



Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

**MASTER**

En Génie Mécanique

Option : Modélisation Numérique

Thème :

**Etude de l'usure des pastilles de coupe revêtue lors  
de l'usinage d'un superalliage à base de cobalt**

**FSX-414.**

Proposé et dirigé par :

SEBHI Amar

Présenté :

KADRI hadj

*Année Universitaire : 2015 / 1016*

N° d'ordre : GM/...../2016

# SOMMAIRE

<b>Remerciements</b> .....	<i>i</i>
<b>Dédicaces</b> .....	<i>ii</i>
<b>Sommaire</b> .....	<i>iii</i>
<b>Liste des abrivaition</b> .....	<i>iiii</i>

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## Chapitre I : Généralités sur les superalliages.

<i>I.1.Introduction:</i> .....	<i>3</i>
<i>I.2.Historique du superalliage :</i> .....	<i>3</i>
<i>I.2.1.Superalliages dans les moteurs d'avions:</i> .....	<i>3</i>
<i>I.2.2.Superalliages dans les turboréacteurs:</i> .....	<i>4</i>
<i>I.3.Groupes d'alliages :</i> .....	<i>4</i>
<i>I.3.1.Les alliages à base de nickel :</i> .....	<i>5</i>
<i>I.3.2.Les alliages à base de fer :</i> .....	<i>5</i>
<i>I.3.3.Les alliages à base de cobalt :</i> .....	<i>5</i>
<i>I.3.4.Les alliages de titane :</i> .....	<i>5</i>
<i>I.4.Caractéristiques général des superalliages:</i> .....	<i>6</i>
<i>I.4.1.Caractéristiques mécaniques:</i> .....	<i>7</i>
<i>I.4.2. Protection contre la corrosion :</i> .....	<i>8</i>
<i>I.4.3.Composition chimique :</i> .....	<i>9</i>
<i>I.4.3.1.Les superalliages de nickel :</i> .....	<i>10</i>
<i>I.4.3.1.1.La matrice austénitique <math>\gamma</math> :</i> .....	<i>10</i>
<i>I.4.3.1.2.La phase <math>\gamma'</math> :</i> .....	<i>11</i>
<i>I.4.3.1.3.Carbure :</i> .....	<i>12</i>
<i>I.4.3.1.4.Borures :</i> .....	<i>12</i>
<i>I.4.3.1.5.Phases fragiles topologiquement compactes, ou TCP (Topologicalty-Close-Packed):</i> ..	<i>12</i>
<i>I.4.3.2.Les Superalliages de cobalt :</i> .....	<i>13</i>
<i>I.5.Les différentes méthodes de durcissement des superalliages comprennent :</i> .....	<i>14</i>
<i>I.6.Élaboration et transformation des superalliages:</i> .....	<i>14</i>
<i>I.6.1. Élaboration classique:</i> .....	<i>14</i>
<i>I.6.2. Élaboration par métallurgie des poudres:</i> .....	<i>15</i>
<i>I.7.Élaboration. mise en œuvre :</i> .....	<i>16</i>

1.7.1.La fusion : .....	16
1.7.2.La fonderie de précision : .....	16
1.7.3.La solidification dirigée et les eutectiques orientés : .....	17
1.7.4.La métallurgie des poudres : .....	18
1.7.4.1.Avantages de la métallurgie des poudres par rapport à la voie coulé-forgé : .....	19
1.7.5.Les alliages a phase dispersée Insoluble (Dispersoides) : .....	19
I.8. La Turbine : .....	20
I.8. 1. Aubage : .....	20
I.8.1.1.Ailettage mobile : .....	20
I.8.1.2.Directrices : .....	21
I.9.Conclusion : .....	22

**Chapitre II: Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.**

II.1.Introduction : .....	24
II.2.Connaissances actuelles sur les mécanismes d'usure et de durée de vie des outils de coupe: .....	25
II.2.1.Influence des paramètres de coupe sur l'usure: .....	25
II.2.2.Les différents mécanismes d'usure: .....	25
II.2.2.1.Usure par adhésion : .....	25
II.2.2.2.Usure par abrasion : .....	26
II.2.2.3 .Usure par diffusion : .....	26
II.2.2.4 .Usure par effritement : .....	27
II.2.2.5 .Usure par déformation plastique : .....	27
II.2.3.Les principales formes d'usure des outils de coupe : .....	28
II.2.3.1.Usure en dépouille VB (l'usure frontale) : .....	29
II.2.3.2.Usure en cratère KT : .....	31
II.2.3.3.L'écaillage : .....	32
II.2.3.4. Arête rapportée : .....	33
II.2.3.5. Arête entaille : .....	34
II.3.La durée de vie des outils de coupe : .....	35
II.3.1.Critères d'usure : .....	36
II.3.2. Modèles de lois d'usure .....	36
II.3.2.1. Définition : .....	36
II.3.2.2. Modèle de TAYLOR généralisé .....	36
II.3.2.3.Modèle de COLDING : .....	39
II.3.2.4.Modèles de KONING-DEPIEREUX .... (1969) : .....	39

II.3.3.Établissement des lois d'usure : .....	39
II.3.4.Determination de la loi d'usure : .....	40
II.3.4.1.Méthode traditionnelle : .....	41
II.3.4.2.Plans factoriels complets : .....	42
II.3.4.3.Calcul des effets moyens : .....	43
II.4. Conclusion : .....	43

**Chapitre III : Les revêtements pour outils-coupants.**

III.1.Les revêtements : .....	45
III.2.L'intérêt des revêtements de surfaces : .....	46
III.2.1.Matériaux de coupes : .....	46
III.2.2.La dureté : .....	47
III.2.3.La résistance à l'usure : .....	47
III.2.4. Le coefficient de frottement : .....	47
III.2.5. La résistance au grippage : .....	47
III.3.Les principaux revêtements utilisables : .....	47
III.3.1. Nitrure de titane (TiN) : .....	47
III.3.2. Carbonitrure de titane (TiCN) : .....	48
III.3.3. Nitrure de titane et d'aluminium (TiAlN) : .....	48
III.3.4. Nitrure d'aluminium et de titane (AlTiN) : .....	48
III.3.5. Borure de titane (TiB <sub>2</sub> ) : .....	48
III.3.6.Nitrure de chrome (CrN) : .....	48
III.3.7. Diamant : .....	49
III.4.Les procédés de fabrication des revêtements : .....	50
III.4.1.Le dépôt CVD (dépôt chimique en phase vapeur) : .....	51
III.4.1.1.Caractéristiques le dépôt CVD : .....	52
III.4.2.Le dépôt PVD (dépôt physique en phase vapeur) : .....	52
III.4.2.1.Caractéristiques Le Dépôt PVD : .....	53
III.5.Carbure revêtu CVD : .....	54
III.5.1.Caractéristiques du carbure revêtu CVD : .....	54
III.6.Nuances de plaquettes : .....	54
III.6.1.Cermet : .....	55
III.6.2.Cermet Revêtu PVD : .....	55
III.6.2.Carbure revêtu PVD : .....	56
III.6.2.1.Caractéristiques : .....	57

III.6.3. Carbure : .....	57
III.6.3.1. Caractéristiques : .....	58
III.6.4. Céramique : .....	59
III.6.4.1. Caractéristiques : .....	59
III.6.5. PCD (Polycrystalline diamond) : .....	61
III.6.5.1. Caractéristiques : .....	61
III.6.6. CBN (Cubic Boron Nitride): .....	61
III.6.6.1. Caractéristiques : .....	62
III.6.7. Cell Fiber : .....	62
III.6.7.1. Caractéristiques : .....	63
III.7. Rôle présumé des revêtements : .....	65

**Chapitre IV: Etude et Analyse Expérimentales.**

IV.1. Introduction : .....	67
IV.2. Présentation du matériel : .....	67
IV.2.1. Machine d'essais : .....	67
IV.2.2. Plaquettes utilisées .....	68
IV.2.3. Matière à usiner : .....	69
IV.2.3.1. Caractéristiques mécaniques : .....	69
IV.2.3.2. Propriétés physiques : .....	69
IV.2.3.3. Composition chimique : .....	69
IV.3. Procédures d'essais : .....	70
IV.3. 1. Paramètres de coupe : .....	72
IV.4. Techniques de mesures l'usure : .....	73
IV.4.1. Mesure avec un microscope optique : .....	73
IV.4.2. Observation microscopique : .....	74
IV.4.3. Evolution de l'usure : .....	76
IV.5. Analyses et interprétation des résultats expérimentaux : .....	77
IV. 6. Conclusion .....	78

<b>Conclusion générale.....</b>	<b>79</b>
---------------------------------	-----------

**Bibliographi**

## ***LISTE DES ABRÉVIATIONS***

<b>ap</b>	Profondeur de passe [mm]
<b>C</b>	Constante dépendant du couple outil/pièce.
<b>CVD</b>	Dépôt chimique en phase vapeur
<b>CBN</b>	Nitruure de bore cubique
<b>f</b>	Avance par tour [mm/dent]
<b>Hv</b>	Dureté en échelle Vickers
<b>HRC</b>	Dureté en échelle Rockwell cône
<b>Kc</b>	Effort spécifique de coupe
<b>KB</b>	Largeur du cratère
<b>KM</b>	Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil
<b>Kt</b>	Conductivité thermique
<b>KT</b>	Profondeur d'un cratère
<b>n</b>	Exposant de TAYLOR
<b>PVD</b>	Dépôt physique en phase vapeur
<b>PCD</b>	Diamant poly cristallin
<b>T</b>	Durée de Vie
<b>K</b>	Dépend de la nuance de l'outil et du matériau usiné.
<b>UGV</b>	Usinage grande vitesse
<b>V<sub>B</sub></b>	Hauteur de l'usure en dépouille
<b>V<sub>BC</sub></b>	Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée
<b>V<sub>c</sub></b>	Vitesse linéaire de coupe [m/min]
<b>V<sub>f</sub></b>	Vitesse d'avance linéaire [m/min]

\* **Ppm** : 1 **P**artie **P**our **M**illion ( $10^{-6}$ ) ; Nombre de molécules du gaz à effet de serre considéré par million de molécules d'air.

## **Introduction générale :**

L'usinage par enlèvement de matière demeure le procédé de fabrication le plus employé dans l'industrie mécanique dans une large gamme d'applications (de l'aérospatiales et l'industrie automobile). Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe et le mouvement d'avance. Il existe deux manières de générer la surface recherchée : par travail de forme ou par travail d'enveloppe. Dans le premier cas, c'est la forme de l'outil qui conditionne la surface obtenue. Dans le second cas, c'est la trace de l'arête de l'outil qui donne la surface finale. De ce fait, la qualité de la pièce produite en usinage dépend principalement de l'état de l'outil de coupe utilisé. Ainsi, la maîtrise de l'usure de cet outil de coupe au cours de l'usinage s'avère très importante. L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. La majeure partie de ce mémoire est consacrée à l'usure des outils de coupe. Cette étude et peut se décomposer en quatre chapitres :

- ✓ Nous aborderons, dans un premier chapitre, une généralité sur les superalliages réfractaires.
- ✓ le deuxième chapitre, qui représente la partie essentielle de ce travail, nous présenterons les fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.
- ✓ Dans le troisième chapitre, nous présenterons Les différents types de Revêtements Pour Outils de Coupe.
- ✓ Le quatrième chapitre c'est la partie pratique dans cette étude, Ce dernier consisté aussi en une présentation du matériel qui sert à l'étude des évolutions de l'usure des plaquettes utilisées, et des observations microscopiques des plaquettes. Une interprétation des résultats est nécessaire pour achever ce travail suivi par quelques perspectives avenir.

# *Chapitre I*

## *Généralités sur Les superalliages*

**I.1.Introduction:**

L'utilisation de plus en plus sévère d'organes ou de pièces mécaniques soumises à des sollicitations thermiques, mécaniques ou thermomécaniques, a conduit le développement d'une gamme assez large d'alliages réfractaires depuis plusieurs décennies. La course vers une meilleure performance dans le domaine du transport ou de l'énergie a induit un développement et une amélioration continue d'alliages métalliques de plus en plus spécifiques (**superalliage** ou **alliage à haute performance**).

Ces alliages ont un double avantage : d'une part, résister à l'oxydation, à l'air libre ou en présence de gaz et d'autre part, de garder un niveau de résistance suffisant sous des sollicitations élevées et une excellente résistance mécanique et une bonne résistance au fluage à haute température,

**I.2.Historique du superalliage :**

Premiers superalliages au cours des années 1920 à partir de l'alliage 80Ni-20Cr utilisé depuis le début du siècle pour les ailettes de turbines à vapeur (brevet anglais de a March en 1906) en raison de sa bonne résistance à la corrosion. P Merica (USA) ajoute de l'aluminium à un alliage Ni-Cu et observe un fort durcissement après traitement thermique : *1er brevet « Superalliage » le 26 juin 1923 (US 1 572 744) avec addition de 5%Al dans NiCu (alliage « Monel K500)* Travaux de N Pilling (UK) et P Chévenard en France (alors aux aciéries d 'Imphy) puis P et N Mérica aux USA qui ajoutent Al dans le Ni80Cr20 et observe un fort durcissement à chaud mesuré. Le durcissement par  $\gamma'$  est caractérisé dans les années 30 mais ne sera réellement identifié qu'en 1951 par Taylor et Floyd en MET En France dépôt d'un brevet par la SA Commentry (P Chévenard) en UK en 1929 (UK 371 344) sur NiCrAl

**I.2.1.Superalliages dans les moteurs d'avions:**

Le premier superalliage introduit dans les moteurs d'avions est le « TiNidur », dérivé de l'alliage P193 développé par la société allemande Krupp et utilisé pour la fabrication d'aubes de turbine forgées du JUMO004 de la société Junker (1936) qui équipera le Messerschmidt ME262 vers la fin de la 2è guerre mondiale .Composition : Fe – 30Ni – 15Cr- 2Ti – 0,8Si – 0,7Mn – 0,15C Al est remplacé par Ti pour le durcissement  $\eta$  (Ni<sub>3</sub>Ti) Cette composition sera optimisée par l'International Nickel Company aux USA pour développer l'A286, base d'une famille de superalliages FeNi.

### I.2.2. Superalliages dans les turboréacteurs:

Parallèlement en UK, l'optimisation du Nimonic 80 par la société anglaise Wiggin permet de l'introduire dans le moteur Goblin De Havilland (1942) et d'augmenter sensiblement la température de la turbine: c'est le 1er véritable superalliage introduit dans les turboréacteurs juste après-guerre. Sa Composition est : Ni - 20Cr - 2Ti - 1Al - jusqu'à 3Fe, 1Si et 1Mn Rupture en traction 1000MPa à 500°C.

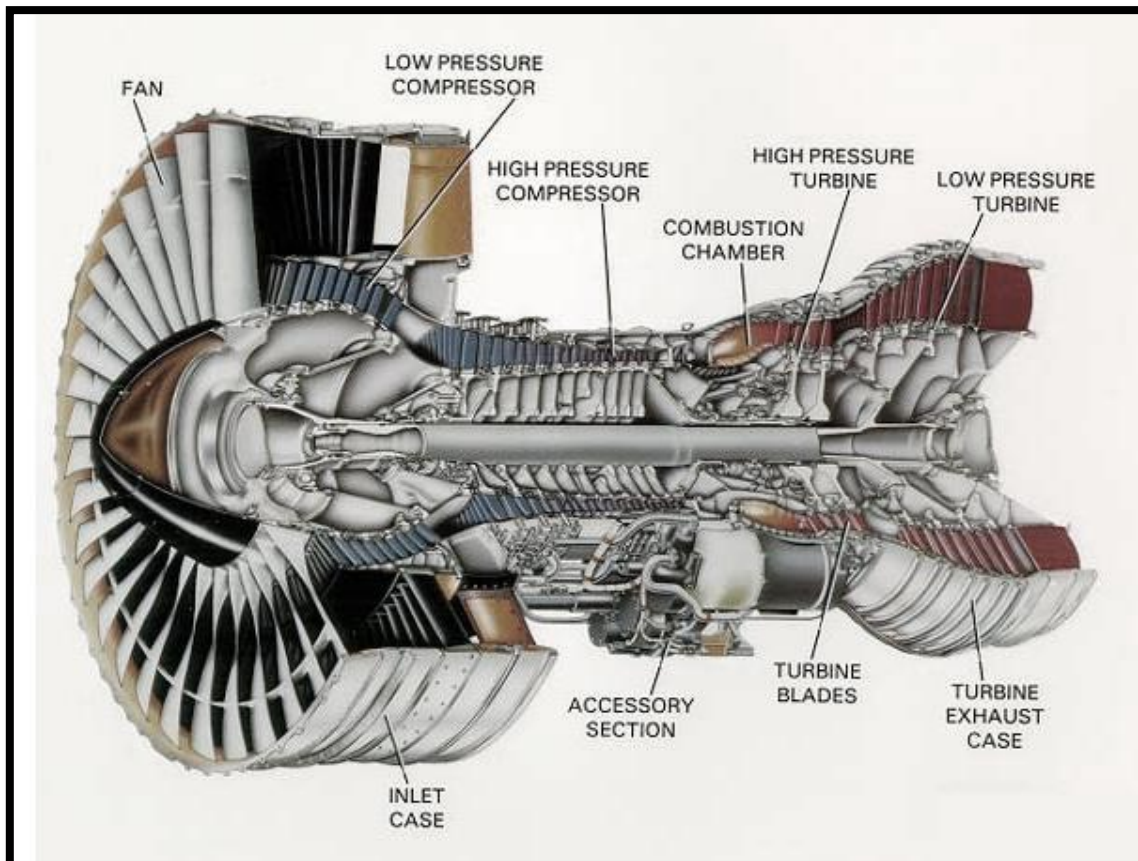


Figure I.1. Coupe du moteur Pratt & Whitney PW400.

### I.3. Groupes d'alliages :

Les superalliages réfractaires se répartissent en 3 groupes :

- Les superalliages à base de Co ;
- Les superalliages à base de Ni ;
- les superalliages à base de Fe - Ni.

**I.3.1. Les alliages à base de nickel :**

Ils sont les plus utilisés. Ils constituent actuellement plus de 50 % du poids des moteurs d'avions les plus récents. Cette proportion est appelée à augmenter à l'avenir.

Parmi les types les plus répandus, citons :

- Inconel 718, Waspaloy, Udimet 720 (durcis par précipitation) ;
- Inconel 625 (mis en solution non durcis sable) ;
- Inconel 718.

Poly cristallins forgés ou élaborés par métallurgie des poudres (ex : waspaloy, inconel 718, n18), utilisés lorsque la température est comprise entre 450°C et 700°C, c'est-à-dire pour la partie haute pression du compresseur (disques, aubes, carters) et la turbine (disques et certaines aubes).

**I.3.2. Les alliages à base de fer :**

Ont été développés à partir des aciers inoxydables austénitiques. Certains offrent des coefficients de dilatation thermique très faibles (tels que l'Incoloy 909) qui les rendent particulièrement adaptés pour les arbres, les bagues et les carters. En revanche, leurs propriétés de résistance à chaud sont les plus mauvaises des 3 groupes.

Types répandus :

- Inconel 909 ;
- A286 ;
- Greek Ascoloy ;

**I.3.3. Les alliages à base de cobalt :**

Ont une meilleure résistance à la corrosion à haute température que les alliages à base de nickel. Ils sont plus coûteux et plus difficiles à usiner en raison de leur résistance à l'usure.

Dans les turbines, ils sont utilisés uniquement dans les parties chaudes, notamment pour les chambres de combustion.

Ils trouvent leur principale application dans les prothèses chirurgicales, où leur résistance intrinsèque à la corrosion fait merveille.

**I.3.4. Les alliages de titane :**

Utilisés pour la partie fan et une partie des compresseurs dont la température est inférieure à 550°C.

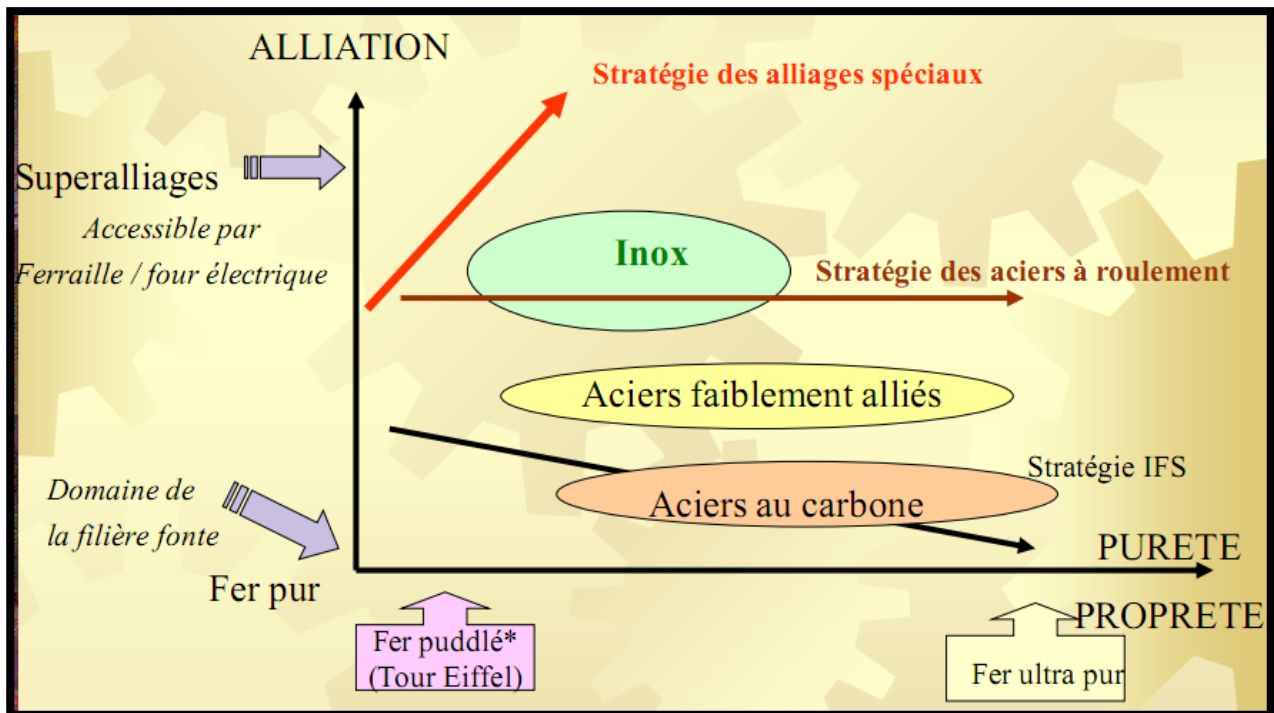


Figure I.2. Le Positionnement des superalliages.

#### I.4. Caractéristiques général des superalliages:

Deux familles de superalliages sont employées : les « base nickel » et les « base cobalt » (le terme « base » précise le métal qui est le plus abondant). En partant du nickel pur, métal qui s'oxyde et qui flue dès  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , l'addition de 20 % en poids de chrome conduit à un alliage dont la résistance à l'oxydation est bonne jusqu'à  $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , voire au-delà. Ensuite, un ajout d'aluminium permet de renforcer les propriétés mécaniques à chaud, jusqu'à près de  $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , grâce à la précipitation dans la solution solide ternaire nickel-chrome-aluminium d'un composé de type  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . Ce composé possède le même réseau cristallin que la solution solide, mais un paramètre légèrement différent. L'ajustage des propriétés mécaniques et chimiques, par un dosage fin des composants cités et des ajouts supplémentaires (titane, molybdène, tungstène, fer, etc.), permet de répondre à des besoins très divers qui dépassent largement le domaine des réacteurs d'avion [1].

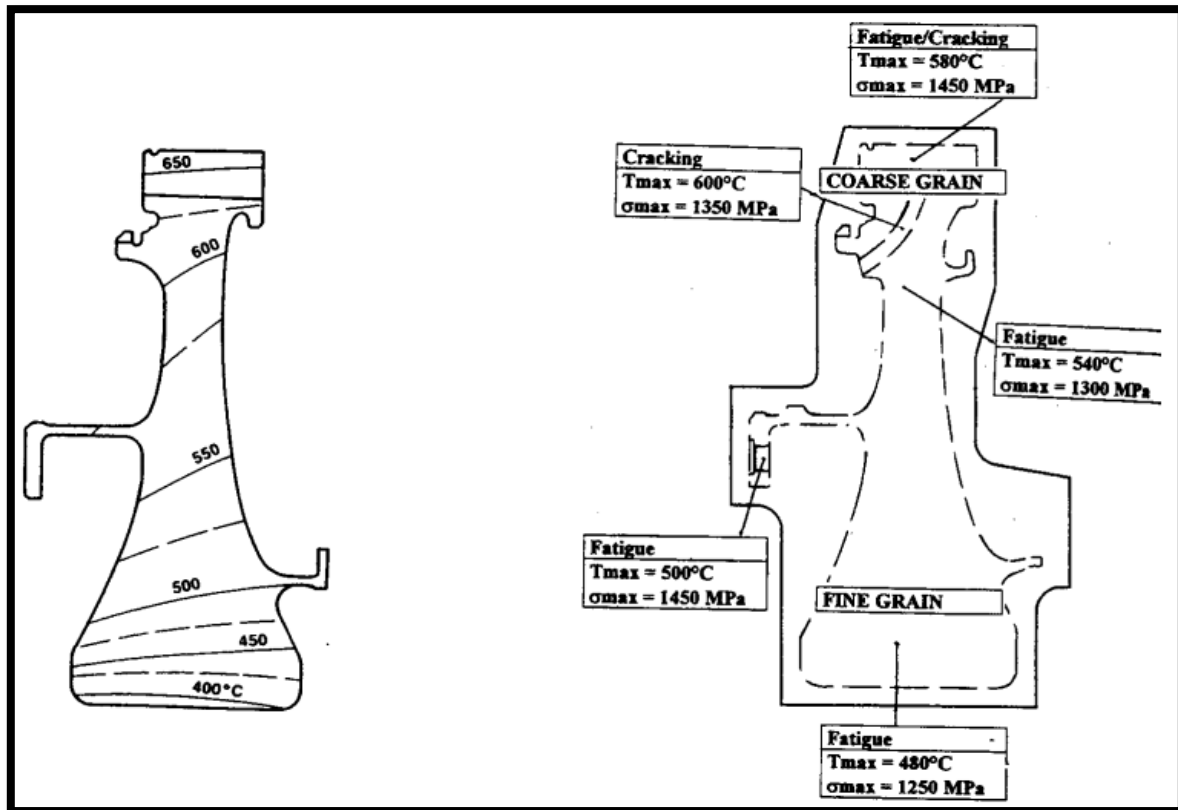


Figure I.3. Sollicitations thermiques et mécaniques dans un disque de turbine [2].

#### I.4.1. Caractéristiques mécaniques:

Pour limiter les déformations, les pièces doivent avoir l'élasticité la plus élevée possible pour pouvoir supporter une charge instantanée élevée (sur vitesse d'un disque de turbine) ou une bonne tenue au fluage pour limiter les déformations viscoplastiques sous l'effet d'une contrainte moyenne élevée ; ces propriétés sont relativement faciles à quantifier [1].

Il n'en est pas de même pour la tenue en fatigues mécanique ou thermique, qui correspondent soit à des vibrations pour la fatigue haute fréquence, soit à des répétitions cycliques des contraintes (démarrages et arrêts), pour lesquelles en interviennent également les autres caractéristiques du cycle et la corrosion. Les lois de comportement sous fatigues brutales et élevées, en vitesse de propagation, ainsi que la ténacité doivent être déterminées pour prévoir la rupture finale [1].

Dans le choix des matériaux et de leurs conditions de traitement, il faut toutefois tenir compte des caractéristiques associées : une limite élastique très élevée risque de correspondre à une faible ténacité ; une structure à gros grains améliore la tenue au fluage mais diminue la tenue en fatigue [1].

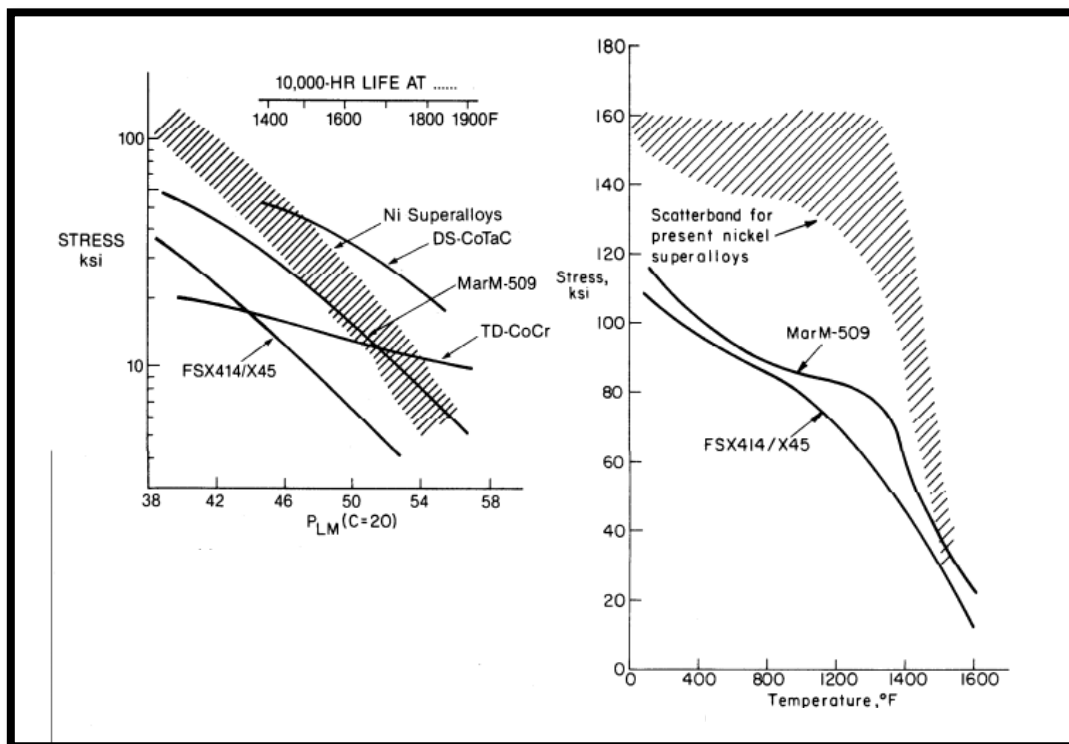


Figure I.4. Comparaison schématiquement de prospérités mécaniques de superalliages base cobalt et superalliage base Nickel [1].

**I.4.2. Protection contre la corrosion :**

Les phénomènes d'oxydation et de corrosion sont dus à la présence d'oxygène et de polluants (Na, Ca, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>) pouvant provenir des carburants ou présents dans l'air, en particulier, en atmosphère marine (NaCl), et se présentent sous deux formes :

- ✓ Au-delà de 750 à 800 °C, l'oxydation/corrosion type I sous forme de couche d'oxydes. Un revêtement à base d'alumine, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, assure une protection efficace ;
- ✓ entre 550 et 750 °C, la corrosion type II, où les dépôts de sels peuvent former avec le nickel ou le cobalt de l'alliage des composés eutectiques à bas point de fusion empêchant la création d'une couche d'oxydes protectrice Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et conduisant à une corrosion en cavernes. Le dépôt préalable de couches protectrices à base d'oxyde chrome Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> permet d'atténuer ce phénomène.

L'amélioration de la tenue des alliages peut s'obtenir soit par augmentation de la teneur superficielle en Al et/ou Cr (par cémentation solide ou par diffusion en phase vapeur), soit par des revêtements de matériaux céramiques (jouant un rôle de barrière thermique et à base de zircone) ou d'alliages spéciaux réalisés par projection plasma basse pression, les plus usités étant actuellement MCrAlY (M étant Ni ou Co, l'addition d'yttrium augmentant l'adhérence de la couche d'oxydes) [1].

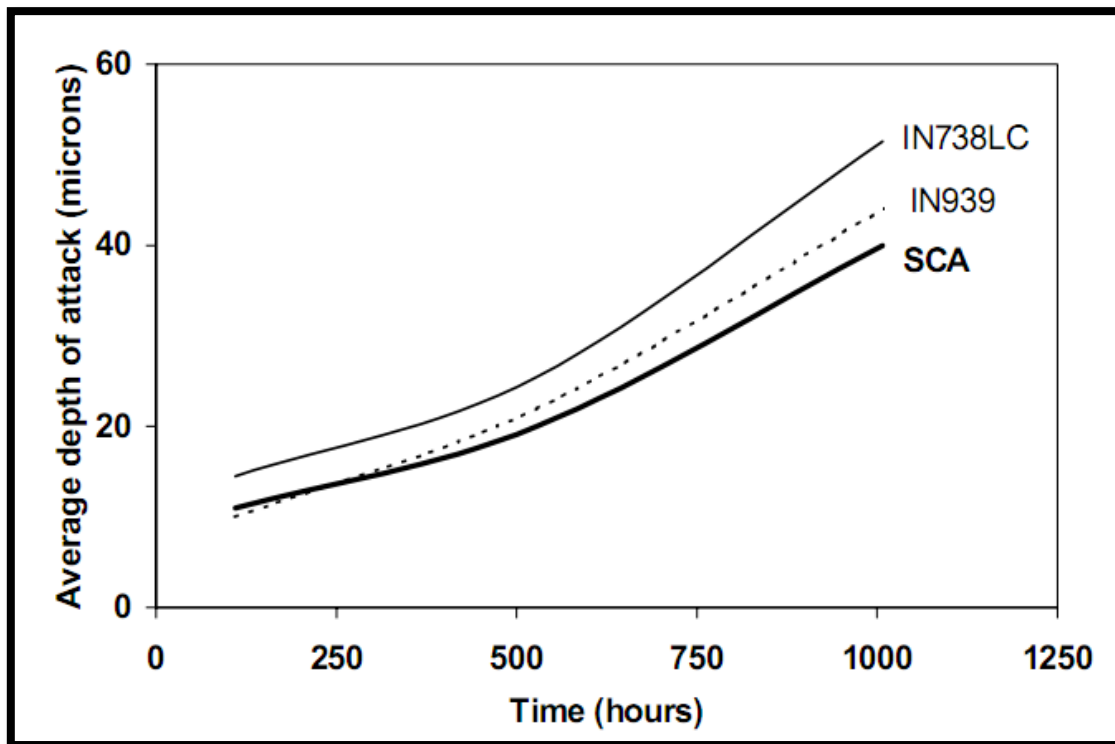


Figure I.5. Essais de corrosion dans la cendre à 800°C (ALSTOM) [2].

**I.4.3. Composition chimique :**

Développés pour des applications à haute température, les superalliages sont des alliages de base fer, nickel ou cobalt (éléments du groupe *VIII B*) présentant des caractéristiques mécaniques élevées à chaud et une faible réactivité chimique (inoxydabilité). Les ailettes mobiles de la turbine, du fait des fortes contraintes mécaniques auxquelles elles sont soumises, sont presque toujours en superalliage de nickel ; les superalliages de cobalt sont plus souvent utilisés pour les aubages fixes [1].

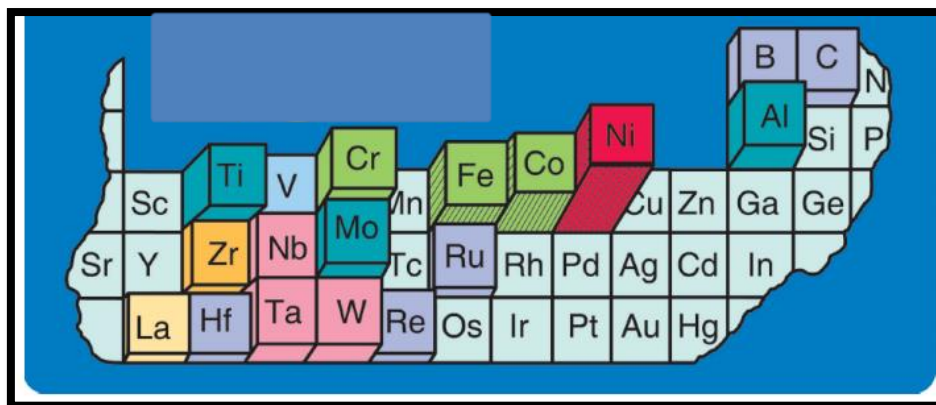


Figure I.6. Tableau périodique des éléments des superalliages base sur le groupe *VIII B*.

### I.4.3.1. Les superalliages de nickel :

Ces propriétés sont obtenues principalement par durcissement structural (précipitation de phases intermétalliques de type  $Ni3M$  {  $M = Al, Ti, Nb$ }), la matrice pouvant de plus être renforcée par l'addition d'éléments durcissant en solution solide (molybdène ou tungstène par exemple). Par ailleurs, la présence de chrome dans ces alliages est indispensable pour renforcer leur résistance à l'oxydation, grâce à la formation d'une couche d'oxyde protectrice de  $Cr2O3$ ; une résistance optimale à l'oxydation est obtenue avec 15 à 30 % de chrome [1].

On connaît maintenant assez bien les relations entre la microstructure des superalliages de nickel et leurs propriétés dans le domaine de température 650-1000°C :

#### I.4.3.1.1. La matrice austénitique $\gamma$ :

Contient une forte concentration d'éléments en solution solide (Co, Cr, Mo, W) ainsi que d'autres éléments tels que le fer, le titane et aluminium. Le cobalt réduit la solubilité de l'aluminium et du titane dans la matrice et aide indirectement à maintenir de hautes caractéristiques mécaniques à haute température. Le durcissement de la solution solide par le tungstène et le molybdène est dû à leur faible diffusivité, les autres éléments ayant d'avantage tendance à diffuser aux températures supérieures à  $0,6 T_f$  [1].

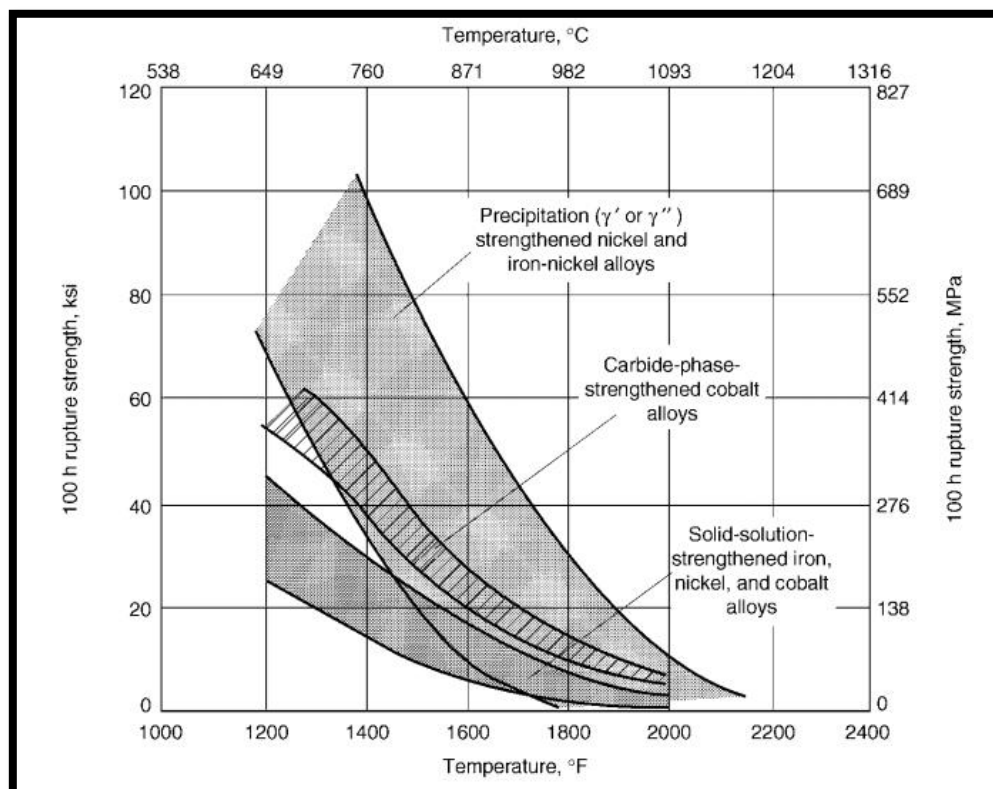


Figure I.7. La résistance à la rupture des superalliages [2].

### I.4.3.1.2. La phase $\gamma'$ :

Principale responsable du durcissement structural des superalliages de nickel, est constituée de précipités intermétalliques de type A3B et de structure CFC, en cohérence avec la matrice austénitique. D'une bonne ductilité, cette phase a tendance à coalescer ("coarsening") aux températures supérieures à  $0,6 T_f$ , entraînant une diminution de la résistance au fluage. On retarde le grossissement des précipités  $\gamma'$  et leur transformation en une phase indésirable grâce à une teneur suffisante en niobium et en tantale [1].

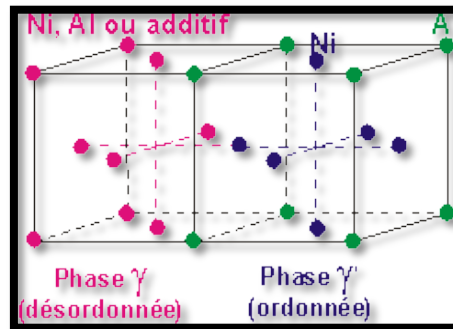


Figure I.8. Ces deux phases sont mixées sans qu'il y ait rupture de la structure.

- ❖ Le durcissement des superalliages par la phase  $\gamma'$  diminue quand la durée et la température d'utilisation du matériau permettent la coalescence ou même la dissolution de la phase ( $1000^\circ\text{C}$  environ).
- ❖ un superalliage comporte 60 % de phase  $\gamma'$ . Il n'est pas possible d'utiliser  $\gamma'$  pure car elle est très fragile, ce qui rend impossible sa mise en forme. Un superalliage est donc le recherche d'un compromis [1].

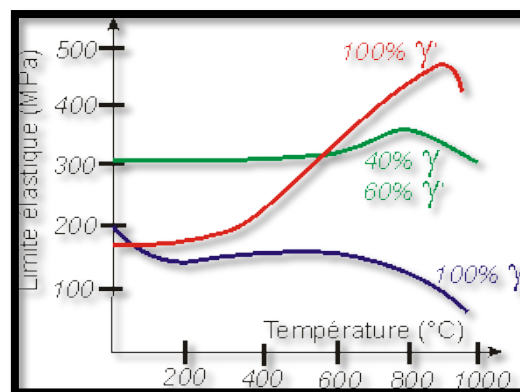


Figure I.9. Comportement entre les phases  $\gamma$  et  $\gamma'$  par rapport à la température  
Typiquement.

**I.4.3.1.3. Carbure :**

En quantité limitée (0,05 à 0,15 % C), ils ont un effet bénéfique sur la résistance à la rupture à haute température, mais leur influence est moindre que celle de la phase  $\gamma'$ .

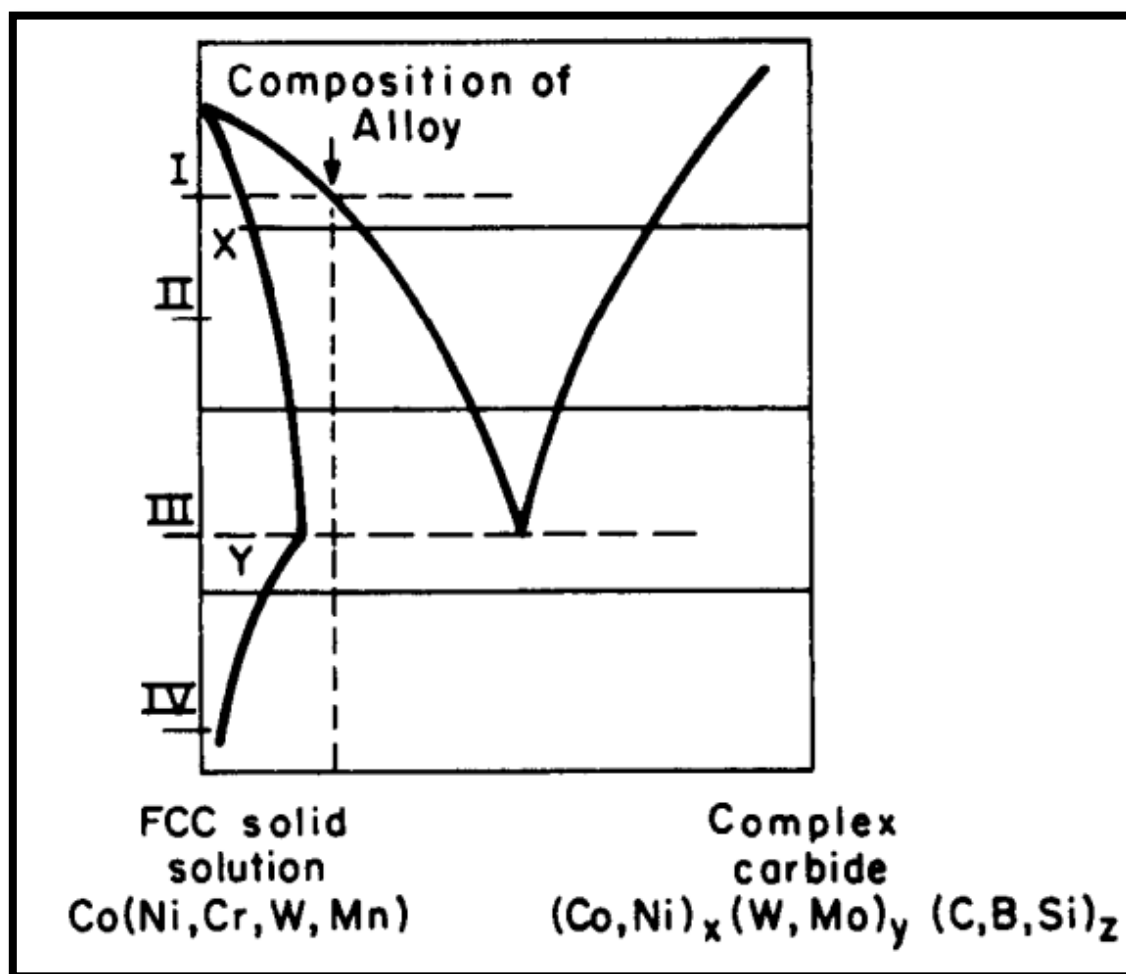


Figure I.10. Représentation schématique de formation dans les superalliages base cobalt [1].

**I.4.3.1.4. Borures :**

Le bore, à des teneurs de 50 à 500 ppm (1 partie pour million ( $10^{-6}$ )), est un élément essentiel des superalliages. Il améliore la résistance au fluage et la ductilité des alliages, mais le mécanisme de l'action des borures n'est pas encore totalement compris [1].

**I.4.3.1.5. Phases fragiles topologiquement compactes, ou TCP (Topologically-Close-Packed):**

Il s'agit de phases indésirables ( $\text{Cr}$ ,  $\gamma$ ,  $x$ ), sous la forme de plaquettes, qui se forment durant les traitements thermiques ou en service, et qui favorisent l'amorçage et la propagation des fissures. On évite leur formation par une définition appropriée de la composition de l'alliage.

### I.4.3.2. Les Superalliages de cobalt :

Sont durcis par la précipitation de carbures, par durcissement en solution solide et, à un degré moindre, par la précipitation de phases intermétalliques. Ces précipités intermétalliques ayant un effet moins durcissant que la phase  $\gamma'$  dans les superalliages de nickel, les superalliages de cobalt sont moins résistants mécaniquement que les superalliages de nickel en dessous de  $1100^\circ\text{C}$  ; ils sont en revanche plus résistants au-dessus de cette température (dissolution de la phase  $\gamma'$  dans les superalliages de nickel au-dessus de  $1000^\circ\text{C}$  environ). Les superalliages de cobalt doivent contenir plus de chrome (25 à 30 %) que ceux de nickel pour résister à la corrosion à haute température [1].

Tableau.I.1.fonction des éléments sur les caractéristiques à chaud des superalliages [1].

<i>Elément</i>	<i>Fonction</i>
<i>Chrome</i>	Résistance à l'oxydation Formation de carbures $M_{23}C_6$ et $M_7C_3$
<i>Molybdène</i> <i>Tungstène</i>	Durcissement de la solution solide Formation de carbures $M_6C$ et $MC$
<i>Titane</i>	Formation de carbure $TiC$ Formation de la phase $\gamma'$ [ $Ni_3(AlTi)$ ]
<i>Aluminium</i>	Formation de la phase $\gamma'$ [ $Ni_3(AlTi)$ ] Résistance à l'oxydation
<i>Cobalt</i>	Durcissement de la solution solide Accroît la température de dissolution de la phase $\gamma'$
<i>Bore</i> <i>Zirconium</i>	Augmentation de la ductilité et de la résistance au fluage
<i>Niobium</i>	Formation de $Ni_3Nb$ et de carbure $NbC$
<i>Carbone</i>	Formation de carbures $MC$ , $M_6C$ , $M_{23}C_6$ , $M_7C_3$ Efficace surtout aux températures élevées

**I.5. Les différentes méthodes de durcissement des superalliages comprennent :**

- le durcissement par formation de solutions solides (ajouts de W, Mo, Ta) ;
- le durcissement par précipitation de carbures de Cr, Mo, W, Ti, les carbures de chrome étant les plus efficaces ;
- essentiel pour les alliages base nickel, le durcissement par précipitation d'une phase  $\gamma'$   $Ni_3$  (Al, Ti), stable jusqu'à 1 100 °C, et d'une phase  $\gamma''$   $Ni_3Nb$  à durcissement plus lent et moins grande stabilité.

Pour des matériaux très particuliers, il faut également citer :

- le durcissement par oxydes dispersés, oxydes insolubles qui apportent une certaine tenue mécanique jusqu'au voisinage de la température de fusion ;
- le durcissement par fibres, surtout connu dans les « eutectiques orientés », grâce auquel il est possible d'obtenir la formation in situ de fibres de carbure ou de composé intermétallique (caractéristiques élevées à très haute température).

L'écroutissage apporté lors du forgeage d'une pièce, le laminage d'une barre ou d'une tôle, exécutés dans des conditions bien contrôlées, peuvent aussi renforcer fortement le durcissement apporté par un traitement de précipitation ultérieur. De façon générale, d'ailleurs, ces opérations de transformation sont des opérations de traitement thermomécanique intervenant dans les performances finales [1].

**I.6. Élaboration et transformation des superalliages:****I.6.1. Élaboration classique:**

Elle s'effectue par fusion au four à induction sous vide, suivie par une refusions au four à électrode consommable sous vide ou sous laitier pour les lingots devant être corroyés. Bien que fort onéreuse, la refusions par faisceau d'électrons et coulée en creuset refroidi commence à être utilisée pour la production d'alliages à très haute pureté. La difficulté de forger des alliages de plus en plus résistants à chaud a induit le développement de la fonderie de précision (par ailleurs économiquement intéressante) et plus récemment de la métallurgie des poudres [1].

Le procédé s'est développé aussi pour les pièces de grandes dimensions (carters de turbine dépassant 1,50 m en diamètre, roues de turbine coulées monobloc-disque et aubes). Très récemment, des procédés de coulée avec vibration du moule ou brassage mécanique du bain de fusion en cours de solidification pour entraver la formation de dendrites ont permis de produire des pièces à grains fins et excellente tenue en fatigue [1].

La solidification dirigée d'alliages de composition eutectique ou semi-eutectique permet la formation in situ de fibres parallèles à l'axe de la pièce, ce qui se traduit par des performances mécaniques très élevées à haute température. Les « eutectiques orientés » nécessitent une propagation du front de solidification à vitesse très lente (de l'ordre du centimètre/heure) avec un fort gradient de température (moule à paroi mince) et la coulée du métal à température élevée (1700° C). Compte tenu de ces difficultés, les tentatives de réalisation industrielle d'aubes ont été un échec [1].

### I.6.2. Élaboration par métallurgie des poudres:

Pour les alliages base nickel, elle a débuté au milieu des années 1970 pour les pièces d'assez grandes dimensions et fortement sollicitées au-delà de 450 à 500 °C (disques de turbine). Le procédé le plus courant est l'atomisation par jet d'argon d'un filet de métal coulé à partir d'un four de fusion sous vide. Le processus de mise en œuvre le plus utilisé est le filage à la presse pour l'obtention de billettes, ultérieurement forgées. La fine structure des billettes confère au matériau des caractéristiques de superplasticité (allongement de rupture supérieur à 100 % en déformation lente) dans le domaine des températures de forgeage. Cela permet l'emploi du forgeage isotherme (par déformation à faible vitesse sous presse hydraulique), donc d'utiliser des presses de relativement faible puissance (de 5000 à 8000 t contre 30 000 à 50 000 t en forgeage classique), et l'obtention de pièces près des côtes finies avec des structures homogènes et bien reproductibles [1].

Les superalliages à durcissement par oxydes dispersés ODS commercialisés (de 0,5 % à 1,2 % d'oxyde d'yttrium) sont produits par un procédé très particulier dit (*mechanical alloying*). Le mélange fondu d'oxydes de 100 à 1 000 Å et de poudre métallique correspondant à la matrice d'un superalliage classique est passé dans une attrition, broyeur à boulets sous atmosphère contrôlée, pendant une dizaine d'heures. Il se forme des particules d'alliage successivement soudées et broyées dans lesquelles l'oxyde se trouve finalement finement dispersé. Le produit est ensuite mis en container puis fritté, filé et laminé en barre ou tôle ; un traitement thermique de recristallisation permet d'avoir un grossissement progressif des grains, qui seront allongés dans le sens du filage, ce qui permet l'optimisation des caractéristiques de fluage [1].

**I.7.Élaboration. mise en œuvre :**

La complexité croissante des superalliages de nickel a nécessité le développement de méthodes d'élaboration et de fabrication de plus en plus soignées. Des progrès continus ont contribué, autant que l'optimisation de la composition chimique, à l'amélioration des superalliages (plus grande propreté, meilleure homogénéité et in fine amélioration des propriétés mécaniques) [1].

**I.7.1.La fusion :**

La fusion par induction sous vide (VIM : vacuum induction melting) a été le premier pas important, dans les années 50, de l'histoire des superalliages ; ce mode d'élaboration, au lieu de la fusion par induction sous air, a permis d'augmenter considérablement la proportion de phase  $\gamma'$  dans ces matériaux. Un progrès important a encore été réalisé au cours des années 60, d'abord grâce à la refusions sous vide (VAR : vacuum arc remelting), puis à la refusions sous laitier électro conducteur (ESR : electroslag remelting). Le procédé ESR permet d'élaborer des produits plus propres que le procédé VAR, du point de vue des structures de ségrégation, de l'homogénéité de la composition chimique et de la pureté en éléments non métalliques. Pour améliorer encore la propreté des alliages, en évitant le contact du lingot avec les réfractaires du four, les producteurs développent actuellement un procédé de raffinage par faisceau d'électrons sur sole froide (EBCHR : electronbeam cold-hearth refining).

La résistance mécanique des produits forgés dépend beaucoup de la taille de grains et de sa relation avec l'épaisseur de la pièce. En principe, il faut éviter les structures à grains trop fins, défavorables à la résistance au fluage et à la propagation des fissures de fatigue, et les structures à grains trop gros, qui abaissent la limite d'élasticité et la résistance à l'amorçage des fissures de fatigue. Une solution peut être de chercher à profiter des avantages de ces deux types de structure, en les localisant là où elles optimisent les caractéristiques recherchées [1].

**I.7.2.La fonderie de précision :**

Les superalliages les plus complexes ayant une grande résistance à chaud et une faible ductilité sont difficilement forgeables ; ils sont mis en forme par fonderie de précision (Investment casting). C'est ce changement qui a permis d'introduire des éléments durcissant en solution solide (W, Mo) dans les superalliages et d'augmenter la proportion des éléments formeurs de la phase  $\gamma'$  (Al, Ti). De plus, cette technique a permis de rendre nettement plus efficace le refroidissement des aubages. La fonderie de précision est la méthode la plus courante pour fabriquer les aubages de turbine et même de grosses pièces de structure. Des techniques de consolidation comme le pressage isostatique à chaud permettent de diminuer le taux de microporosité et d'améliorer les caractéristiques mécaniques et la soudabilité.

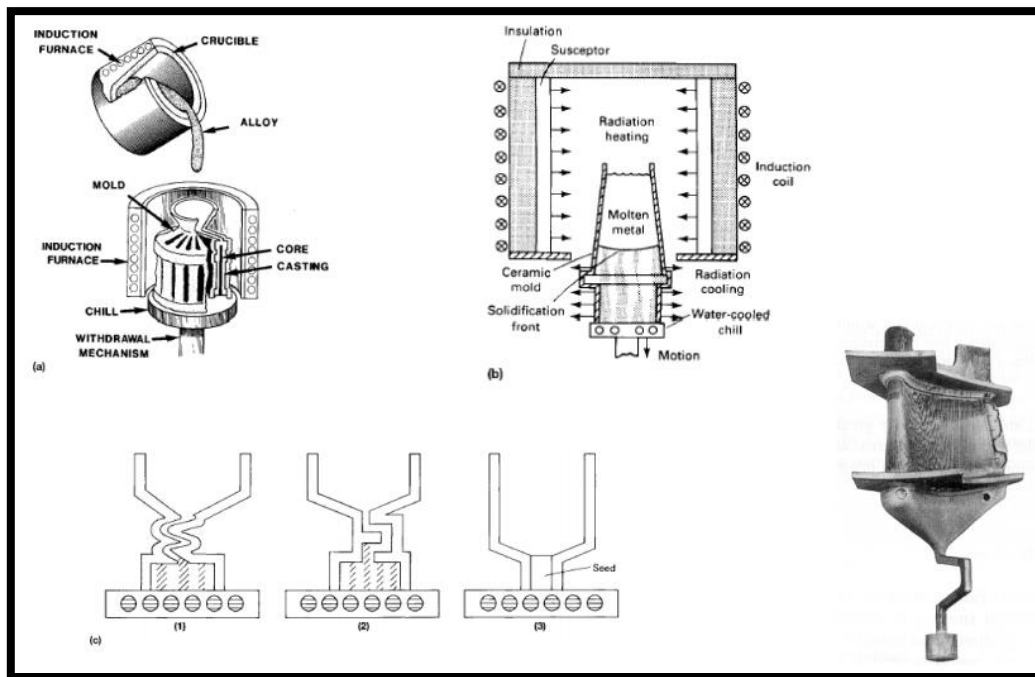


Figure I.11. Solidification dirigée en fonderie à la cire perdue [2].

### I.7.3. La solidification dirigée et les eutectiques orientés :

Dans les années 70, la solidification dirigée a permis de faire un nouveau progrès aux superalliages, en améliorant leurs caractéristiques mécaniques et en leur donnant une plus grande tolérance aux hautes températures. Cette technique permet en effet de réaliser des produits à structure colonnaire, avec les joints de grains orientés parallèlement à la direction des contraintes principales inertielles et thermiques de l'aube. Il en résulte une augmentation notable de la ductilité et de la résistance à la fatigue thermique : les gains obtenus par rapport à la solidification équiaxe peuvent être de 30 à 500°C en fluage et de 3 à 5 fois en durée de vie en fatigue thermique. Les alliages se prêtant bien à la solidification dirigée contiennent souvent du hafnium (1 à 2 %), cet élément améliorant la ductilité du matériau aux températures intermédiaires et diminuant ainsi la tendance à la formation de criques longitudinales entre les grains adjacents. D'abord utilisée sur des réacteurs d'avions militaires, la solidification dirigée est maintenant assez répandue, y compris pour les aubages des grosses turbines à combustion.

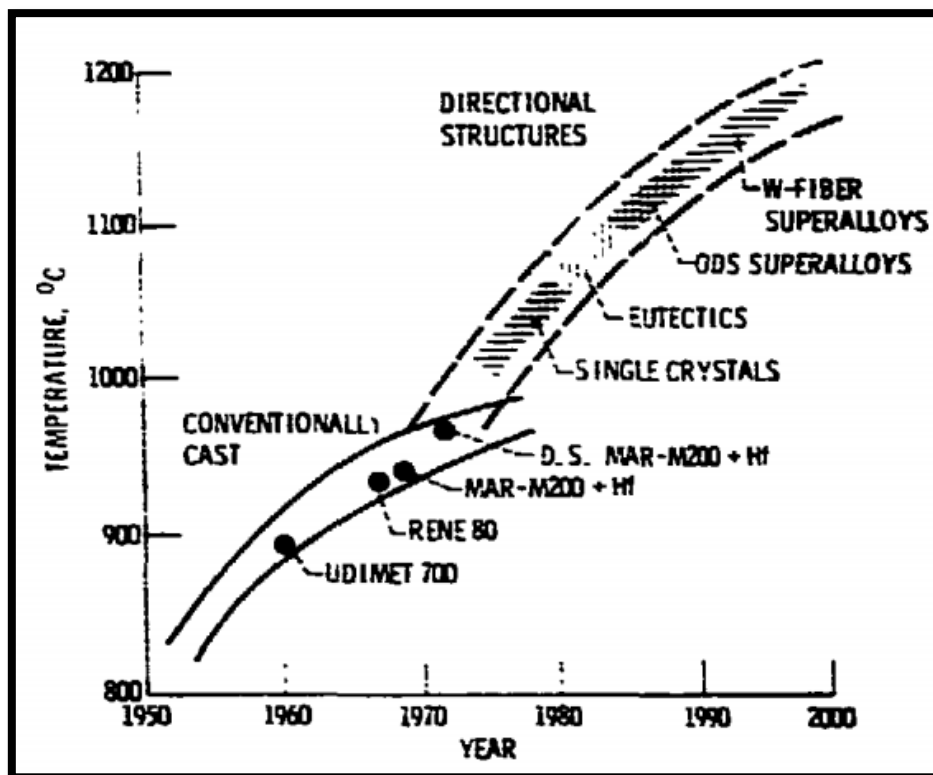


Figure I.12. Développement des alliages obtenus par fonderie conventionnelle et par solidification dirigée. En ordonnée, température conduisant à rupture en 1000 h sous une contrainte de 150 MPa [1].

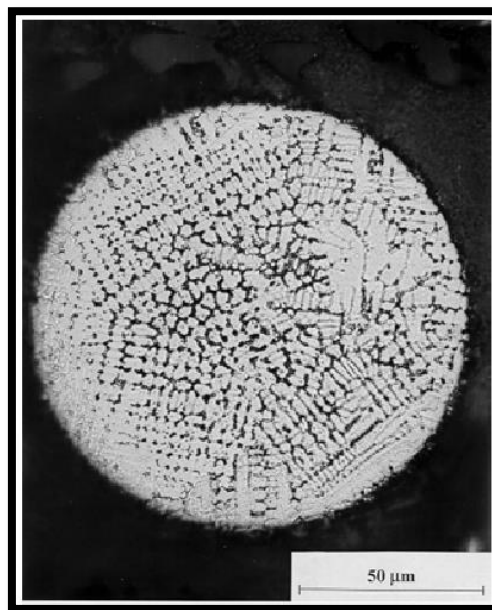
Dans un stade ultérieur on a élaboré des pièces monocristallines, de façon à éliminer toute influence du joint. Cette technique a conduit à définir des alliages n'ayant plus les additions de bore, hafnium ou zirconium destinées à améliorer la ductilité des joints de grains. Ces alliages peuvent avoir ainsi des températures de fusion plus élevées de 80 à 1000 C° et supporter des traitements de mise en solution à 1260-1320C°, permettant de mieux "utiliser" la phase  $\gamma'$ . Il peut en résulter un gain en fluage de 40 à 500 C° par rapport aux meilleurs alliages à solidification colonnaire [1].

#### I.7.4. La métallurgie des poudres :

Les années 70 ont été également marquées par des travaux considérables sur la métallurgie des poudres pré alliées base nickel pour mettre en œuvre des alliages très chargés en éléments durcissant, devenus impossibles à transformer en métallurgie classique. Un des problèmes les plus importants rencontrés est celui de la propreté des poudres ; les micros inclusions ont une répercussion sur la tenue en fatigue beaucoup plus importante que pour les matériaux élaborés de façon classique. Des incidents ont été rencontrés avec les premières applications de la métallurgie des poudres à la fabrication de disques de turbine, mais cette technique est aujourd'hui utilisée par la SNECMA pour la fabrication des disques des turbines équipant des avions de combat français.

**I.7.4.1. Avantages de la métallurgie des poudres par rapport à la voie coulé-forgé :**

- ✓ Réduction des ségrégations chimiques ;
- ✓ Homogénéité microstructurale ;
- ✓ Réduction de la taille de grains ;
- ✓ Économie de matière ;
- ✓ Haute limite élastique ;
- ✓ Résistance élevée à la fatigue ;
- ✓ Résistance à la propagation de fissures.



**Figure I.13.** Poudre en superalliage NR3C (procédé de l'électrode tournante diamètre 200µm) [2].

**I.7.5. Les alliages à phase dispersée Insoluble (Dispersoïdes) :**

Les alliages à phase dispersée insoluble (oxyde de thorium ou d'yttrium) élaborés à l'état solide par la métallurgie des poudres ou (mechanical alloying ) offrent aussi des caractéristiques intéressantes vers les hautes températures, mais d'un niveau cependant plus faible que celui des eutectiques orientés. Ce type d'élaboration est complexe et la production est très limitée. Divers alliages dits ODS (ODS: Oxide Dispersion Strengthening) ont été néanmoins développés pour les TAC, mais ils semblent plutôt trouver une application dans les environnements industriels extrêmes.

## I.8. La Turbine :

### I.8. 1. Aubage :

Malgré les perspectives prometteuses offertes par les matériaux céramiques, il est vraisemblable que les superalliages revêtus resteront pendant encore de nombreuses années la solution de référence pour les matériaux d'aubage. On peut en effet douter de l'aptitude des céramiques à base de silicium à pouvoir dépasser une température de 13000°C pendant de longues durées. Par ailleurs, de nombreuses années seront nécessaires avant d'envisager l'utilisation des céramiques oxydes, plus réfractaires, comme matériaux d'aubage [1].

#### I.8.1.1. Ailettage mobile :

Chez General Electric, les nuances les plus courantes pour l'aubage mobile ont été pendant longtemps l'Udimet 500, l'Udimet 700 et l'Inconel 738. L'Udimet 700/René 77 a remplacé l'Udimet 500 vers 1965 pour les ailettes du 1<sup>er</sup> étage, permettant de gagner en fluage et en résistance à l'oxydation et donc de fonctionner avec une température d'entrée turbine plus élevée ; l'Udimet 500 est resté le matériau de choix pour les ailettes du dernier étage. L'Inconel 738 a par la suite remplacé l'Udimet 700, pour sa meilleure résistance à la corrosion, et a été utilisé entre 1971/72 et 1984. À ce moment, l'alliage GTD-111, plus performant en fluage et en fatigue thermique, a été introduit par General Electric, au moins pour les ailettes du 1<sup>er</sup> étage. Les ailettes des trois étages de la TAC 9001F sont en alliage GTD-111. Sur les nouvelles turbines GE des séries 7F et 9F, les ailettes en GTD-111 du 1<sup>er</sup> étage sont élaborées par solidification dirigée, alors que celles des autres étages ont une structure équiaxe [1].

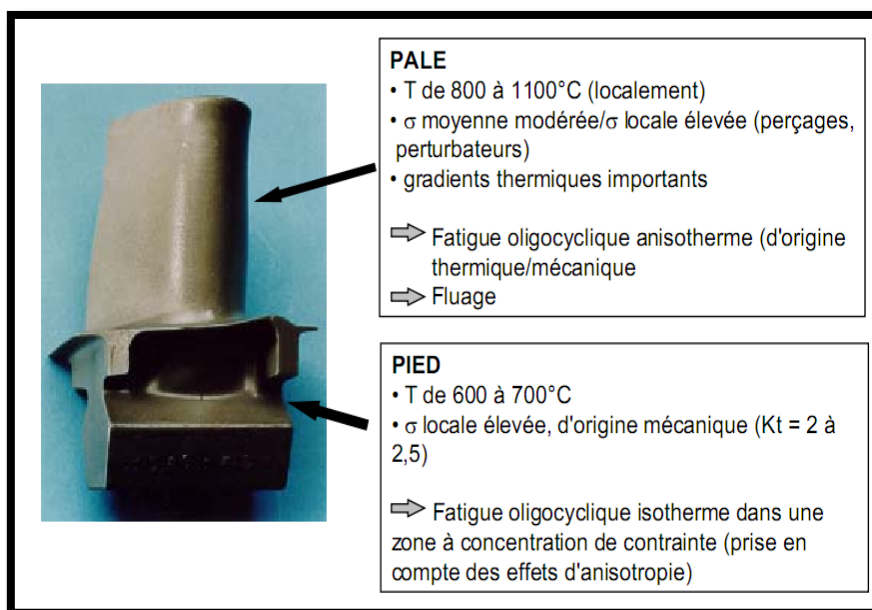


Figure I.14. Sollicitations thermiques et mécaniques dans une aube de turbine.

L'Inconel 738 représente un standard pour ce qui concerne la tenue à la corrosion et on considère, encore maintenant, qu'il réalise un bon compromis pour les turbines terrestres (heavy duty) vis-à-vis des propriétés exigées d'un matériau d'ailettage mobile (stabilité structurale, hautes caractéristiques mécaniques, bonne résistance à la corrosion ; L'Inconel 939, également développé par l'INCO pour la tenue à la corrosion et équivalent à l'Inconel 738, semble davantage utilisé en Europe qu'ailleurs . On peut penser que l'alliage GTD-111 est probablement un peu moins résistant à la corrosion que l'Inconel 738 du fait de sa moindre teneur en chrome.

**Tableau I.2.** Superalliages utilisés comme matériaux d'aubage dans le tac industriel [1].

Alliage	Ni	Co	Cr	Al	Ti	Mo	W	Nb	Ta	Fe	Zr	C	B
GTD 111	Bas	9.5	14	3.0	4.9	1.5	3.8	-	2.8	-	0.05	0.10	0.01
GTD 222	Bas	19	22.5	1.2	2.3	-	2.0	0.8	1.0	0.3	0.02	0.10	0.008
IN-738	Bas	8.5	16	3.4	3.4	1.7	2.6	0.9	1.8	0.5	0.1	0.11	0.01
IN-939	Bas	19	22.5	1.9	3.7	-	2.0	1.0	1.4	-	0.1	0.15	0.01
MAR-M421	Bas	10	15	4.3	1.7	2.0	3.5	1.7	-	1	0.05	0.15	0.015
Nimonic 115	Bas	15	15	5.0	4.0	4.0	-	-	-	1	0.04	0.16	0.02
Udimet 500	Bas	18	19	3.0	3.0	4.0	-	-	-	4	-	0.07	0.005
Udimet 700	Bas	18	15	4.3	3.5	5.0	-	-	-	1	-	0.07	0.02
Udimet 710	Bas	15	18	2.5	5.0	3.0	1.5	-	-	-	-	0.07	0.02
Udimet 720	Bas	15	18	2.5	5.0	3.0	1.2	-	-	-	-	0.04	0.005
FSX- 414	10.5	Bas	29.5	-	-	-	7.0	-	-	1	-	0.25	0.01
X40	10.5	Bas	25.5	-	-	-	7.5	-	-	2	-	0.5	-
X45	10.5	Bas	25.5	-	-	-	7.0	-	-	2	-	0.25	0.01
S816	20.0	Bas	20	-	-	4.0	4.0	4.0	-	4	-	0.4	-

### I.8.1.2.Directrices :

Les directrices du 1<sup>er</sup> étage sont soumises à des contraintes mécaniques plus faibles que les ailettes mobiles, mais à des températures plus élevées. Elles doivent avoir une bonne résistance à la fatigue thermique, ainsi qu'à l'oxydation et à la corrosion, notamment en présence de soufre. Leur fabrication et leur réparation exigent aussi du matériau une relativement bonne soudabilité [1].

Ces diverses raisons ont conduit les constructeurs à utiliser comme matériaux d'aubage fixe des superalliages de cobalt, généralement plus résistants à très haute température que ceux de nickel. **L'alliage FSX-414** constitue une référence de General Electric depuis de nombreuses années. Cette nuance a remplacé les alliages X-40 et X-45, précédemment utilisés ; par rapport à ces derniers, le **FSX-414** présente une meilleure soudabilité (plus faible teneur en carbone) et une plus grande résistance à l'oxydation/corrosion (plus forte teneur en chrome). L'alliage **FSX-414** a été utilisé longtemps pour les trois directrices, jusqu'au moment où, avec l'augmentation régulière de la température d'entrée turbine, on lui trouva une tenue au fluage insuffisante, nécessitant une maintenance trop fréquente.

Le matériau remplaçant dorénavant le **FSX-414** pour les aubes directrices des 2ème et 3ème étages est le GTD-222, un superalliage de nickel à 29,5 % de chrome dont la résistance au fluage est supérieure de 850C° à celle du **FSX-414** ; ce choix est également favorable vis-à-vis de la fatigue thermique. En revanche, Le **FSX-414** présente une meilleure résistance à la corrosion et a donc été conservé pour la première directrice, qui est encastrée en tête et en pied. On notera enfin que la composition chimique du GTD-222 (teneurs en aluminium et en titane) confère à l'alliage une bonne soudabilité [1].

### **I.9. Conclusion :**

Pour les directrices du premier étage, un superalliage de cobalt de meilleure tenue au fluage que le **FSX-414** (gain d'environ 300C°). Il s'agit de l'alliage GTD-484 (29 Cr, 10 Ni, 7 W, 1 Hf, 0,5 Ta, base Co), dont les qualités seraient aussi une meilleure tenue aux impacts et une soudabilité améliorée.

# *Chapitre II*

## *Fondements théoriques du Mécanisme d'usure des outils de coupe*

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

### II.1.Introduction :

L'usure de l'outil est due aux contraintes qu'on lui fait subir lors de l'usinage. En effet, la coupe des métaux est une opération de déformation plastique qui doit obtenir la rupture de la matière. Les sollicitations mécaniques et thermiques subies par l'outil sont donc très importantes.

L'outil est le point faible de l'usinage car lors de l'industrie transformatrice des métaux, elle sensible aux effets mécaniques et thermiques qui provoquent son usure et sa durée de vie est courte. L'usure des outils de coupe est un des phénomènes physico-chimiques les plus complexes. Il influe sur la géométrie de l'outil ainsi que sur la qualité de la pièce. Elle est due par son apparition aux causes suivantes :

- Frottements outil-copeau, outil-pièce et pièce-copeau (usure abrasive).
- Déformations plastiques de la matière de la partie active de l'outil.
- Echauffement important dû à la coupe.
- L'émiettement de l'outil (arrachement de petites particules métal).

Différents mécanismes sont responsables de la dégradation de l'outil de coupe et différents modes d'usure coexistent. Leur importance dépend de la température mise en jeu dans la zone de coupe [4] (figure II.1) et de la vitesse de défilement du copeau sur la plaquette. La (figure II.1) montre que l'usure adhésive est le mécanisme le plus actif sur une large plage de la température de coupe.

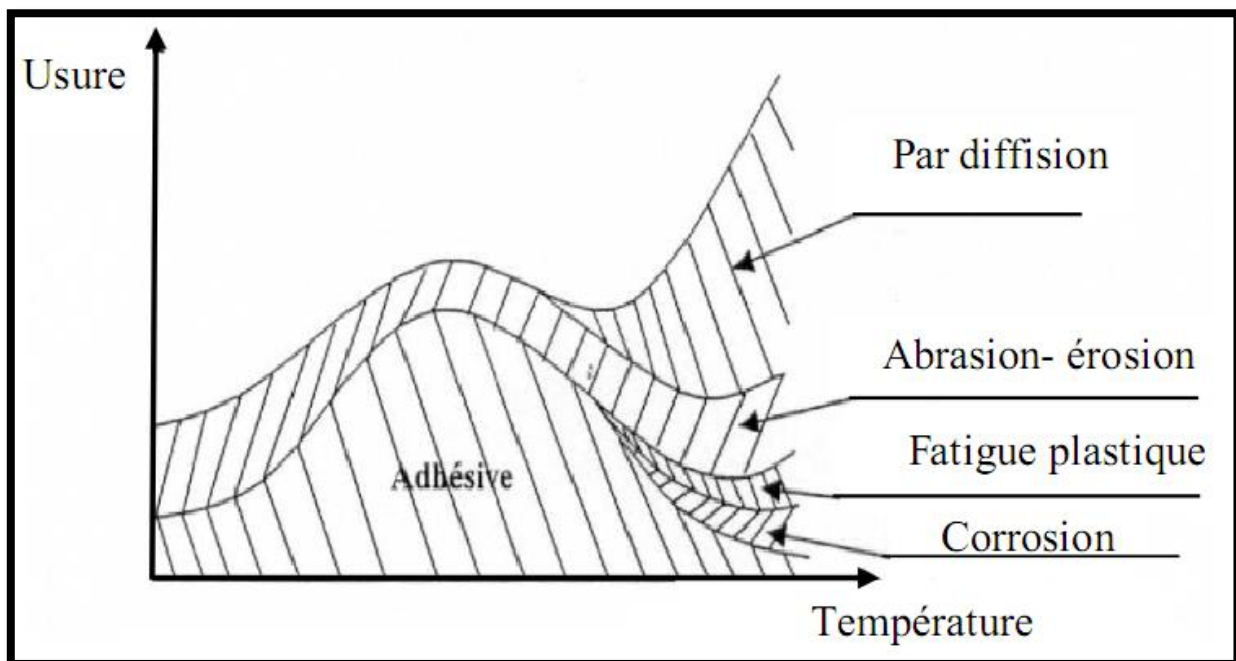


Figure II.1: Phénomène d'usure selon la température [4].

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

### II.2. Connaissances actuelles sur les mécanismes d'usure et de durée de vie des outils de coupe:

#### II.2.1. Influence des paramètres de coupe sur l'usure:

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe. Le premier est formé par la matière usinée et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, lubrification) :

- ✓ **La vitesse de coupe** : La température étant croissante avec la vitesse de coupe, l'outil devient fragile et l'usure est rapide.
- ✓ **L'avance** : Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, et diminuent la durée de vie de l'outil,
- ✓ **La profondeur de passe** : La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur le long de l'arête tranchante, son influence reste modeste sur l'usure.
- ✓ **Le matériau usiné** : son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de certains éléments d'addition),
- ✓ **Le matériau de l'outil (revêtement...)**.
- ✓ **La lubrification** : son influence intervient faiblement sur le coefficient de frottement pièce/outil et copeau/outil, mais permet la baisse de la température de la partie active de l'outil.

#### II.2.2. Les différents mécanismes d'usure:

L'usure des outils de coupe est la conséquence de divers mécanismes sont : l'usure par l'adhésion, l'usure par abrasion, l'usure par diffusion, l'usure par effritement et l'usure par déformation plastique.

##### II.2.2.1. Usure par adhésion :

Cette usure est aussi une usure par arrachement mécanique de particules d'outil, mais Après formation d'une microsoudure entre le copeau et l'outil. Les microsoudures sont favorisées par les pressions locales importantes entre les aspérités du copeau et de l'outil entraînant des déformations importantes et une élévation de chaleur provoquant la soudure.

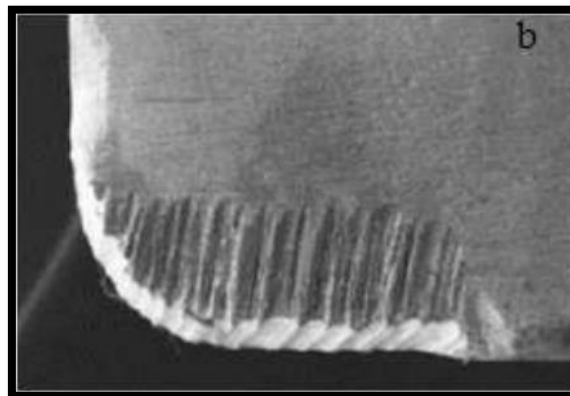
L'usure par adhésion est ainsi observée sur les outils en carbure. En effet, ce mode d'usure peut être entretenu lorsque les surfaces frottant ne sont en contact que sur une partie de leurs surfaces apparentes de frottement, soit à cause de l'état de surface des faces d'attaque et en dépouille, soit à cause de vibrations, soit à cause de la présence d'arête rapportée [5].

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

L'usure par adhésion diminue lorsque la vitesse augmente jusqu' à une vitesse critique au-delà de laquelle se poursuit une usure par diffusion [6 ,5].

### **II.2.2.2.Usure par abrasion :**

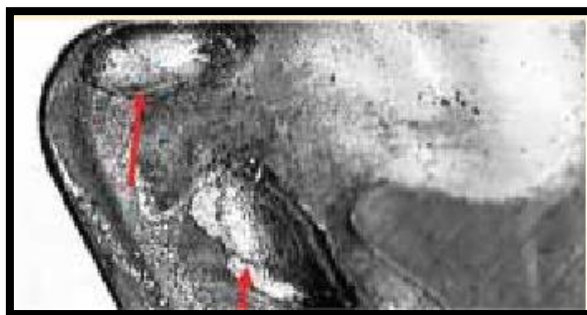
L'usure par abrasion est visible sur les faces de coupe et en dépouille des outils de coupe. Les surfaces abrasées présentent des sillons parallèles à la direction d'écoulement. Ils sont principalement causés par des inclusions siégeant dans le matériau à usiner. Les particules dures de carbure, de nitrure ou d'oxyde provenant de la pièce frottent sur les faces de coupe et de dépouille [6 ,5].



**Figure II.2:***Usure par abrasion.*

### **II.2.2.3 .Usure par diffusion :**

L'usure par diffusion est une usure continue pour laquelle les éléments de l'outil sont extraits par le copeau par quantités très petites. Elle est due aussi bien à la diffusion des constituants de l'outil dans le copeau qu'à celle des constituants de la matière usinée dans l'outil [5].



**Figure II.3:***Usure par diffusion.*

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

### ➤ Cause :

Une combinaison de diffusion chimique et d'abrasion cause la cratérisation. Généralement, la chaleur des copeaux décompose les grains de carbure de tungstène dans le substrat et le carbone s'infiltré dans les copeaux (diffusion), faisant apparaître un cratère sur le dessus de la plaquette. Le cratère pourra éventuellement s'agrandir assez pour entraîner l'arrêt de l'usinage, combiné à de l'écaillage ou de l'usure en dépouille. Des technologies de revêtement modernes comme DurAtomic ont considérablement réduit ce mode d'usure, mais pour atteindre de meilleures performances à hautes vitesses de coupe, la cratérisation réapparaît inévitablement [3].

### ➤ Ce que l'on observe :

- Cratères sur le dessus de la plaquette
- Le brise-copeaux peut être modifié après la cratérisation.

### ➤ Actions correctives :

- Utiliser une nuance plus dure donc résistante à l'usure et si nécessaire essayer un autre revêtement ou réduire la chaleur engendrée.
- Utiliser du liquide de refroidissement
- Utiliser une géométrie de coupe plus fine
- Réduire la vitesse de coupe (ou RPM)
- Changer la vitesse d'avance.

#### **II.2.2.4 .Usure par effritement :**

Actuellement, la destruction d'un outil par effritement local doit être considérée comme anormale, malgré qu'on la rencontre fréquemment. Plusieurs causes peuvent entraîner cet effritement :

- Une grande fragilité du matériau constituant l'outil (mauvaise composition chimique ou mauvais traitement thermique).
- Des chocs provoqués par des discontinuités ou par des vibrations importantes.
- Des fissures microscopiques formées à l'arête de l'outil.
- Mauvais choix des paramètres géométriques de l'outil, les pentes d'affûtage devant être d'autant plus faibles que l'outil est plus fragile [6,5].

#### **II.2.2.5 .Usure par déformation plastique :**

Sous l'effet des hautes températures et des hautes pressions dans la zone de coupe, la pointe de l'outil peut subir une déformation permanente. Cette forme d'usure détermine la précision dimensionnelle de la pièce usinée et présente un mode de détérioration de l'outil [6,5].



**Figure II.4 :** *Usure par déformation plastique.*

➤ **Cause :**

Surcharge thermique. Une chaleur excessive qui provoque l'assouplissement du liant de carbure de (Cobalt). Combinaison d'une surcharge mécanique excessive, d'une pression de la plaquette sur la pièce à usiner. Cela engendre une déformation de l'arête partiellement ou totalement, cela peut conduire par la suite à la rupture ou l'usure en dépouille irrégulière de la plaquette [3].

➤ **Ce que l'on observe :**

- Déformation de l'arête coupe ou usure en dépouille excessive ou irrégulière.
- Variation des côtes de la pièce à usinée.

➤ **Quand cela arrive :**

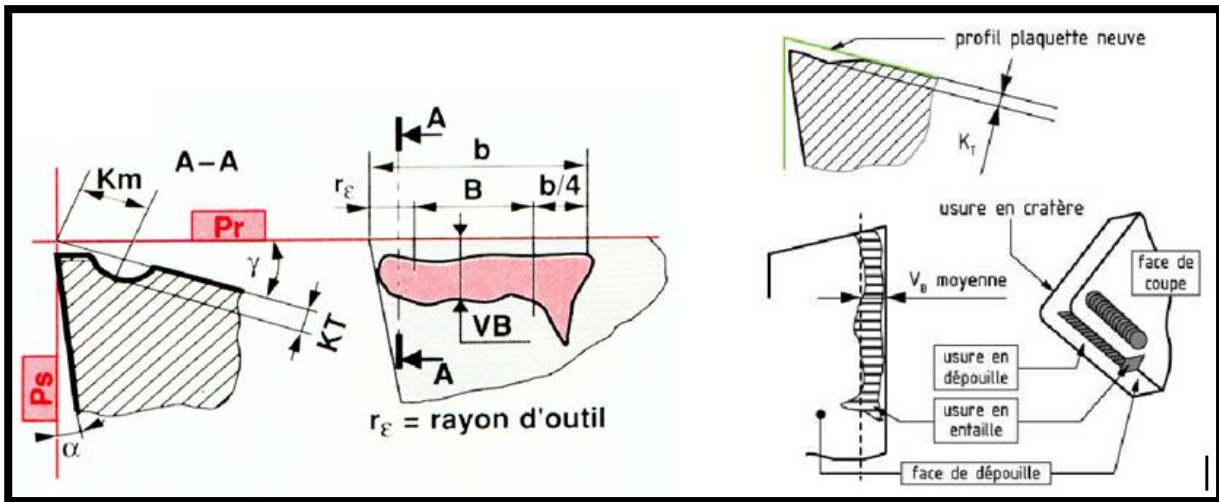
- Vitesses élevées et/ou avances élevées
- Aciers difficiles ou matériaux durs.
- Superalliages ou aciers inoxydables

➤ **Actions correctives :**

- Utiliser correctement le liquide de refroidissement
- Essayez une nuance plus dure.
- Réduire la vitesse de coupe (ou RPM) ou réduire l'avance
- Sélectionnez une plaquette avec une géométrie différente.

### **II.2.3. Les principales formes d'usure des outils de coupe :**

Les principales formes d'usure des outils de coupe sont illustrées sur la (figure II.5) [5]. Ces formes sont directement les conséquences d'interactions entre la matière usinée, le copeau et l'outil et dépendent aussi du rôle de la température.

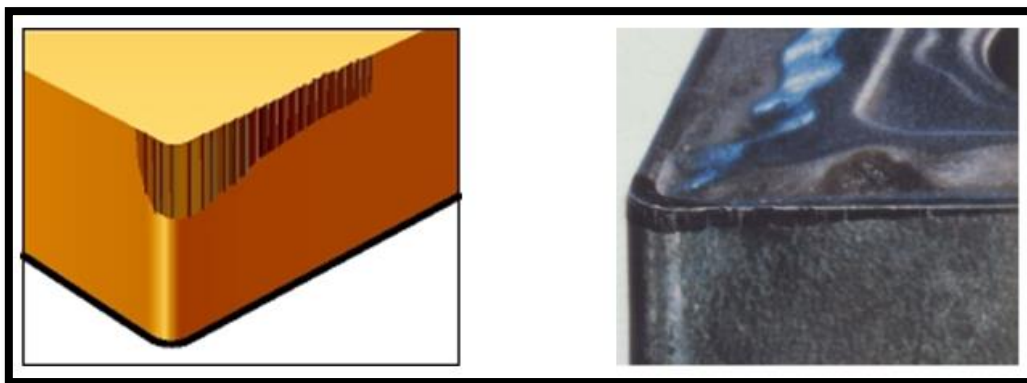


**Figure II.5 :** Types d'usure et critères associés [5].

### II.2.3.1. Usure en décapille VB (l'usure frontale) :

Sur les faces en décapille, par frottement sur la pièce.

Elle se manifeste par l'apparition d'une bande brillante et striée, parallèle à l'arête. Dans la zone B, la largeur "VB" de cette bande évolue (dans le temps) parallèlement à la profondeur "KT" du cratère jusqu'à la destruction de la pointe par la conjonction de ces deux effets. (Figure II.5) [5].



**Figure II.6 :** Usure en décapille.

#### ➤ Cause :

Abrasion : des inclusions microscopiques dures à la surface de la pièce, dégradent la plaquette. Une usure en décapille irrégulière ainsi qu'une usure en décapille uniforme qui se forme trop rapidement, amène à prendre des mesures correctives rapidement [3].

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

### ➤ Ce que l'on observe :

- Abrasion relativement uniforme le long de l'arête de coupe.
- Une apparition irrégulière d'usure en dépouille peut indiquer une influence de l'autre type d'usures (voir les autres descriptions d'usures)

Remarque : La matière usinée peut être refoulée le long de l'arête de coupe et donc exagérer la taille apparente de la trace d'usure [3].

### ➤ Quand cela arrive :

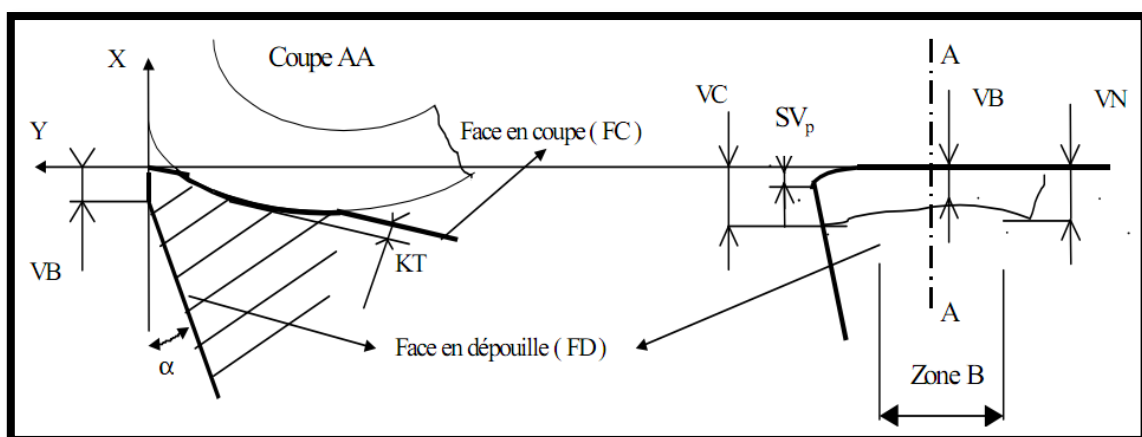
- Dans tous les matériaux, même sans aucun autre type d'usure, une usure en dépouille excessive sera le critère d'arrêt de la plaquette.

### ➤ Actions correctives

- Choisir une nuance plus dure, plus résistante à l'usure, ou une nuance revêtue.
- Réduire la vitesse de coupe (ou RPM)
- Utiliser correctement le liquide de refroidissement
- Si possible, choisir une plaquette avec un rayon plus grand.

### ❖ A noter toutefois :

- L'accroissement de la largeur de la bande d'usure à ses extrémités, due à l'usinage des zones superficielles de la pièce, qui donne lieu à des phénomènes particuliers ;
- Dans des conditions de coupe sévères, l'apparition d'une déformation plastique de la pointe de l'outil caractérisée par son affaissement " $SV_p$ " ;
- dans le cas de chocs répétés ou de variations périodiques des efforts (coupe discontinue, vibrations) la possibilité d'un effritement de l'arête de coupe.



**Figure II.7:** L'apparition d'une déformation plastique de la pointe de l'outil caractérisée par son affaissement " $SV_p$ " [5]. .

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

Les mesures de l'usure frontale "VB" en fonction du temps de coupe (Figure II.7) permettent en général de suivre l'évolution de l'usure. Cette évolution n'est pas rigoureusement continue et des irrégularités peuvent apparaître autour de la courbe traduisant la tendance moyenne. Dans le cas des outils carbures, on explique l'évolution de cette usure par la superposition de deux types principaux d'usure :

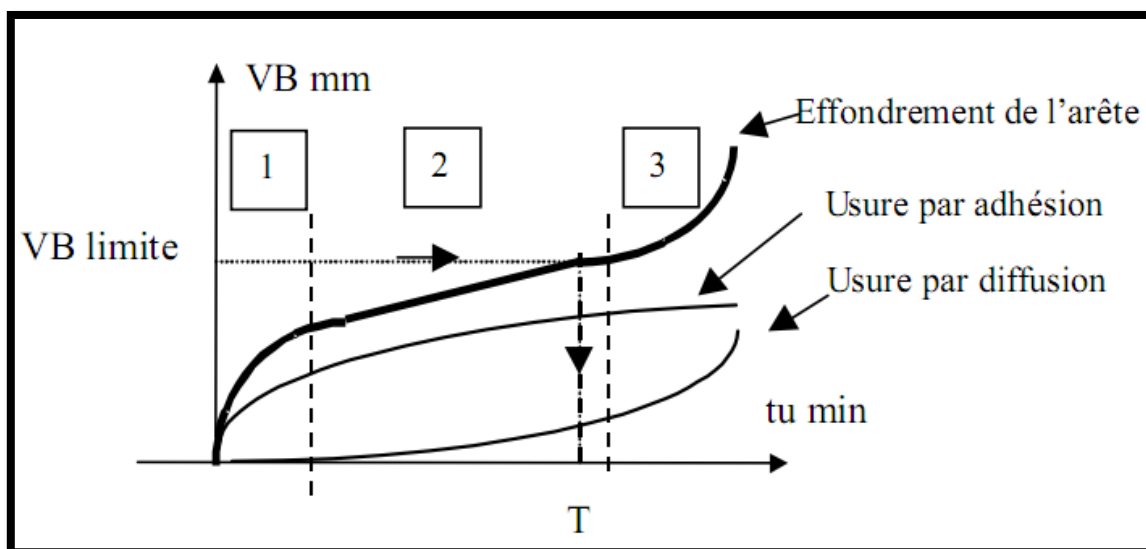
- l'usure par adhésion favorisée par les pressions locales et les températures importantes.
- l'usure par diffusion, transfert de certains constituants de l'outil dans le copeau, favorisé par les fortes températures à l'interface outil/copeau.

On observe 3 zones :

Zone 1 : période d'adaptation du tranchant au régime de coupe.

Zone 2 : Stabilisation du gradient d'usure, évolution sensiblement linéaire en fonction du temps.

Zone 3 : croissance rapide de l'usure qui précède l'effondrement de l'arête ; dans cette zone les risques de rupture d'outil sont importants.

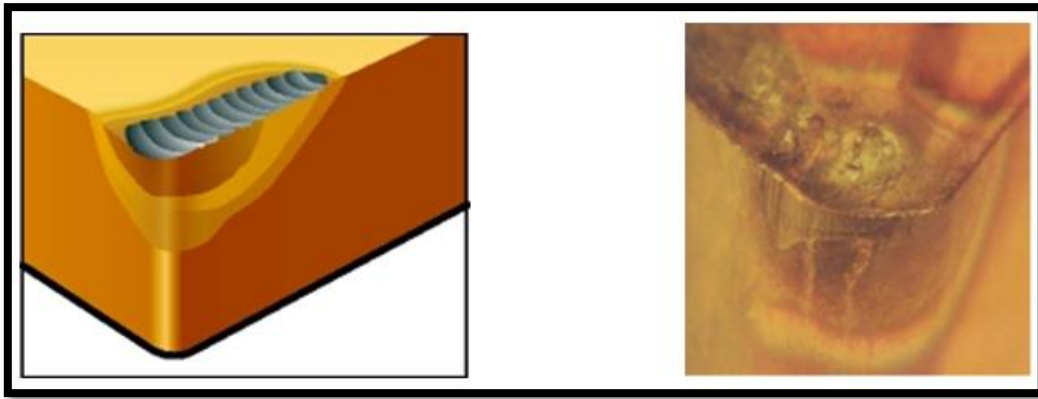


**Figure II.8:** Evolution de l'usure frontale.

### **II.2.3.2. Usure en cratère KT :**

Sur la face de coupe de l'outil, par frottement du copeau.

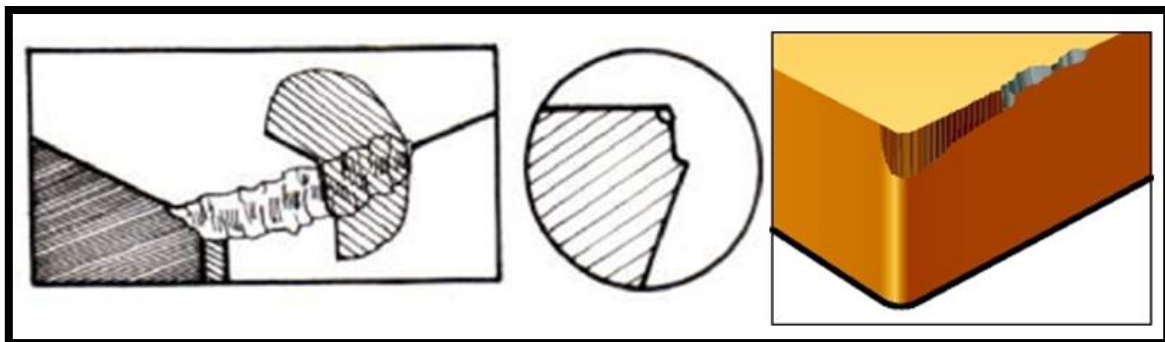
Au cours de l'usure, la profondeur "KT" et la position du cratère évoluent et influent, en particulier, sur le rayon d'enroulement du copeau ; le flanc arrière du cratère pouvant jouer le rôle d'un brise-copeau naturel. (Figure II.7) [5].



**Figure II.9:** *Usure en cratère.*

### II.2.3.3.L'écaillage :

Se constate quand la fragilité de la nuance employée est trop grande en égard au travail à exécuter, quand l'outil subit des chocs thermiques. Des criques se forment perpendiculairement à l'arête de coupe et des particules de carbure sont arrachées progressivement de cette arête. Ce phénomène est parfois appelé formation de fissure en peigne (figure II.10) [5].



**Figure II.10 :** *Usure de l'écaillage.*

➤ **Cause :**

Instabilité mécanique ou adhésion de la matière. L'écaillage de la plaquette peut être le résultat de vibrations dans la pièce. De fortes inclusions dans les matériaux usiné ou l'usinage en coupe interrompue augmente les contraintes sur la plaquette et peut causer de l'écaillage [3].

On peut parfois noter, par manque d'acuité, de l'écaillage dans les matériaux collants.

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

### ➤ *Ce que l'on observe:*

- Ecaillage le long du bord de la plaquette.

### ➤ *Quand cela arrive:*

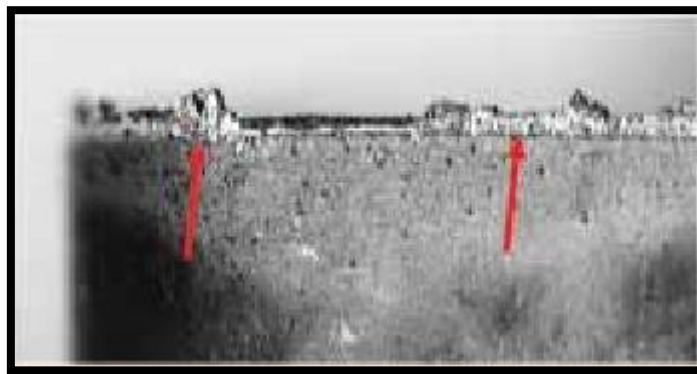
- Mauvaise stabilité, outils usagés...etc.
- Contrainte lors des entrées et sorties ;
- Points durs ainsi que points mous dans les matériaux usinés ;
- Matériaux frittés (abrasifs).

### ➤ *Actions correctives:*

- Contrôler la stabilité pièce, machine..etc.
- Choisir une nuance plus dure ou géométrie plus robuste ;
- Réduire la vitesse d'avance ;
- Dans certains cas, supprimer le liquide de refroidissement ;
- Voir aussi les actions correctives pour la formation d'arêtes rapportées.

#### **II.2.3.4. Arête rapportée :**

L'arête rapportée se manifeste par un dépôt de la matière usinée sur l'arête de coupe. C'est une sorte de soudure qui se produit entre deux matériaux. Elle se localise préférentiellement sur la face de coupe, mais apparaît dans certains cas sur la face en dépouille.



**Figure II.11 :** *Arête rapportée.*

### ➤ *Cause :*

Adhésion de la matière sur la plaquette.

La formation d'arête rapportée est le résultat d'une fusion de la matière usinée sur l'arête de Coupe. C'est aussi l'indication d'une affinité chimique entre la plaquette et la matière.

Haute pression de coupe, et une température localement insuffisante autour de la zone de coupe.

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

Ce mode d'usure pourrait, dans certains cas être bénéfique pour la durée de vie de l'outil, mais la conséquence de cette formation d'arêtes rapportées engendre des écaillages ou la rupture de la plaquette [3].

### ➤ *Ce Que L'on Observe :*

- Matériaux collés sur le dessus ou sur la dépouille de la plaquette ;
- Changements irréguliers d'aspect de la surface fini.

### ➤ *Quand cela arrive :*

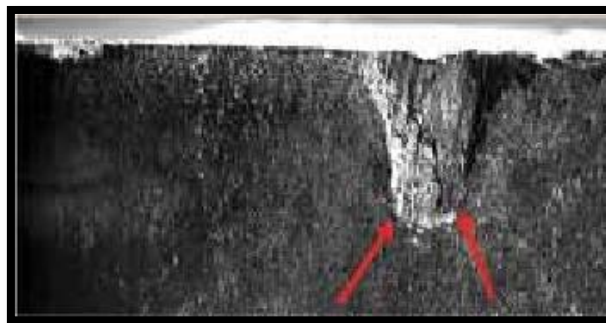
- Dans certains alliages, aciers inoxydables et d'autres matériaux collants (ex : Alliages d'Aluminium).
- A vitesse faible, spécialement en dressage face au centre pièce ainsi qu'en tronçonnage et peut même apparaître en perçage (vitesse nulle au centre outil).

### ➤ *Actions correctives:*

- Le changement du revêtement de la plaquette peut réduire la formation d'arête rapportée.
- Augmenter la vitesse de coupe (ou RPM) ou augmenter la vitesse d'avance.
- Essayer une plaquette avec une géométrie plus fini.
- Utiliser correctement le liquide de refroidissement ou alors pas du tout ; changer éventuellement le pourcentage de la concentration du lubrifiant.

### **II.2.3.5. Arête entaille :**

L'entaille est une forme d'usure sévère localisée sur l'arête de coupe. Elle est due généralement à la sollicitation combinée (traction-compression) de la partie active de l'outil lors de l'usinage de surfaces très dures. Dans certains cas d'usinage où la température devient importante, l'entaille peut provenir d'un écaillage et donc d'un phénomène de fatigue Thermomécanique [5].



**Figure II.12:** *Arête entaille.*

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

### ➤ Cause :

Combinaison de caractéristiques des matériaux de la pièce à usiner et des conditions de coupe. L'entaille est souvent causée par les caractéristiques de la surface de la pièce à usiner, par exemple pièces forgées (dures) ou moulées (abrasives). Cela provoque une usure rapide de la plaquette dans la zone de coupe. De trop fortes contraintes peuvent aussi conduire à l'entaille de la plaquette à la suite de compression le long de l'arête de coupe – la plaquette est particulièrement sollicitée au niveau de la profondeur de coupe [3].

### ➤ Ce que l'on observe :

- l'accumulation de copeaux sur la plaquette au niveau de la zone de coupe.

Remarque: L'entaille peut être de deux sortes : lisse qui indique une interaction plus chimique ou irrégulière qui est plus mécanique.

### ➤ Quand cela arrive :

- Matériaux usinés avec problème d'état de surface (exemple : oxydation).
- Matériaux écroui dû à l'usinage.
- Fonderie ou d'autres processus d'élaboration pouvant affecter les surfaces.

### ➤ Actions correctives :

- Varier la profondeur de coupe.
- modifier l'avance ou augmenter la vitesse de coupe (Remarque : cela va générer plus d'usure en dépouille).
- Sélectionner une nuance plus tenace.
- Changer de brise-copeaux.
- Eviter les arêtes rapportées.

### **II.3. La durée de vie des outils de coupe :**

- ❖ La qualité du travail d'un outil de coupe dépend de son degré d'usure.

Cette usure a une influence directe sur :

- La qualité de la surface obtenue.
- La tenue de l'outil dans le temps (plus il sera usé, plus il s'usera vite).
- La puissance nécessaire à la coupe (plus il sera usé, moins il coupera).

- ❖ La durée de vie de l'outil sera conditionnée en fonction de son degré d'usure.

Sur le poste de travail, la durée de vie de l'outil s'exprimera comme :

- un volume de copeaux produit entre deux changements d'arête.

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

- un nombre de pièces usinées entre deux changements d'arête.
- une longueur usinée entre deux changements d'arête.

### **II.3.1. Critères d'usure :**

Les critères usuellement utilisés pour les outils en carbure et, notamment, ceux recommandés par la norme NF E 66 505, sont basés sur l'évolution de l'usure frontale ou de la cratérisation. Du point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer, puisqu'elle détermine l'état de surface de la pièce usinée et la précision dimensionnelle [6].

De plus, l'expérience montre que l'évolution de l'usure des outils à plaquette carbure dite "à jeter", qui permettent de vitesses de coupe élevées, peut être définie de façon satisfaisante par la seule mesure de l'usure frontale, dans une large plage des paramètres de coupe. Toutefois, pour des valeurs élevées des paramètres de coupe provoquant une forte élévation de la température à l'interface outil-copeau, l'accélération de l'usure par diffusion devient très sensible, et favorise une évolution rapide de la cratérisation.

Le critère principal défini pour les outils carbure et céramique selon ISO 3685 est le suivant :

- Largeur de la bande d'usure frontale  $V_B = 0,3$  mm si elle est uniforme dans la zone B ( finition).
- Sinon, largeur maximale de cette bande  $V_B = 0,6$  mm (ébauche).

Ces valeurs limites de  $V_B$  correspondent sensiblement à celles relevées à la frontière des zones 2 et 3 de la (figure II.8), on minimise ainsi le risque de rupture accidentelle de l'outil pendant la production.

### **II.3.2. Modèles de lois d'usure**

#### **II.3.2.1. Définition :**

La loi d'usure définit la variation de la durée effective de coupe  $T$  des outils en fonction des conditions géométriques et cinématiques de l'usinage. La durée effective de coupe  $T$  est définie comme étant le temps d'usinage qui conduit à l'usure limite définie par le critère d'usure précédent.

#### **II.3.2.2. Modèle de TAYLOR généralisé**

De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour représenter la loi d'usure des outils de coupe, parmi lesquels le modèle de TAYLOR généralisé :

$$T = K \cdot a^\alpha \cdot f^\gamma \cdot v^r$$

Pour une géométrie de copeau donnée ( $f = \text{cste}$  et  $a = \text{cste}$ ) ; il vient :

$$T = C V_c^n$$

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

Taylor fut le premier à proposer en 1907, un modèle mathématique reliant la durée effective de coupe  $T$  d'un outil aux paramètres de coupe [6].

$$T = C \cdot V_c^n$$

$V$  : Vitesse de coupe

$T$  : Durée de Vie

$n$  : Exposant de TAYLOR

$C$  : Constante dépendant du couple outil/pièce.

Ce modèle est représenté par une droite dans un graphe à coordonnées logarithmiques :

$$\text{Log } T = n \text{ Log } V + \text{Log } C$$

Gilbert (1950) a proposé la généralisation du modèle de Taylor. La constante  $C$  est remplacé par une expression qui tient compte de la géométrie de l'outil et du copeau.

$$T = K \cdot a^\alpha \cdot f^\gamma \cdot v^r$$

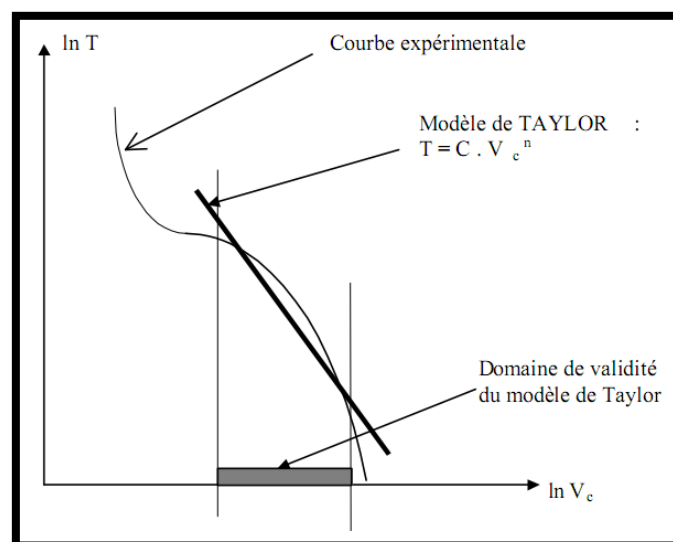
$K$  : dépend de la nuance de l'outil et du matériau usiné.

$a$  : Profondeur de passe.

$f$  : Avance.

$x, y$  Exposants dépendant de la nuance de l'outil.

Ce modèle reflète correctement la moyenne des résultats expérimentaux dans la plage des paramètres de coupe couramment utilisés, mais peut s'écarter rapidement de la réalité en dehors du domaine usuel (Figure II.13).



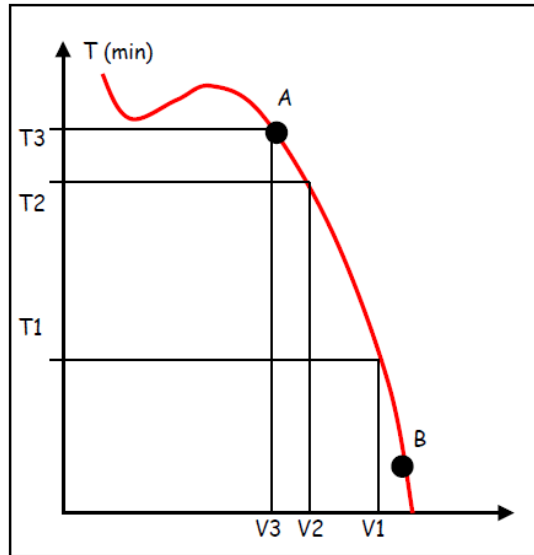
**Figure II.13:** *Domaine de validité du modèle de Taylor.*

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

### II.3.2.2.1.Principe :

On fixe une vitesse de coupe  $V_i$  et on usine avec l'outil jusqu'à ce que le critère d'usure soit atteint (généralement  $VB=0,3$ ) et on note le temps effectif de coupe  $T_i$ .

- En reportant sur un graphe les couples  $(V_i, T_i)$ , on obtient une courbe qui a cette allure.



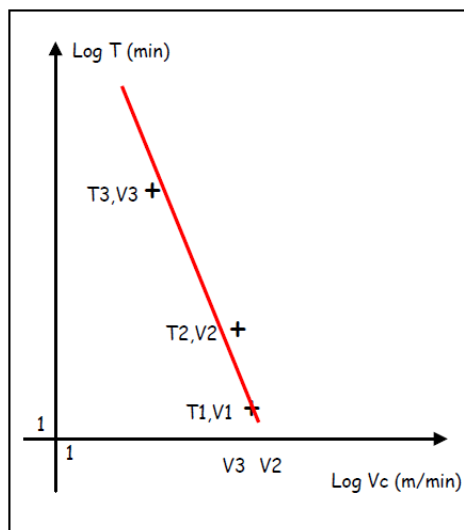
**Figure II.14:** Graphe les couples  $(V_i, T_i)$ .

Dans la zone A-B, on peut écrire :

$$T = C_v V^k$$

Modèle de TAYLOR simplifié,  $C_v$  et  $k$  sont des coefficients.

Représenté dans un repère à coordonnées Logarithmiques, la portion A-B est pratiquement une droite.



**Figure II.15:** Repère à coordonnées logarithmiques.

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

$$\text{Log } T = \text{Log } C_v + k \log V$$

Si on connaît la durée de vie  $T_1$  pour la vitesse de coupe  $V_1$ , et la durée de vie  $T_2$  pour la vitesse de coupe  $V_2$ , alors on peut déterminer facilement  $C_v$  et  $k$ .

$$K = \frac{\text{LOG } T_0 - \text{LOG } T_1}{\text{LOG } V_0 - \text{LOG } V_1} \quad C_v = 10^{(\text{LOG } T - K \text{ LOG } V)}$$

$K$  dépend surtout de l'outil. Il est seulement possible de dire qu'il se situe entre (-12 et 1).

$C_v$  dépend surtout du matériau usiné et des conditions de coupe. Il est encore plus difficile de lui donner un ordre de grandeur :  $10^4 < C_v < 10^{14}$

Dans la pratique, on trouvera la valeur de la vitesse de coupe dans des bases de données fournies par les fabricants qui ont réalisés des campagnes expérimentales pour déterminer les valeurs de  $C_v$  et de  $k$  en fonction des caractéristiques de leurs outils (matière, revêtement, géométrie, ...).

### **II.3.2.3. Modèle de COLDING :**

Ce modèle (1958-1960) [7] est construit à partir des polynômes de la forme:

$$K + a.X + C.Y - Z + K.X.Z = 0$$

$$\text{Ou } K + aX + bX^2 + cY + dY^2 + cZ^2 - Z + f.X.Y + g.Y.Z + h.X.Z = 0$$

Avec  $X = \log F$ ,  $Y = \log V$  et  $Z = \log T$ .

La complexité de ce modèle et la difficulté d'obtenir toutes les constantes  $a, b, c, d, e, f, g, h$ , pour chaque cas le rendent très peu exploitable. Il rend pourtant compte des diverses particularités du phénomène de coupe, notamment de l'existence de valeur optimale de l'avance que les modèles plus simples ne laissent pas apparaître.

### **II.3.2.4. Modèles de KONING-DEPIEREUX (1969) :**

$$T = e^{(-\alpha.V^v - \gamma.a^u - \sigma.f^\lambda)}$$

Ce modèle conduit à une représentation correcte de la loi d'usure et son type exponentiel est en accord avec les courbes expérimentales qui déterminent l'usure des outils.

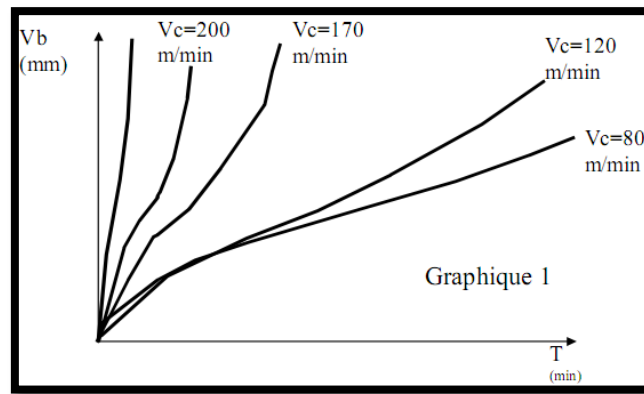
### **II.3.3. Établissement des lois d'usure :**

Lorsque l'on effectue l'usinage d'une pièce dont seule  $V_c$  varie, on obtient les courbes suivantes.

La norme préconise les valeurs d'usure suivantes :

- ❖ Outil ARS ou carbure :  $V_B = 0.3$  ;  $V_B \text{ max} = 0.6$
- ❖ Outil carbure :  $K_T = 0.03 + 0.3f$

Le critère le plus souvent retenu est  $V_B = 0.3$



**Figure II.16:** *Établissement des lois d'usure.*

- ✓ Le critère étant défini ( $V_B = cte = 0.3$ ), le graphique 1 nous donne différentes valeurs qui permettent d'obtenir un nouveau graphique  $T = f(V)$ .

#### **II.3.4. Détermination de la loi d'usure :**

##### **\*Principe :**

La détermination des coefficients du modèle de la loi d'usure se fait à partir d'essais à paramètres de coupe constants. Chaque courbe d'usure frontale en fonction du temps de coupe permet de définir un point figuratif de la loi d'usure. Pour déterminer l'influence des trois conditions de coupe (pénétration, avance, vitesse de coupe) il est nécessaire d'effectuer un nombre minimal d'essais.

Nous utiliserons un plan d'expériences comportant 9 essais qui permet de tester 3 valeurs des 3 conditions de coupe dans le cas où il n'y a pas d'interaction entre elles. La réalisation complète de ces essais ne peut se faire dans le cadre d'un TP de courte durée ; aussi, un seul essai sera effectué. La détermination de la loi d'usure se fera à l'aide du résultat de cet essai et des résultats obtenus antérieurement.

La méthode des plans d'expériences n'est pas une technique nouvelle, mais il a fallu attendre les travaux du Docteur TAGUCHI au Japon pour qu'elle soit plus largement utilisée. Cette méthode permet une diminution souvent importante du nombre d'essais par rapport aux techniques traditionnelles de tâtonnements successifs.

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

### II.3.4.1.Méthode traditionnelle :

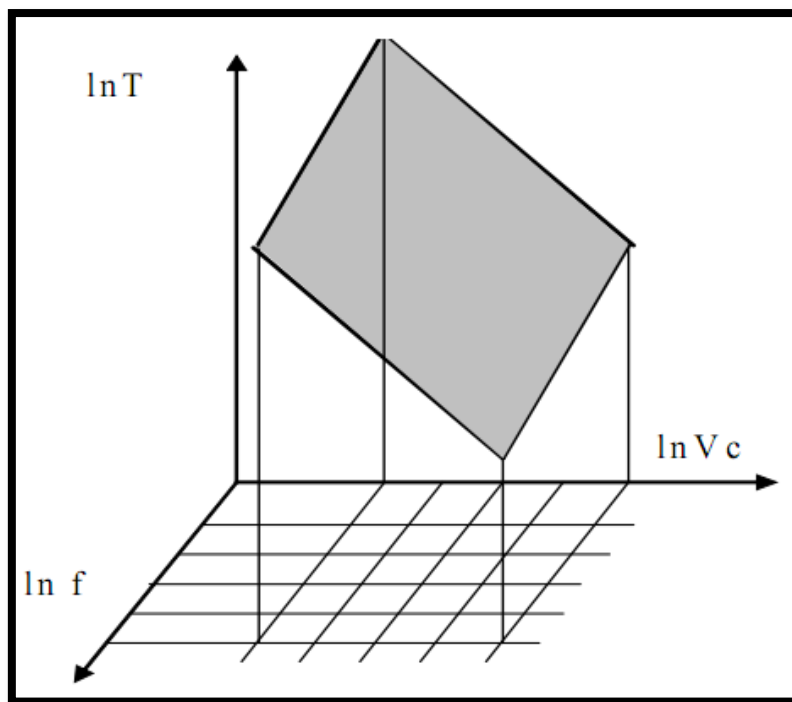
Supposons que l'on désire étudier l'influence des conditions cinématiques de l'usinage sur la durée de vie  $T$  des outils de coupe. Chacun des facteurs (vitesse de coupe  $V_c$  et avance  $f$ ) peut prendre plusieurs valeurs comprises entre un mini et un maxi.

La démarche traditionnelle, définie par les normes ISO, consiste à étudier séparément les deux facteurs  $V_c$  et  $f$ . On fixe  $f$  à un niveau moyen et on détermine la valeur de la durée de vie de l'outil lorsque  $V_c$  varie de sa valeur mini à sa valeur maxi à l'aide de 5 expériences par exemple.

On procède de même pour étudier l'influence de l'autre facteur  $f$ .

Ces essais permettent de savoir comment agit  $V_c$  quand  $f$  est au niveau moyen, mais ne permettent pas de connaître son action quand  $f$  est au niveau mini ou maxi.

Pour ce faire, il est nécessaire de réaliser un maillage du domaine de validité des deux facteurs  $V_c$  et  $f$  et d'exécuter un essai à chacun des nœuds du maillage (figure II.17) ; il faut alors réaliser 25 expériences pour connaître la loi  $T(V_c, f)$ .



**Figure II.17** : Durée d'outil en fonction de  $V_c$  et  $F$ .

- ✓ Si l'on désire aussi étudier l'influence de la pénétration en prenant 5 valeurs pour ce nouveau facteur, il faudrait alors réaliser 125 essais, ceux-ci correspondent à un plan factoriel complet.

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

### II.3.4.2.Plans factoriels complets :

#### \* Définition :

L'étude d'un plan complet consiste à étudier toutes les combinaisons possibles des facteurs pris en considération dans l'expérience. Pour k facteurs à n niveaux, le plan complet comporte donc  $n^k$  essais.

Pour illustrer l'étude des plans complets nous allons prendre comme exemple l'influence des conditions cinématiques de l'usinage ( $V_c$  et  $f$ ) sur la durée d'outil  $T$  avec seulement 2 niveaux par facteur. Le plan complet comporte donc 4 essais (figure II.18).

La réponse, caractéristique de la durée d'outil, diminue de 1 quand l'avance passe du niveau 1 au niveau 2 ; elle diminue de 1,5 quand la vitesse passe du niveau 1 au niveau 2.

L'effet global de l'avance est de 1.

L'effet global de la vitesse est de 1,5.

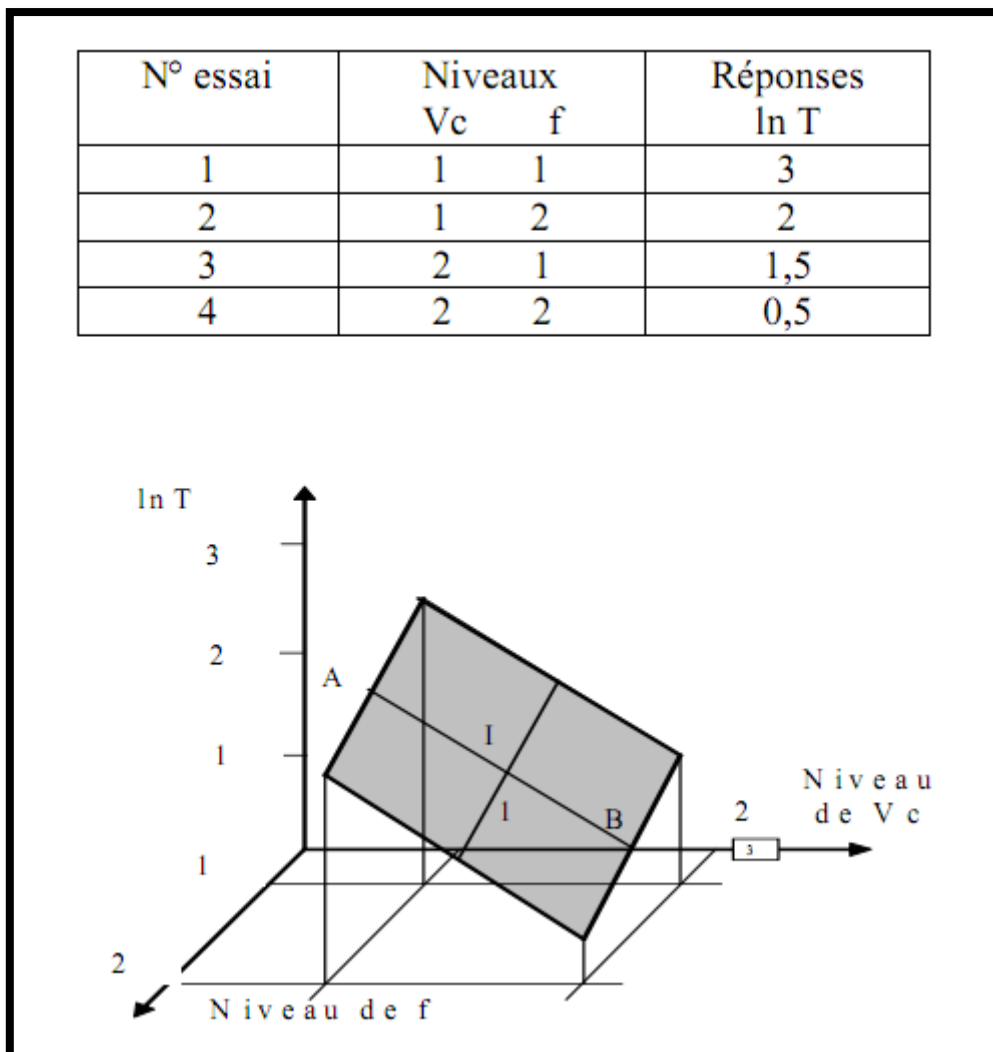


Figure II.18 : Plans factoriels complets.

## Chapitre II Fondements théoriques du mécanisme d'usure des outils de coupe.

### **II.3.4.3. Calcul des effets moyens :**

Les effets moyens sont calculés par rapport à la moyenne générale des essais qui correspond au point central du domaine de validité des facteurs (point I sur figure II. 18) L'effet moyen de l'avance au niveau 2 est obtenu par :

$E_{f2}$  = moyenne des réponses pour  $f$  au niveau 2 – moyenne générale.

De même :

$E_{f1}$  = moyenne des réponses pour  $f$  au niveau 1 – moyenne générale.

$E_{Vc2}$  = moyenne des réponses pour  $V_c$  au niveau 2 – moyenne générale.

$E_{Vc1}$  = moyenne des réponses pour  $V_c$  au niveau 1 – moyenne générale.

### **II.4. Conclusion :**

Les outils de coupe s'usent parce que les surfaces d'usure (face de coupe et de dépouille) de l'outil doivent supporter des charges normales élevées et parce que le copeau et la pièce appliquent ces chargements lors de mouvements relatifs sévères par rapport aux surfaces d'usure.

Les actions de coupe et de frottement sur ces surfaces de contact augmentent la température du matériau d'outil, ce qui accélère l'usure physique et chimique de ce dernier.

Pour enlever de la matière à la pièce, ces mouvements et ces forces sont nécessaires, donc l'usure de l'outil est un problème majeur qui se pose aux industries de la fabrication mécanique et en particulier lors de l'usinage des matériaux durs. Malheureusement il y a de nombreuses variables à considérer, il n'est donc pas surprenant que l'expertise de l'usure des outils et les décisions de changement d'outil soient des problèmes difficiles.

# *Chapitre III*

## *Les revêtements*

### *Pour outils-coupants*

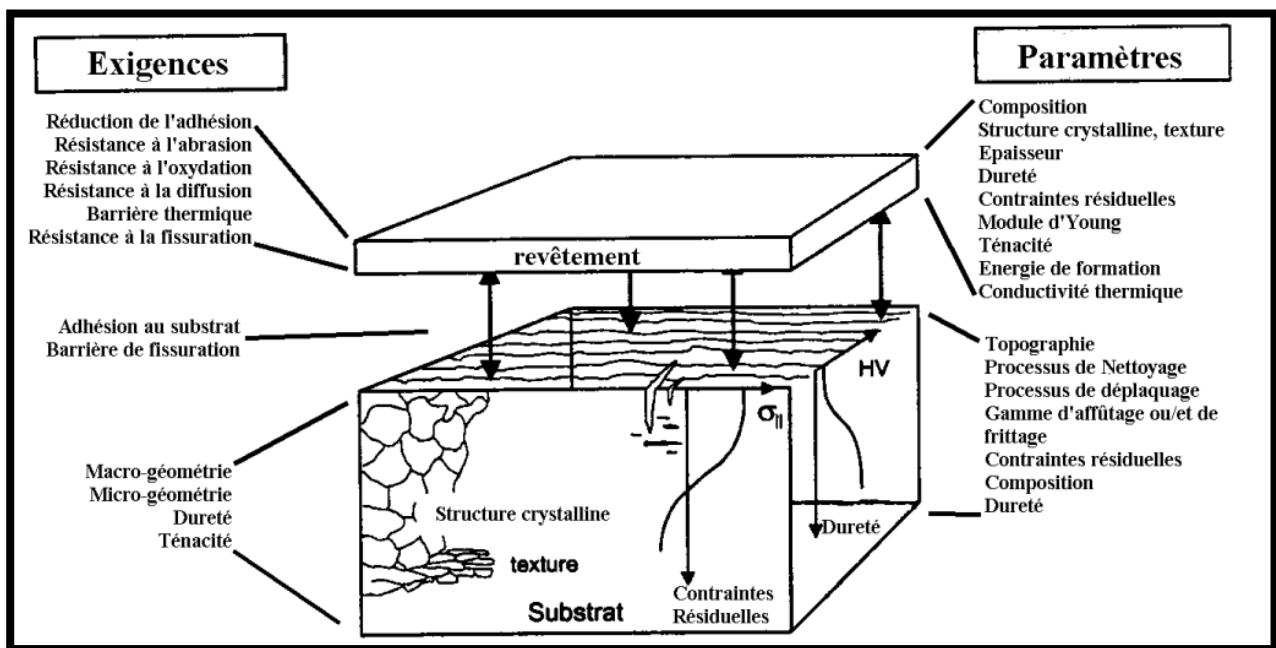
**III.1. Les revêtements :**

Les revêtements sont depuis quelques années un nouvel axe de recherche dans le monde Industriel afin d'améliorer les conditions de coupe et la productivité. Ils prennent une place de plus en plus importante dans le monde de l'usinage, puisque en 2001, 90% des outils carbures Fabriqués sont revêtus [10].

Le principe consiste à recouvrir d'un film mince (jusqu'à 10 µm d'épaisseur) les outils en matériaux ayant des propriétés particulières comme par exemple une très grande dureté (2000 à 3200 HV) ou des coefficients de frottements faibles.

Comme nous pouvons le voir sur la (Figure III-1), le rôle recherché pour le revêtement est complexe. Il doit à la fois protéger le substrat de l'usure (adhésion, abrasion, oxydation, diffusion), faire office de barrière thermique, résister à la fissuration et tout ceci grâce à un dépôt d'épaisseur très faible [10].

Actuellement, les revêtements les plus couramment utilisés sont les carbures de titane (TiC), les nitrures de titane (TiN), les carbonitrures de titane (TiCN) ou l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).



**Figure III.1:** Représentation des exigences envers les revêtements et des paramètres à maîtriser pour répondre aux exigences [9].

**III.2.L'intérêt des revêtements de surfaces :**

Les outils de coupe sont maintenant presque tous munis de revêtements qui sont devenus l'un des principaux facteurs de leur efficacité.

Pour assurer un usinage efficace il ne suffit plus de savoir choisir la meilleure forme d'outil pour la fabrication envisagée, il faut aussi déterminer le revêtement le mieux approprié. Il ne suffit pas que l'outil enlève des surépaisseurs de métal, il faut aussi qu'il laisse derrière lui une surface utilisable et que l'opération soit aussi peu coûteuse que possible. Un bon revêtement doit limiter les échauffements, éviter les soudures à froid, augmenter les vitesses de coupe et les profondeurs de passe, diminuer les efforts de coupe et contribuer à l'obtention d'un bon état de surface. Il doit aussi s'user lui-même très peu.

**III.2.1.Matériaux de coupes :**

Le carbure métallique Wc-Coa été développé en 1923 et amélioré plus tard l'ajout de TiC et TaC .en 1969 apparît le revêtement CVD .Le carbure revêtu est depuis très largement utilisé .La base cermet TiC-TiN voit le jour en 1974.Actuellement, "le carbure revêtu pour l'ébauche et le cermet pour la finition" est une tendance vérifiée et bien établie [3].

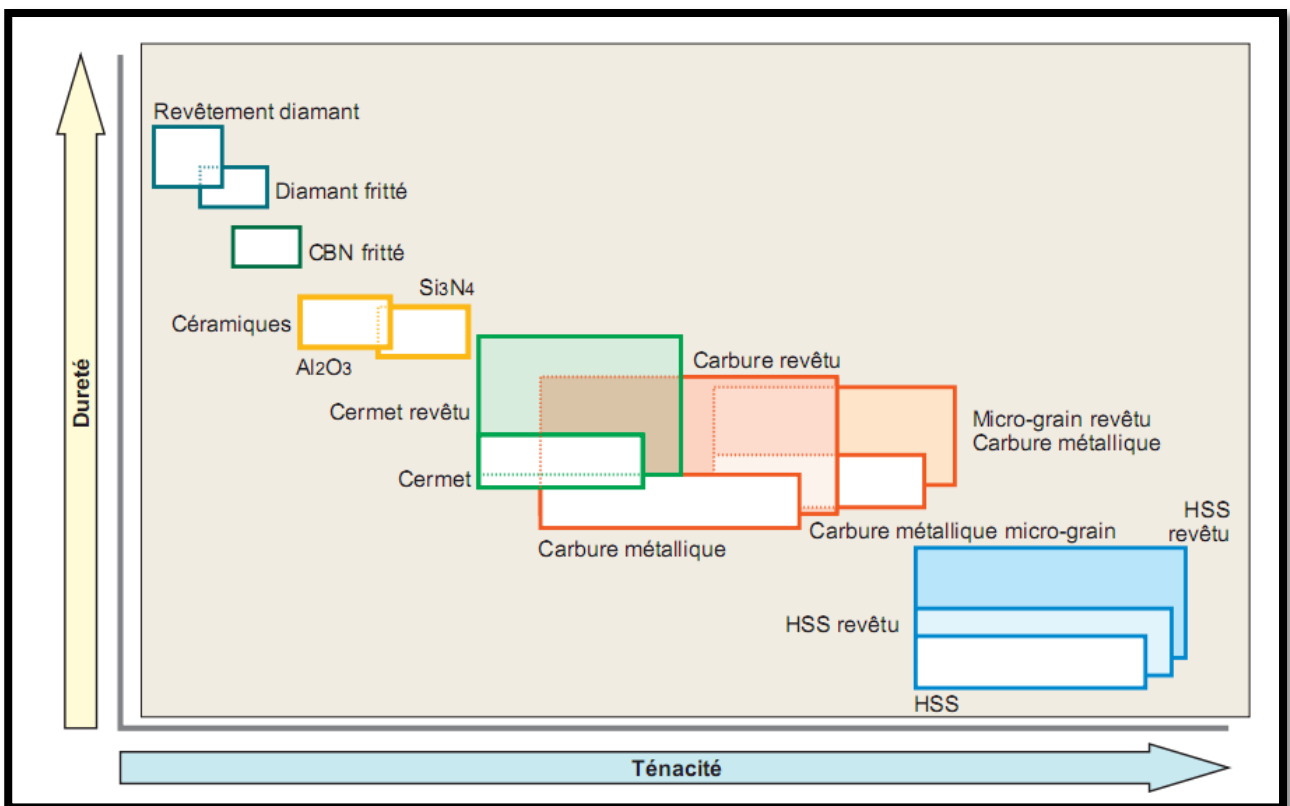


Figure III.2: Matériaux de coupes [13].

**III.2.2. La dureté :**

C'est un facteur essentiel car les plus grandes durées de vie ne peuvent être obtenues qu'avec des surfaces très dures. Toutefois, une très grande dureté ne garantit nullement une grande durée car bien d'autres facteurs entrent en jeu.

Il s'agit d'une qualité nécessaire mais pas suffisante. Les dépôts de diamant par CVD ont une dureté qui peut atteindre 20 fois celle des dépôts PVD ; la vitesse de coupe est pratiquement triplée par rapport aux mêmes outils non revêtus et ils constituent le meilleur choix pour l'usinage de beaucoup de métaux non ferreux.

**III.2.3. La résistance à l'usure :**

Il s'agit avant tout de la résistance à l'abrasion, mais elle ne garantit pas les outils contre le bris des arêtes ou la formation d'arêtes rapportées par soudure à froid.

**III.2.4. Le coefficient de frottement :**

Il doit être aussi faible que possible pour limiter les échauffements qui sont toujours nuisibles à la durée de vie des outils. Un faible coefficient de frottement favorise l'écoulement des copeaux sur les plaquettes de coupe et permet d'obtenir de meilleurs états de surfaces.

**III.2.5. La résistance au grippage :**

elle doit être étudiée en fonction du matériau à travailler, il s'agit avant tout d'éviter la formation des arêtes rapportées qui se produisent souvent lors de l'usinage de l'aluminium, du cuivre ou des aciers inoxydables.

**III.3. Les principaux revêtements utilisables :****III.3.1. Nitrure de titane (TiN) :**

C'est un traitement standard obtenu par déposition physique en phase vapeur. La dureté de surface atteint 81 HRc, le coefficient de frottement lors de la coupe est d'environ 0,4 et la stabilité thermique est assurée jusqu'à environ 550 °C. Ce traitement est adapté à la coupe de beaucoup de matériaux, en particulier les métaux ferreux, les aciers courants alliés et non alliés, les aciers durs et les aciers rapides [3 ; 12 ; 13].

**III.3.2. Carbonitrure de titane (TiCN) :**

La dureté est plus importante, jusqu'à 90 HRc et le coefficient de frottement plus faible, environ 0,3. Ce revêtement convient parfaitement pour la coupe de matériaux réputés difficiles comme les aciers moulés, les alliages d'aluminium, les aciers à outils, le cuivre, l'inconel, les alliages de titane et les métaux non ferreux en général [3 ; 12 ; 13].

**III.3.3. Nitrure de titane et d'aluminium (TiAlN) :**

Ce revêtement à hautes performances procure une dureté de surface pouvant atteindre 80 HRC. Il garde sa dureté à haute température grâce à la formation d'une couche d'alumine mauvaise conductrice de la chaleur qui permet d'évacuer un maximum de calories en les transférant dans les copeaux plutôt que dans l'outil lui-même.

Il devient possible d'atteindre des vitesses de coupe très élevée avec très peu de liquide de refroidissement, ou même pas du tout. Le faible coefficient de frottement permet d'usiner des matériaux abrasifs comme l'acier moulé, les alliages d'aluminium, les aciers à outils ou encore les alliages de nickel [3 ; 12 ; 13].

**III.3.4. Nitrure d'aluminium et de titane (AlTiN) :**

La proportion d'aluminium est plus grande, la surface est plus dure et le revêtement est mieux protégé de l'oxydation car la couche d'alumine qui se forme est plus épaisse.

La coupe à haute température et à haute vitesse devient possible [3 ; 12 ; 13].

**III.3.5. Borure de titane (TiB2) :**

Ce revêtement est plus dur que les précédents et sa surface est très lisse, ce qui procure un coefficient de frottement très bas, un très bon écoulement des copeaux et une grande résistance à l'usure.

Par son caractère antiadhésif avec de nombreux métaux, il évite la formation d'arêtes rapportées et on l'apprécie pour l'usinage des alliages aluminium-silicium, du titane, du magnésium et des alliages de cuivre [3 ; 12 ; 13].

**III.3.6. Nitrure de chrome (CrN) :**

Il prend un aspect irisé qui lui vaut le sur nom de (**rainbow coating**), traitement artificiel. Malgré une très faible épaisseur, les caractéristiques sont encore meilleur que pour les revêtements précédents ; il résiste très bien à la corrosion, possède une dureté de 90 à 92 HRc, une très bonne

résistance à l'abrasion et aux chocs et un coefficient de frottement extrêmement bas qui peut descendre jusqu'à 0,027.

Ce revêtement est indiqué pour les alliages d'aluminium très chargés en silicium, les aciers inoxydables, Les aciers à haute teneur en nickel, le titane et de nombreux matériaux composites.

En outre, ils s'adaptent très bien aux situations difficiles qui amènent à la formation d'arêtes rapportées [3 ; 12 ; 13].

**III.3.7. Diamant :**

Les revêtements adamantins obtenus par dépôt chimique en phase vapeur offrent actuellement les meilleures performances pour la coupe des métaux non ferreux, le graphite, les matériaux composites à matrice métallique, les alliages légers à haute teneur en silicium et de nombreux autres matériaux abrasifs. Il ne faut pas les utiliser pour usiner les aciers car la chaleur dégagée favorise la dissolution du carbone dans les copeaux et détruit rapidement le revêtement [3 ; 12 ; 13].

**Tableau III.1 : Comparatif des propriétés de certains revêtements [10].**

<i>Revetement</i>	<i>Résistance à l'usure</i>	<i>Résistance chimique</i>	<i>Résistance mécanique</i>	<i>Résistance au frottement</i>
<b>TiC</b>	<i>Excellents</i>	<i>mauvais</i>	<i>mauvais</i>	<i>bon</i>
<b>TiN</b>	<i>bon</i>	<i>bon</i>	<i>bon</i>	<i>Excellents</i>
<b>Ti(C,N)</b>	<i>moyen</i>	<i>moyen</i>	<i>moyen</i>	<i>Tres bon</i>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<i>Tres bon</i>	<i>Excellents</i>	<i>Excellents</i>	<i>bon</i>

- ❖ Des dépôts plus durs sont désormais utilisés, comme les nitrures de bore cubique (CBN) ou les dépôts diamants. Dans ces cas-là, c'est la dureté qui est recherchée afin de faciliter la résistance à l'usure.

Le dépôt peut être monocouche ou multicouche. L'intérêt du multicouche est de pouvoir cumuler les propriétés de chaque dépôt et d'avoir une meilleure résistance à la fissuration.

Le principe du dépôt multicouche permet aussi d'envisager des revêtements plus complexes, comme par exemple des revêtements composés de métaux et métalloïdes comme le (Ti,Cr) N, le (Ti,V)N ou le Ti(B,N).

De nombreux revêtements sont mis au point, car l'évolution des outils de coupe est, aujourd'hui, davantage basée sur l'évolution des revêtements que sur celle des substrats.

L'évolution des revêtements est devenue très rapide, alors qu'elle était quasiment inexistante il y a 20 ans. Cela est dû en grande partie à l'évolution de l'usinage à grande vitesse et à sec.

Actuellement, environ 90% des outils carbure en vente sont désormais revêtus. Les outils complexes comme les forêts sont revêtus par le procédé CVD (Chemical Vapor Déposition) et les outils de type plaquette carbure sont plutôt revêtus par le procédé PVD (Physical Vapor Déposition) [3 ; 12 ; 13].

Les coûts de revient des revêtements ont beaucoup baissé et sont désormais assez faibles par rapport aux autres facteurs intervenant dans l'usinage:

- pièce produite,
- frais d'immobilisation du matériel et d'amortissement des machines,
- coût de la main d'œuvre.

#### **III.4. Les procédés de fabrication des revêtements :**

Les revêtements utilisés industriellement pour l'usinage se partagent en deux familles principales qui se différencient par le mode de déposition (CVD ou PVD) du revêtement sur le substrat.

Les propriétés qui en découlent sont différentes : dureté, adhésion, cristallisation, comportement mécanique, etc. Quel que soit le mode de déposition, il est nécessaire de suivre scrupuleusement le processus suivant :

- ✓ le substrat doit être parfaitement décapé, afin de faire disparaître toute trace de graisse, hydrocarbure ou dépôt organique. La première étape consiste donc en une opération de nettoyage dans des bains successifs de solvants organiques : trichloréthylène, acétone, alcool.
- ✓ le substrat ne doit pas être pollué en surface par des éléments métalliques. En effet ces derniers pourraient créer localement des hétérogénéités néfastes à la bonne résistance et à l'adhérence du dépôt. La deuxième étape consiste alors en un bain oxydant (acide sulfurique), puis un bain réducteur (acide fluorhydrique) et enfin un bain permettant un dépôt d'oxyde natif protecteur pour éviter toute ré-contamination (acide chlorhydrique)
- ✓ par précaution un troisième nettoyage sous argon sera réalisé dans l'enceinte même du four de déposition ;

- ✓ dans l'enceinte du four sous vide, une vaporisation du revêtement à déposer est réalisée. Cette vaporisation va bien sûr dépendre du procédé (évaporation, pulvérisation, plasma, etc.) [3 ; 12 ; 13].
- ✓ Le dépôt du revêtement sur le substrat se déroule par croissance continue de la couche déposée (coalescence). Le mode d'adhésion du revêtement sur le substrat dépend de la nature de l'interface : mécanique, de diffusion, de pseudo-diffusion ou chimique.
- ❖ Le choix du mode de déposition doit se faire en fonction des caractéristiques du dépôt et du mode de déposition. La Société Française du Vide a établi un tableau comparatif des modes de dépôt (tableau III.2).

**Tableau III.2 : Comparatif des modes de dépôt [9].**

Caractéristiques	Mode de production	Vitesse de dépôt	Dépôt sur formes complexes	Dépôt sur surface poreuse	Perturbation à l'interface de croissance	Chauffage du substrat par moyens externes
<b>Dépôt CVD</b>	Réaction chimique	200à2500Å/min	Bons résultats	Résultats moyens et limités	Oui	Oui
<b>Dépôt PVD</b>	Energie thermique	Jusqu' à et ions	Peu recommandé	Résultats médiocres	Non	Oui

**III.4.1.Le dépôt CVD (dépôt chimique en phase vapeur) :**

Le dépôt de type CVD est apparu dès les années 1960, mais il est réservé aux substrats de type carbure résistants aux hautes températures. En effet, le procédé impose un revenu élevé au substrat. Les dépôts CVD permettent des épaisseurs de l'ordre de quelques microns (5 à 12 en moyenne) [11].

Les éléments déposés en CVD sont généralement des revêtements :

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

Les dépôts CVD sont basés sur l'obtention d'un dépôt par vaporisation à haute température à l'intérieur du four sous vide.

Ce procédé comporte des avantages et des inconvénients :

- ✓ grande dureté des dépôts ;
- ✓ grande variété des matériaux déposés ;
- ✓ forte épaisseur (12  $\mu\text{m}$ ) qui permet d'obtenir une durée de vie importante, mais qui peut modifier la géométrie des outils (acuité d'arête) ;
- ✓ possibilité de dépôt sur des pièces complexes ;
- ✓ bonne adhérence (en particulier sur substrat de type carbure).
- ✓ température de dépôt élevée ce qui peut provoquer une modification de l'état du substrat (structure métallurgique et état des contraintes).

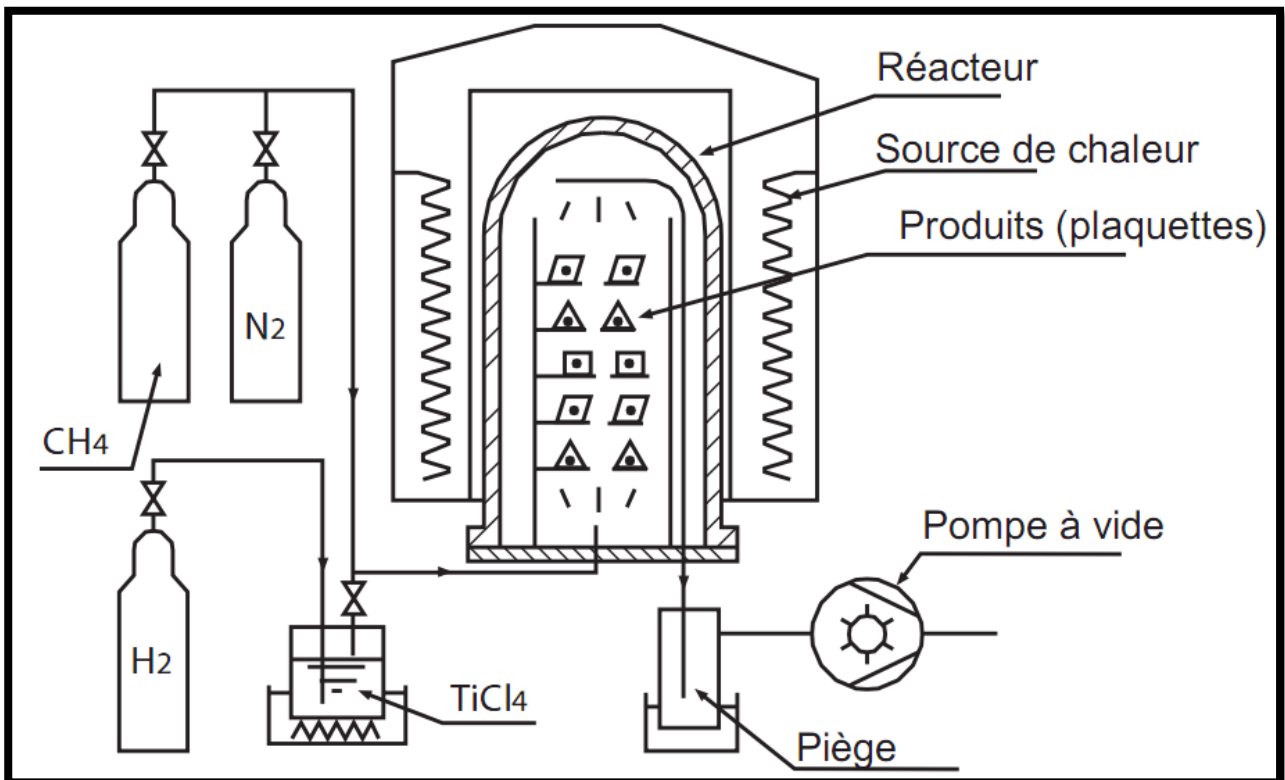


Figure III.3 : CVD (Dépôt chimique en phase vapeur) [11].

#### III.4.1.1. Caractéristiques le dépôt CVD :

- Dépôt uniforme sur la surface ;
- Facilité d'application pour un dépôt multicouche ;
- Possibilité de revêtement épais ;
- Température de traitement : 900~1100 °C.

### III.4.2. Le dépôt PVD (dépôt physique en phase vapeur) :

Industrialisé depuis 1978, cette technique présente les avantages suivants :

- ✓ dépôt d'une grande variété de matériaux inorganiques (métaux, alliages, etc.) à cause de son extrême versatilité ;
- ✓ faible température du dépôt qui permet de garder l'intégrité physique du substrat ;
- ✓ possibilité de faire des revêtements multicouches ;
- ✓ possibilité de faire varier la température du substrat dans de très larges limites, depuis des températures inférieures à 0°C, jusqu'à de très hautes températures ;
- ✓ très haute dureté des dépôts ;
- ✓ faible épaisseur des dépôts, ce qui permet d'assurer la constance de la géométrie des outils,
- ✓ excellente liaison avec le substrat ;

Comme tout procédé industriel, il a aussi ses inconvénients :

- ✓ vitesse de dépôt faible ;
- ✓ nécessité de revêtir des formes simples.

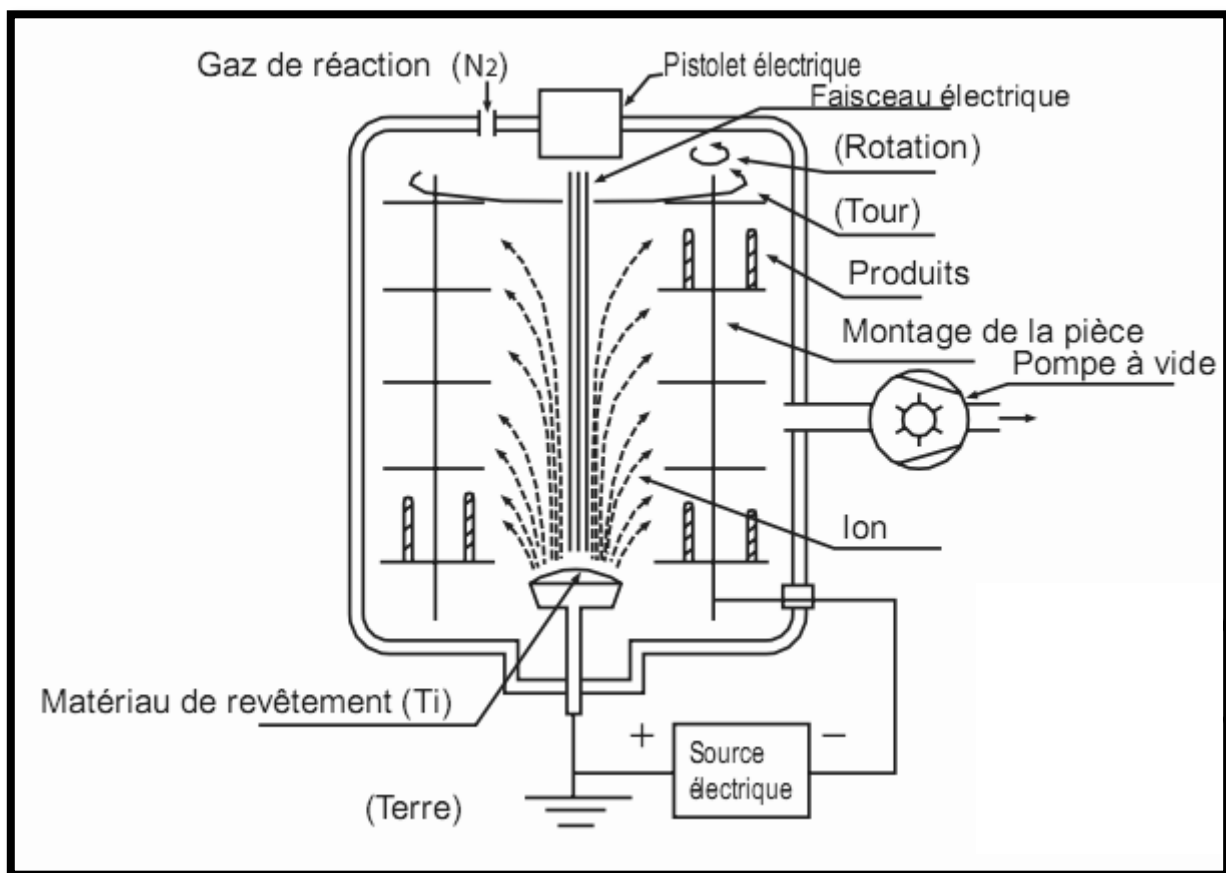


Figure III.4 : PVD (Dépôt physique en phase vapeur) [11].

**III.4.2.1. Caractéristiques Le Dépôt PVD :**

- Absence de détérioration ;
- Pas de perte de résistance à la flexion ;
- Excellente résistance à l'écaillage ;
- Température de traitement : 400~600 °C.

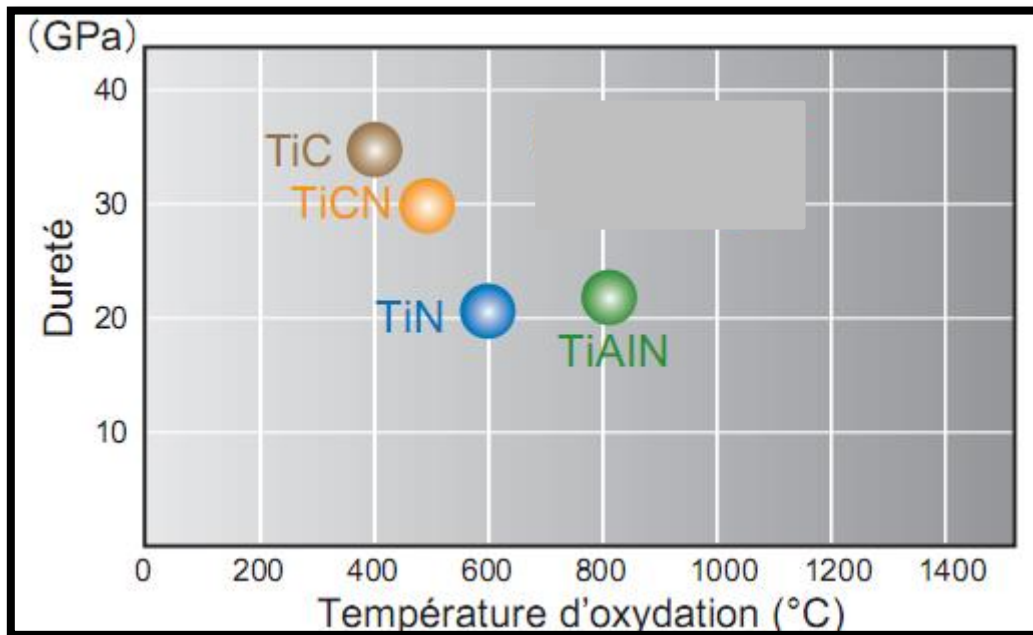


Figure III.5 : Propriétés des revêtements PVD

**III.5. Carbure revêtu CVD :**

Les nuances de carbure revêtu CVD sont basées sur la technologie céramique à couches minces et assurent une coupe stable et efficace à des vitesses élevées ou lors d'applications impliquant des chocs importants [3 ; 12 ; 13].

**III.5.1. Caractéristiques du carbure revêtu CVD :**


- Applicable à la coupe de faible à haute vitesse et de la finition à l'ébauche ;
- La ténacité et la résistance aux fissures supérieures permettent une coupe stable ;
- Le contrôle efficace des copeaux pris en charge par les brise-copeaux permet de réduire les temps de coupe [3 ; 12 ; 13].



III.6.2. Cermet Revêtu PVD :

Le cermet revêtu PVD est un substrat cermet avec une fine couche à haute résistance à l'usure et à l'adhérence grâce à la technologie PVD (dépôt physique en phase vapeur). La température de traitement du PVD étant généralement inférieure à celle du CVD, Le cermet revêtu PVD présente une moins grande sensibilité à la détérioration et une plus grande résistance à la flexion, voir le (Tableau III.4) [3 ; 11].

Tableau III.4 : Caractéristiques du cermet et du cermet revêtu PVD [11].

Matériau de la pièce	Symbole		Couleur	Composant principal (Composition du revêtement)	Avantages
	Cermet	<b>TN6010</b> (Super Micro-Grain)	<b>Gris</b>	<b>TiCN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surface de cermet amélioré grâce à une résistance à l'usure et une ténacité supérieures</li> <li>• Application : Cermet non revêtu économique pour l'acier</li> </ul>
		<b>TN60</b>	<b>Gris</b>	<b>TiCN+NbC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cermet généralement recommandé avec une résistance à l'usure et une ténacité supérieures</li> <li>• Application : Coupe de l'acier et de l'acier inoxydable</li> </ul>
		<b>TN6020</b> (Super Micro-Grain)	<b>Gris</b>	<b>TiCN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cermet super micro-grain avec une résistance à l'usure et une ténacité supérieures</li> <li>• Application : Première recommandation de cermet pour la coupe de l'acier et de l'acier inoxydable</li> </ul>
		<b>TN100M</b>	<b>Gris</b>	<b>TiCN+NbC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cermet tenace avec une meilleure résistance à l'oxydation et aux variations de température</li> <li>• Application : Fraisage à haute vitesse de l'acier</li> </ul>
		<b>TC40</b>	<b>Gris</b>	<b>TiC+TiN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bon équilibre entre résistance à l'usure et ténacité</li> <li>• Application : Rainurage et filetage de l'acier</li> </ul>
	PVD	<b>PV7020</b> (Super Micro-Grain)	<b>Or</b>	<b>TiCN</b> <b>(TiAlN+TiN)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtement PVD base TiAlN sur cermet super micro-grain</li> <li>• Application : Première recommandation de cermet revêtu par PVD pour la coupe de l'acier, bon équilibre entre résistance à l'usure supérieure et ténacité</li> </ul>




III.6.2. Carbure revêtu PVD :

Les nuances de carbure revêtu par PVD sont basées sur des technologies précises de façonnage des arêtes et de revêtement céramique à couches minces et sont parfaitement adaptées au tournage, au rainurage, au filetage et au tronçonnage de précision. Elles associent un substrat en carbure très solide et une technologie de revêtement innovante qui favorisent une excellente résistance à l'usure et une forte adhérence du revêtement pour prolonger la durée de vie des outils et assurer une coupe stable [11 ; 13].

III.6.2.1. Caractéristiques :

- Adapté aux vitesses faible à élever et de la finition à l'ébauche ;
- Coupe stable et excellente ténacité ;
- La surface fine et lisse du carbure revêtu PVD assure un bon état de surface et une coupe de haute précision.

Tableau III.5 : Caractéristiques du carbure revêtu par PVD [11].

Matériau de la pièce	Symbole	Couleur	Composant principal	Avantages
	<b>PR915</b> (Super Micro-Grain)	Violet-bleu	TiAlN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtement PVD base TiAlN sur carbure super micro grain, résistance à l'usure et à l'oxydation supérieure</li> <li>• Application : Coupe haute précision stable et fiable de l'acier</li> </ul>
	<b>PR930</b> (Super Micro-Grain)	Gris-rouge	TiCN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtement PVD avec base TiCN dure sur carbure super micro-grain</li> <li>• Application : Faible vitesse de coupe, coupe de précision avec arête vive</li> </ul>
	<b>PR1005</b>	Gris-rouge	TiCN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtement PVD base TiCN sur carbure micro-grain dur</li> <li>• Application : Tournage de l'acier standard, durée de vie prolongée grâce à l'anti-adhérence</li> </ul>
	<b>PR1025</b>	Gris-rouge	TiCN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtement PVD base TiCN sur carbure micro-grain</li> <li>• Application : Coupe générale de l'acier et de l'acier inoxydable, stabilité et durée de vie prolongée</li> </ul>
	<b>PR1115</b>	Rouge-violet	TiAlN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtement PVD base TiAlN dure sur carbure super micro-grain</li> <li>• Application : Résistance à l'oxydation supérieure et bon équilibre entre résistance à l'usure et ténacité</li> </ul>
	<b>PR1125</b>	Rouge-violet	TiAlN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtement PVD base TiAlN dure sur carbure super micro-grain, ténacité et résistance à la chaleur supérieure</li> <li>• Application : Finition et coupe légèrement intermittente de l'acier inoxydable</li> </ul>
	<b>PR905</b>	Violet-bleu	TiAlN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtement PVD à surface fine lisse sur carbure dur avec résistance à la déformation plastique</li> <li>• Application : Adapté au fraisage de la fonte grise et à graphite sphéroïdal et au tournage d'alliages Réfractaires</li> </ul>




III.6.3. Carbure :

Le carbure est utilisé dans de nombreuses applications en raison de ses caractéristiques mécaniques supérieures. KYOCERA produit divers types de carbures, notamment le KW10 pour les matériaux non ferreux et les carbures micro-grain pour la coupe de précision [11].

III.6.3.1. Caractéristiques :

- Tenace et dur ;
- Bonne conductivité thermique ;
- Adapté à la coupe de métaux non ferreux et de non-métaux ;
- Coupe stable à des vitesses de coupe faibles, y compris le fraisage.

Tableau III.6: Caractéristiques du carbure [11].

Matériau de la pièce	Symbole	Couleur	Composant principal	Avantages
	PW30	Gris	WC+Co +TiC+T aC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Symbole d'identification ISO du carbure P (K10)</li> <li>• Application : Fraisage de l'acier, résistance à l'usure stable et ténacité</li> </ul>
	KW10	Gris	WC+Co	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Symbole d'identification ISO du carbure K (K10)</li> <li>• Application : Coupe stable de la fonte, des matériaux non ferreux et des non-métaux</li> </ul>
	GW15	Gris	WC+Co	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Symbole d'identification ISO du carbure K (équivalent à K10), carbure micro-grain tenace</li> <li>• Application : Forte résistance à l'usure et ténacité pour la fonte, les matériaux non ferreux et les non-métaux</li> </ul>
	GW25	Gris	WC+Co	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Symbole d'identification ISO du carbure K (K30)</li> <li>• Application : Résistance à l'usure et à l'écaillage stable pour le fraisage de l'aluminium</li> </ul>
	SW05	Gris	WC+Co	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Symbole d'identification ISO du carbure K (K05)</li> <li>• Application : Coupe continue et finition d'alliages de titane offrant une résistance supérieure à l'usure</li> </ul>
	SW10	Gris	WC+Co	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Symbole d'identification ISO du carbure K (K10)</li> <li>• Application : Coupe continue et légèrement intermittente d'alliages de titane offrant une résistance supérieure à l'usure et un résultat stable</li> </ul>
	SW25	Gris	WC+Co	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Symbole d'identification ISO du carbure K (K25)</li> <li>• Application : Coupe intermittente et légèrement intermittente d'alliages de titane offrant un résultat stable</li> </ul>

**III.6.4.Céramique :**

Les plaquettes en céramique peuvent être utilisées à grande vitesse, ce qui permet de réduire les temps d'usinage, toujours coûteux. Les plaquettes en céramique sont recommandées pour les applications de tournage dur d'aciers trempés de 38 à 64HRC ou de tournage de la fonte, de l'ébauche à la finition. Les plaquettes en céramique de KYOCERA sont conçues pour résister à l'oxydation et conserver leur dureté, même à des températures élevées [3;11].



**Figure III.6.** *Plaquettes en céramique.*

**III.6.4.1.Caractéristiques :**

- L'excellente résistance à l'usure garantit des vitesses de coupe élevées ;
- La céramique permet d'obtenir d'excellents états de surface grâce à la faible affinité avec les matériaux de la pièce ;
- La céramique à base de nitrure de silicium possède une résistance aux chocs thermiques supérieure, autorisant ainsi la coupe de la fonte avec arrosage.

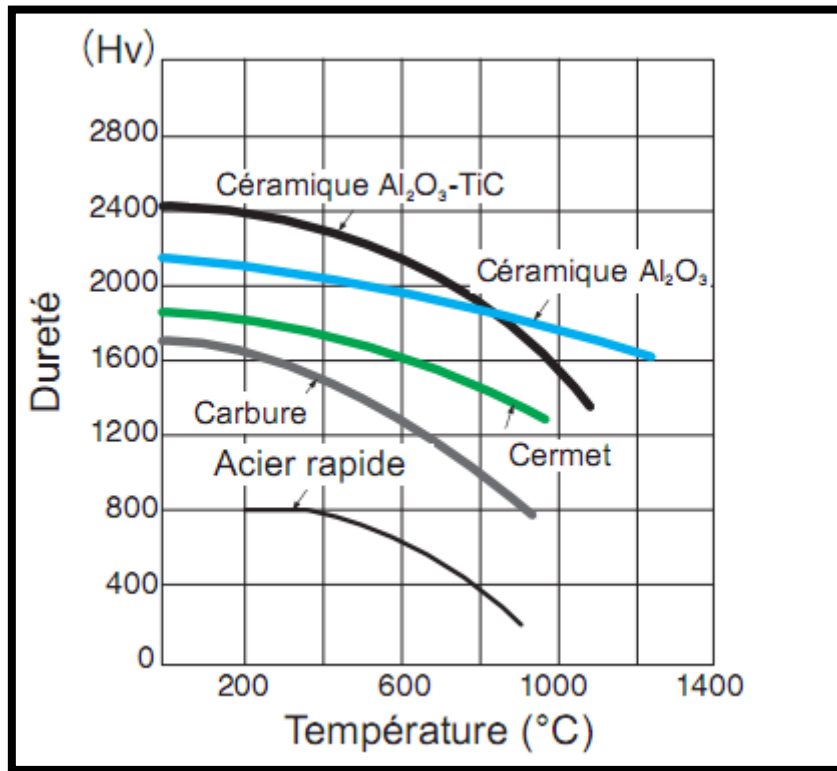


Figure III.7. Dureté à températures élevées [11].

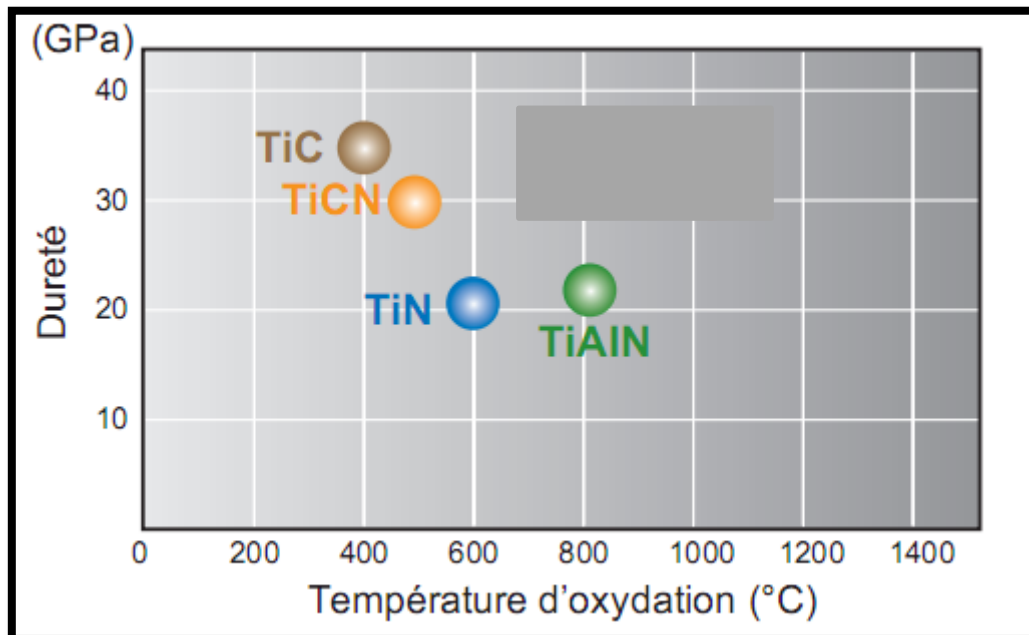
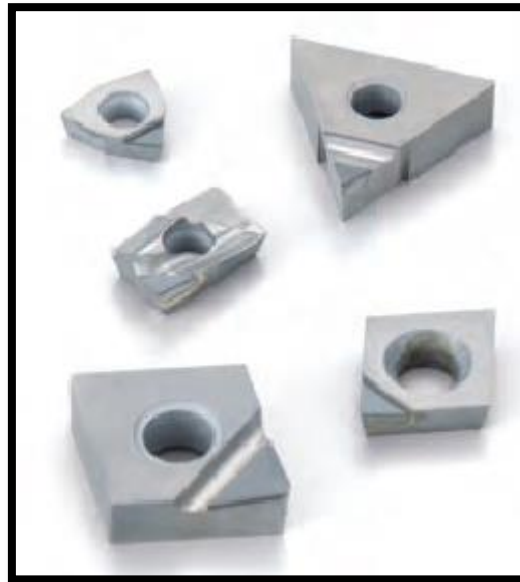


Figure III.8. Propriétés des revêtements PVD [11].

### **III.6.5.PCD (Polycrystalline diamond) :**

Le diamant de KYOCERA est un matériau synthétique fritté à des températures et pressions élevées. Le PCD (diamant poly cristallin) est idéal pour les métaux non ferreux et les non-métaux [3 ; 11].



**Figure III.8.** *Plaquettes en PCD.*

#### **III.6.5.1.Caractéristiques :**

- Applicable aux métaux non ferreux, au tournage de non-métaux, au fraisage et à divers autres types de coupe ;
- Longue durée de vie grâce à une extrême dureté ;
- Possibilité d'atteindre des vitesses de coupe élevées qui améliorent la productivité de la coupe ;
- La surépaisseur réduite des arêtes permet une coupe haute précision ;
- Applications diverses pour la coupe de matériaux non ferreux et de non-métaux ;
- La surface finie présentera un aspect « arc-en-ciel » (l'utilisation du diamant cristal seul ne produira pas de surface finie de type miroir) [3 ; 11].

#### **III.6.6.CBN (Cubic Boron Nitride):**

En matière de dureté, le CBN de KYOCERA occupe la deuxième position, derrière le diamant. Le CBN (nitrure de bore cubique) est un matériau synthétique qui présente une conductivité Thermique élevée permettant une coupe stable [3 ; 11].



**Figure III.9.** *Plaquettes en CBN.*

**III.6.6.1. Caractéristiques :**

- Résistance à l'usure supérieure lors de la coupe de matériaux trempés ;
- Adapté à la coupe à haute vitesse de la fonte et de l'acier fritté ;
- Haute conductivité thermique permettant une coupe stable.

**III.6.7. Cell Fiber :**

Le « Cell Fiber » est un matériau composite constitué d'un noyau fibreux contrôlé (partie grise) et d'un revêtement extérieur (partie blanche).

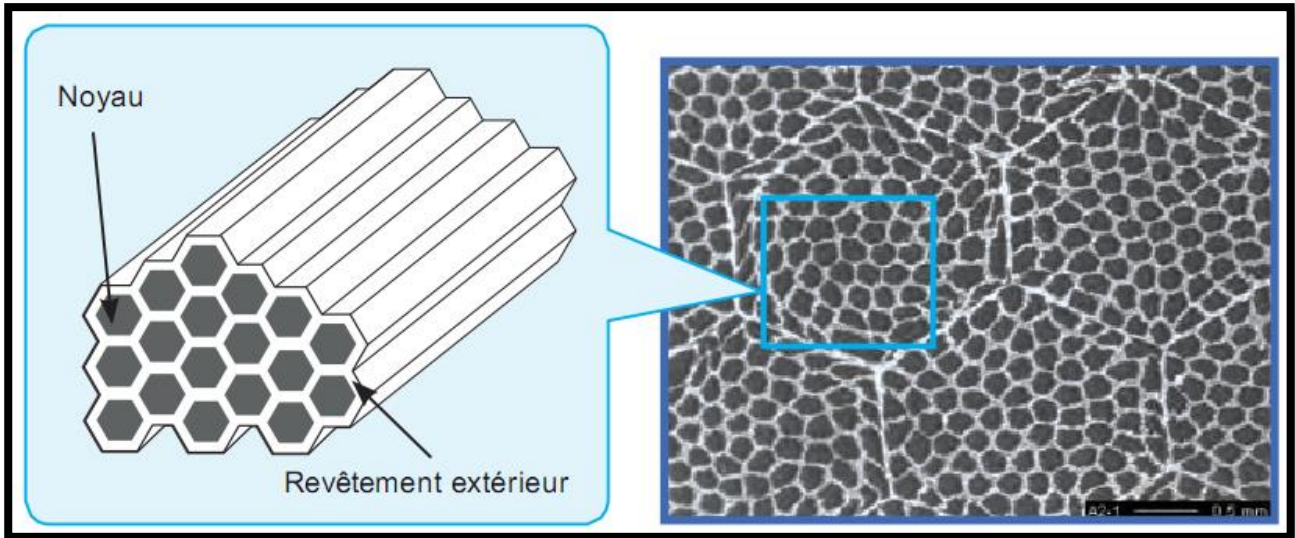


Figure III.10. Structure du Cell Fiber [11].

**III.6.7.1 Caractéristiques :**

- Les plaquettes « Cell Fiber » combinent un noyau résistant à l’usure et un revêtement extérieur robuste
- Le revêtement extérieur robuste bloque les fissures qui se forment dans le noyau.
- Les caractéristiques du matériau « Cell Fiber » sont le fruit d’une combinaison de matériaux et de structures.

Tableau III.7. Caractéristiques du celle fiber [11].



Matériau de la pièce	Symbole	Couleur	Composant principal	Avantages
	<b>KBN35</b> <b>M</b>	<b>Rouge-noirâtre</b>	<b>CBN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matériau composite en CBN « Cell Fiber » composé de CBN résistant à l’usure (noyau) et de CBN résistant (revêtement extérieur).</li> <li>• Application : Coupe stable de l’acier trempé à intermittence</li> </ul>
	<b>CF1</b>	<b>Gris</b>	<b>Céramique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matériau composite en céramique « Cell Fiber » composé de céramique résistante à l’usure (noyau) et de céramique résistante (revêtement extérieur).</li> <li>• Application : Coupe d’alliages réfractaires tels que l’Inconel</li> </ul>

Tableau III.8: Caractéristiques générale des nuances [3].

Matériaux durs	Dureté (HV)	Dispersion énergie (Kcal/g.atom)	Solution dans Fe (%.1250c)	Conductivité thermique (W/m.k)	Expansion* thermique ( $\times 10^{-6}/k$ )	Matériau de coupe
Diamant	>9000	-	Hautement soluble	2100	3.1	Diamant fritte
CBN	>4500	-	-	1300	4.7	CBN fritté
Si3N4	1600	-	-	100	3.4	Céramique
Al2O3	2100	-100	=0	29	7.8	Céramique carbure métallique
TiC	3200	-35	<0.5	21	7.4	Cermet carbure revêtu
TiN	2500	-50	-	29	9.4	Cermet carbure revêtu
TaC	1800	-40	0.5	21	6.3	Carbure métallique
WC	2100	-10	7	121	5.2	Carbure métallique

(\*):  $1W/m.K=2.39 \times 10^{-3} cal/cm.sec^*c$

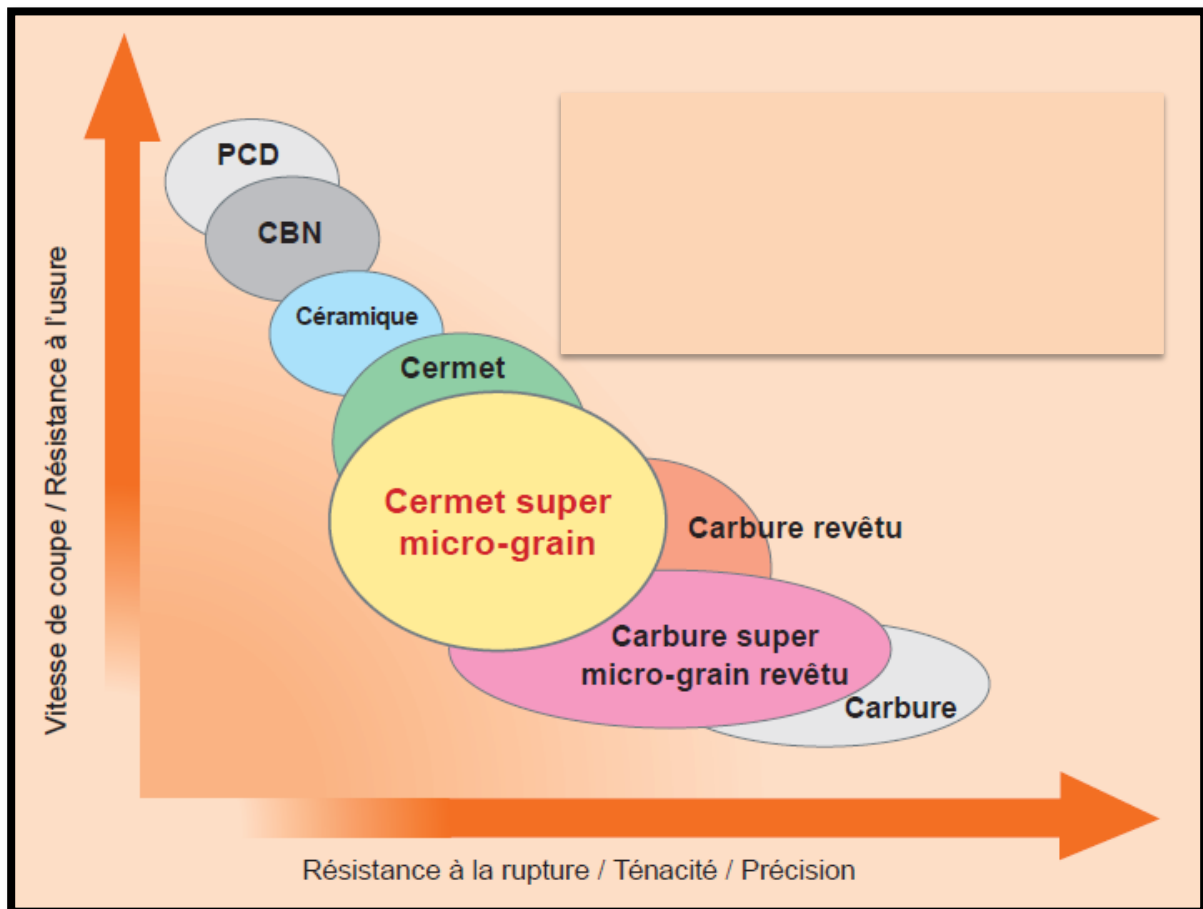


Figure III.11. Récapitulatif des nuances de plaquettes [11].

**III.7. Rôle présumé des revêtements :**

Le rôle recherché dans l'application de revêtements sur les outils est de limiter l'usure des outils durant l'opération d'usinage.

Le dépôt étant d'épaisseur très faible (quelques microns), on ne peut envisager que le revêtement:

- ✓ apporte des caractéristiques de résistances mécaniques.
- ✓ permette de « protéger » le substrat par une couche indestructible.

L'apport du revêtement doit avoir un rôle plus subtil. Les propriétés recherchées sont de type protection thermique : (formation du copeau, frottement du copeau) ou de barrière chimique : (oxydation ou affinité chimique).

De fait actuellement les fabricants spécialisés ont tendance à rechercher les caractéristiques suivantes [9 ; 10] :

- ✓ bonne adhésion au substrat,
- ✓ propriétés mécaniques permettant de résister aux pressions superficielles importantes,
- ✓ faible conductivité thermique (barrière thermique),
- ✓ faible affinité chimique avec les éléments constitutifs du matériau usiné,
- ✓ bonne résistance à l'oxydation à haute température,
- ✓ bon coefficient de frottement pour éviter l'usure par le frottement du copeau.

Les revêtements nouveaux sont à base de :

- ✓ nitrure (bore, aluminium, chrome, titane, etc.) ;
- ✓ titane (bore, carbone, etc.) ;
- ✓ diamant.

Ils permettent d'atteindre les caractéristiques physiques suivantes [9 ; 10] :

- ✓ dureté comprise entre 1800 à 4500 Hv ;
- ✓ conductibilité thermique de l'ordre de 11 à 35 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> ;
- ✓ module d'Young compris entre 300 et 600 daN/mm<sup>2</sup>.

# *Chapitre IV*

*Etude et analyse*

*Expérimentales*

**IV.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique. Ce chapitre va consister aussi en une présentation du matériel qui sert à l'étude des évolutions de l'usure plaquettes utilisées, et des observations microscopiques des plaquettes.

Les essais ont été réalisés dans l'atelier de la commande numérique de l'entreprise MEI (SONALGAZ) de M'Sila, au laboratoire de mécanique de l'université de M'sila.

**IV.2. Présentation du matériel :**

Notre travail repose à la fois sur l'obtention de résultats expérimentaux et sur la mise en place d'outils pour le fraisage des superalliages base cobalt fsx 414 Les usinages ont été réalisés sur un center d'usinage 5 Axes type DMF 180. Figure. IV.1

**IV.2.1. Machine d'essais :**

**Figure. IV.1.** Center d'usinage 5 Axes.

Le center d'usinage 5 Axes de puissance à la broche 35 KW a une gamme de vitesses comprise entre 20 et 18000 tour /mn et l'avance rapide entre 0 et 2000.

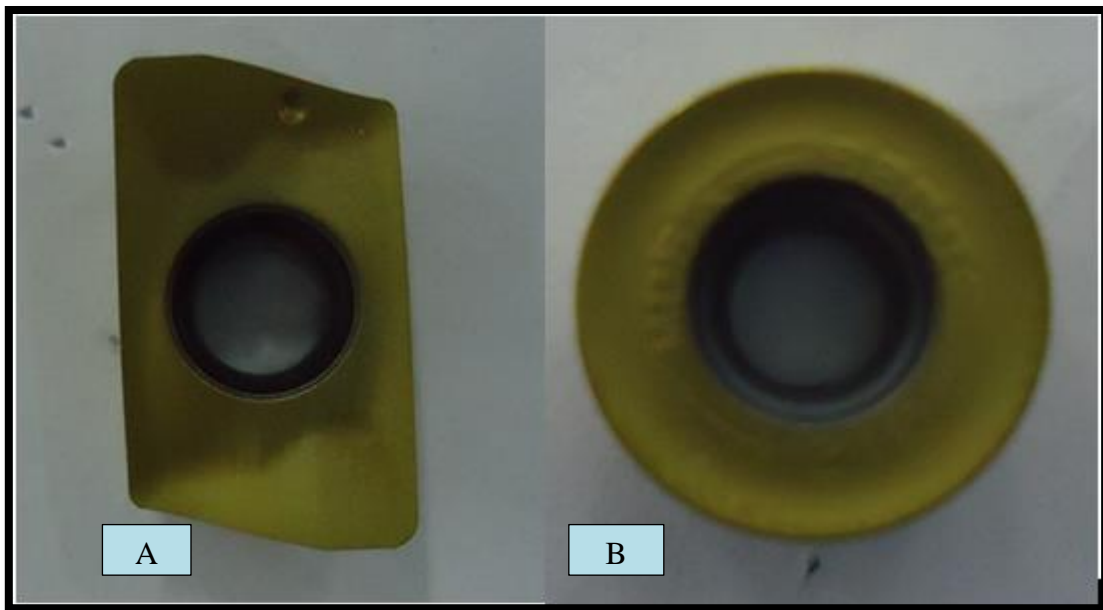
\* Le travail a été effectué avec lubrification

### IV.2.2. Plaquettes utilisées

Les plaquettes utilisées sont : plaquettes de référence XOMX 090308TR F40M et RPHT1204 M0T– M08.F40M, Nuance revêtue PVD pour le fraisage fin et la moyenne ébauche avec avances faibles et/ou vitesse de coupe basses.

Excellents en fraisage quand il y a des risques de vibrations et pour l'usinage avec arrosage. Recommandée pour l'usinage des superalliages.

Le type de revêtement est : le nitrure d'aluminium et de titane (Ti, Al) N sont utilisées comme Outils de coupe. Elles sont fixées sur des corps d'outils qui ont été spécialement conçus pour le Fraisage.



**Figure. IV.2.** Plaquettes utilisées type (**A** : XOMX 090308TR F40M et **B** : RPHT1204 M0T– M08.F40M).

En considérant l'ensemble des résultats à obtenir et des facteurs influents à priori, sur leur Niveau, on peut établir un bilan récapitulatif :

- Résultats à observer,
- Suivi d'usure des plaquettes,
- Relevé de profil des plaquettes usées,

**IV.2.3. Matière à usiner :**

Superalliage base cobalt (fsx414) de caractéristiques suivantes :

**IV.2.3.1. Caractéristiques mécaniques :**

• A l'état mis en solution (caractéristique moyenne) :

- Résistance : 1160 N/mm<sup>2</sup>
- Limite d'élasticité à 0,2 % : 650 N/mm<sup>2</sup>
- Allongement sur 5d : 35 %

• Etat thermomécanique (caractéristique mini) :

- Résistance : > 1175 N/mm<sup>2</sup>
- Limite d'élasticité à 0,2 % : > 850 N/mm<sup>2</sup>
- Allongement sur 5d : > 14 %

**IV.2.3.2. Propriétés physiques :**

- Densité : 8,3 g/cm<sup>3</sup>
- Coefficient moyen de dilatation en m/m. °C :
  - entre 20 °C et 200 °C : 12,1 x 10<sup>-6</sup>
- Module d'élasticité en N/mm<sup>2</sup>:
  - à 20 °C : 225 x 10<sup>3</sup>

**IV.2.3.3. Composition chimique :**

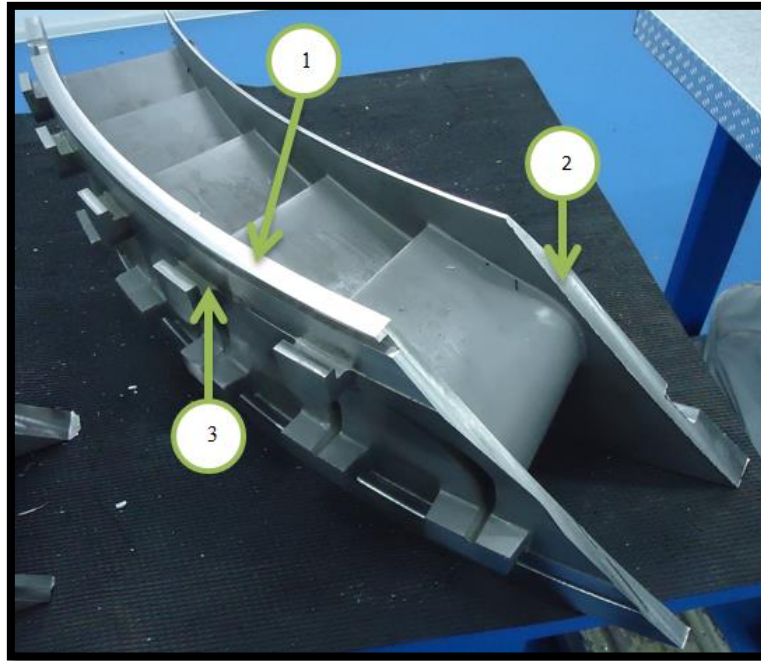
**Tableau IV.1 : Composition chimique de FSX414 (Ailette Fixe 1 Etage 5001).**

<i>composant</i>	<i>%</i>
<b>Sb</b>	<b>0.009</b>
<b>Sn</b>	<b>0.014</b>
<b>Pd</b>	<b>0.002</b>
<b>Ag</b>	<b>0.054</b>
<b>Ru</b>	<b>0.001</b>
<b>Mo</b>	<b>0.348</b>
<b>Nb</b>	<b>0.056</b>
<b>Zr</b>	<b>0.003</b>
<b>Bi</b>	<b>0.001</b>
<b>Se</b>	<b>0.000</b>
<b>W</b>	<b>8.029</b>
<b>Re</b>	<b>0.137</b>
<b>Ta</b>	<b>0.000</b>
<b>Hf</b>	<b>0.000</b>
<b>Ni</b>	<b>14.686</b>
<b>Co</b>	<b>56.894</b>
<b>Fe</b>	<b>2.522</b>
<b>Mn</b>	<b>0.301</b>
<b>Cr</b>	<b>16.846</b>
<b>V</b>	<b>0.049</b>
<b>Ti</b>	<b>0.044</b>
<b>Al</b>	<b>0.000</b>

**IV.3. Procédures d'essais :**

Les essais sont effectués en des opérations d'usinage (surfaçage sur une pièce de superalliage base cobalt FSX 414 type ailette fixe 1<sup>er</sup> étage 5001).

Les essais d'usure ont été réalisés avec des vitesses de coupe constantes.



**Figure. IV.3.** Les Trois (03) Surfaces Pour Les Essais D'usinage sur l'Ailette Fixe 1er Etage 5001.

Les essais ont été menés avec les plus grandes précautions. La démarche générale des essais est la suivante :

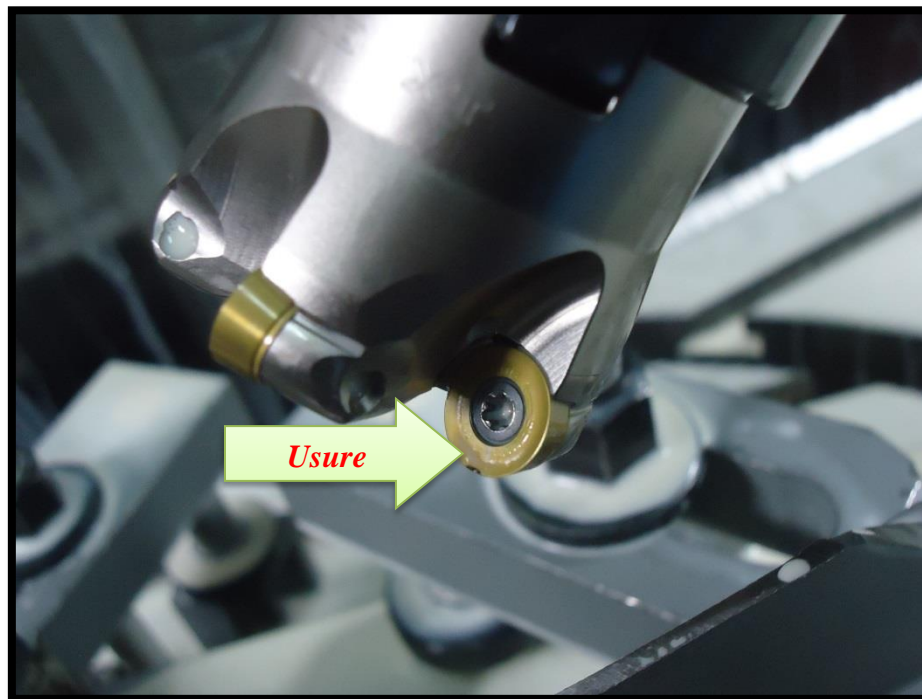
- Mise en position de la pièce sur la table de center d'usinage DMF 180 ;
- Réglage de l'avance, de la profondeur de passe et choix de la plage de vitesse ;
- Lancement le programme d'usinage :
  - Surfaçage de la face 1 (Fraise à copier avec plaquette rondes  $\phi 50$ );
  - Surfaçage de la face incline 2(Fraise à copier avec plaquette rondes  $\phi 50$ ) ;
  - Surfaçage de la face 3 (Fraises à surfacer-dresser et rainurer  $\phi 16$ ).



**Figure. IV.4.** Les Opérations des surfaçages (face 1et 2) par la fraise à copier  $\Phi 50$ .

Afin de s'affranchir d'une erreur sur la profondeur de passe, nous avons effectué une mesure du diamètre avant et après usinage ;

- Démontage de la plaquette ;
- Observation visuelle périodique des plaquettes utilisées (face de coupe, et la face de Dépouille) ;



**Figure. IV.5.** Observation visuelle périodique des plaquettes chaque fin de passe.

- Observation et mesure géométrique des différents paramètres de la plaquette (usure...) au microscope à la fin de la dernière passe ;
- Traitement informatique des données ;
- Analyse des résultats ;

**IV.3. 1.Paramètres de coupe :**

Les conditions de coupe sont choisies parmi celles recommandées par la norme ISO et SECO, pour tous les essais de coupe, la dénomination des paramètres est la suivante :

- Avances de coupe :  $f_z$  en mm/dent ;
- Profondeur de coupe :  $a$  en mm ;
- Vitesse de coupe :  $V_c$  en m/min ;
- Temps de coupe :  $t$  en min.

Les géométries des fraises et Les conditions de coupe choisies sont les suivantes :

**1/ pour la fraise à copier  $\phi 50$ :**

- ✓ Type de plaquette RPHT1204 M0T– M08.F40M
- ✓ Angle d'attaque  $k=45^\circ$
- ✓ Angle de coupe  $\gamma_o = -2$  à  $0^\circ$
- ✓ Angle de coupe axial  $\gamma_p = +4^\circ$
- ✓ Angle de coupe radial  $\gamma_f = -2^\circ$  à  $0^\circ$
- ✓ Angle de dépouille  $\alpha=11^\circ$
- ✓ Nombre de dents (plaquettes) : 5dents
- ✓ Vitesse de coupe :  $V_c = 63$  m/min ;
- ✓ Profondeur de coupe :  $a = 0.5$  mm ;
- ✓ Avance de coupe :  $f_z = 0.075$  mm/dent.
- ✓ Temps d'usinage pour chaque passe est : 3 minutes

**2/ pour la Fraise à surfacer-dresser et rainurer  $\phi 16$  :**

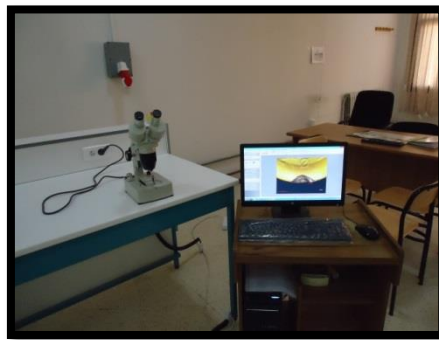
- ✓ Type de plaquettes XOMX 090308TR F40M
- ✓ Angle d'attaque  $k=90^\circ$
- ✓ Angle de coupe  $\gamma_o = -10^\circ$  à  $-7^\circ$
- ✓ Angle de coupe axial  $\gamma_p = +5^\circ$  à  $+9^\circ$
- ✓ Angle de coupe radial  $\gamma_f = -10^\circ$  à  $-7^\circ$
- ✓ Angle de dépouille  $\alpha =$  spéciale

- ✓ Nombre de dents (plaquettes) : 2 dents
- ✓ Vitesse de coupe :  $V_c = 53 \text{ m/min}$  ;
- ✓ Profondeur de coupe :  $a = 2 \text{ mm}$  ;
- ✓ Avance de coupe :  $f_z = 0.085 \text{ mm/dent}$ .
- ✓ Temps d'usinage pour chaque passe est : 2.2 minutes

#### **IV.4. Techniques de mesures l'usure :**

##### **IV.4.1. Mesure avec un microscope optique :**

Le suivi de l'évolution de l'usure en dépouille et l'usure en cratère est réalisé à l'aide d'un microscope optique de précession (x40).



**Figure. IV.6. Microscope optique.**

- Notre observation a porté sur l'usure pour déterminer les limites du domaine d'usage du couple outil matière, il s'agit de déterminer un domaine de validité de production d'une surface dans de bonnes conditions technologiques en fonction des trois paramètres : la vitesse de coupe ( $V_c$ ), la profondeur de passe ( $a$ ) et l'avance ( $f$ ).
- A chaque fin d'opération, la plaquette était démontée et observée au microscope. De manière Usuelle, le critère de réforme retenu est l'usure en dépouille ( $VB$ ).

IV.4.2.Observation microscopique :

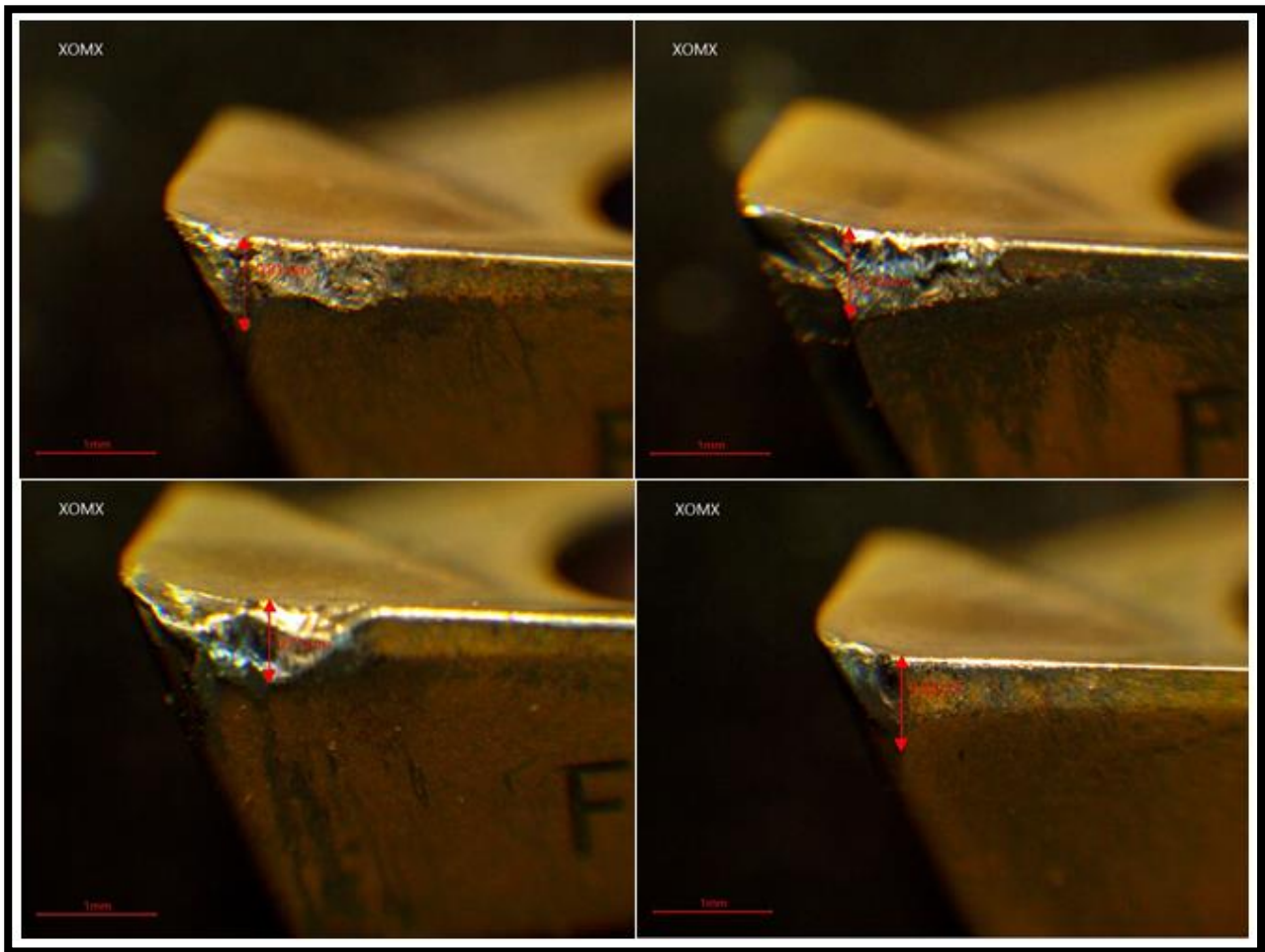


Figure. IV.7.Observation microscopique de l'usure en dépouille fracture sur les faces de dépouille des plaquettes type XOMX revêtue.

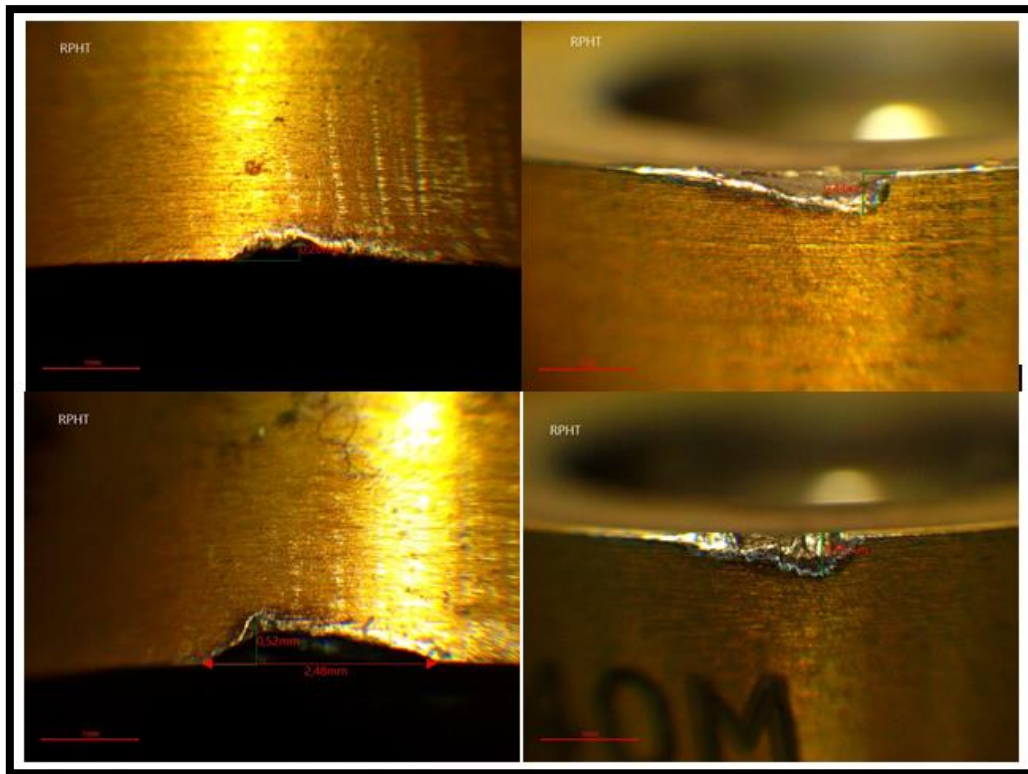


Figure. IV.8. Observation microscopique de l'usure en dépouille fracture sur les faces de dépouille des plaquettes type RPHT revêtue.

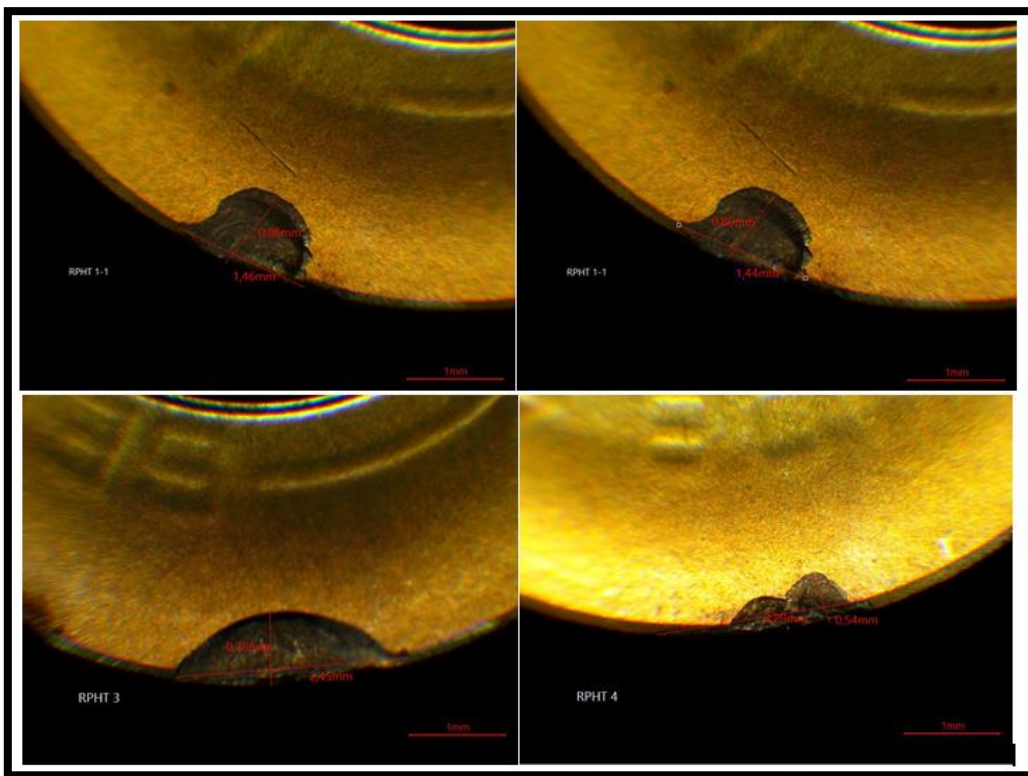


Figure. IV.9. Observation microscopique de l'usure en cratère fracture sur les faces de coupe des plaquettes type RPHT revêtue.

IV.4.3. Evolution de l'usure :

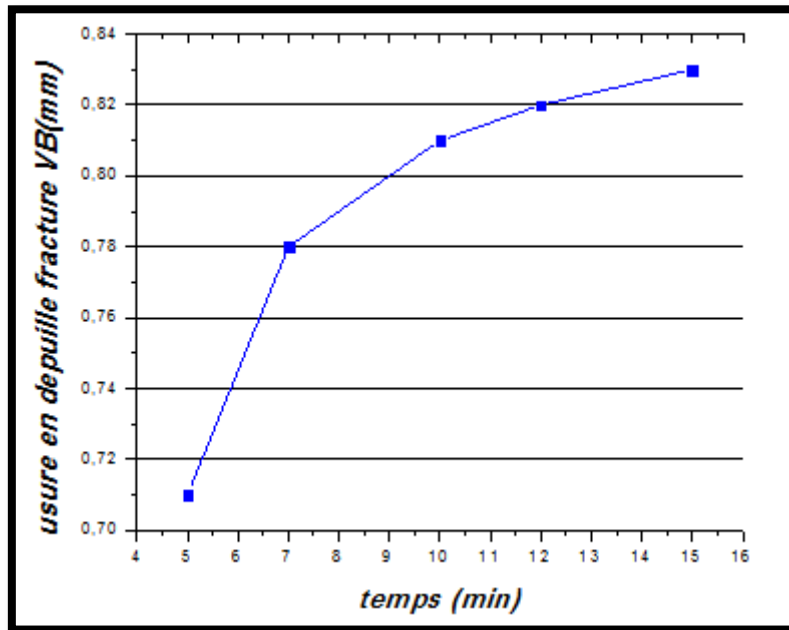


Figure. IV.10. Evolution de l'usure en dépouille fracture  $K_t$  en fonction du temps de coupe, obtenues avec des plaquettes XOMX types F40M,

Pièce FSX414,  $V_c = 53$  (m/mn),  $f = 0.085$  (mm/dent) et  $a_p = 0,5$ mm.

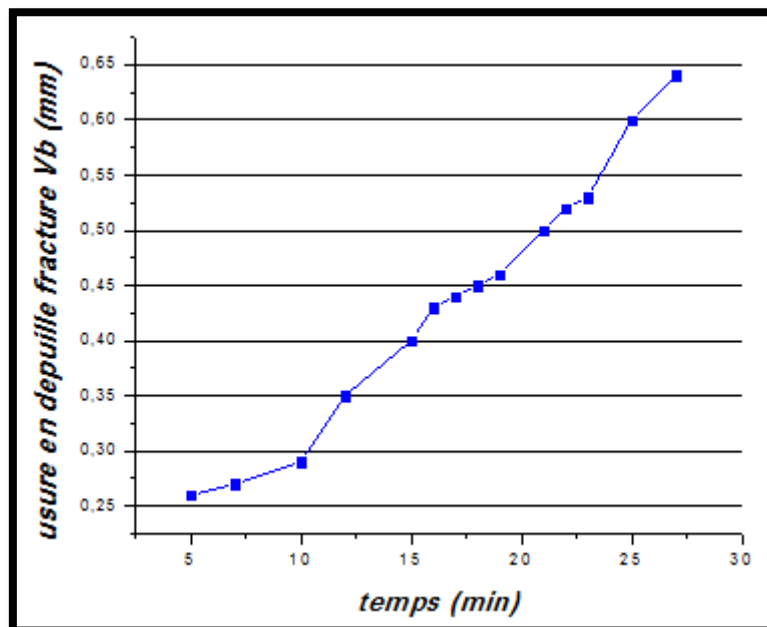
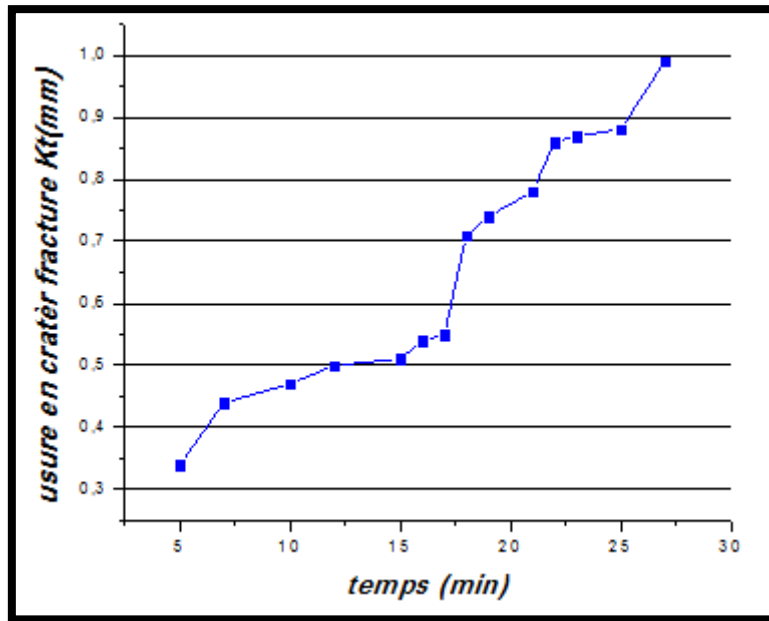


Figure. IV.11. Evolution de l'usure en dépouille fracture  $V_b$  en fonction du temps de coupe, obtenues avec des plaquettes RPHT types F40M,

Pièce FSX414,  $V_c = 63$  (m/mn),  $f = 0.075$  (mm/dent) et  $a_p = 0,5$ mm.



**Figure. IV.12.** Evolution de l'usure en cratère fracture  $K_t$  en fonction du temps de coupe, obtenues avec des plaquettes RPHT types F40M,

Pièce FSX414,  $V_c = 63$  (m/mn),  $f = 0.075$  (mm/dent) et  $a_p = 0,5$  mm.

#### IV.5. Analyses et interprétation des résultats expérimentaux :

Nous avons tracés sur les figures (IV. 10), (IV. 11) et (IV. 12) la variation de l'usure en dépouille fracture  $V_b$  et l'usure en cratère fracture en fonction de temps de coupe.

Ainsi, la plaquette est sous contrainte mécanique dès qu'elle commence la coupe et aussi longtemps que la coupe dure. L'importance et la direction des forces de coupe varient cependant ces variations provoquent ainsi des criques principalement parallèles à l'arête de coupe. Des variations des températures se produisant parce que l'arête de coupe s'échauffe pendant la coupe et qu'elle se refroidit en dehors de celle-ci. Cet effet d'échauffement et de refroidissement engendre des contraintes thermiques qui provoquent des criques thermiques perpendiculaires à l'arête de coupe.

**IV. 6. Conclusion**

Les outils de coupe s'usent parce que les surfaces d'usure (face de coupe et de dépouille) de l'outil doivent supporter des charges normales élevées et parce que le copeau et la pièce appliquent ces chargements lors de mouvements relatifs sévères par rapport aux surfaces d'usure. Les actions de coupe et de frottement sur ces surfaces de contact augmentent la température du matériau d'outil, ce qui accélère l'usure physique et chimique de ce dernier. Pour enlever de la matière à la pièce, ces mouvements et ces forces sont nécessaires.

***Conclusion générale:***

Les outils de coupe s'usent parce que les surfaces d'usure (face de coupe et de dépouille) de l'outil doivent supporter des charges normales élevées et parce que le copeau et la pièce appliquent ces chargements lors de mouvements relatifs sévères par rapport aux surfaces actives de l'outil.

Les actions de coupe et de frottement sur ces surfaces de font croître la température du matériau d'outil, ce qui accélère l'usure physique et chimique de ce dernier.

Pour enlever de la matière à la pièce, ces mouvements et ces forces sont nécessaires, donc l'usure de l'outil est un problème majeur qui se pose aux industries de la fabrication mécanique et en particulier lors de l'usinage des matériaux durs. Malheureusement il y a de nombreuses variables à considérer, il n'est donc pas surprenant que l'expertise de l'usure des outils et les décisions de changement d'outil soient des problèmes difficiles.

S'agissant d'un procédé de finition permettant d'obtenir des qualités proches de la rectification, le suivi de l'usure est primordial pour le respect des tolérances dimensionnelles, des états de surface, des tolérances géométriques. Par conséquent l'étude approfondie et continue de l'usure, notamment lors de l'usinage des superalliages de hautes duretés, comme **FSX 414**, avec des matériaux à outils de hautes performances est une tâche d'une grande importance économique et technologique en productique mécanique.

Et finalement Compte tenu de la complexité du phénomène d'usure de l'outil, il n'existe pas de loi mathématique simple permettant de calculer la durée de vie de l'outil de coupe. Cette durée de vie est caractérisée par le temps mis pour atteindre la valeur limite du critère d'usure considéré dans des conditions données de coupe.

# ***Bibliographie***

[1] Matériaux de turbines à combustion – Evolution des tendances (Direction des études et recherches) EDF Electricité de France Octobre 1992.

[2] Matthew J. Donachie Stephen J. Donachie (Superalloys a technical guide) Second Edition 2002 ASM International. All Rights Reserved.

[3] Catalogue et guide technique 2015 **SECO**.

[4] Mohieddine BENGHERSALLAH :(Recherche sur le fraisage des matériaux durs avec les matières de coupe modernes : application a L'UGV des superalliages) Thèse de Doctorat UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA Année 2010.

[5] M. Tchadja KAGNAYA : (Contribution à l'identification des mécanismes d'usure d'un wc-6%co en usinage et par une approche tribologique et thermique) Thèse de Doctorat ; L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE PARIS Spécialité “Sciences et génie des matériaux” 04 septembre 2009.

[6] Laurent Terzolo : (Vers une prédiction de la durée de vie des outils de forge à chaud par la détermination numérique du régime thermique et de l'usure abrasive) Thèse de Doctorat L'ECOLE DES MINES DE PARIS Spécialité «Mécanique Numérique».

[7] ABDELKRIM Mourad (Etude de l'influence de la température de coupe dans l'usure des outils et sur les caractéristiques métallurgiques des Alliages usinés) Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DE BATN ; 23/01/ 2008.

[8] Farhat ZEMZEMI : (Caractérisation de modèles de frottement aux interfaces pièce-outil-copeau en usinage : application au cas de l'usinage des aciers et de l'inconel 718) l'École Centrale de Lyon, 4 décembre 2007.

[9] Christian PAGÈS :( Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage a sec de finition.) ÉCOLE CENTRALE DE LYON, 14 novembre 2003.

[10] Nadjette Belhamra :( Réalisations et caractérisations de revêtements durs à base nitrures et de carbures : Applications à l'usinage des métaux) Université Mohamed Khider – Biskra: 29/10/2014.

[14] Catalogue et guide technique 2011 **SANDVIK** (Outils rotatifs : FRAISAGE/PERCAGE/SYSTEMES D'OUTILLAGE).

[15] KORLOY CUTTING TOOLS 2014-2015.

**Sites Internet:**

[11] GUIDE TECHNIQUE : KYOCERA

<http://www.kyocera.fr>

[12] GUIDE TECHNIQUE : Superalliages réfractaires :

<http://www.sandvik.coromant.com>

<http://www.aero-knowledge.com>

[13] Fiche technique les solutions SECO pour l'usinage des superalliages :

<http://www.secotools.com/fr>

[16] KORLOY CUTTING:

<http://www.korloy.com>

## ***Résumé:***

Notre travail porte sur la connaissance de l'évolution des technologies de ces dernières années a conduit à un développement majeur des matériaux utilisés dans tous les domaines de l'ingénierie. Dans le domaine mécanique, la qualité d'une pièce usinée dépend fortement de l'état d'usure de l'outil de coupe. Cette usure constitue donc un problème majeur dans le domaine de la fabrication industrielle. Elle est fonction de plusieurs facteurs notamment du matériau usiné, des conditions de coupe, du procédé de coupe. Tous ces facteurs ont pour corollaire une production importante de chaleur qui induit une usure accélérée de l'outil de coupe. Dans ce modeste travail nous présenterons le matériel qui sert à l'étude des évolutions de l'usure des plaquettes utilisées, et des observations microscopiques des plaquettes.

## **Mots-clefs :**

**Usinage ; suivi de l'usure d'outil ; l'usure en dépouille VB ; l'usure en cratère Kt**