, gaz, fuite). Un nettoyage/dégraissage efficace des pièces usinées est essentiel dans toutes les industries de transformation des métaux (après usinage ou déformation à froid ou à chaud, avant et après traitements thermiques, avant soudage ou brasage/diffusion ...). Il faut nettoyer les pièces métalliques afin d'éliminer les huiles et graisses présentes sur leur surface. Malgré le développement et la mise sur le marché de nouveaux produits de nettoyage, les solvants chlorés fournis dans des systèmes en boucle fermée constituent généralement la meilleure solution. Outre leur supériorité technique, ils possèdent, lorsqu'ils sont utilisés en système fermé, des atouts uniques en termes de sécurité des conditions de travail, de protection de l'environnement et de rentabilité. Ces solvants offrent des avantages et propriétés spécifiques pour les applications de nettoyage/dégraissage des métaux :

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

Cependant, le traitement de ces solvants usagés reste un point très problématique pour l'avenir de cette filière. La famille de Normes ISO 14001 relative à la mise en place d'un système de management environnemental, préconise la prise en compte de toutes les phases du cycle de vie d'un produit afin d'en réduire leur impact potentiel sur l'environnement. Il est ainsi recommandé de confiner les lieux de stockage et les machines utilisant les fluides de coupe afin de limiter la pollution des sols et de l'eau. L'application du fluide de coupe conventionnel crée des problèmes techno-environnementaux sévères [26].

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

#### **II.3.4. Emission d'aérosols**

Nous appelons aérosol toute particule liquide ou solide qui reste en suspension dans l'air et qui a une vitesse de chute qui n'excède pas 0.25m/s (norme NFX 44-001). L'INRS [25] propose plusieurs voies pour éviter les différentes sources d'infections cutanées et respiratoires :

- Utiliser des produits où tous les irritants et allergènes potentiels sont inventoriés (fiche sécurité complète à jour).

- Suivre la composition, la concentration, le pH des fluides de coupe en cours d'utilisation.
- Former et informer le personnel quant à la manipulation de ces produits.
- Centraliser et verrouiller l'approvisionnement en fluide de coupe au pied des machines pour mieux contrôler les caractéristiques des fluides dans les bacs.

Dans le domaine de l'hygiène du travail, les méthodes classiques d'évaluation de la toxicité est basée seulement sur la caractérisation de la concentration en masse et la composition chimique des particules dispersées dans l'atmosphère (Gensdarmes et coll., 2007). Dans le domaine de l'usinage, l'indicateur de la toxicité peut être évalué directement à travers l'émission d'aérosols, utilisant l'unité de poussière ( $D_U$ ), ou par la concentration de la toxicité [2].

Dans le domaine de l'usinage, il est essentiel d'identifier pour chaque opération d'usinage, combien ça peut générer d'aérosols. Par conséquent, il est utile dans l'estimation de l'émission d'aérosols d'utiliser uniquement ( $D_U$ ). ( $D_U$ ) est le coefficient de l'aérosol émis durant le procédé de coupe et représente la masse des aérosols divisée par la masse de copeaux enlevés. ( $D_U$ ) comprend liquide et solides aérosols générés lors de l'usinage qui peuvent être nocifs, tant pour la santé de l'opérateur et l'environnement [2].

### II.3.5. Coût de la lubrification

Une récente recherche conduite sur l'industrie d'automobilles en Europe, a relevée que les dépenses sur les fluides lubrifiants utilisés pendant l'usinage, est environ les 20% du coût total de fabrication [13], en comparaison a l'outil de coupe (7,5%), le cout des fluides lubrifiants est trop élevé. Comme résultat, le besoin de réduire la consommation des fluides lubrifiants durant l'usinage, est devenue très grand. En outre la limite d'exposition à une concentration d'aérosols des fluides travaillants sur les métaux, est de 5 mg/m<sup>3</sup>, pour le OSHA (Occupation Safety and Health Administartion, du USA) [25], et de 0,5 mg/m<sup>3</sup> pour le NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health, du USA) [14]. Dans l'industrie d'automobile aux Etats-Unis le niveau des nuages d'huile dégagés lors de fabrication est de l'ordre de 20-90 mg/m<sup>3</sup> [15], Ceci ouvre la voie à une grande opportunité à travailler pour améliorer la qualité de l'air du lieu de travail [6].

Le cout associé à l'utilisation des fluides lubrifiants est estimé à plusieurs milliards de dollars chaque année [16]. Par conséquence l'élimination si possible d'utiliser les lubrifiants peut engendrer un gain signifiant.

Le mode MQL se réfère à l'utilisation des fluides lubrifiants avec un débit allant de 50 à 500 ml/h ce qui représente 3 à 4 fois moins la quantité utilisée durant une lubrification classique, là où, par exemple 10 litres de fluide est dispersée par une minute [17].

Ce concept de quantité minimale de lubrifiant (MQL), été avancé depuis une dizaine d'années comme un moyen d'aborder les questions d'environnementale risques professionnels associés avec les particules de fluide de coupe aéroporté durant l'usinage [12, 5].

- Fluide de refroidissement utilisé : Solution d'ester triglycérique et du propylène glycol. Une minimum quantité de lubrifiant est assuré par un system de lubrification (Unist Lubricator)
- Débit de fluide de refroidissement : 50 ml/heure
- Pression de la buse : 1,4 barg (20psi)
- Pièce : barre d'acier au carbone, avec dureté 62-64 HRC (Rockwell)
- Outil utilisé : faible teneur en carbone (Kennametal KD5625), avec angle d'inclinaison de  $-6^\circ$ , longueur du chanfrein 0,12 mm rayon de la corne 0,03mm et rayon de 0,8mm.

Les efforts de coupe ont été mesurés à l'aide d'un dynamomètre comme on le voit dans la figure II.6. La figure II.7 montre un thermocouple de type K utilisé sous la cale-support de plaquette d'outil. La température (Temp) à l'emplacement de thermocouple peut être liée à la température ( $T_c$ ), telle que mesurée par la méthode d'imagerie déduit à la pointe de l'outil avec.

$$\text{Temp}(t) = \frac{1}{k} T_c (t - \tau)$$

Où  $k$  est un facteur d'atténuation d'une valeur de l'ordre de 8, et  $\delta$  est un temps de retard souvent environ 4 secondes.



Figure II.6: Système appliquant quantité minimale de lubrification monté sur le tour horizontal (à gauche). Usinage à sec (au centre). Usinage avec quantité minimale de lubrification (à droite). [6]

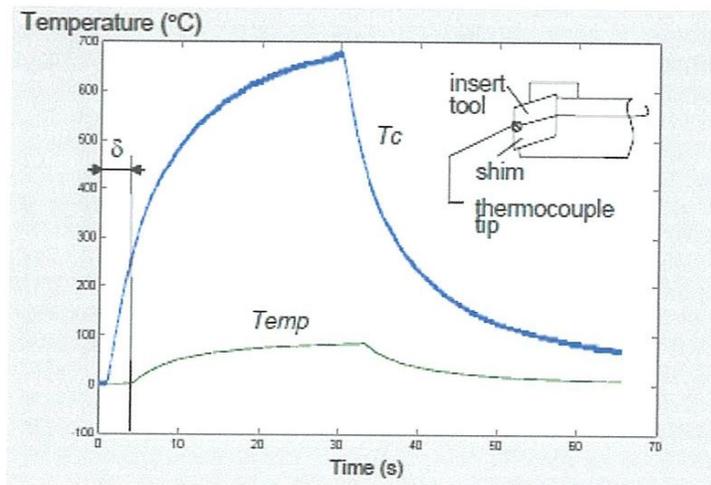


Figure II.7: Cale-thermocouple, outil de mesure de la température de coupe. [6]

La figure II.8 illustre l'augmentation des efforts de coupe en fonction de l'avance (f), cependant, l'utilisation de la MQL n'affecte pas d'une manière perceptible le niveau des efforts de coupe. Par conséquent, le ramollissement thermique du matériau ne semble pas se produire avec un peu de liquide (MQL).

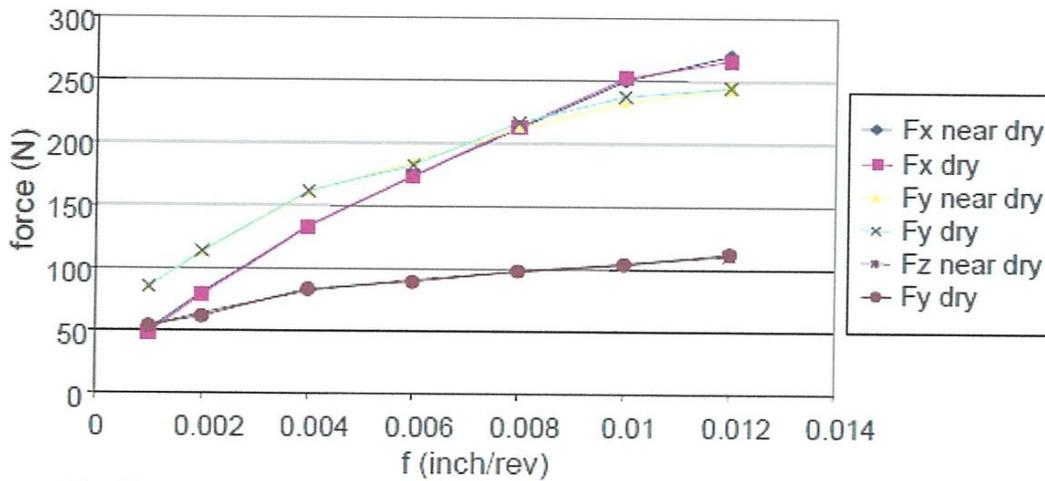


Figure II.8: Efforts de coupes pour différentes valeurs d'avance, à vitesse de coupe=450 sfpm, profondeur de coupe = 0,012 pouce (in). [6]

La figure II.9 donne l'élévation de la température au niveau de la cale-support de plaquette de l'outil en correspondance à divers valeurs d'avance (f).

On voit que la température descend de l'ordre de 5 à 10 % avec l'utilisation du MQL, cet effet est qualitativement appréciable en comparant l'usinage à sec à celui presque à sec (MQL) tel qu'illustré dans la figure II.6. L'application de MQL est vue comme atténuant de la température élevée des copeaux.

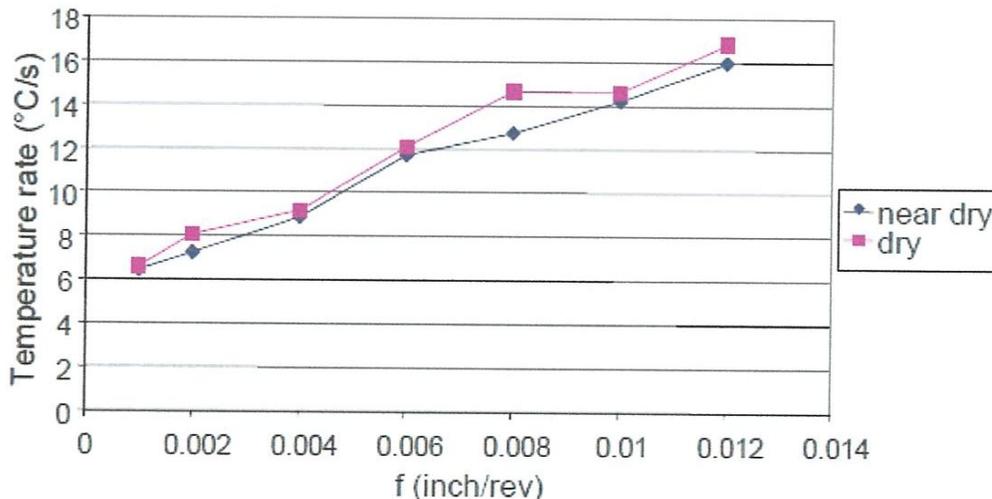


Figure II.9: Taux de température pour différentes valeurs d'avance, à vitesse de coupe=450 sfpm, profondeur de coupe = 0,012 pouce (in). [6]

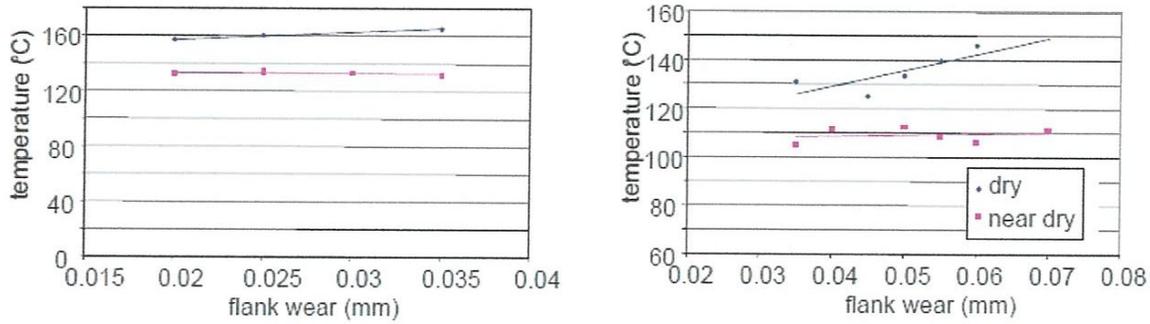


Figure 11.12: L'état d'équilibre (après 2 minutes d'usinage) de la température de coupe en fonction de l'état d'usure, à vitesse de coupe=700 sfpm, avance=0,008 in/tr, profondeur de coupe= 0,01 pouce (in) (à gauche) ; vitesse de coupe=500 sfpm, avance=0,004 in/tr, profondeur de coupe= 0,012 pouce (in) (à droite). [6]

La figure 11.13 montre la progression de l'usure sur la plaquette sous deux conditions de coupe différentes. L'usure de la plaquette est mesurée après chaque usinage.

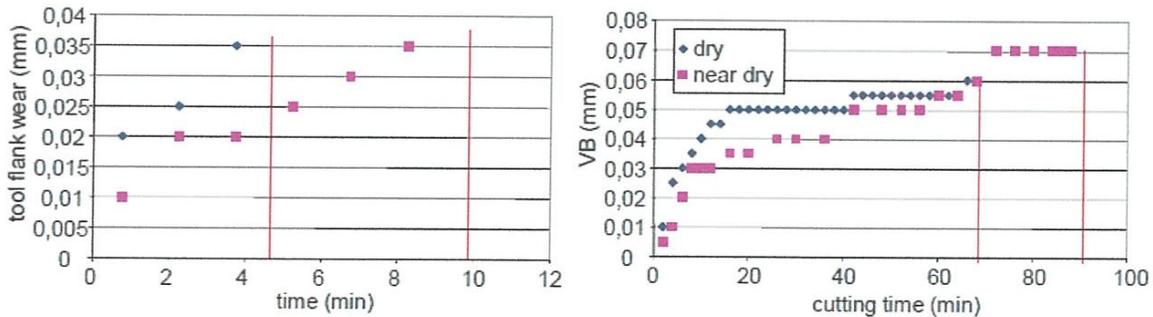


Figure 11.13: Progression de l'usure d'outil dans le temps, à vitesse de coupe=700 sfpm, avance=0,008 in/tr, profondeur de coupe= 0,01 pouce (in) (à gauche), vitesse de coupe=500 sfpm, avance=0,004 in/tr, profondeur de coupe=0,012 pouce (in) (à droite). [6]

En se basant sur le modèle de Taylor, la durée de vie de l'outil de coupe (T) peut être généralement d'écrit en terme de vitesse de coupe comme.

$$T = \exp(C)V_c^a$$

Avec les données dans le Tableau 11.3 les coefficients C et a, du modèle de Taylor peuvent être calculé comme dans le Tableau 11.4.

Tableau 11.3: Résultats du test – Durée de vie de l'outil

Test	Vc (sfpm)	F (in/rev)	Ap (in)	T in MQL (min)	T in Dry (min)
1	500	0.004	0.01	90	68
2	700	0.008	0.01	9.75	5.25

Tableau 11.4: Coefficients de Taylor

Coefficient	MQL	Dry
a	-6.60	-7.61
C	45.54	51.52

Les essais ont été réalisés pour confirmer le comportement dynamique de la température et des efforts de coupe en réponse à l'application de la quantité minimale lubrifiante (MQL). Pendant l'essai, la longueur totale de coupe (8 pouces) le long de la barre a été divisée en trois sections consécutives. La première section a été usinée complètement à sec, la MQL a été appliquée au début de la deuxième section, et au début de la troisième section la MQL était stopper afin qu'une condition de coupe à sec se poursuive. Le profil de température de la cale-support de la plaquette et les efforts de coupe, en correspondances aux temps de coupe, sont indiquées dans la figure II.14. La température chute d'environ 15 % en raison de la quantité minimale lubrifiante appliquée, tandis que le temps nécessitait pour atteindre un état stationnaire de température, est de l'ordre de 20 à 30 secondes. Les forces ne présentent aucune différence apparente avec ou sans l'utilisation de quantité minimale lubrifiante. Ces observations concordent généralement avec d'autres tests.

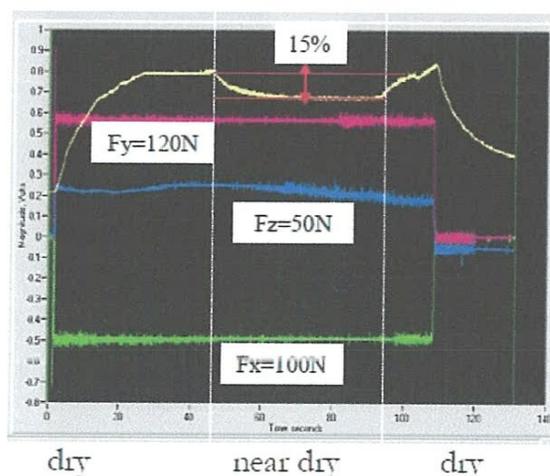


Figure II.14: Variation de la température et efforts de coupe en réponse à l'application intermittente de lubrification minimale, à vitesse de coupe=500 sfpm, avance=0,002 in/tr, profondeur de coupe=0,0075 pouce (in). [6]

### II.3.7.1. Principe de base des systèmes industrialisés de la micro-lubrification

Dans les systèmes de micro-lubrification, l'apport de lubrifiant entre l'outil et la pièce à usiner s'effectue par des microgouttelettes d'huile en suspension dans un flux d'air, ce que l'on appelle l'aérosol. Les systèmes décrits dans ce document sont dotés d'un générateur d'aérosol spécial capable de produire des microgouttelettes d'environ 0,5  $\mu\text{m}$ . Du fait de leur taille réduite, ces gouttelettes ne possèdent quasiment aucune inertie ni gravité. Ces propriétés permettent l'acheminement, sans effet de séparation notable, de l'aérosol sur de longues distances, dans des canalisations sinueuses ou par le biais de broches à rotation rapide. Les microgouttelettes de lubrifiant sont ainsi en permanence disponibles sur la lame de l'outil. La micro-lubrification constitue un moyen efficace d'assurer la lubrification du processus d'enlèvement de matière avec un volume d'huile minimal. Ses avantages sont des gains de productivité grâce à des vitesses de coupe plus élevées, une durée de vie accrue des outils ainsi que la suppression du traitement et de l'élimination des fluides de coupe [27].

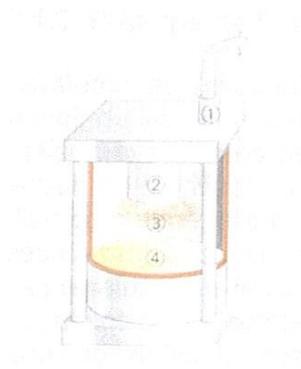


Figure II.15 : 1-Transport de l'aérosol ; 2-Générateur d'aérosol  
3-Gouttelettes de lubrifiant ; 4-Fluide lubrifiant. [27]

### II.3.7.1.1. Principe de fonctionnement de l'aérosol

Grâce à la vaporisation contrôlée de l'aérosol, la taille et la répartition des microgouttelettes d'huile du système de micro-lubrification LubriLean® est très homogène.

D'où des avantages d'ordre physique :

Une excellente couverture de la surface à lubrifier et la pénétration de particules ultrafines de lubrifiant dans les endroits difficilement accessibles ou cachés de la pièce.

On peut également réaliser des tracés difficiles, avec beaucoup de courbes, comme par exemple à travers le révoluer d'un tour.

Le transport de l'aérosol vers la zone d'usinage ne pose pas non plus de difficulté avec les fraiseuses dépassant les 20 000 tr/min.

Ces systèmes peuvent également être installés à une distance maximum de 20 m du poste d'usinage.

La micro-lubrification diminue le frottement – et de ce fait le transfert de chaleur – entre les copeaux et la pièce. La lubrification optimale des copeaux lors de leur évacuation dans la rainure permet d'une part des vitesses plus élevées et d'autre part une nette amélioration des états de surface [27].

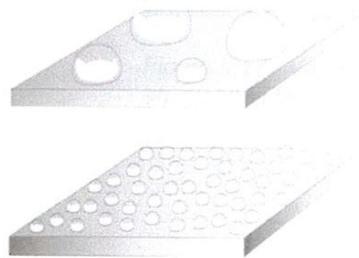


Figure II.16 : Image en haut (procédé classique - Mauvaise couverture de la pièce et de l'outil en raison de la vaporisation incontrôlée des gouttelettes air\_huile au niveau de la buse).  
Image en bas (Les nombreuses microgouttelettes homogènes diffusées par l'aérosol LubriLean® assurent une couverture régulière de la pièce) [27].

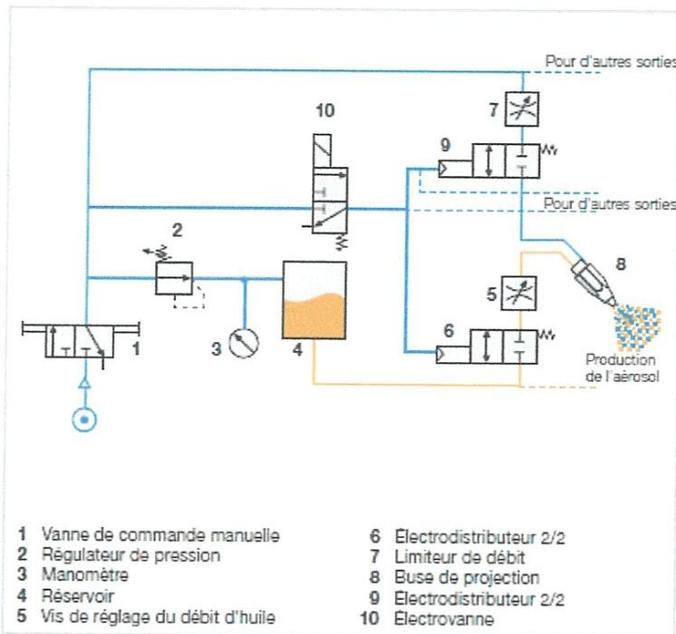


Figure II.18 : Fonctionnement du système Basic [27].

#### II.3.7.1.4. Avantages

- Facilité d'installation en seconde monte sur les machines-outils classiques
- Adaptation simple
- Temps de réaction rapide
- Excellente sécurité de fonctionnement pour le processus d'usinage
- Les buses ne goutent pas à l'arrêt du système
- Distance de projection pouvant aller jusqu'à 300 mm
- Buses spéciales empêchant un élargissement excessif du jet
- Meilleur état de surface dû à un moindre frottement
- Pas de résidus de lubrifiant sur la pièce et les copeaux lorsque le réglage est optimal
- Amélioration de la sécurité et de l'hygiène au poste de travail
- Durée de vie accrue des outils assurant un amortissement rapide du système

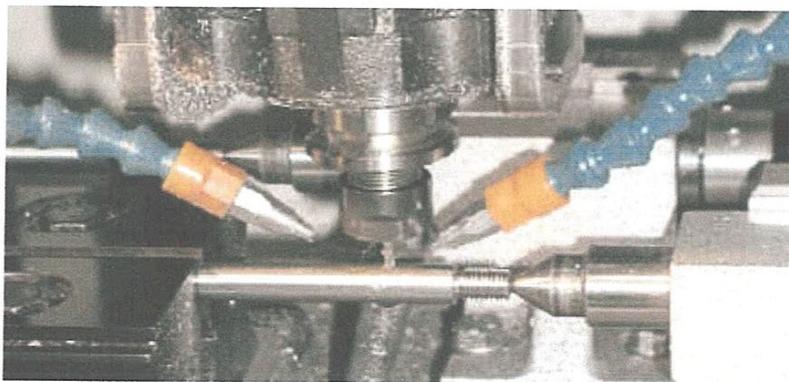


Figure II.19 : LubriLean® Basic - Perçage, fraisage, brochage, taraudage, filetage, et fraiseuses universelles (applications jusqu'à huit points de lubrification) [27].

### III – Littérature et objectifs de l'étude

#### III.1. Introduction

Pour identifier les critères de performances optimales d'un procédé d'usinage, la méthode de la logique floue nous permet de prendre une décision selon différentes situations. Lors de l'usinage, de nombreux paramètres peuvent affecter le processus de coupe. On peut illustrer dans ce qui va suivre, quatre indicateurs principaux pour caractériser la durabilité d'usinage, matériau, énergie, émissions d'aérosols et coût. Cependant, ils sont influencés par nombreux autres paramètres d'usinage tel que la géométrie de l'outil, les conditions de coupe, pièce et lubrification.

Dans la présente étude de littérature, on va illustrer un modèle de développement durable en matière d'usinage appliqué à trois processus différents, tournage, perçage et fraisage. Le modèle développé par Zaghbani et al., (2010) a été conçu spécialement pour l'acier de moule et n'intègre pas l'émission de particules métalliques. Dans ce qui va suivre aussi, une approche différente intégrant l'émission de particules est adoptée et un algorithme de logique floue est proposé pour prendre une décision et pour permettre une comparaison entre les différents processus. La méthode est utile pour évaluer une augmentation de la productivité, recyclage, en réduisant les effets néfastes de l'usinage sur les opérateurs, et l'environnement.

#### III.2. Approche

Le développement durable d'un procédé d'usinage doit être évalué à l'aide de facteurs mesurables qui peuvent être appelées indicateurs de développement durable. Dans ce but, le procédé d'usinage peut être considéré comme durable, si, la puissance, le matériel, le coût, et l'émission d'aérosols de ce procédé sont réduits aux valeurs minimum d'entrée/sortie. La puissance, le matériel, le coût et émission d'aérosols, sont définis comme les indicateurs du procédé. Ces quatre indicateurs ne sont pas indépendants. Ils dépendent tous des facteurs suivants:

- 1- Usinage exercé
- 2- Matériau de la pièce à usiner
- 3- Matériau et géométrie de l'outil
- 4- Paramètres de coupe
- 5- Mode de lubrification.

Pour une œuvre (pièce) conçue et une pièce brute donnée, les trois premiers facteurs (1, 2 et 3) peuvent être clairement définis. Toutefois, les paramètres de coupe et la méthode de lubrification ne sont pas toujours évidents à choisir. Il est intéressant de définir les quatre indicateurs de processus (puissance, matériel, coût, et émission d'aérosol) en fonction des conditions de coupe (paramètres de coupe et le mode de lubrification). L'approche qui va être illustré est définie comme suit :

Étape 1, Choisir les paramètres de coupe.

Étape 2, Pour les paramètres de coupe choisis, estimer la puissance, matériau, coût et émission d'aérosol, comme paramètres d'entrée de processus.

Étape 3, Pour les paramètres de coupe choisis, estimer la puissance, matériau, coût et émission d'aérosol, comme paramètres de sortie du processus.

Étape 4, Pour des indicateurs estimés, à savoir, puissance, matériel, coût et émission d'aérosols, un barème spécial pour chaque indicateur devrait être proposé pour définir les limites des trois niveaux (faibles, moyennes et élevées).

Étape 5, Définir trois niveaux de développement durable: non durable (NS); tranquillement durables (QS) et durable (S).

Étape 6, Pour les paramètres de coupe choisis, le programme de la logique floue est utilisé pour prendre une décision (Figure III.1).

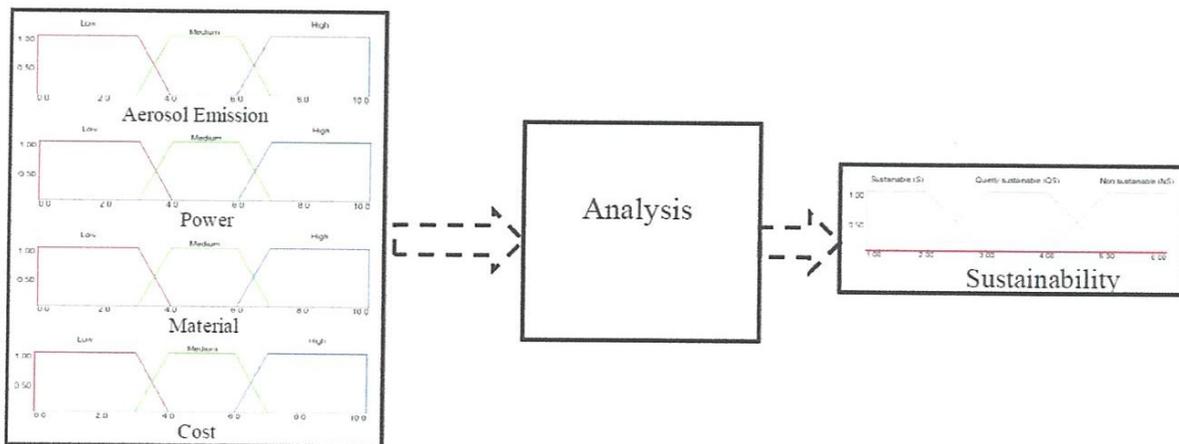


Figure III.1 : Approche proposé pour définir le développement durable d'un procédé d'usinage [2].

### III.3. Critères de performances en usinage

Les activités industrielles comme toutes autres activités visent à réaliser des bénéfices économiques de leur travail, minimiser le coût de fabrication, particulièrement dans l'usinage, qui est devenu un souci majeur, c'est pourquoi les influences aussi du mode de lubrification sur les critères de la performance d'usinage doivent se rapporter à une notion économique.

Les critères de performances d'usinage, la puissance, matériel, coût, et émission d'aérosols (lubrifiant et mode d'arrosage), peuvent être estimés comme suit :

#### III.3.1. Puissance

La puissance du procédé d'usinage peut être évaluée d'après les puissances partielles:

l'aérosol émis durant le procédé de coupe et représente la masse des aérosols divisée par la masse de copeaux enlevés.  $D_u$  comprend liquide et solides aérosols générés lors de l'usinage qui peuvent être nocifs, tant pour la santé de l'opérateur et l'environnement (Dhar and Islam, 2006 ; Dhar et al., 2006 ; Yue et al., 2004 ; Chen et al., 1998, 1999, 2000, 2002, 2001 ; Rossmore et Rossmore, 1990 ; Sondossi et al., 2001). Selon l'équation suivante, il est possible de prédire l'indicateur des émissions d'aérosol (Khettabi et Songmene, 2009 ; Khettabi et coll., 2010 b, 2010c).

$$D_u = A \times \frac{\beta_{max} - \beta}{\beta_c} \times R_a \times \eta_s \cdot \left( \frac{V_0}{V} \right)^\delta \exp\left( \frac{-E_A}{E} \right)$$

où  $A$  représente le facteur de proportionnalité;  $V$  est la vitesse de coupe,  $V_0$  est la vitesse de coupe critique au cours de laquelle l'émission de poussière est maximale;  $R_a$  est la rugosité arithmétique du face de coupe de l'outil râteau,  $\eta_s$  est la densité de segmentation de copeau,  $\beta$  est un coefficient de segmentation de copeau défini par Xie et al., (1996).  $\beta_{max}$  et  $\beta_c$  sont respectivement la valeur maximale et la valeur critique au cours de laquelle la formation de copeau change;  $\delta$  est un paramètre du matériau mis en place pour caractériser sa capacité à produire des copeaux fragiles (cassés) ou ductiles.

$E_A$  est l'état d'énergie de la particule (énergie d'activation de particules par unité de surface par unité de temps  $w/mm^2$ ) et  $E$  est l'énergie de coupe par unité de surface coupée et par unité de temps ( $w/mm^2$ ). L'énergie  $E$  de coupe orthogonale peut être calculée par l'équation suivante:

$$E = \tan \varphi (1 - C_h \sin \alpha) V \frac{F_{sh}}{bf}$$

Où  $\varphi$  est l'angle de cisaillement, la  $F_{sh}$  est une force cisaillement,  $C_h$  le taux de compression du copeau,  $\alpha$  l'angle d'inclinaison d'outil,  $bf$  la section du copeau.

Selon les résultats expérimentaux, il est utile d'utiliser directement la valeur  $D_u$  multiplié par  $10^4$ . Il a été constaté que le  $D_u$  du matériau fragile, est très faible et par conséquent, la toxicité doit être aussi faible (Khettabi et Songmene, 2009 ; Khettabi et al., 2010 b, 2010c). Dans le cas de la fonte grise, le maximum  $D_u$  a été à  $0,02 \times 10^{-4}$  pendant la rotation orthogonale. Par la suite, il peut être représenté juste 0,02 dans l'échelle de la toxicité dans le programme de la logique floue. Si plusieurs procédé ont comparés, le fraisage peut être considéré comme le processus qui produit plus de poussière que le tournage et le perçage (Zaghbani et coll., 2009 ; Khettabi et Songmene, 2009 ; Khettabi et al., 2010 a, 2010 b, 2010c).

### III.3.4. Coût d'usinage

Le coût d'usinage est estimé en utilisant les équations développées par Parent et al., (2007). Le coût total d'une opération d'usinage est calculé comme suit :

$$C_{dry/wet} = (C_m + C_{CAM} + C_{pie} + C_b) + (C_{aor} + C_{aof}) + C_{lub} + T_{lub}$$

Où,  $C_M$  est le coût de l'utilisation de la machine (\$) calculé comme suit :

$$C_m = M \times (T_{urs} + T_{ursh} + T_{ufs} + T_{ufsh} + T_{cot})$$

$M$  : coût par minute de fonctionnement (salaires, frais de machine, etc.). (\$/min).

$T_{urs}, T_{ufs}$  : temps effectif de coup (préliminaire et finition) (min).

$T_{ufsh}, T_{ursh}$  : temps non-effectif de coupe (min).

$C_{CAM}$  : coût programmation CAM (\$)

$C_{pie}$  : coût d'emplacement et déplacement matériau (pièce) (\$).

$C_b$  : coût de la matière première (\$).

$C_{aor}, C_{aof}$  : coût d'utilisation outils (rugueux et finition) (\$/ min)

$T_{lub}$  : temps de lubrification (pour l'usinage à sec  $T_{lub} = 0$ ).

$C_{lub}$  : coût unitaire de lubrification (\$/ min).

Une fois que les indicateurs sont évalués, la décision peut être prise concernant la viabilité du procédé, en utilisant le programme de la logique floue.

### III.4. Introduction sur la logique floue

#### III.4.1. A titre d'information

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  $[0, 1]$ , Zadeh :

- redéfinit ce qu'est un sous-ensemble d'un univers donné,
- bâtit un modèle complet de propriétés et de définitions formelles,
- et montre que cette théorie des sous-ensembles flous se réduit effectivement à la théorie des sous-ensembles classiques dans le cas où les fonctions d'appartenance ne prennent que les valeurs binaires de  $\{0, 1\}$ .

La logique floue présente aussi l'intérêt d'être plus facile et moins chère à implémenter qu'une logique probabiliste.

### III.4.2. Le Principe, à travers un exemple

Considérons par exemple la vitesse d'un véhicule sur une route nationale Guelma-Annaba. La vitesse normale est de 90 km/h (valeur arbitraire). La vitesse peut être considérée comme élevée au-dessus de 100 km/h, et réglementaire en dessous de 80 km/h.

Si nous voulons répondre par exemple à la question (La vitesse est-elle élevée ?). La logique booléenne envisagerait les choses de la manière suivante (Figure III.2):

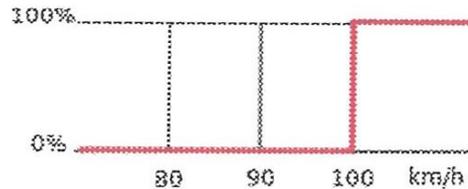


Figure III.2

- La vitesse est considérée à 100% comme élevée à partir de 100 km/h, et à 0% en dessous.

La logique floue, à l'inverse, permet des degrés de vérification de la condition « La vitesse est-elle élevée ? » (Figure III.3) :

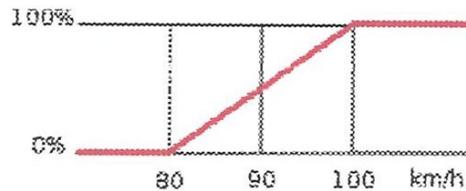


Figure III.3

- La vitesse est considérée réglementaire en dessous de 80 km/h. On peut donc dire qu'en dessous de 80 km/h, la vitesse est élevée avec un taux de confiance de 0%.
- La vitesse est considérée comme élevée au-dessus de 100 km/h. La vitesse est non-réglementaire avec un taux de confiance de 100% au-dessus de 100 km/h.
- Aux points intermédiaires, on considère que la vitesse est non-réglementaire à 50% de confiance à 90 km/h et à 25% de confiance à 85 km/h.

De la même manière, la fonction « La vitesse est-elle peu élevée ? » sera évaluée de la manière suivante (Figure III.4) :

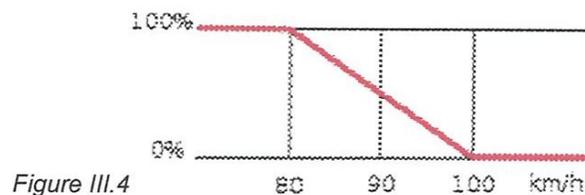


Figure III.4

- La vitesse est considérée comme peu élevée en dessous de 80 km/h. Elle est donc peu élevée à 100%.
- La vitesse est considérée comme pas du tout peu élevée au-dessus de 100 km/h. Elle est donc peu élevée à 0%.
- La vitesse est donc peu élevée à 50% à 90 km/h, et à 25% à 95 km/h. On peut

Également définir une fonction « La vitesse est-elle moyenne ? » (Figure III.5):

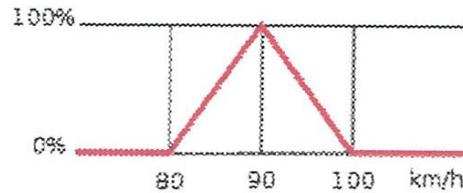


Figure III.5

- La vitesse est moyenne à 90 km/h. À cette allure, la vitesse est moyenne à 100%.
- La vitesse n'est pas du tout moyenne en dessous de 80 km/h et au-dessus de 100 km/h. Hors de cet intervalle, la vitesse est moyenne à 0%.
- La vitesse est donc moyenne à 50% à 85 km/h et 95 km/h.

Il n'est pas obligatoire que la transition soit linéaire. Des transitions hyperboliques (comme une sigmoïde ou une tangente hyperbolique), exponentielle, gaussienne (dans le cas d'un état moyen) ou de toute autre nature sont utilisables (Figure III.6).

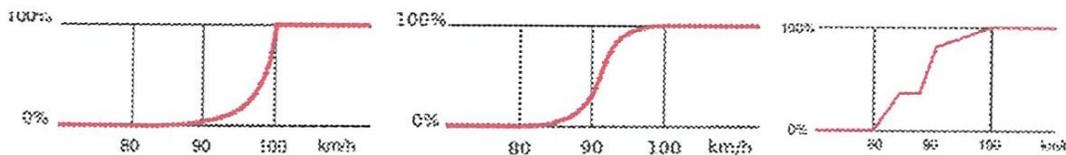


Figure III.6

### III.4.3. La commande floue à travers un exemple

Une fois la valeur de l'entrée (« La vitesse est-elle élevée ? ») évaluée, une valeur peut être déterminée pour une fonction de sortie. Considérons, par exemple, la fonction « Si la fièvre est forte, alors administrer de l'aspirine ». Une telle fonction est appelée commande floue. Elle est composée de deux parties:

- Une entrée : « La fièvre est-elle forte ? ». On considère qu'une fièvre n'est pas forte en dessous de 38°C, et qu'elle est forte au-dessus de 40°C.
- Une sortie : « Administrer de l'aspirine »

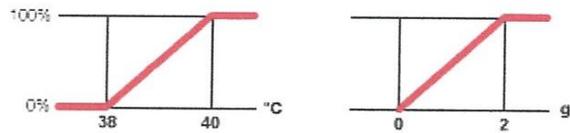


Figure III.7

Il existe plusieurs techniques pour déterminer la valeur de la sortie (dans l'exemple : la quantité d'aspirine à administrer) :

- La droite ayant la même ordonnée que le point de la courbe de départ ayant pour abscisse la valeur de l'entrée coupe la courbe de sortie. L'abscisse de ce point d'intersection est une valeur de sortie possible (Figure III.8).



Figure III.8

La droite ayant la même ordonnée que le point de la courbe de départ ayant pour abscisse la valeur de l'entrée délimite un trapèze au niveau de la sortie. Le centre de gravité de ce trapèze est également une valeur de sortie possible (Figure III.9).



Figure III.9

#### III.4.4. Discussion de théories

Il existe une opinion qui dit que "La théorie des ensembles flous présente la particularité de n'avoir aucun théorème à proposer. C'est-à-dire que si elle peut rendre quelques services techniques, elle ne peut pour autant prétendre à un quelconque statut de science, et encore moins de théorie."

En fait, la logique floue a été formalisée et un théorème (élémentaire, cependant) montre que dans le cas particulier où les propositions traitées ne sont pas floues, la logique floue se réduit à la logique classique.

D'autre part, bien que des détracteurs de la logique floue prétendent que "Le théorème de Cox-Jaynes montre d'une part que l'on peut représenter un état de connaissance incertaine par une probabilité, et d'autre part que tout moyen utilisé pour prendre des

décisions sera soit isomorphe à la théorie des probabilités, soit incohérent" , ce théorème ne s'applique pas aux connaissances floues, qui ne sont généralement pas des connaissances incertaines (ce qui rend difficile, voire infondée, leur représentation par des probabilités).

Le flou est lié à la forme de la connaissance : son imprécision n'est donc pas de nature probabiliste. Par exemple, dire "l'âge de cette personne est autour de 30 ans" ne présume en rien de la probabilité de l'âge effectif de la personne. On peut mieux voir la distinction entre imprécision et probabilité en pondérant cette assertion : "je suis sûr que l'âge de cette personne est autour de 30 ans" où l'on peut retrouver ici à la fois une imprécision (sur la valeur de l'âge) et une certitude (sur le fait que cet âge soit autour de 30 ans). Ou aussi : "l'âge de cette personne est autour de 30 ans, avec une probabilité de 0.2" où l'on retrouve encore une connaissance floue ("autour de 30 ans") qui est relativisée par une probabilité de véracité

Pour illustrer encore ce propos, on peut citer l'exemple classique de *Jim Bezdek* qui permet de mieux différencier probabilité et imprécision : "On se trouve dans un désert, après des jours d'errance... Presque mort de soif, on trouve alors 2 bouteilles remplies d'un liquide. Sur la bouteille A, une étiquette annonce "*potable avec un degré 0.9*", et sur la bouteille B, l'étiquette dit "*potable avec une probabilité 0.9*". Laquelle de ces 2 bouteilles doit-on choisir ?". Si l'on traduit les indications des étiquettes, on en retire qu'en buvant la bouteille A, on pourra s'en tirer avec comme seuls risques, quelques problèmes intestinaux non mortels... Par contre, en buvant la bouteille B, il y a une probabilité non négligeable (10 % de chance) que le liquide puisse être très nocif (acide...) et absolument pas buvable.

La logique floue s'attache donc à une certaine forme des connaissances (leur imprécision) et propose un certain formalisme rigoureux permettant d'inférer de nouvelles connaissances. En cela, elle est complémentaire de la théorie des probabilités.

### III.5. Définition des fonctions d'appartenance et règles

Nous retournons au début du chapitre III, étape 6, pour les paramètres de coupe choisis, le programme de la logique floue est utilisé pour prendre une décision (*Figure III.1*). La forme trapézoïdale des ensembles flous est utilisée et les trois niveaux sont proposés pour chaque indicateur (faible, moyen et élevée). L'échelle de 10 est proposée d'avoir une quantification uniforme pour les différents indicateurs. Les vraies valeurs des indicateurs doivent être transformées dans le barème proposé.

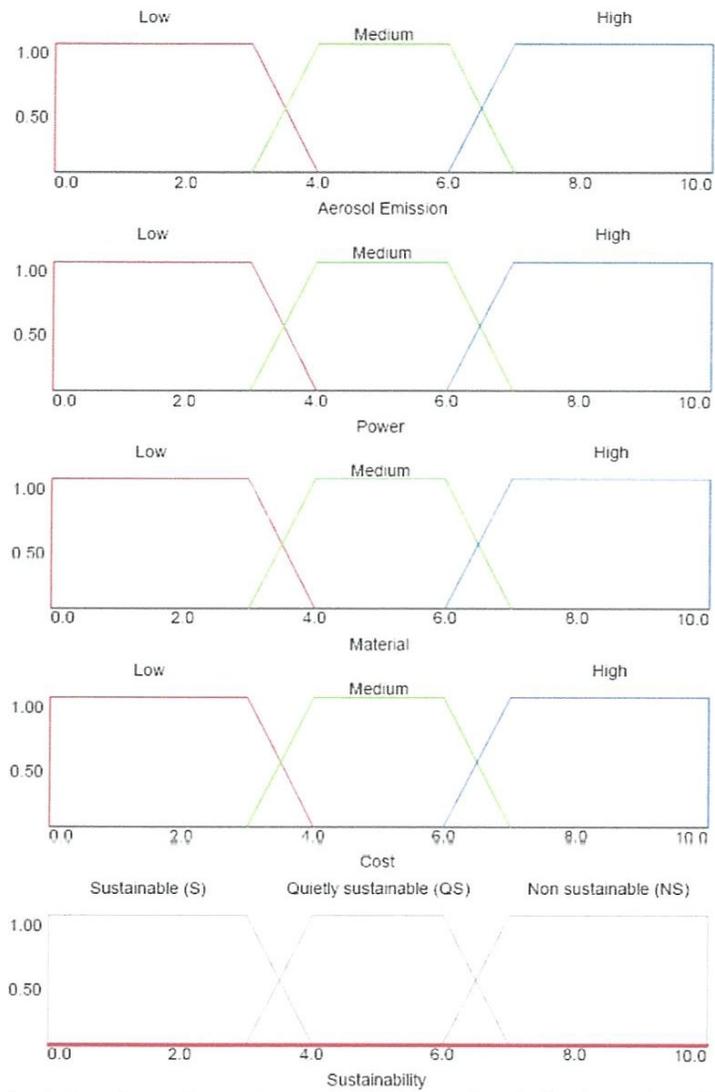


Figure III.10: Exemple de fonctions d'appartenance définissant les indicateurs de puissance et de toxicité [2].

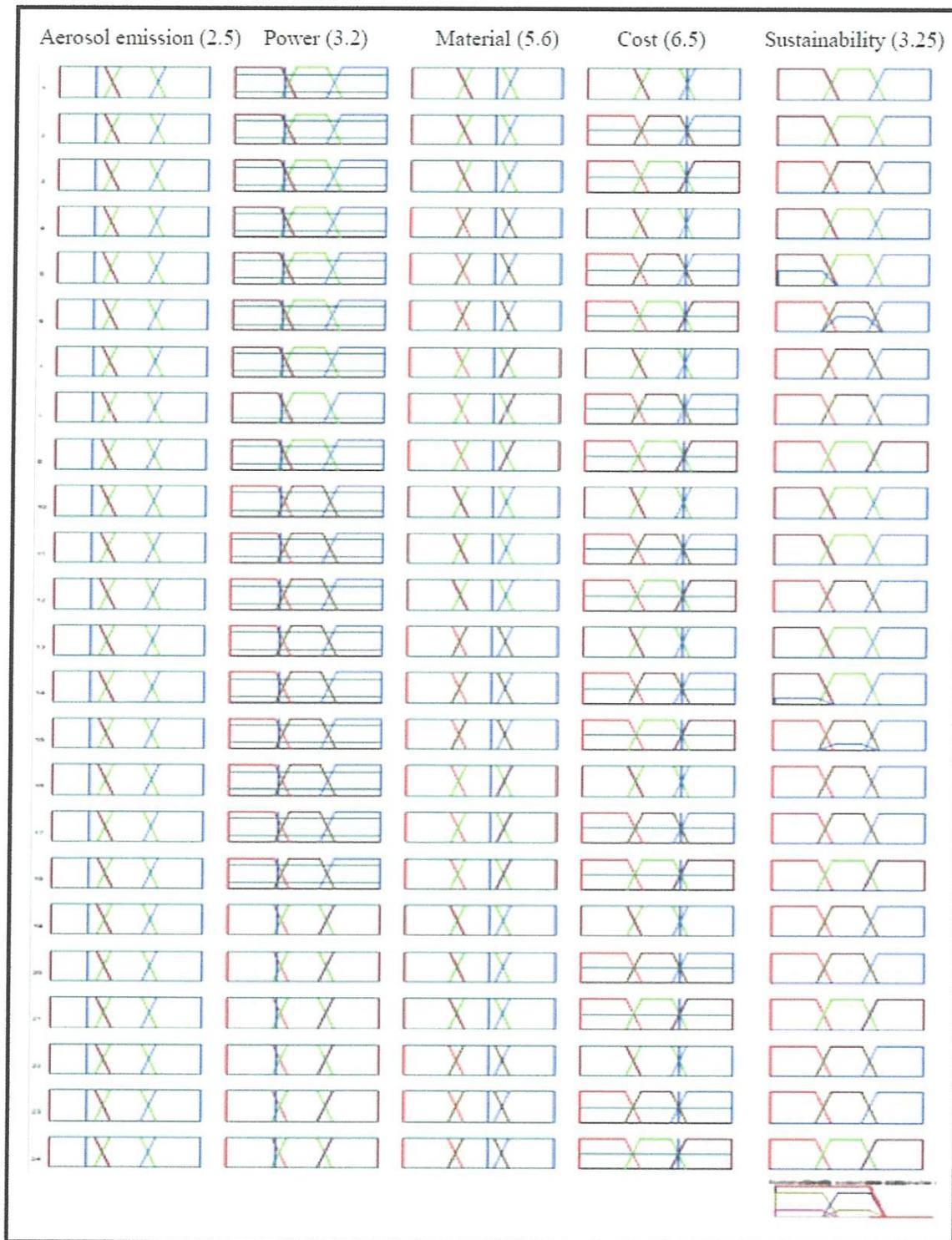


Figure III.11 : Définition des règles [2].

### III.6. Application

La méthode a été appliquée pour différents processus : fraisage, perçage et tournage. Les différentes conditions de coupe seront testées pour ces trois processus, et l'indice de durabilité (sustainability) sera calculé par ordinateur. L'estimation de certains paramètres (effort, puissance, émission de poussière et coût) sera mesurée, ou déduite des modèles prédictifs développés pour l'émission d'effort et d'aérosols. On trouvera les résultats suivants:

- 1 - Comparaison de la durabilité des trois processus.
- 2 - Influences de la vitesse de coupe sur l'indice de durabilité pour les trois méthodes.
- 3 - Une approche d'optimisation peut être proposée pour estimer les conditions de coupe correspondant aux limites de durabilité.

La Figure III.12, montre l'émission maximale de particules en fonction des différents processus pendant l'usinage d'aluminium en alliage 6061-T6 et perçage de laiton 70-30. En termes d'émission d'aérosols, le fraisage peut être considéré comme plus dangereux que les autres processus. Dans l'échelle des émissions d'aérosols de 0 à 10, le fraisage de 6061-T6 peut avoir la valeur de 5,46 (Figure III.12). Vitesses de coupe très élevées, et émission d'aérosols diminue pour tous les processus (Khettabi et Songmene, 2009 ; Khettabi et al. 2010a, 2010b, 2010c).

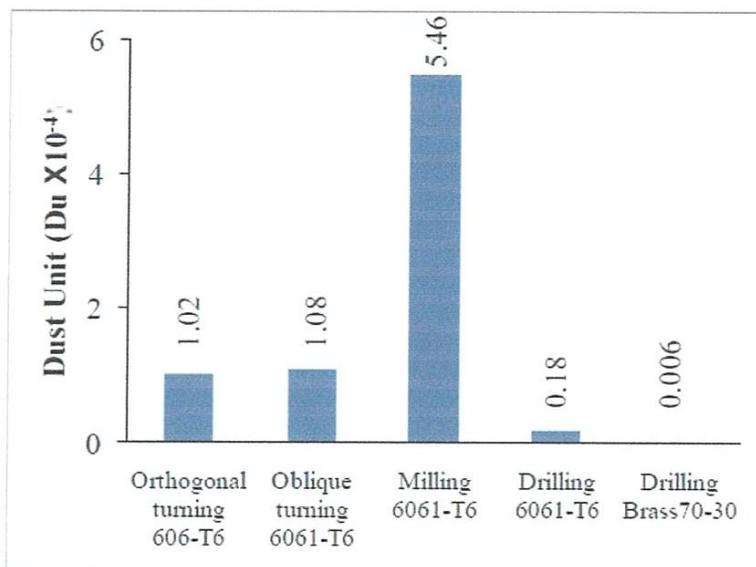


Figure III.12 : Comparaison de l'émission maximale d'aérosols en fonction du processus et matériau.

Il a été constaté que la vitesse de coupe élevée combinée à un débit optimal de lubrifiant produit un copeau segmenté (Xie et al., 1996) et diminue les émissions de particules (nuages) et puissance (Khettabi et Songmene, 2009 ; Khettabi et al., 2010 a, 2010 b, 2010c). Par conséquent, à vitesse de coupe élevée avec un débit de lubrifiant important, le procédé doit être remis au développement durable. La classification de la durabilité des différents matériaux au cours du procédé d'usinage, peut être réduite uniquement pour les deux indicateurs (émissions d'aérosols et puissance), car l'indicateur du matériau et coût peut rester le même pour chaque matériau. Mais pour le

même matériau, il est nécessaire de trouver les conditions optimales pour être durable. En utilisant ce modèle, il est possible de construire une base de données des conditions durables pour différents matériaux pendant le procédé de coupe. En général, à vitesse de coupe élevée, la puissance, le matériel, les coûts et l'émission d'aérosols devraient être en diminution et le processus devient viable.

La puissance du procédé d'usinage est généralement déterminée par l'effort principal de coupe (Sadowy, 1965). Il est possible d'utiliser l'effort de coupe pour estimer la puissance. La consommation d'énergie peut être évaluée à l'aide de l'équation suivante:

$$P = F_c \times V_c$$

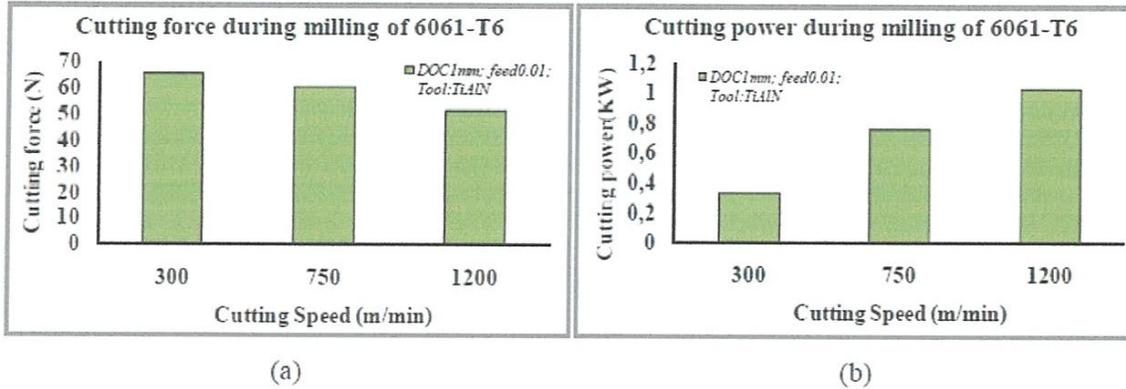


Figure III.13 : Puissance et effort de coup en fonction de la vitesse de coupe avec outil TiAlN pendant fraisage de 6061-T6

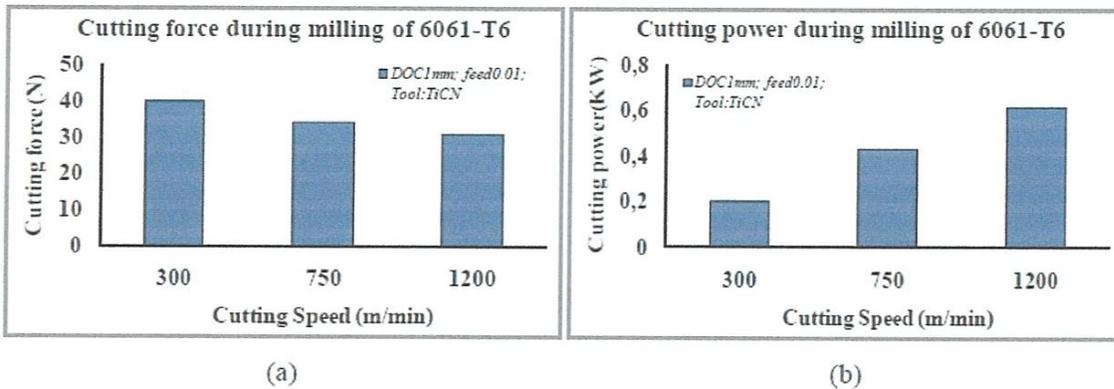
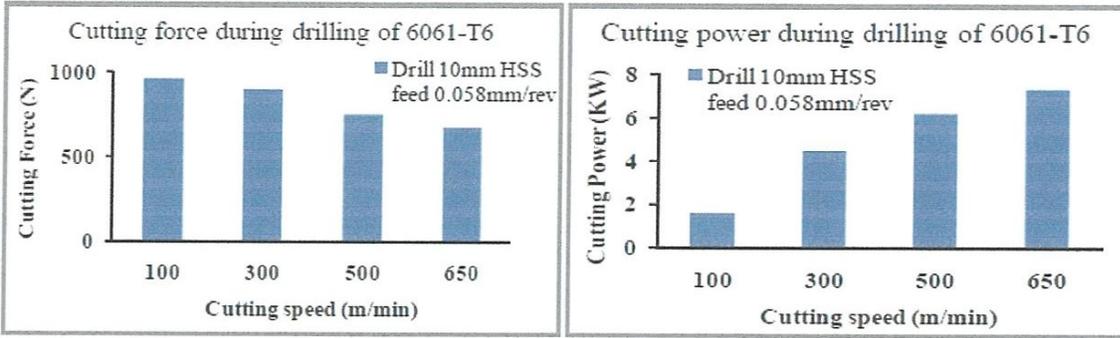


Figure III.14 : Puissance et effort de coup en fonction de la vitesse de coupe avec outil TiCN pendant le fraisage de 6061-T6



(a)

(b)

Figure III.15 : Puissance et effort de coup ( $F_z$ ) en fonction de la vitesse de coupe pendant le perçage d'alliage d'aluminium (6061-T6).

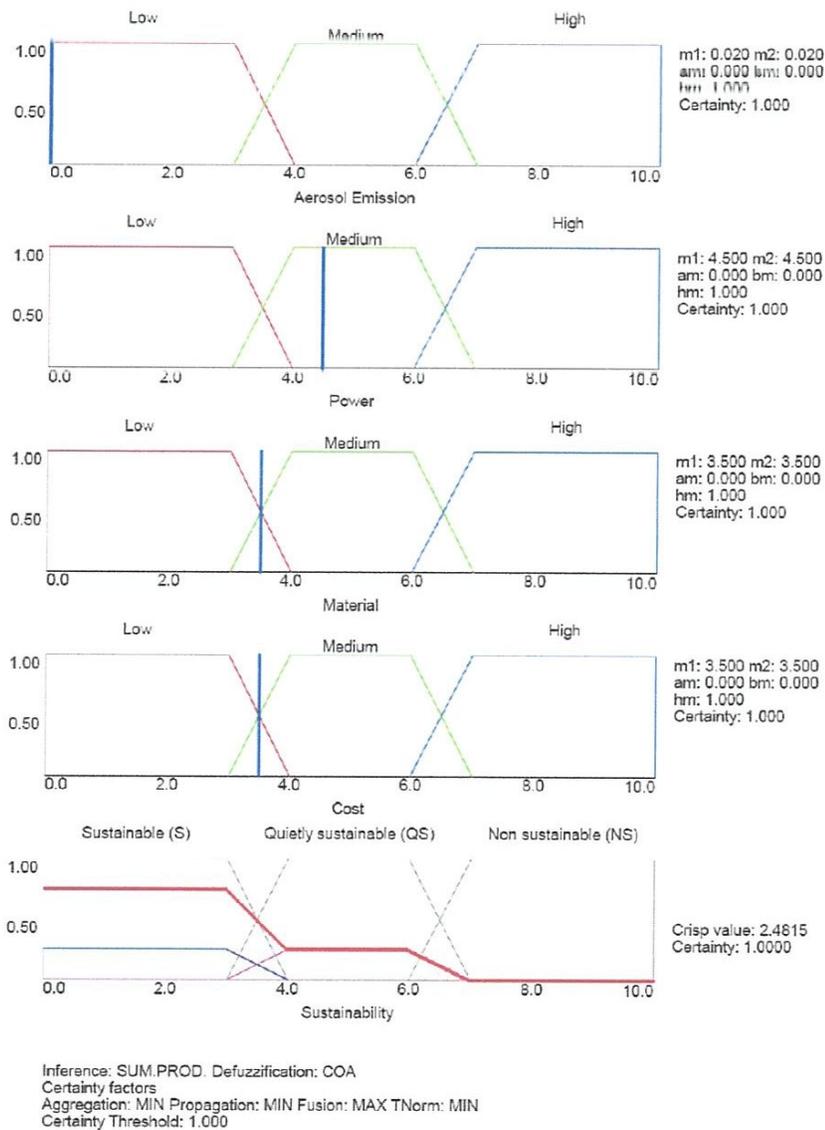


Figure III.16 : La durabilité des processus de perçage à 300 m/min [2].

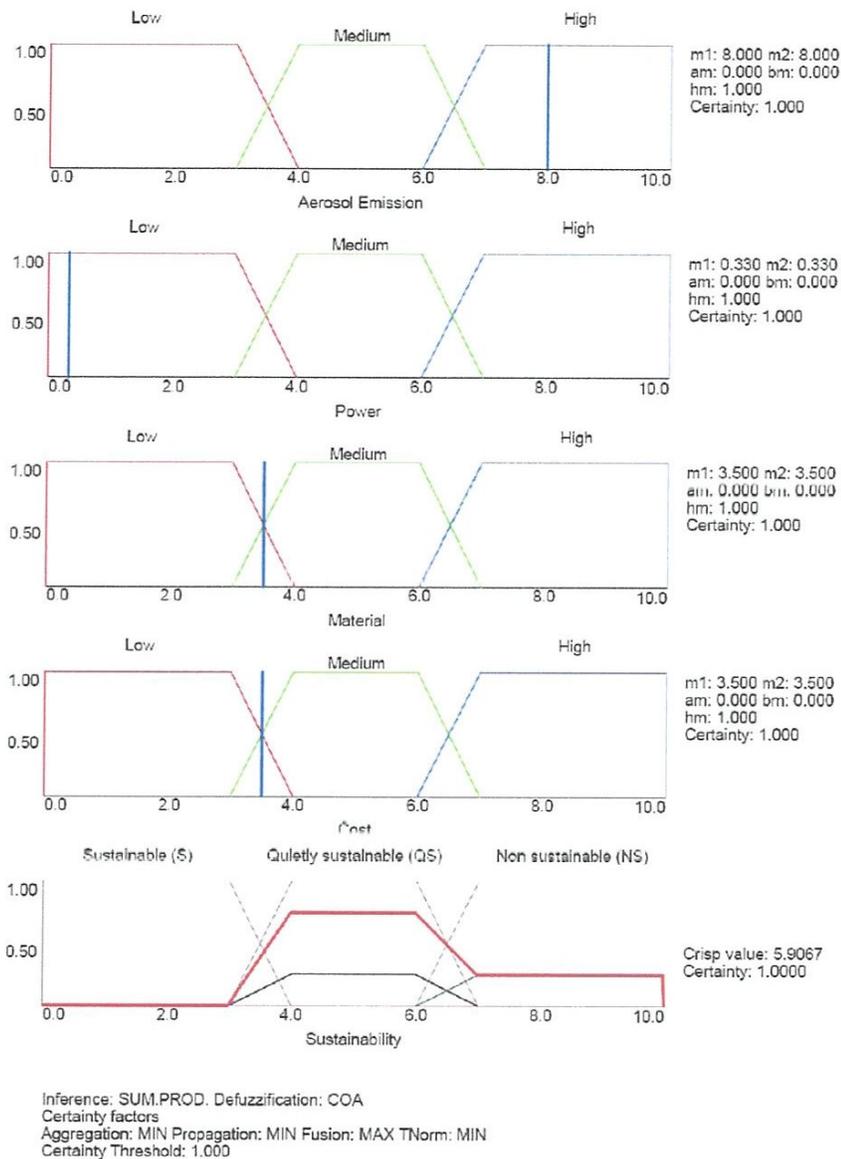


Figure III.17 : La durabilité des processus de fraisage à 300 m/min [2].

Une augmentation de la vitesse de coupe augmente la consommation d'énergie durant le procédé de coupe. Selon la puissance de coupe pour les différents tests, on peut considérer la valeur de l'indicateur de puissance directement comme valeur de la puissance en KW. La valeur la plus élevée obtenue lors des essais a été environ 7,4 KW. Comparaisons, le perçage et le fraisage d'alliage d'aluminium 6061-T6 en cours des procédés à sec, l'indicateur de matériel et de coût devrait être pratiquement les même pour les deux procédés. Cependant, l'émission d'aérosols et puissance doivent être différents pour les deux différents procédés d'usinage.

- perçage à 300m/min, l'émission d'aérosols est 0,02 et la puissance 4,5 (Figure III.15)
- fraisage à 300m/min, l'émission d'aérosols est 8 et la puissance 0,33 (Figure III.13).

Il peut être obtenu en utilisant le programme de la logique floue pour évaluer la durabilité des procédés dans des conditions similaires. Il a été constaté que le perçage est plus avantageux en termes de durabilité que le fraisage (*Figure III.16* et *Figure III.17*).

Il a été constaté expérimentalement que l'effort de coupe pendant le procédé de fraisage est très faible par rapport à l'effort de coupe pendant le procédé de perçage (*Figure III.13* et *Figure III.14*). Toutefois, le fraisage peut être avantageux en puissance mais son émission d'aérosol est très élevée. Généralement, à vitesse de coupe très élevée, combinée à une profondeur optimale de coupe et vitesse d'avance, doit être durable, car le critère de puissance, toxicité et de matériel devraient être plus faibles. Avec le même procédé et avec des conditions différentes, la durabilité devient dissemblable, et l'optimisation devrait être faite facilement à l'aide de ce modèle de programme de la logique floue.

### **III.7. Conclusion de la revue de littérature**

Le modèle illustré, avait pour but d'évaluer un développement durable d'un procédé d'usinage (c'était le cas pour les alliages d'aluminium), les paramètres de coupe étaient variés à fin d'identifier les performances d'usinage en termes de durabilité, ce modèle tient compte aussi des processus d'usinage qui doivent être optimisés.

Ce modèle proposé de développement durable de l'usinage, aide donc le recyclage, réduit la toxicité, coût et énergie, avec amélioration de la productivité. À très grande vitesse de coupe, ce processus est considéré comme durable, car la puissance, le coût, le matériel et la toxicité généralement diminuent.

Ce concept de développement durable dans le domaine de l'usinage intégrant l'émission d'aérosols, puissance, coût et matériel, permet de développer une nouvelle classification d'usinage.

L'application de la méthode de la logique floue pour évaluer l'indice de durabilité nous a permis de prendre la bonne décision.

## **IV – Données expérimentales et programmation avec la logique floue**

### **IV.1. Objectif**

Nous avons déjà illustré dans les chapitres précédents, que l'évaluation et la comparaison des influences du mode de lubrification sur la performance d'usinage ne doit pas se limiter à considérer certains critères de performances de coupe, mais aussi doit se pencher sur une notion économique et environnementale.

Le but de l'étude qui va suivre est de :

- A- Comparer les résultats expérimentaux, des différents modes de lubrification, mode d'usinage à sec, MQL (lubrification minimale), et lubrification abondante, en termes, de performances de l'usinage, coût, et avantages environnementaux.
- B- Vérifier le mode de lubrification (MQL-quantité minimale de lubrification) avec le programme de la logique floue, en se basant sur des données pratiques, et sur des connaissances développées dans ce sens.
- C- Acquérir une connaissance sur la lubrification minimale (MQL), ses caractéristiques et ses avantages environnementaux, et bien être des opérateurs. Connaître les variables importantes pour son efficacité tout en réalisant un usinage dans des conditions optimales de productivité.
- D- utiliser le programme de la logique floue comme étant une nouvelle méthodologie d'optimisation du processus d'usinage en tenant compte des critères de performances de coupe, et de l'efficacité des différents modes de lubrification.
- E- Pour conclure, mettre en évidence les conditions optimales du processus d'usinage issues de l'évaluation par la logique floue.

### **IV.2. Exposition d'un essai d'expérience**

#### **IV.2.1. Introduction**

La préparation d'une expérience d'un usinage, consiste principalement à déterminer les tâches qui devront être réalisées pendant l'expérience, à savoir :

- a- Le procédé d'usinage à effectuer, les conditions de coupe.
- b- La machine, outillages, instruments, et matériaux nécessaires pour réaliser les essais d'expérience.
- c- Déterminer le nombre de répétitions nécessaires pour avoir le niveau de confiance requis.
- d- Déterminer l'ordonnancement des essais du plan d'expérience afin d'en minimiser le coût et le temps de réalisation.
- e- Créer une base, de données collectées durant les essais d'expériences, pour les analyser.

#### IV.2.2. Procédé d'usinage, conditions et données des essais expérimentaux

Le procédé d'usinage choisi est le fraisage en concordance, dans son principe, le fraisage est un procédé de coupe (enlèvement de matière) faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à une ou plusieurs arêtes (mouvement de coupe) et l'avance rectiligne d'une pièce (dit mouvement d'avance).

Dans le cas du fraisage en concordance, la direction d'avance est la même que le sens de rotation de la fraise. La profondeur de coupe va donc diminuer jusqu'à être égale à zéro en fin de passe.

Les variables dépendantes qui ont été mesurées au cours du procédé de fraisage sont :

1. La durée de vie de l'outil.
2. L'effort de coupe.
3. La rugosité de la surface.

L'expérience est réalisée avec trois niveaux différents pour chaque variable indépendante, on trouve donc :

1- Le mode de lubrification, à sec, avec lubrification abondante (600 L/h), et avec lubrification minimale (MQL à 3,64 L/h) ; fluide de coupe utilisé est le CIMSTAR 60C-HFP. La lubrification abondante est réalisée par le système de lubrification de la machine-outil, tandis que la lubrification minimale est produite par un système de micro-lubrification Technolube.

2- La vitesse de coupe, à 100, 150, et 200 (m/min).

Tableau IV.1: Mode de lubrification, et vitesses de coupe [29].

Numéro des essais	Variables indépendantes	
	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)
1	Sec	100
2	Sec	150
3	Sec	200
4	Lubrification Abondante	100
5	Lubrification Abondante	150
6	Lubrification Abondante	200
7	Lubrification Minimale (MQL)	100
8	Lubrification Minimale (MQL)	150
9	Lubrification Minimale (MQL)	200

Les conditions de coupe sont :

- 1- Profondeur de coupe : 2 mm
- 2- Avance par dent : 0.25 mm/dent
- 3- Immersion : 12 mm

Le matériau utilisé est un composite GrA-Ni 10S.4G® étudié est un CsMAIPA qui contient deux particules :

(1) le SiC d'une taille de l'ordre de 14  $\mu\text{m}$ ;

(2) le graphite d'une taille de l'ordre de 80  $\mu\text{m}$  revêtu par une couche de nickel d'épaisseur 5-10  $\mu\text{m}$  (50 % massique de Nickel et Graphite).

Tableau IV.2: Données pour la durée de vie de l'outil [29].

Numéro d'essais	Mode de lubrification	Vitesse de coupe	Durée de vie de l'outil (min)		
			T	T	T
1	Sec	100	1,91	1,9	1,9
2	Sec	150	1,77	1,78	1,59
3	Sec	200	1,55	1,52	1,58
4	LA	100	2,14	2,13	2,21
5	LA	150	1,85	1,93	1,96
6	LA	200	1,86	1,73	1,7
7	LM (MQL)	100	2,12	2,13	2,11
8	LM (MQL)	150	1,95	2,11	2,09
9	LM (MQL)	200	1,86	1,76	1,83

Tableau IV.3: Données pour l'effort de coupe [29].

Numéro d'essais	Mode de lubrification	Vitesse de coupe	Effort de coupe (N)		
			Fc	Fc	Fc
1	Sec	100	106,62	112,35	100,18
2	Sec	150	100,59	93,37	106,62
3	Sec	200	89,76	90,35	90,44
4	LA	100	120,53	119,57	121,25
5	LA	150	109,86	108,27	109,53
6	LA	200	101,58	103,36	99,67
7	LM (MQL)	100	116,43	118,45	119,38
8	LM (MQL)	150	118,28	116,99	114,24
9	LM (MQL)	200	104,78	105,93	108,56

Tableau IV.4: Données pour la rugosité de la surface usinée [29].

Numéro d'essais	Mode de lubrification	Vitesse de coupe	Rugosité de la surface ( $\mu\text{m}$ )		
			Ra	Ra	Ra
1	Sec	100	1,28	1,5	1,11
2	Sec	150	1	0,94	1,02
3	Sec	200	0,92	0,9	0,9
4	LA	100	0,89	0,89	0,87
5	LA	150	0,76	0,75	0,77
6	LA	200	0,6	0,69	0,5
7	LM (MQL)	100	0,81	0,8	0,81
8	LM (MQL)	150	0,6	0,6	0,6
9	LM (MQL)	200	0,65	0,59	0,67

### **IV.3. Problématique et objectif**

La première partie de notre problème concerne la détermination des influences de la lubrification sur les critères de la performance d'usinage.

L'élimination des fluides de coupe est souhaitable pour éviter les pollutions réellement ou potentiellement générées par ces produits. L'industrie manufacturière est l'un des facteurs principaux de pollution de l'environnement, donc est devenu urgent pour les industriels de réduire cet impact sur l'environnement. Le concept de quantité minimale de lubrifiant (MQL), été avancé depuis une dizaine d'années comme un moyen d'aborder les questions d'environnement, et risques professionnels associés avec les particules de fluide de coupe aéroportées durant l'usinage, il faut donc :

- a- Assurer de bonnes conditions d'hygiène et de santé pour les opérateurs au milieu du travail.
- b- Respecter l'environnementale, en supprimant, ou limitant les risques de pollution.
- c- Réduire les coûts de production.

Ces conditions nous conduisent vers un processus d'usinage plus propre et écologique, pour cela donc :

La deuxième partie de notre problème concerne la comparaison des influences de la lubrification abondante et lubrification minimale (MQL- minimal quantity lubrication) sur les critères de la performance de l'usinage.

L'augmentation de la productivité ainsi que la diminution du coût du produit sont deux obligations pour l'industrie, donc :

La troisième partie de notre problème concerne la mise au point d'une méthodologie d'optimisation pour les conditions de coupe, ce qui doit lier les critères de la performance de l'usinage avec la productivité et le coût de produit.

### **IV.4. Analyse des données**

Pour analyser les données nous allons utiliser le programme de la logique floue. Dans les définitions des fonctions d'appartenances et règles, qui vont suivre, nous allons choisir un nombre minimal possible de variantes (indépendantes et dépendantes), pour pouvoir élaborer un nombre suffisant de combinaison, qui nous permettra ensuite de bien faire une optimisation adéquate.

Il est à noter qu'analyser différents variables interactifs entre eux ne produise qu'une complexité plus élevée pour l'interprétation des résultats.

#### IV.4.1. Définition des fonctions d'appartenance et règles

Le programme de la logique floue est utilisé pour prendre une décision. La forme trapézoïdale des ensembles flous est utilisée et les trois niveaux sont proposés pour chaque indicateur (faible [Low], moyen [Medium] et élevée [High]).

L'échelle de 5 est proposée d'avoir une quantification uniforme pour les différents indicateurs.

Pour éviter toute complexité d'analyse et interprétation des résultats, on va se limiter à choisir donc du tableau IV.4 les variables suivantes:

- Le mode de lubrification.
- La vitesse de coupe.
- Rugosité de la surface usinée (considérant les données moyennes qu'on trouve dans le tableau IV.5).

Avec la programmation par ordinateur, les résultats de ce choix, va nous conduire à un indicateur de conditions optimales du processus d'usinage, est-ce là à travers plusieurs combinaisons de règles que le programme de la logique floue va générer automatiquement.

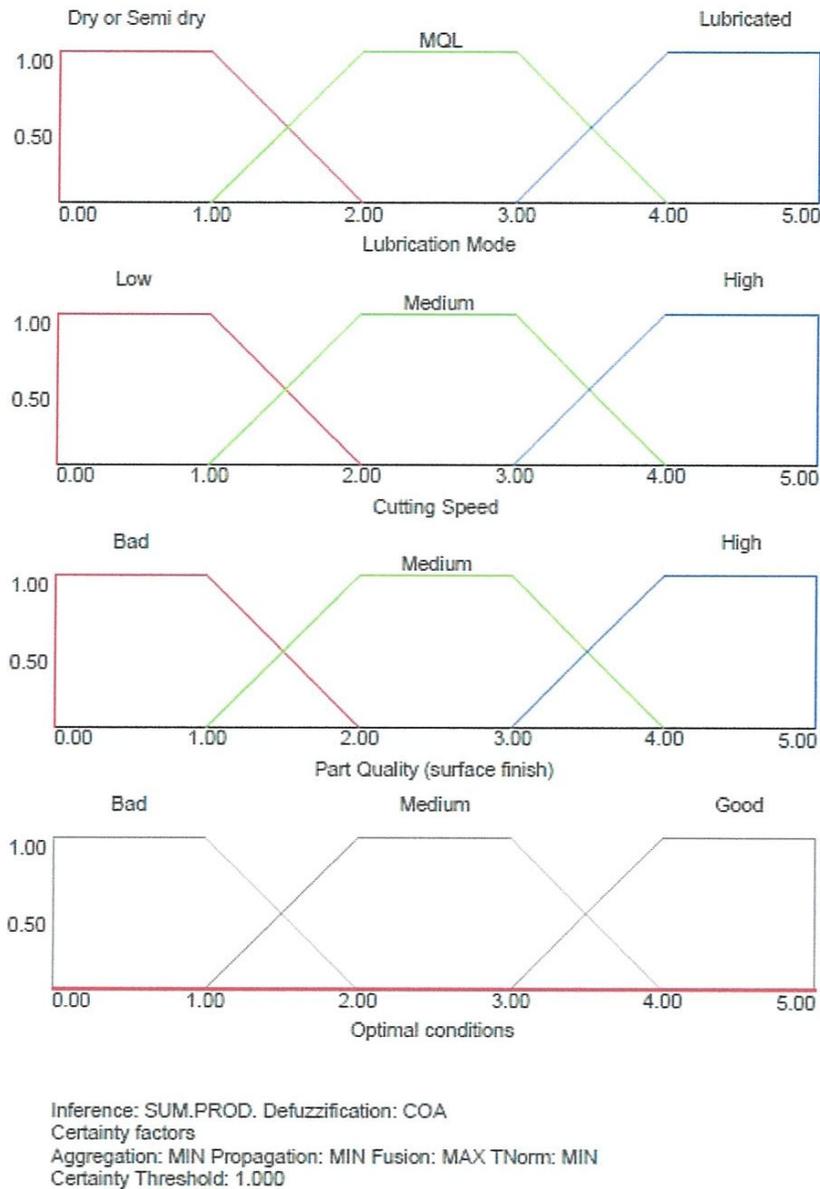


Figure IV.1: Fonctions d'appartenance définissant les indicateurs d'optimisation

On a illustré dans les chapitres précédents, que la logique floue s'attache à une certaine forme de connaissances.

Ces connaissances expérimentales illustrées dans la revue de littérature, vont nous aider à définir les règles des toutes les combinaisons possibles que le programme devrait produire.

Nous savons donc déjà que, en terme de :

Lubrification abondante, l'émission de beaucoup d'aérosols, et un facteur de pollution, en outre, l'utilisation des lubrifiants d'une manière abondante durant l'usinage, augmente le coût de réalisation du produit.

Vitesse de coupe élevée, combinée à un débit optimal de lubrifiant produit un copeau segmenté, diminue l'émission d'aérosols, et augmente l'indicateur de productivité, Une augmentation de la vitesse de coupe augmente la consommation d'énergie durant le procédé de coupe.

Productivité optimale de l'usinage, ne doit pas se pencher uniquement sur l'aspect quantitatif, mais aussi et surtout sur l'aspect qualitatif du produit usiné, la qualité du produit garantie un bénéfice économique.

Conditions optimales d'un processus d'usinage, doivent lier les critères de la performance de l'usinage avec la productivité et le coût de produit.

Les vraies valeurs des variables doivent être transformées dans le barème proposé, pour ce qui va suivre, on va se limiter, dans une première phase à étudier les conditions optimales du procédé d'usinage en fonction de :

- Le mode de lubrification.
- La vitesse de coupe.
- Rugosité de la surface usinée (considérant les données moyennes qu'on trouve dans le tableau IV.5).

Tableau IV.5: Valeurs du temps et du coût unitaires [29].

Numéro des essais	VI		VD			Temps unitaire Tu (min/pièce)	Coût unitaire Cu (\$/pièce)
	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)	Durée de vie de l'outil (min)	Effort de coupe (N)	Rugosité de la surface (µm)		
1	Sec	100	1,9	106,38	1,3	4,75	43,47
2	Sec	150	1,71	100,19	0,99	4,04	41,96
3	Sec	200	1,55	90,18	0,91	3,69	35,55
4	LA	100	2,16	120,45	0,88	4,67	41,64
5	LA	150	1,91	109,22	0,76	3,97	40,34
6	LA	200	1,76	101,54	0,6	3,63	34,19
7	LM (MQL)	100	2,12	118,09	0,81	4,65	41,27
8	LM (MQL)	150	2,05	116,5	0,6	3,96	40,02
9	LM (MQL)	200	1,82	106,42	0,64	3,62	33,92

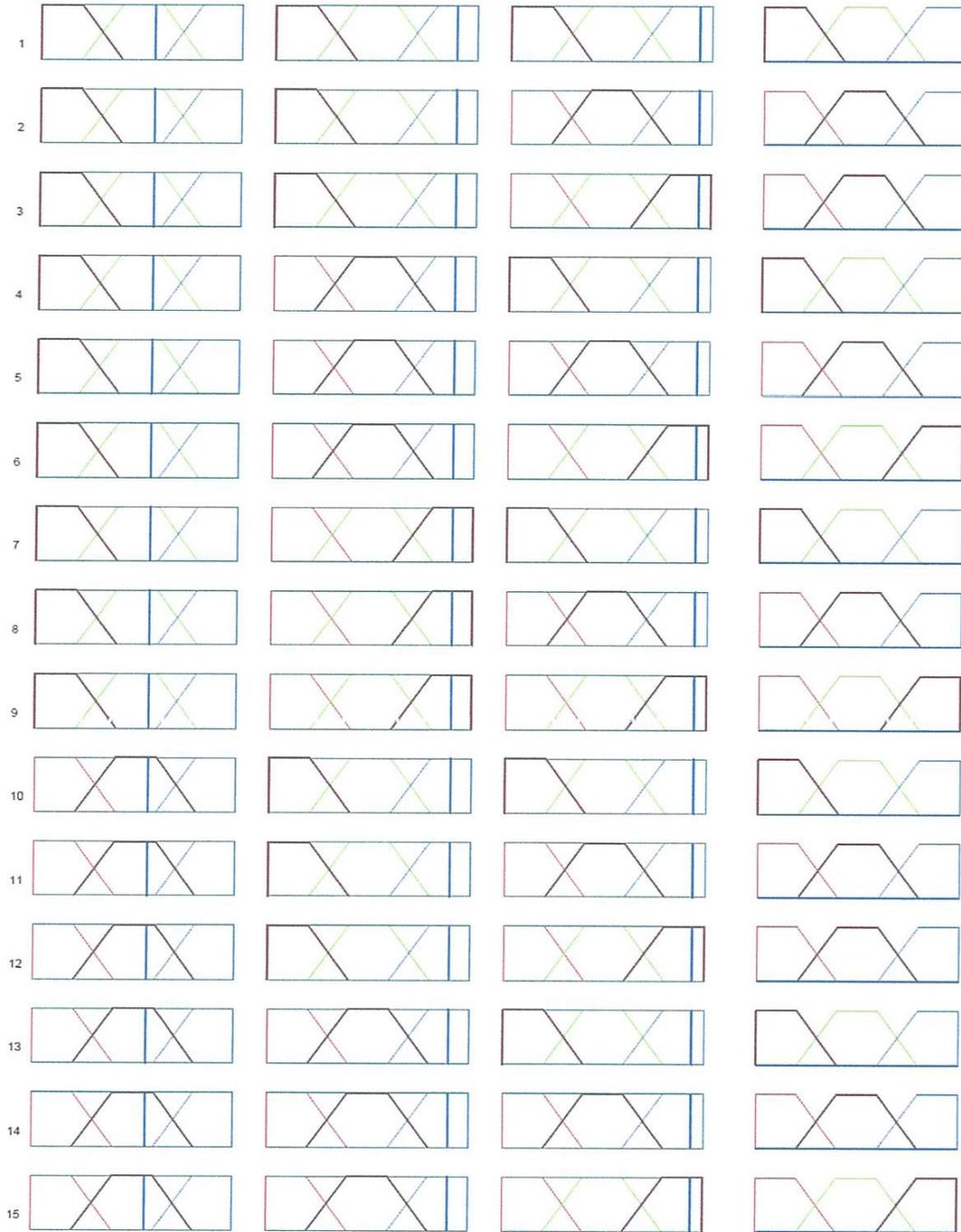
#### IV.4.1.1. Limitation

Il a été constaté que les essais ont été faits avec une plaquette sans revêtement. Cela n'est pas utilisé dans l'usinage industriel des pièces en CsMAIP-SiC (dans l'industrie, l'usinage de CsMAIP-SiC est effectué par des plaquettes CBN ou PCD qui ont une durée de vie nettement supérieures, pour cette raison, nous n'allons pas considérer les données de la durée de vie de l'outil, et les données du temps unitaire par pièce, cependant on va se baser sur des connaissances acquises sur les effets de ces deux variantes sur la performances de l'usinage, toutefois, nous allons concentrer cette étude, sur les autres variables du tableau.

## IV.4.2. Programmation

```
[Options]
inference_type=SUM.PROD.
defuzz_mode=COA
Aggregation=MIN
Propagation=MIN
Fusion=MAX
TNorm=MIN
Cert_Treshold=1.00
[ScreenLayout]
TitleFont=Arial,10,0,0
AxisFont=Arial,10,0,0
SubTitleFont=Arial,10,0,0
LegendFont=Arial,10,0,0
[Premise 1]
name=Lubrication Mode
1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Dry or Semi dry
2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;MQL
3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;Lubricated
[Premise 2]
name=Cutting Speed
1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Low
2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;Medium
3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;High
[Premise 3]
name=Part Quality (surface finish and forces)
1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Bad
2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;Medium
3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;High
[Conclusion 1]
name=Optimal conditions
1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Bad
2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;Medium
3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;Good
[Rules]
1=1;1;1;1;1.00
2=1;1;2;2;1.00
3=1;1;3;2;1.00
4=1;2;1;1;1.00
5=1;2;2;2;1.00
6=1;2;3;3;1.00
7=1;3;1;1;1.00
8=1;3;2;2;1.00
9=1;3;3;3;1.00
10=2;1;1;1;1.00
11=2;1;2;2;1.00
12=2;1;3;2;1.00
```

Inference: SUM.PROD.



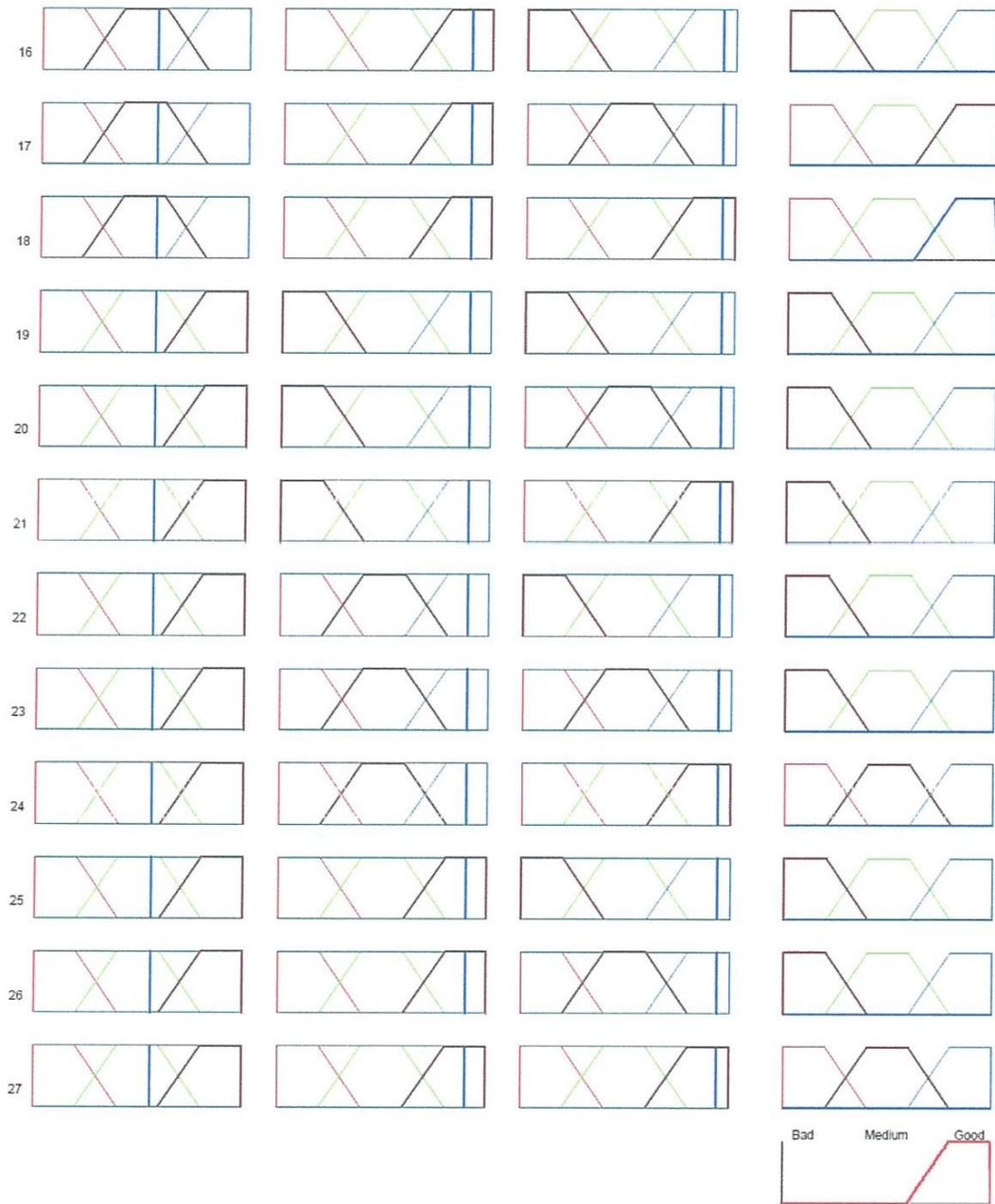


Figure IV.3 : Définition des règles

#### IV.5. Résultats d'analyse des données, et discussion

À travers toutes les combinaisons possibles générées par le programme de la logique floue, les critères de performance et conditions optimales de l'usinage pour tous les essais d'expérience, les résultats d'analyse des données se résument comme suit.

Numéro d'essai	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)	Rugosité de la surface (μm) [Qualité de pièce]
1	Sec	100	1,3
Barème	0,1	0,5	0,1

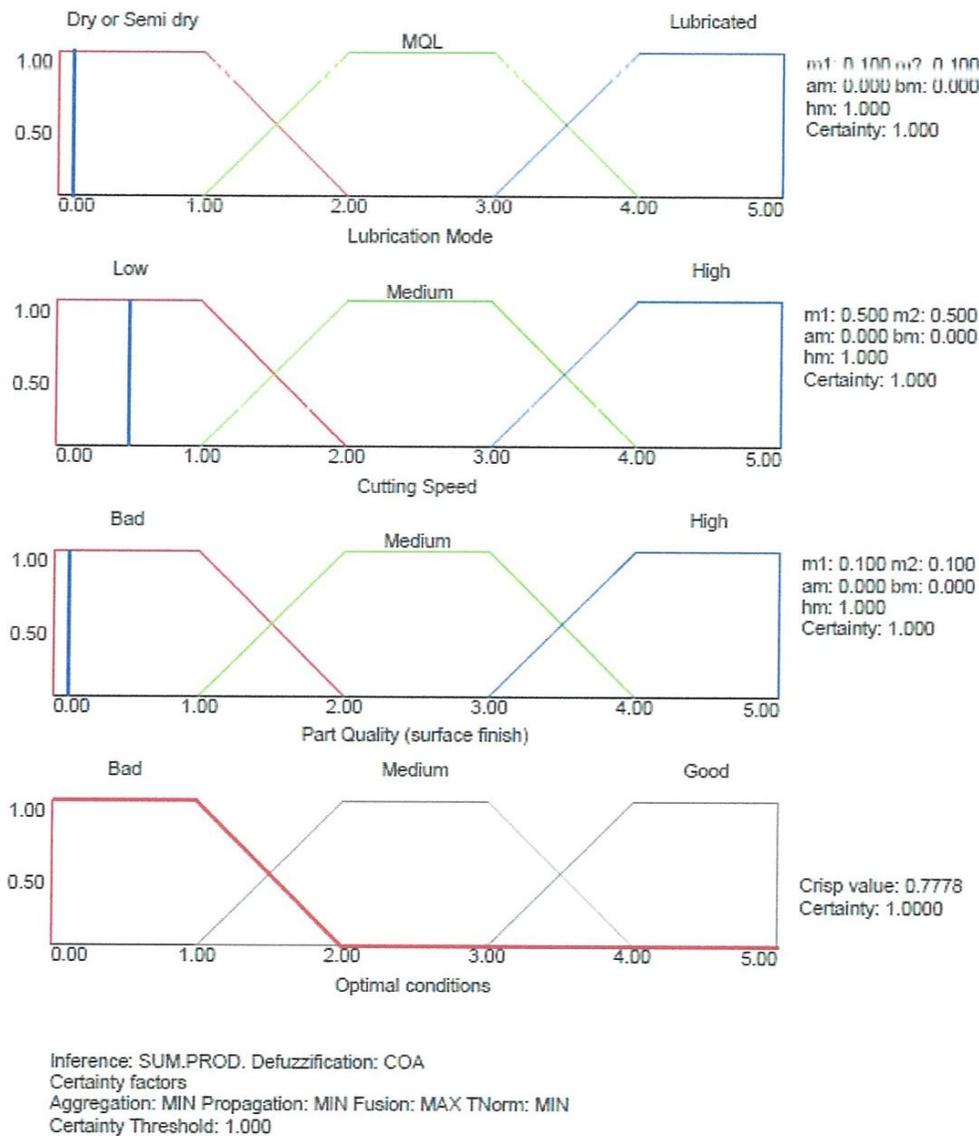
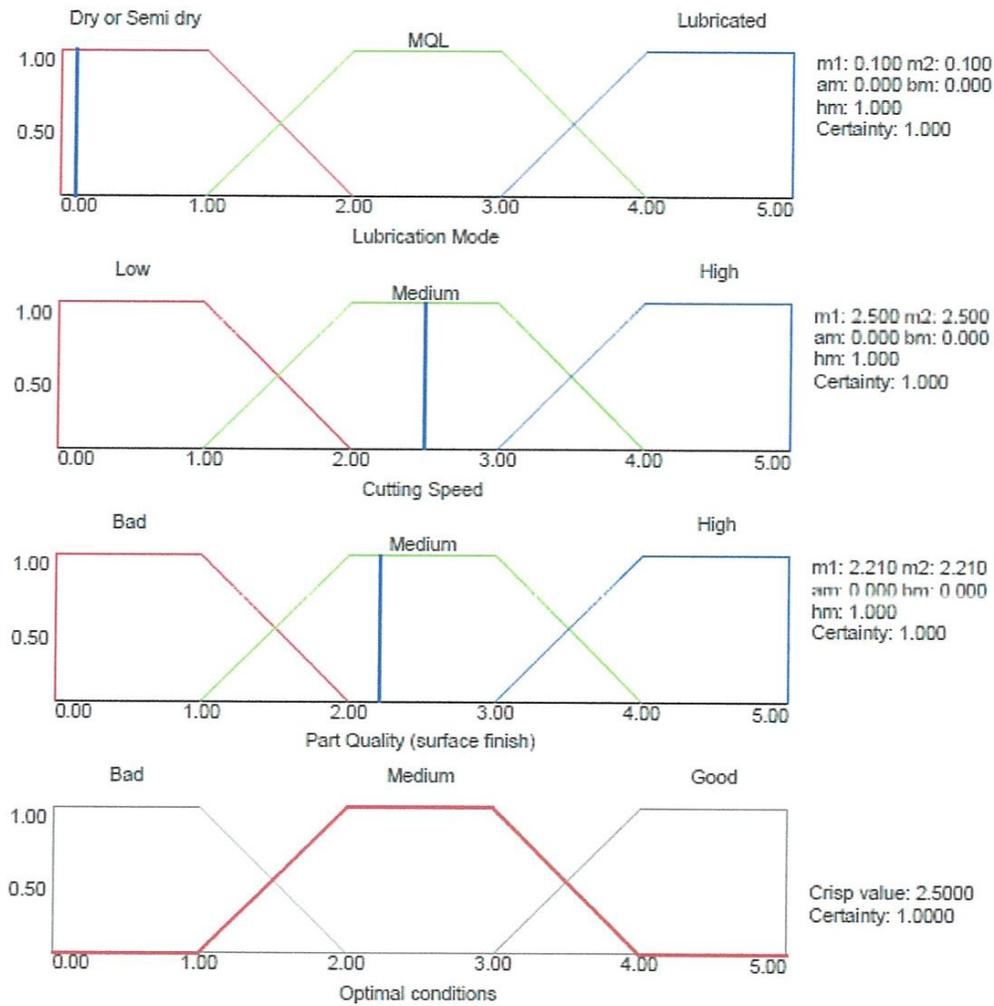


Figure IV.4 : Indicateur de conditions optimales à 0,7776 (Mauvaises)

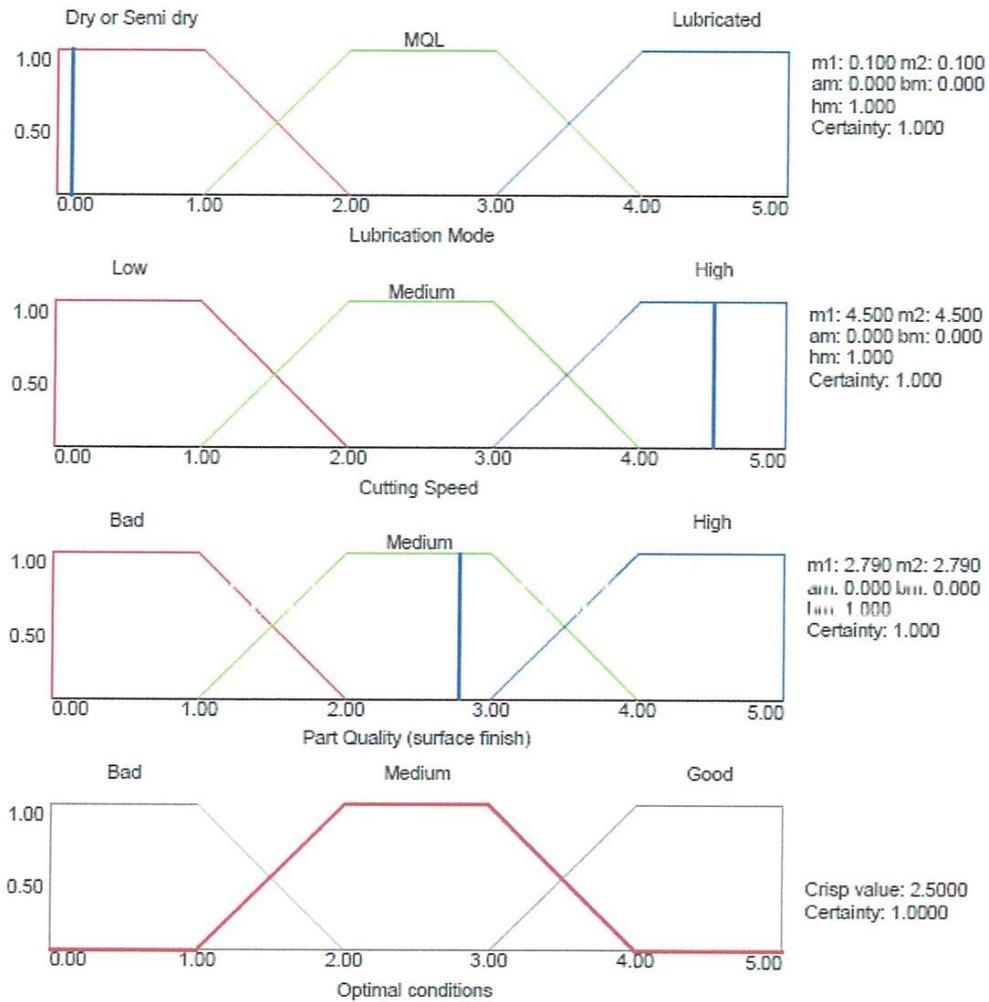
Numéro d' essai	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)	Rugosité de la surface (µm) [Qualité de pièce]
2	Sec	150	0,99
Barème	0,1	2,5	2,21



Inference: SUM.PROD. Defuzzification: COA  
 Certainty factors  
 Aggregation: MIN Propagation: MIN Fusion: MAX TNorm: MIN  
 Certainty Threshold: 1.000

Figure IV.5 : Indicateur de conditions optimales à 2,5 (Moyennes)

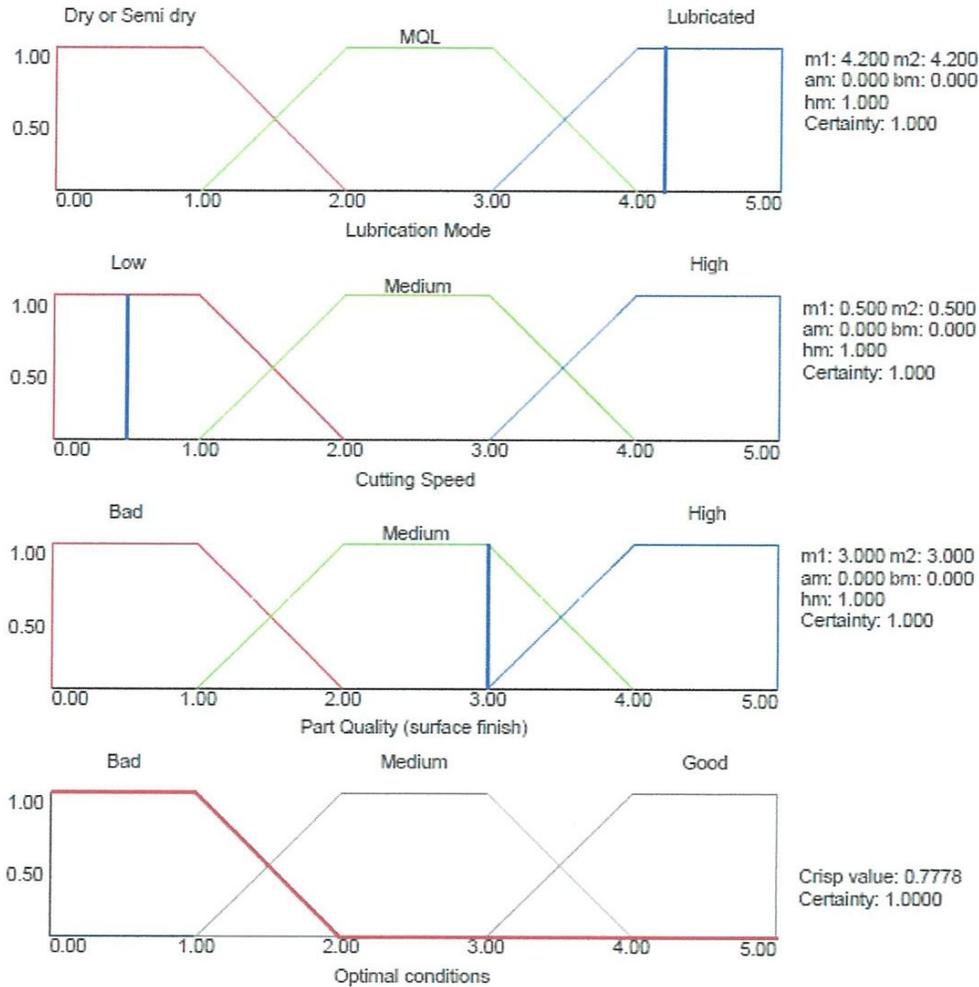
Numéro d'essai	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)	Rugosité de la surface (µm) [Qualité de pièce]
3	Sec	200	0,91
Barème	0,1	4,5	2,79



Inference: SUM.PROD. Defuzzification: COA  
 Certainty factors  
 Aggregation: MIN Propagation: MIN Fusion: MAX TNorm: MIN  
 Certainty Threshold: 1.000

Figure IV.6 : Indicateur de conditions optimales à 2,5 (Moyennes)

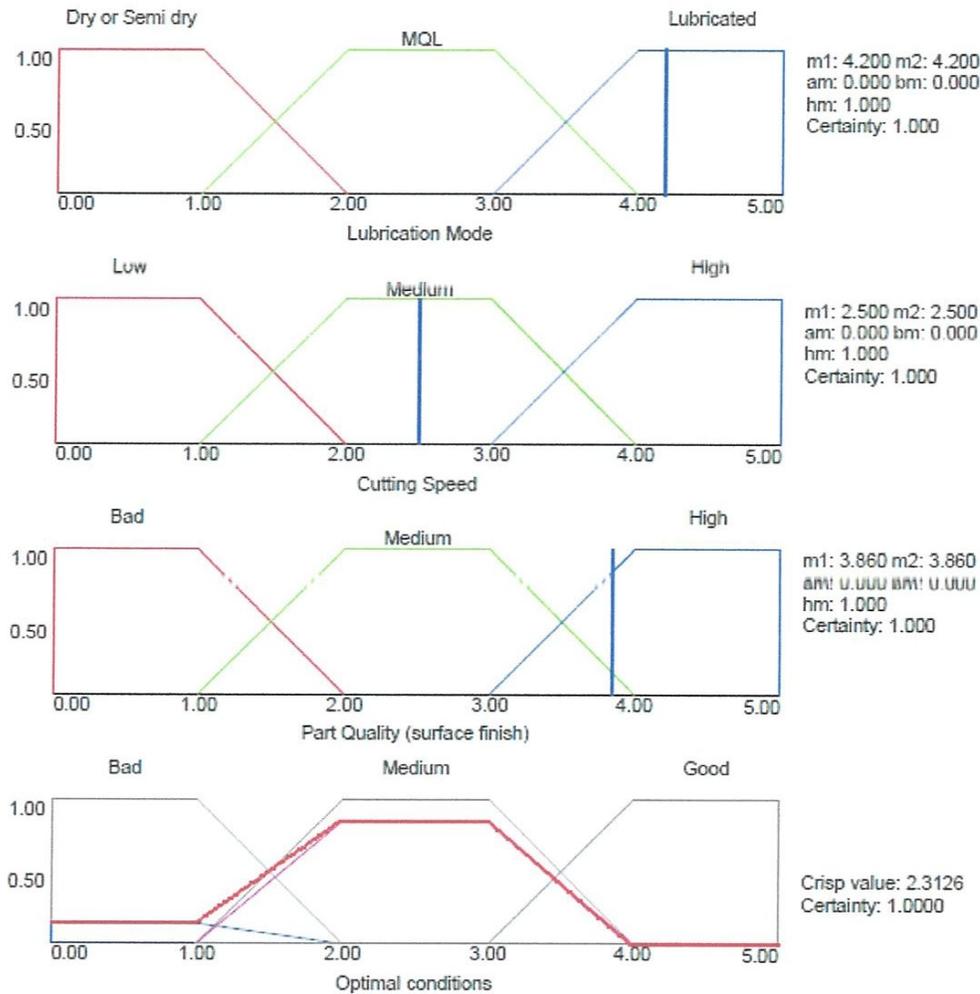
Numéro d' essai	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)	Rugosité de la surface (μm) [Qualité de pièce]
4	LA	100	0,88
Barème	4,2	0,5	3



Inference: SUM.PROD. Defuzzification: COA  
 Certainty factors  
 Aggregation: MIN Propagation: MIN Fusion: MAX TNorm: MIN  
 Certainty Threshold: 1.000

Figure IV.7 : Indicateur de conditions optimales à 0,7778 (Mauvaises)

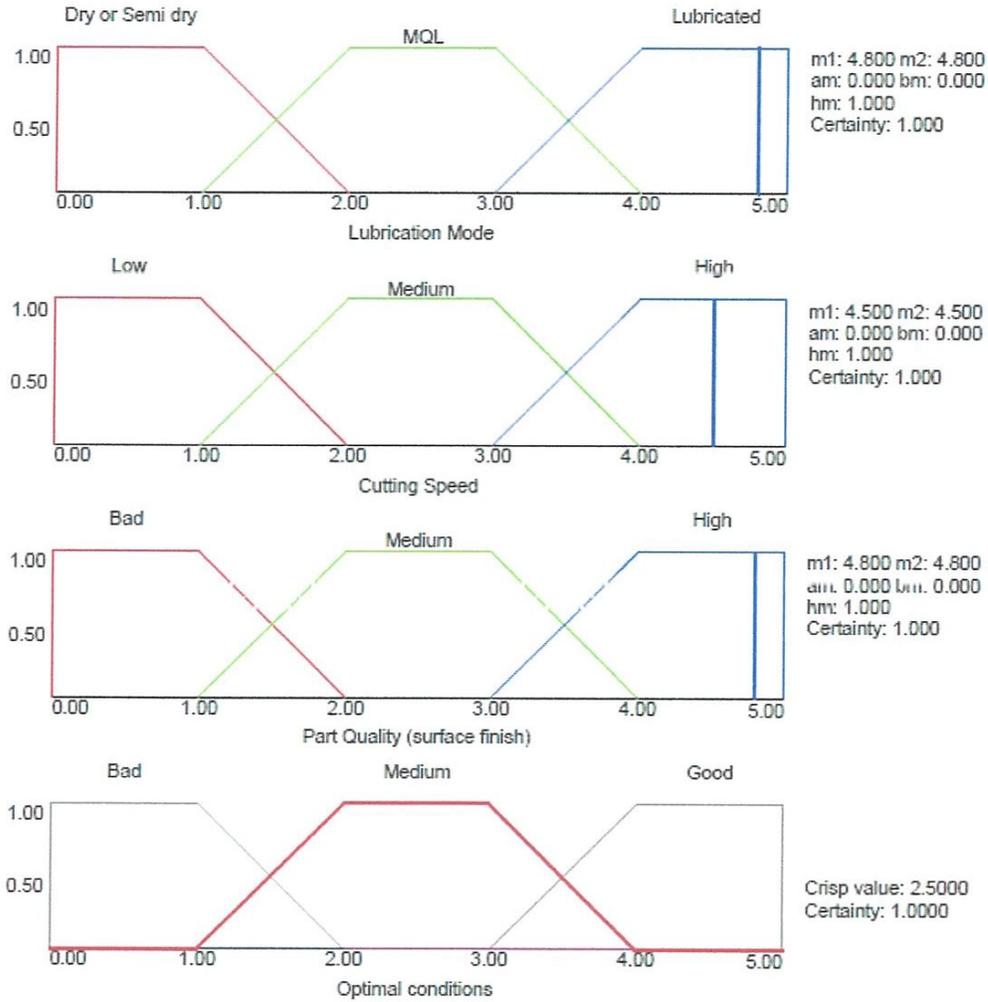
Numéro d' essai	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)	Rugosité de la surface ( $\mu\text{m}$ ) [Qualité de pièce]
5	LA	150	0,76
Barème	4,2	2,5	3,86



Inference: SUM.PROD. Defuzzification: COA  
 Certainty factors  
 Aggregation: MIN Propagation: MIN Fusion: MAX TNorm: MIN  
 Certainty Threshold: 1.000

Figure IV.8 : Indicateur de conditions optimales à 2,3126 (Moyennes)

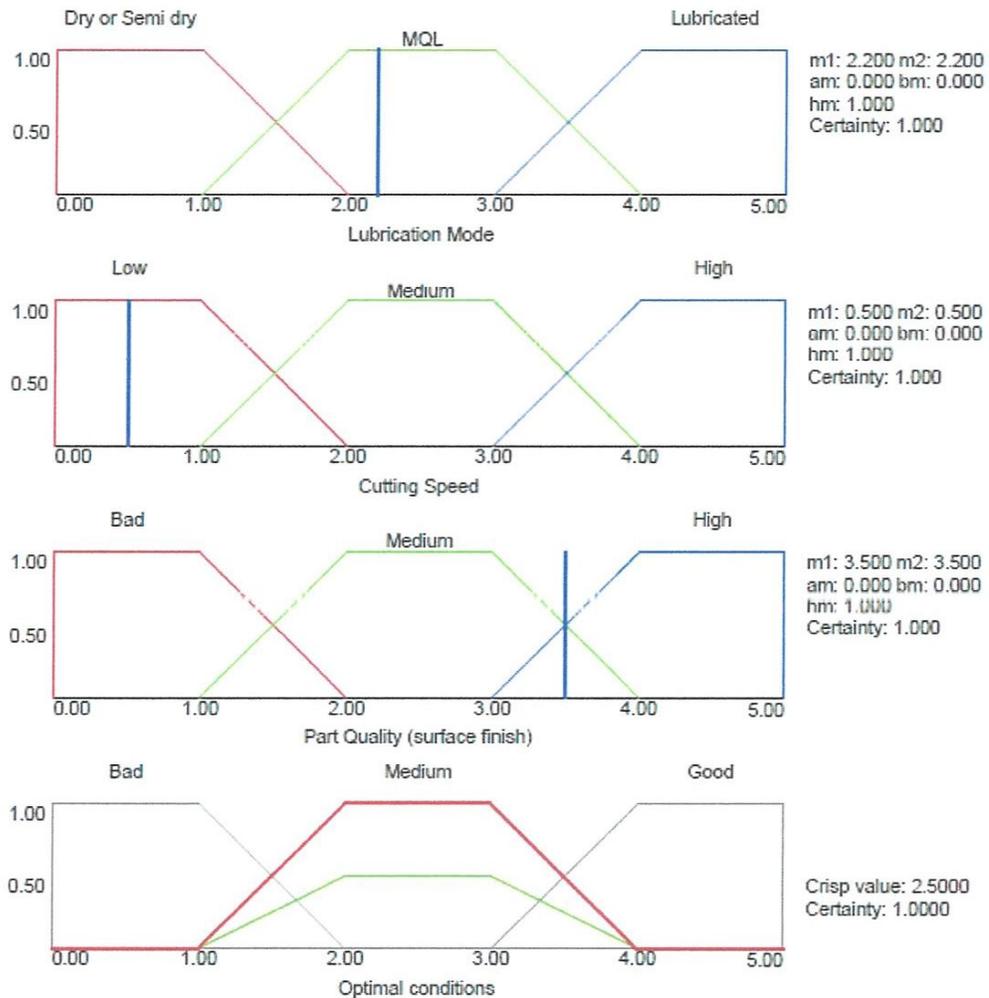
Numéro d' essai	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)	Rugosité de la surface (µm) [Qualité de pièce]
6	LA	200	0,6
Barème	4,8	4,5	4,8



Inference: SUM.PROD. Defuzzification: COA  
 Certainty factors  
 Aggregation: MIN Propagation: MIN Fusion: MAX TNorm: MIN  
 Certainty Threshold: 1.000

Figure IV.9 : Indicateur de conditions optimales à 2,5 (Moyennes)

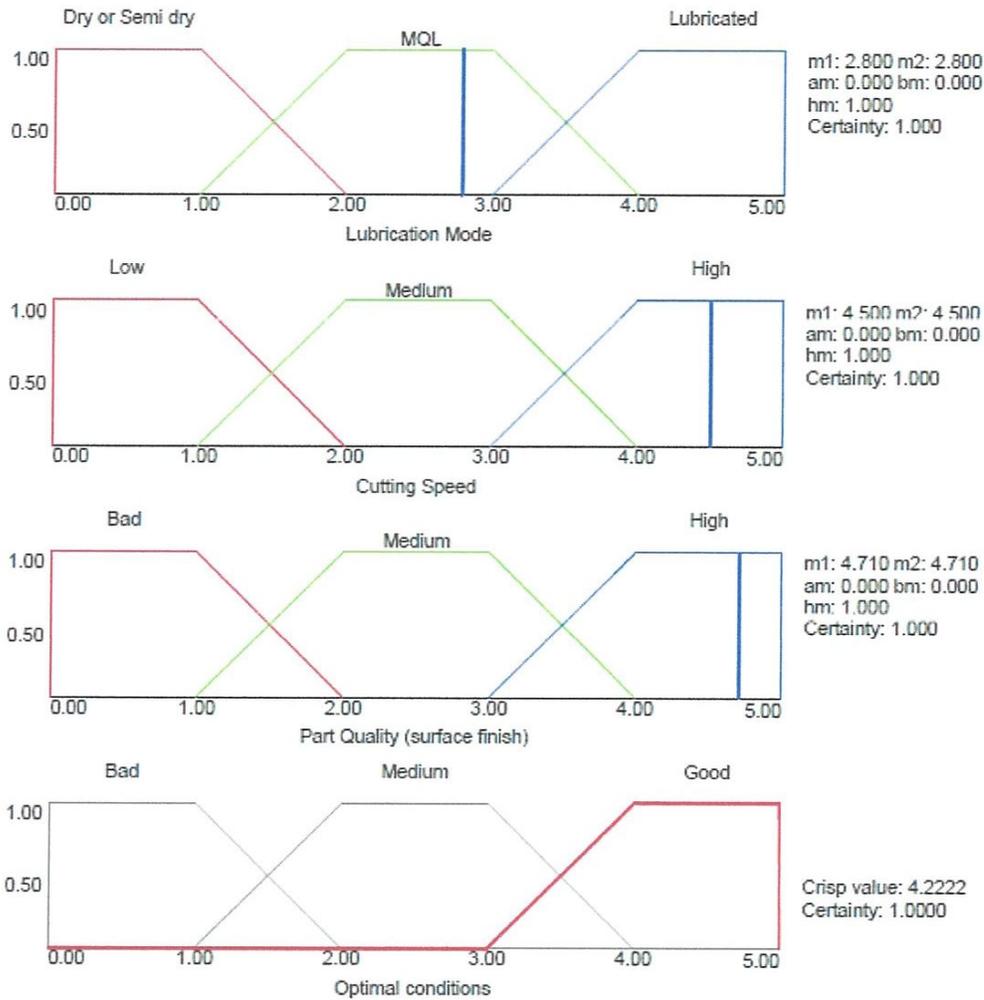
Numéro d'essai	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)	Rugosité de la surface (µm) [Qualité de pièce]
7	MQL	100	0,81
Barème	2,2	0,5	3,5



Inference: SUM.PROD. Defuzzification: COA  
 Certainty factors  
 Aggregation: MIN Propagation: MIN Fusion: MAX TNorm: MIN  
 Certainty Threshold: 1.000

Figure IV.10 : Indicateur de conditions optimales à 2,5 (Moyennes)

Numéro d' essai	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)	Rugosité de la surface (µm) [Qualité de pièce]
9	MQL	200	0,64
Barème	2,8	4,5	4,71



Inference: SUM.PROD. Defuzzification: COA  
 Certainty factors  
 Aggregation: MIN Propagation: MIN Fusion: MAX TNorm: MIN  
 Certainty Threshold: 1.000

Figure IV.12 : Indicateur de conditions optimales à 4,2222 (Élevées)

#### IV.5.1. Discussion

Les simulations effectuées avec le programme de la logique floue utilisant les données expérimentales, nous montrent les différentes combinaisons qui correspondent aux essais d'expériences, on a donc:

[1=1;1;1;1;1.00] - 0,7776 (Mauvaises) Essai 1  
2=1;1;2;2;1.00  
3=1;1;3;2;1.00  
4=1;2;1;1;1.00  
[5=1;2;2;2;1.00] - 2,5 (Moyennes) Essai 2  
6=1;2;3;3;1.00  
7=1;3;1;1;1.00  
[8=1;3;2;2;1.00] - 2,5 (Moyennes) Essai 3  
9=1;3;3;3;1.00  
10=2;1;1;1;1.00  
11=2;1;2;2;1.00  
[12=2;1;3;2;1.00] - 2,5 (Moyennes) Essai 7  
13=2;2;1;1;1.00  
14=2;2;2;2;1.00  
[15=2;2;3;3;1.00] - 4,2222 (Élevées) Essai 8  
16=2;3;1;1;1.00  
17=2;3;2;3;1.00  
[18=2;3;3;3;1.00] - 4,2222 (Élevées) Essai 9  
19=3;1;1;1;1.00  
[20=3;1;2;1;1.00] - 0,7778 (Mauvaises) Essai 4  
21=3;1;3;1;1.00  
22=3;2;1;1;1.00  
23=3;2;2;1;1.00  
[24=3;2;3;2;1.00] - 2,3126 (Moyennes) Essai 5  
25=3;3;1;1;1.00  
26=3;3;2;1;1.00  
[27=3;3;3;2;1.00] - 2,5 (Moyennes) Essai 6

Selon les résultats d'analyse des données de dessus, on a donc les combinaisons quantifiant les conditions optimales de l'usinage en fonction des critères de performances de coupe de l'usinage, on trouve donc pour tous les essais les matrices suivantes :

[1=1;1;1;1;1.00] - 0,7776 (Mauvaises) Essai 1  
[5=1;2;2;2;1.00] - 2,5 (Moyennes) Essai 2  
[8=1;3;2;2;1.00] - 2,5 (Moyennes) Essai 3  
  
[12=2;1;3;2;1.00] - 2,5 (Moyennes) Essai 7  
[15=2;2;3;3;1.00] - 4,2222 (Élevées) Essai 8  
[18=2;3;3;3;1.00] - 4,2222 (Élevées) Essai 9

[20=3;1;2;1;1.00] - 0,7778 (Mauvaises) Essai 4  
[24=3;2;3;2;1.00] - 2,3126 (Moyennes) Essai 5  
[27=3;3;3;2;1.00] - 2,5 (Moyennes) Essai 6

Nous pouvons conclure que :

- Le mode de lubrification et la vitesse de coupe influencent significativement les conditions optimales de performance de l'usinage.
- Les conditions optimales de performance de l'usinage croît à l'augmentation de la vitesse de coupe, cette croissante est liée au mode de lubrification.
- Souvent, à grande vitesse de coupe, le fluide lubrifiant ne peut pas arriver aux zones de contacts outil-pièce, cependant le taux de pénétration du fluide dans la zone de coupe ne dépend pas uniquement de la pression et de la vitesse du fluide, mais surement du mode de lubrification et du system de lubrification adopté.
- Les meilleures conditions optimales sont celles produites sous la lubrification minimale (MQL). En même temps que l'augmentation de la vitesse de coupe, l'influence du fluide de coupe sur ces conditions optimales augmente, pour le mode de lubrification abondante et pour la lubrification minimale.
- Une très bonne qualité de surface usinée, est produite sous la lubrification minimale (MQL) et à vitoccc de coupcc élcvcé et moycncnc.
- A vitesse de coupe plus basse, les performances de l'usinage sont mauvaises, en constatant que l'indicateur d'optimisation est à sa valeur le plus basse.
- L'augmentation de la vitesse de coupe n'implique pas forcément une amélioration des critères de performance, si l'augmentation de la vitesse n'est pas affecté par le mode de lubrification.
- Les conditions optimales de l'usinage sont plus affectées par le mode de lubrification que par la vitesse de coupe.

D'après les résultats qu'on a obtenus, nous remarquons que les indicateurs optimaux de performance de l'usinage sont ceux des résultats des deux essais expérimentaux numéro 8 et 9, sous le mode de la lubrification minimale (MQL).

#### IV.6. Optimisation

Pour optimiser les résultats de la première programmation, et simplifier la prise de décision par le programme de la logique floue, nous introduisons une autre variable qui nous aidera à définir en meilleure façon, les conditions optimales de la performance de l'usinage, on va donc :

- Introduire de nouveau toutes les données, et celles des efforts de coupe (tableau IV.5).

- En comparant les combinaisons qu'on va trouver à celles issues de notre première programmation, pour laisser uniquement les combinaisons optimales en fonction de mode de lubrification et vitesse de coupe, vu précédemment.
- On va considérer uniquement la lubrification minimale (MQL) qui a donné des indicateurs de conditions optimales les plus élevés (4,2222 pour les deux essais 8 et 9).
- Les combinaisons avec la vitesse de coupe (100 m/min) va être exclu des règles de programmation, on a remarqué que l'indicateur de conditions optimale, tel illustré dans la combinaison [12=2;1;3;2;1.00], et de 2,5, cette même valeur reste inchangée pour la combinaison 8 et 27 à l'augmentation de la vitesse de coupe, à différent mode de lubrification.
- Pour avoir une confiance additionnelle sur la décision que va prendre le programme de la logique floue, donc après validations des réponses, le coût unitaire correspondant à chaque combinaison des conditions de coupe va être considéré pour déterminer la combinaison qui produit le coût unitaire minimal de production.

#### IV.6.1. Programmation et conclusion

```
[Options]
inference_type=SUM.PROD.
defuzz_mode=COA
Aggregation=MIN
Propagation=MIN
Fusion=MAX
TNorm=MIN
Cert_Treshold=1.00
[ScreenLayout]
TitleFont=Arial,10,0,0
AxisFont=Arial,10,0,0
SubTitleFont=Arial,10,0,0
LegendFont=Arial,10,0,0
[Premise 1]
name=Lubrication Mode
1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Dry or Semi dry
2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;MQL
3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;Lubricated
[Premise 2]
name=Cutting Speed
1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Low
2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;Medium
3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;High
[Premise 3]
name=Part Quality (surface finish)
1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Bad
2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;Medium
3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;High
```

[Premise 4]

name=Cutting Forces

1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Low

2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;Medium

3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;High

[Conclusion 1]

name=Optimal conditions

1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Bad

2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;Medium

3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;Good

[Rules]

1=1;1;1;1;1;1.00  
2=1;1;1;2;1;1.00  
3=1;1;1;3;1;1.00  
4=1;1;2;1;1;1.00  
5=1;1;2;2;1;1.00  
6=1;1;2;3;1;1.00  
7=1;1;3;1;1;1.00  
8=1;1;3;2;1;1.00  
9=1;1;3;3;1;1.00  
10=1;2;1;1;1;1.00  
11=1;2;1;2;1;1.00  
12=1;2;1;3;1;1.00  
13=1;2;2;1;1;1.00  
14=1;2;2;2;1;1.00  
15=1;2;2;3;1;1.00  
16=1;2;3;1;1;1.00  
17=1;2;3;2;1;1.00  
18=1;2;3;3;1;1.00  
19=1;3;1;1;1;1.00  
20=1;3;1;2;1;1.00  
21=1;3;1;3;1;1.00  
22=1;3;2;1;1;1.00  
23=1;3;2;2;1;1.00  
24=1;3;2;3;1;1.00  
25=1;3;3;1;1;1.00  
26=1;3;3;2;1;1.00  
27=1;3;3;3;1;1.00  
28=2;1;1;1;1;1.00  
29=2;1;1;2;1;1.00  
30=2;1;1;3;1;1.00  
31=2;1;2;1;1;1.00  
32=2;1;2;2;1;1.00  
33=2;1;2;3;1;1.00  
34=2;1;3;1;1;1.00  
35=2;1;3;2;1;1.00  
36=2;1;3;3;1;1.00  
37=2;2;1;1;1;1.00  
38=2;2;1;2;1;1.00

39=2;2;1;3;1;1.00  
40=2;2;2;1;1;1.00  
41=2;2;2;2;1;1.00  
42=2;2;2;3;1;1.00  
43=2;2;3;1;1;1.00  
44=2;2;3;2;1;1.00  
45=2;2;3;3;1;1.00  
46=2;3;1;1;1;1.00  
47=2;3;1;2;1;1.00  
48=2;3;1;3;1;1.00  
49=2;3;2;1;1;1.00  
50=2;3;2;2;1;1.00  
51=2;3;2;3;1;1.00  
52=2;3;3;1;1;1.00  
53=2;3;3;2;1;1.00  
54=2;3;3;3;1;1.00  
55=3;1;1;1;1;1.00  
56=3;1;1;2;1;1.00  
57=3;1;1;3;1;1.00  
58=3;1;2;1;1;1.00  
59=3;1;2;2;1;1.00  
60=3;1;2;3;1;1.00  
61=3;1;3;1;1;1.00  
62=3;1;3;2;1;1.00  
63=3;1;3;3;1;1.00  
64=3;2;1;1;1;1.00  
65=3;2;1;2;1;1.00  
66=3;2;1;3;1;1.00  
67=3;2;2;1;1;1.00  
68=3;2;2;2;1;1.00  
69=3;2;2;3;1;1.00  
70=3;2;3;1;1;1.00  
71=3;2;3;2;1;1.00  
72=3;2;3;3;1;1.00  
73=3;3;1;1;1;1.00  
74=3;3;1;2;1;1.00  
75=3;3;1;3;1;1.00  
76=3;3;2;1;1;1.00  
77=3;3;2;2;1;1.00  
78=3;3;2;3;1;1.00  
79=3;3;3;1;1;1.00  
80=3;3;3;2;1;1.00  
81=3;3;3;3;1;1.00

En tenant compte des résultats de la première programmation, l'optimisation des combinaisons, et résultats des deux essais 8 et 9, seront donc comme suit :

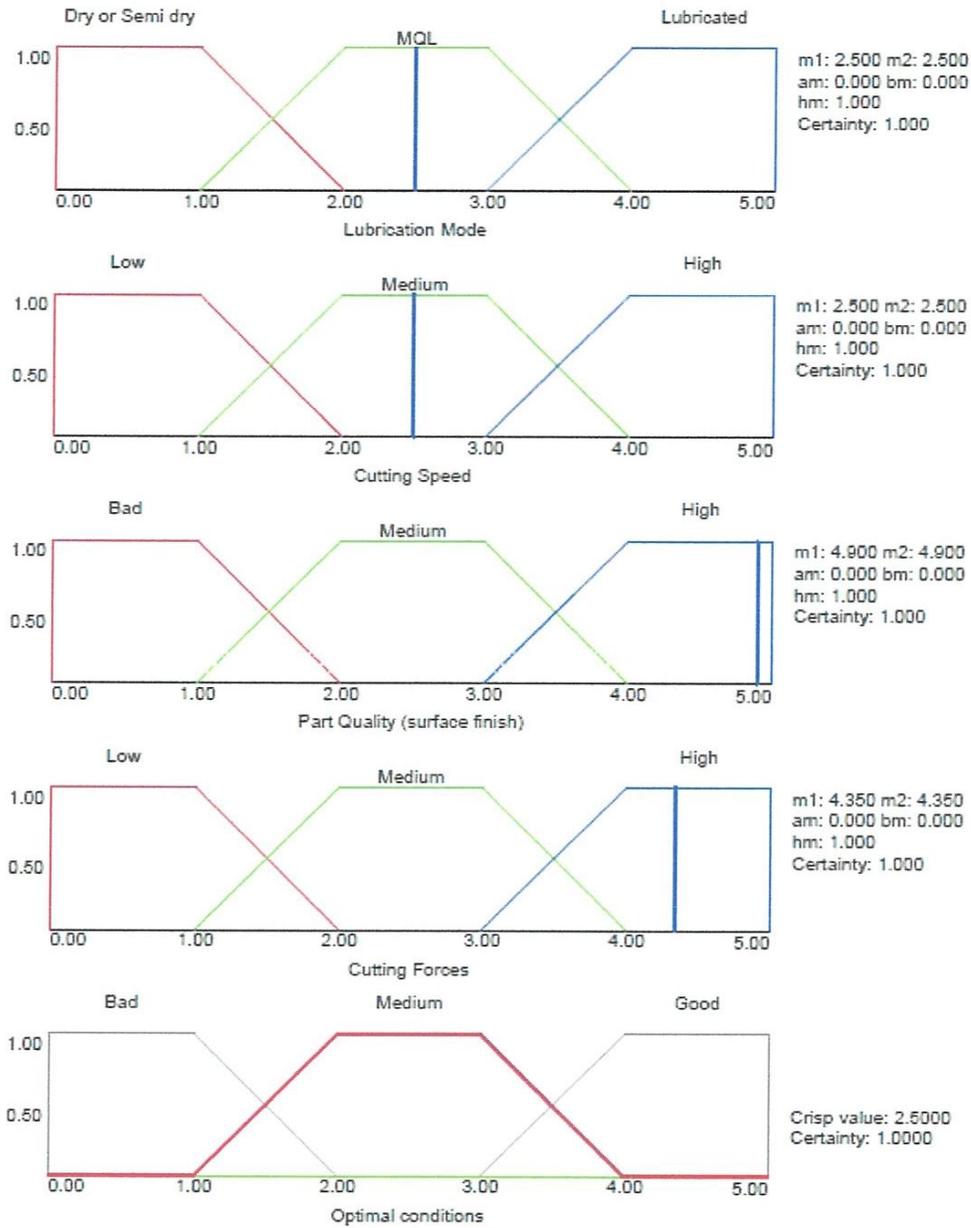
[Options]  
inference\_type=SUM.PROD.

```

defuzz_mode=COA
Aggregation=MIN
Propagation=MIN
Fusion=MAX
TNorm=MIN
Cert_Treshold=1.00
[ScreenLayout]
TitleFont=Arial,10,0,0
AxisFont=Arial,10,0,0
SubTitleFont=Arial,10,0,0
LegendFont=Arial,10,0,0
[Premise 1]
name=Lubrication Mode
1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Dry or Semi dry
2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;MQL
3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;Lubricated
[Premise 2]
name=Cutting Speed
1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Low
2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;Medium
3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;High
[Premise 3]
name=Part Quality (surface finish)
1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Bad
2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;Medium
3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;High
[Premise 4]
name=Cutting Forces
1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Low
2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;Medium
3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;High
[Conclusion 1]
name=Optimal conditions
1=0.000000;1.000000;0.000000;1.000000;1.000000;Bad
2=2.000000;3.000000;1.000000;1.000000;1.000000;Medium
3=4.000000;5.000000;1.000000;0.000000;1.000000;Good
[Rules]
1=2;2;2;1;2;1.00
2=2;2;2;2;2;1.00
3=2;2;2;3;1;1.00
4=2;2;3;1;2;1.00
5=2;2;3;2;2;1.00
6=2;2;3;3;2;1.00
7=2;3;1;1;1;1.00
8=2;3;1;2;1;1.00
9=2;3;1;3;1;1.00
10=2;3;2;1;2;1.00
11=2;3;2;2;2;1.00
12=2;3;2;3;2;1.00

```

13=2;3;3;1;3;1.00  
 14=2;3;3;2;3;1.00  
 15=2;3;3;3;2;1.00



Inference: SUM.PROD. Defuzzification: COA  
 Certainty factors  
 Aggregation: MIN Propagation: MIN Fusion: MAX TNorm: MIN  
 Certainty Threshold: 1.000

Figure IV.13 : Indicateur de conditions optimales à 2,5 (Moyennes)

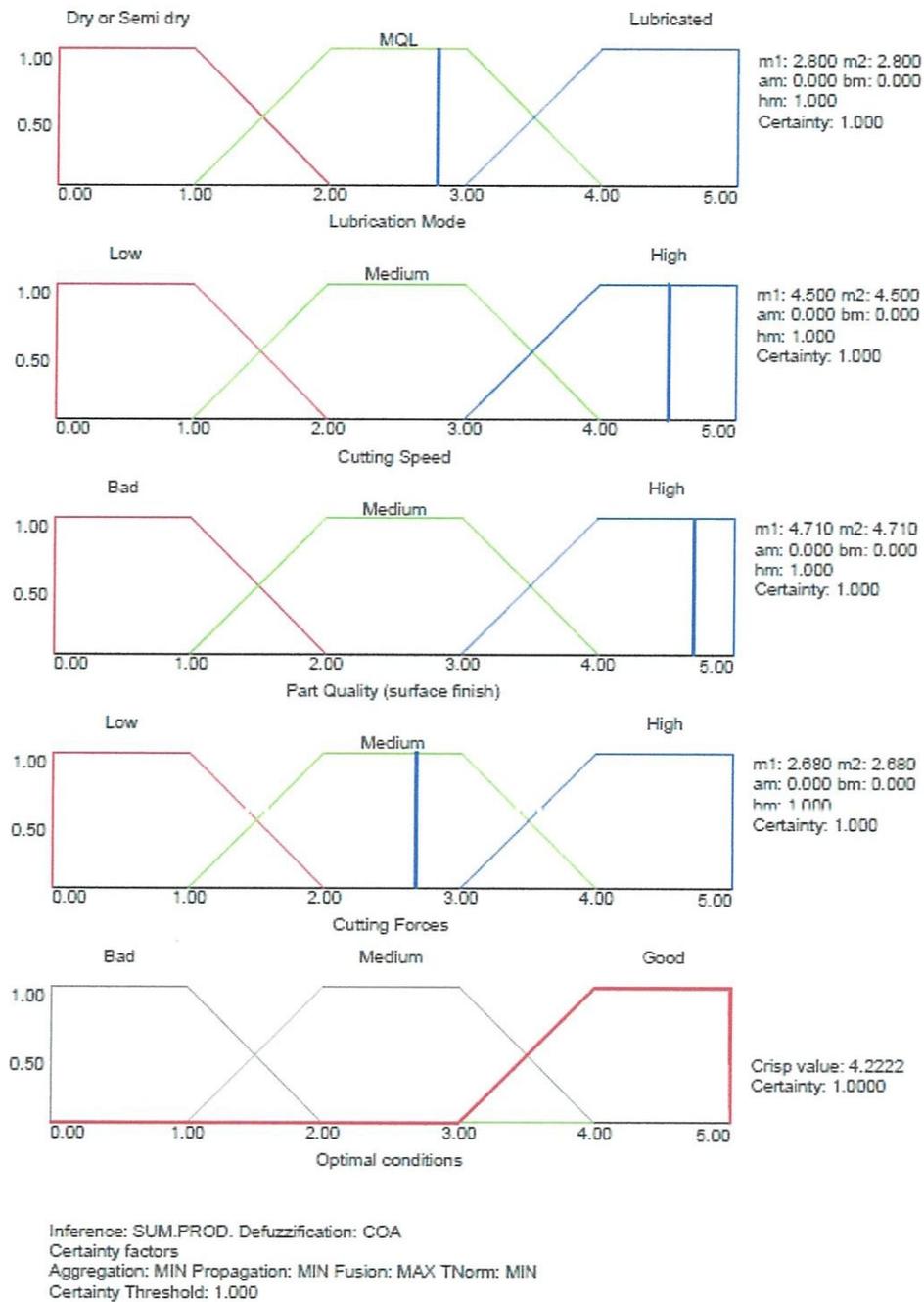


Figure IV.14 : Indicateur de conditions optimales à 4,2222 (Élevées)

Les combinaisons suivantes donnent l'état optimisé des résultats des essais 8 et 9.

[6=2;2;3;3;2;1.00] - 2,5 (Moyennes) Essai 8  
 [14=2;3;3;3;2;3;1.00] - 4,2222 (Élevées) Essai 9

D'après les résultats d'analyse des données et l'optimisation des combinaisons issues de la programmation ci-dessus, nous pouvons en déduire que :

- La vitesse de coupe et le mode de lubrification influencent significativement un autre critère de performance de l'usinage, c'est l'effort de coupe. L'augmentation de la vitesse de coupe diminue l'effort de coupe.

## **V – Conclusion**

Dans ce travail de thèse, on a montré qu'à une grande vitesse de coupe et un taux de lubrification minimale (MQL) on peut avoir les conditions optimales de coupe d'un procédé d'usinage. En conséquence, une vitesse de coupe élevée combinée à un débit optimal de lubrifiant diminue l'émission d'aérosols, le coût de lubrification, et augmente l'indicateur de productivité.

La lubrification abondante produit une émission considérable d'aérosols, donc est un facteur de pollution, en outre, l'utilisation des lubrifiants d'une manière abondante durant l'usinage, augmente le coût de réalisation du produit, et d'un point de vue économique est moins avantageuse à celui de la lubrification minimale (MQL).

Le mode de lubrification et la vitesse de coupe influencent significativement la rugosité de la surface usinée, et l'effort de coupe, en conséquence, influencent les conditions optimales de performance de l'usinage.

Une très bonne qualité de surface usinée, est produite sous la lubrification minimale (MQL) et à vitesse de coupe élevée. L'augmentation de la vitesse de coupe diminue l'effort de coupe, et, de conséquence diminue le coût unitaire. L'augmentation de l'effort de coupe augmente la consommation de l'énergie, et accélère l'usure de l'outil, cependant augmente le coût de la pièce usinée.

Souvent, à grande vitesse de coupe, le fluide lubrifiant ne peut pas arriver aux zones de contacts outil-pièce, cependant le taux de pénétration du fluide dans la zone de coupe ne dépend pas uniquement de la pression et de la vitesse du fluide lubrifiant, mais surtout du mode de lubrification et du système de lubrification adopté (le cas pour la MQL).

L'augmentation de la vitesse de coupe n'implique pas forcément une amélioration des critères de performance, si l'augmentation de la vitesse n'est pas affecté par le mode de lubrification, à vitesse de coupe plus bas, les performances de l'usinage sont mauvaises, en constatant que l'indicateur d'optimisation est à son niveau le plus bas.

Les conditions optimales sont celles produites sous la lubrification minimale (MQL). En même temps que l'augmentation de la vitesse de coupe, l'influence du fluide de coupe sur ces conditions optimales augmente, pour le mode de lubrification minimale.

Les critères de performance d'un processus d'usinage, doivent lier les critères de la performance de coupe, au coût, et à la productivité. La productivité optimale d'un procédé d'usinage, ne doit pas se pencher uniquement sur l'aspect quantitatif, mais aussi sur l'aspect qualitatif de la pièce usinée, la qualité du produit garantie un bénéfice économique.

Avec cette étude on a pu confirmer, qu'à même vitesse de coupe élevée, le mode de lubrification minimale (MQL), est beaucoup avantageux que le mode de lubrification abondante, l'usinage avec le mode MQL porte une réponse positive à nos soucis économiques, techniques, environnementaux, et surtout à la santé et bien-être des opérateurs.

## Références

- [1] X. Soldani. Thèse de doctorat, Ecole des arts et métiers de Metz, 2008.
- [2] 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.
- [3] Ali, S.M.; Dhar, N.R., & Dey, S.K. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on cutting performance in turning medium carbon steel by uncoated carbide insert at different speed-feed combinations. *APEM Journal*, 6 (2011) 3, 185-196 ISSN 1854-6250 *Scientific paper*.
- [4] Nilesh C Ghuge, Dhattrak V.K., Dr.AM.Mahalle, Minimum Quantity Lubrication, *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN) ISSN: 2250-3021 ISBN: 2878-8719 PP 55-60*.
- [5] N. R. Dhar, M.W. Islam, A Study of Effects of MQL on Tool Wear, Job Dimension and Finish in Turning AISI-1040 Steel. *AESEAP Journal of Engineering Education 2007; Vol. 31, No. 2*.
- [6] Ronan Autret, Graduate Research Assistant, Steven Y. Liang, Professor, Minimum Quantity Lubrication in Finish Hard Turning (To appear in HNICEM '03). *Georgia Institute of Technology Atlanta, GA 30332-0405*.
- [7] J. Kouam, V. Songmene, M. Balazinski and P. Hendrick, Dry, Semi-Dry and Wet Machining of 6061-T6 Aluminium Alloy, <http://dx.doi.org/10.5772/51351>
- [8] Siddiqui Mohd Tareq, R. K. Shrivastava, Generalized Investigation of Near Dry Machining, *IJERT*, ISSN: 2278-0181, Vol. 1 Issue 5, July – 2012.
- [9] Domnita-Florina FRĂȚILĂ, Research of Environment-Friendly Techniques Influence on Gear Accuracy in Context of Sustainable Manufacturing. *PROCEEDINGS OF THE ROMANIAN ACADEMY, Series A, Volume 14, Number 1/2013, pp. 56–63*.
- [10] Fratila, Domnita; Gyenge, Csaba; Ros, Olimpia; Machining (Methods), Machining (By-products), Lubrication and lubricants, Green technology, Manufacturing processes, Production planning. *Annals of DAAAM & Proceedings*, ISSN: 1726-9679 (2007).
- [11.] Klocke, F., Eisenblatter, G., "Dry Cutting," *Annals of the CIRP*, 46 (2), pp. 519-526, 1997.
- [12.] McClure, T. F., Adams, R. and Gugger, M. D, Comparison of Flood vs. Microlubrication on Machining Performance, website: <http://www.unist.com/techsolve.html>, 2001.
- [13.] Brockhoff, T. and Walter, A., "Fluid Minimization in Cutting and Grinding," *Abrasives*, October 1998, pp. 38-42, 1998.].
- [14.] U.S. Department of Health and Human Services, Occupational Exposure to Metalworking Fluids, NIOSH Publication No. 98-102, January 1998.
- [15.] Bennett, E.O. and Bennett, D.L., "Occupational Airway Diseases in the Metalworking Industry," *Tribology International*, 18/3, pp. 169-176, 1985.
- [16.] "Ecologically Improved Manufacturing" at [http://www.ifw.uni-hannover.de/BEREICH3/Forschen/310\\_2e.htm](http://www.ifw.uni-hannover.de/BEREICH3/Forschen/310_2e.htm)
- [17.] F. Klocke and G. Eisenblatter, "Dry Cutting", *Annals of the CIRP*, 46/2, pp.519-526, 1997.
- [18.] K. A VENUGOPAL, S PAUL et A. B CHATTOPADHYAY : Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling. *Wear* 262, pages 1071–1078, avril 2007.

- [19.] Mark ANDERSON, Rahul PATWA et Yung C. SHIN : Laser-assisted machining of inconel 718 with an economic analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(14):1879–1891, novembre 2006.],
- [20] Rami MOHAMMAD. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- [21.] M. GOLDIN, S. FANTONI, Y. DEJOBERT, A. LEROYER et P. FRIMAT : Les dermatitis professionnelles aux fluides de coupe : À propos de 32 cas. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 65(7-8):531–540, décembre 2004.
- [22.] P FRIMAT et S FANTONI-QUINTON : La main du travailleur : aspects socio-économiques. Quelle réparation ? Quel reclassement. *Progrès en dermatologie-allergologie*. John Libbey éd, Paris, pages 65 – 79, 2001.
- [23.] C. GÉRAUT et D. TRIPODI : Dermatoses professionnelles et aldéhydes. *Revue Française d'Allergologie et d'Immunologie Clinique*, 47(3):144–149, avril 2007.
- [24.] R. KHETTABI, V. SONGMENE et J. MASOUNAVE : Effect of tool lead angle and chip formation mode on dust emission in dry cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 194(1-3):100–109, novembre 2007.
- [25.] A CAUSSE : Captage et traitement des aérosols de fluides de coupe., 2005.
- [26.] M. Anthony XAVIOR et M. ADITHAN : Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2):900–909, 2009.
- [27] LubriLean® – Microlubrification - 1\_5102\_F, Catalogue.
- [28] Wikipédia.
- [29] Faramarz Dolatabadi: étude de l'influence du mode de lubrification sur les performances d'usinage du composite à matrices d'aluminium, mémoire 2010