

# Usinage des matériaux aéronautiques à faible usinabilité

par **Joël VIGNEAU**  
SNECMA - Département Matériaux et Procédés

<b>1. Spécificités d'usinage des matériaux à faible usinabilité.....</b>	<b>BM 7 285 - 2</b>
1.1 Superalliages .....	— 2
1.2 Alliages de titane .....	— 2
<b>2. Procédés d'usinage avancés.....</b>	<b>— 3</b>
2.1 Usinage à grande vitesse (UGV) .....	— 3
2.2 Assistance à l'usinage.....	— 5
<b>3. Autres procédés d'usinage à productivité élevée .....</b>	<b>— 7</b>
<b>4. Intégrité des surfaces .....</b>	<b>— 8</b>
<b>5. Concept avancé d'optimisation des paramètres d'usinage .....</b>	<b>— 8</b>
<b>6. Conclusion .....</b>	<b>— 9</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>— 9</b>

Une assez grande variété de matériaux sont considérés comme ayant une faible usinabilité ; ce sont, notamment, les aciers durs, certaines variétés de fontes, les alliages haute température, les alliages de titane, les céramiques, certains matériaux composites, etc. Cet article concerne seulement les **matériaux d'usage aéronautique**, dont les applications requièrent l'enlèvement par usinage d'une grande quantité de matière pour passer d'une pièce brute de forgeage ou de moulage, à une pièce finie, le volume de matière à enlever par usinage atteignant 80 %. Ces matériaux sont essentiellement les superalliages et les alliages de titane, utilisés notamment pour la construction des turboréacteurs.

Les principales caractéristiques des turboréacteurs sont le rapport poussée sur masse et la consommation spécifique. Les chiffres les plus favorables sont atteints en utilisant des alliages de nickel et de cobalt (superalliages) pour leur résistance à haute température et des alliages de titane pour leurs propriétés spécifiques (rapport propriété sur masse volumique). Les **superalliages** représentent environ 55 % des matériaux utilisés dans les turboréacteurs et les **alliages de titane** environ 25 %. Ces matériaux présentent de grandes difficultés d'usinage et leurs évolutions, comme les nouveaux alliages issus de la métallurgie des poudres (MdP) ou les alliages monocristallins, vont généralement dans le sens d'amplifier ces difficultés.

Cependant, les impératifs de compétitivité demandent de produire les pièces avec des performances accrues de productivité et de qualité. Dans ce but, toutes les améliorations potentielles des procédés d'usinage conventionnels et non conventionnels doivent être considérées et évaluées.

Le sujet de cet article est d'analyser les spécificités d'usinage des superalliages et des alliages de titane, puis de considérer et commenter les développements des procédés d'usinage avancés comme la grande vitesse et l'assistance à la coupe, enfin de décrire les stratégies nouvelles d'optimisation des paramètres d'usinage. Des procédés d'usinage plus anciens mais qui, en regard des matériaux nouveaux, s'avèrent hautement productifs, sont également considérés.

# 1. Spécificités d'usinage des matériaux à faible usinabilité

Les meilleures conditions d'usinage des matériaux difficiles à usiner ne peuvent être obtenues qu'en possédant une bonne connaissance des microstructures et des propriétés mécaniques, physico-chimiques et thermiques de ces matériaux, de façon à savoir évaluer leurs effets sur le comportement des outils de coupe et sur l'efficacité des procédés utilisés.

Les **compositions** de quelques-uns des matériaux, cités dans la suite de cet article, sont données tableau 1.

## 1.1 Superalliages

■ Les superalliages sont principalement utilisés en raison de la conservation de leurs propriétés à haute température : résistance mécanique, fluage, fatigue, résistance à l'oxydation et à la corrosion.

Les alliages de nickel sont durcis par des précipités intermétalliques de type  $Ni_3(Al - Ti)$  – phase  $\gamma'$  – et par des éléments de type carbures répartis ou précipités aux joints de grains. L'augmentation du pourcentage de ces phases améliore la tenue en température ; les plus avancés des alliages contiennent 55 % de  $\gamma'$ , comme l'alliage N18 obtenu par MdP [11], et 70 % pour les alliages monocristallins tels que l'AM1. Les développements de ces deux alliages ont été réalisés en France ; SNECMA y a participé.

■ Les **propriétés génériques** des alliages de nickel [9] et de cobalt [10] qui expliquent leur faible usinabilité et qui sont à l'origine des difficultés d'usinage rencontrées, sont résumées ci-après.

- Conçus pour résister à haute température, ces alliages conservent leurs propriétés mécaniques même pour des températures de coupe élevées.

- Les fortes teneurs en phases dures conduisent à de sévères usures par abrasion des outils de coupe.

- La conductivité thermique relativement faible réduit les transferts thermiques dans la pièce usinée et maintient l'arête de coupe à une température élevée.

- La structure austénitique entraîne un fort écrouissage des surfaces usinées qui amplifie l'usure de l'arête de coupe lors de son passage suivant.

L'ensemble de ces conditions défavorables fait que les vitesses de coupe conventionnelles, avec outils en carbure, sont de 80 à 90 % plus faibles que celles des aciers de construction courants [12].

## 1.2 Alliages de titane

Les alliages de titane [13] sont utilisés jusqu'à environ 500 °C. En comparaison avec la nuance TA6V, utilisée depuis de nombreuses années, deux voies d'évolution peuvent être identifiées :

- la première vise à améliorer la résistance au fluage ;
- la seconde, la résistance mécanique et la tenue en fatigue oligocyclique.

Des exemples d'alliages correspondants sont respectivement Ti 834 et Betacez ; ce dernier a été développé en France avec la participation de SNECMA.

Les problèmes posés par l'usinage du titane sont bien connus, ils proviennent de ses propriétés, notamment faible conductivité thermique et forte réactivité chimique. De plus, certains alliages, dont les deux derniers cités, contiennent du zirconium qui amplifie la réactivité chimique. Pour toutes ces raisons, les vitesses de coupe sont nécessairement réduites.

Tableau 1 – Composition de quelques alliages

Alliages de nickel	Ni	Co	Cr	Mo	Ta	W	Al	Ti	Fe	Nb
Alliages forgés										
Inconel 718	base		19	2,8			0,3	0,7	18	5,0
Waspalloy	base	14	20	4			4	3,5		
Astroloy	base	17	15	5,0			4,0	3,5		
N18	base	16	11	6,5			4,3	4,3		
Alliages moulés										
Rene 77	base	14	15	3,9			4,0	3,0		
IN100	base	15	10				5,5	4,5		
AM1	base	6,5	7,5	2,0	8,0	5,5	5,3	1,2		
Alliages de titane										
TA6V	base	6		4						
IMI 834	base	6			4	4		0,7	0,5	
Betacez	base	5	2	4	2	3,9	1			

## 2. Procédés d'usinage avancés

En dépit de ces difficultés d'usinage, des améliorations des vitesses de coupe ou des débits de copeaux sont possibles et sont recherchées.

### 2.1 Usinage à grande vitesse (UGV)

Il est clairement établi, comme le montre la figure 1, que la température dans la zone de coupe augmente quand la vitesse de coupe augmente [1]. Ainsi, la grande vitesse de coupe peut être définie comme étant celle induisant dans la pièce (dans le plan de cisaillement) une température suffisante pour entraîner une diminution significative des propriétés mécaniques du matériau usiné, sa coupe étant ainsi facilitée. Cela signifie que la grande vitesse (GV) dépend du matériau usiné et que l'outil de coupe doit supporter des températures élevées. Des opportunités de vitesses de coupe pour des outils carbure et céramique, sont montrées sur la figure 1 ; elles dépendent de la capacité en température des matériaux d'outils. Ces observations doivent être connues pour aider à comprendre les résultats d'usinage à grande vitesse (UGV) et d'assistance à l'usinage.

En pratique, on considère que, pour un matériau donné, la grande vitesse commence à environ trois fois la vitesse de coupe conventionnelle. Des ordres de grandeur des différents domaines de vitesses de coupe sont montrés sur la figure 2.

■ Le **tournage à grande vitesse des superalliages**, avec outils en céramique, a été développé durant les années quatre-vingt. L'évolution du procédé s'est faite en fonction du développement des outils en céramique : d'abord  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$  (30 % en particules), puis SIALON (base  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), enfin  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$  (whiskers). Aujourd'hui, cette dernière nuance de céramique est la plus performante en rai-

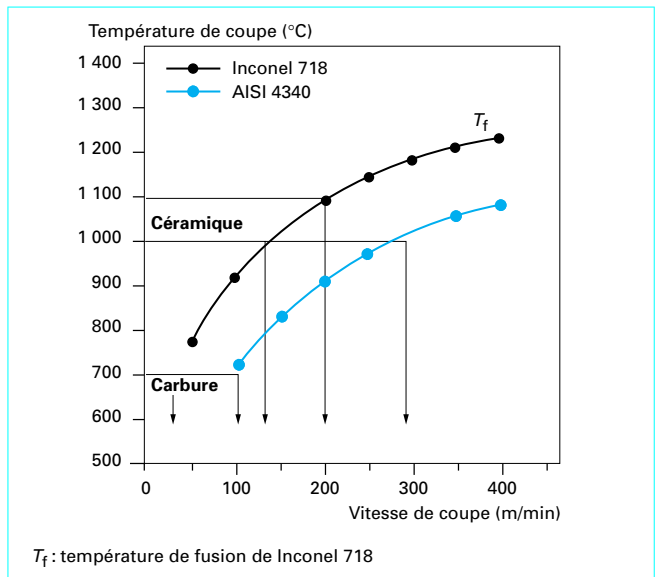


Figure 1 – Température de coupe en fonction de la vitesse de coupe

son de sa résistance à l'usure et de sa ténacité [2]. Elle permet des vitesses de coupe 6 à 8 fois plus élevées que le carbure.

**Exemple** : la vitesse de coupe de l'Inconel 718 (mis en solution et vieilli — état TR : trempe + revenu —) est d'environ 25 à 30 m/min avec outils en carbure et 200 à 300 m/min avec outils en céramique  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$ .

Les durées de vie sont respectivement d'environ 15 à 20 min et 5 à 10 min.

Ainsi, malgré une durée de vie plus courte, une arête de coupe en céramique usine un volume de matière supérieure, ou au moins égal, à celui usiné par une arête en carbure (figure 3). Les outils en céramique whiskers ont atteint un haut niveau de fiabilité [3] autorisant leur utilisation pour des opérations d'usinage automatisées. Le nitrure de bore cubique (CBN) est également efficace, notamment pour les opérations de finition, mais son coût élevé rend difficile la justification économique de son utilisation.

Des exemples d'opérations d'usinage sont montrés figure 4.

Un autre avantage du tournage GV est de produire des copeaux segmentés, pouvant ainsi être aisément et automatiquement évacués hors de la machine.

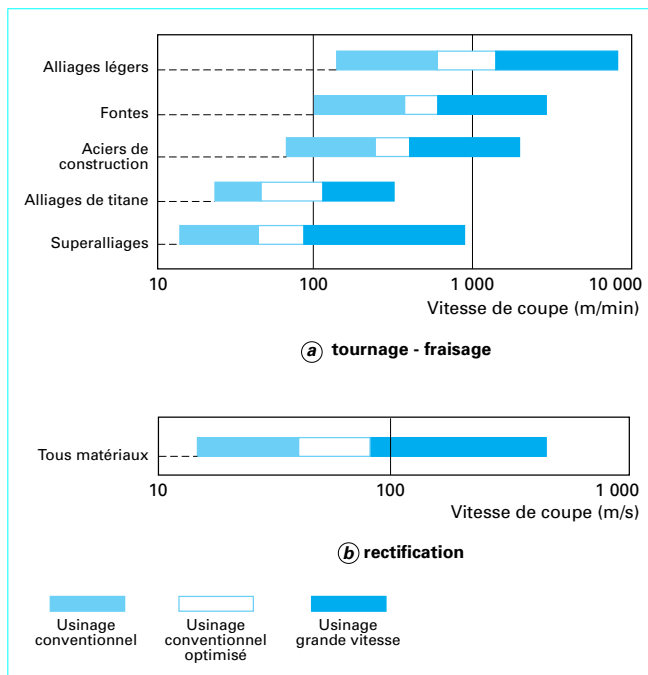


Figure 2 – Domaines des vitesses de coupe

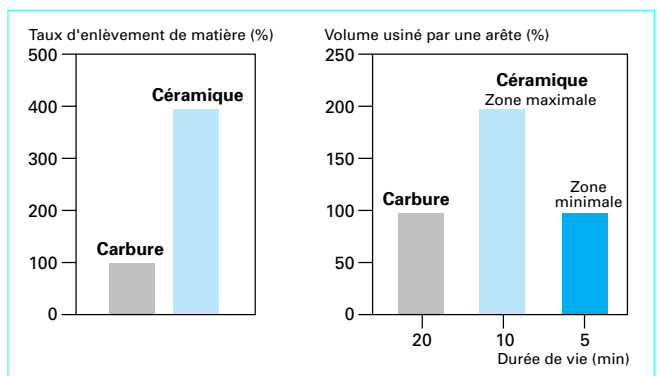


Figure 3 – Comparaison des performances des matériaux de coupe pour le tournage de l'Inconel 718

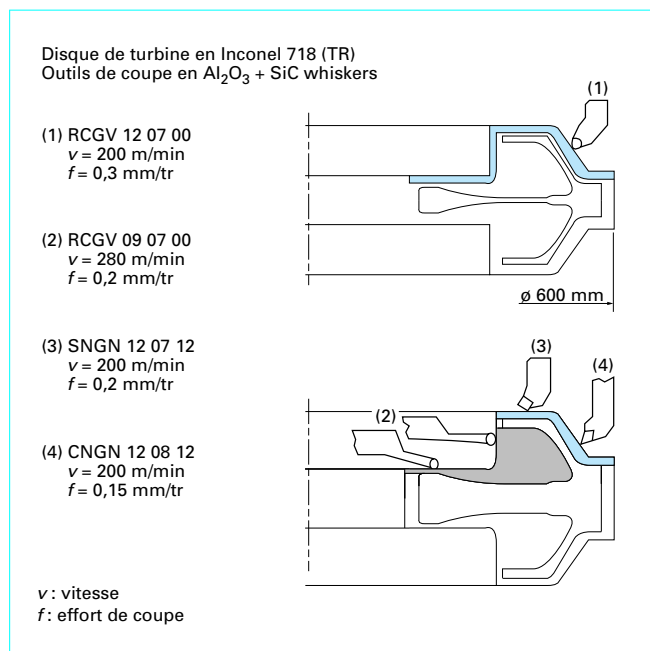


Figure 4 – Exemples de tournage à grande vitesse pour différents outils normalisés

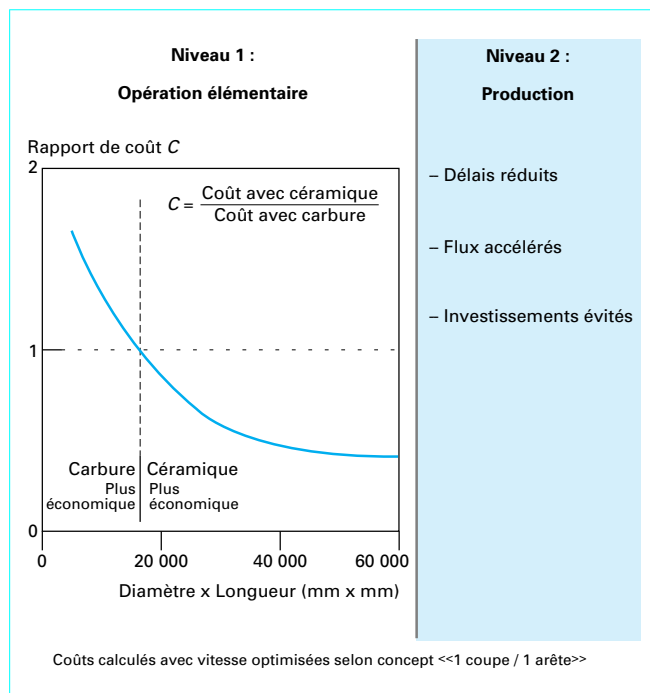


Figure 5 – Analyse des coûts des outils en céramique

Une **analyse économique** de l'utilisation des outils en céramique doit considérer deux niveaux, ainsi que le montre la figure 5.

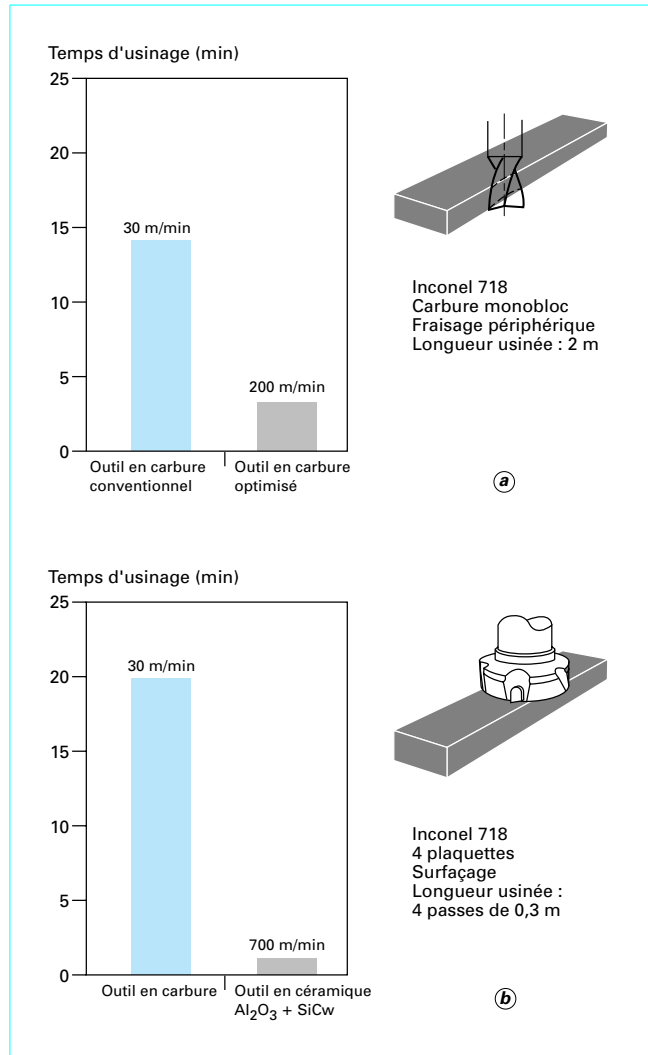


Figure 6 – Application du fraisage à grande vitesse à des pièces de démonstration

Le **premier niveau** concerne le gain de coût réalisé sur une opération élémentaire ; il est fonction de la réduction du temps de coupe pour l'opération, du taux horaire et du coût outil. Très généralement, la réduction de temps de l'opération se situe entre 30 et 80 %, mais le gain de coût n'est que de l'ordre de 20 %, en raison du coût élevé des outils en céramique (bien qu'il ait tendance à diminuer). Toutefois, selon l'opération d'usinage concernée et surtout selon la stratégie de changement d'arête de coupe, le gain en coût pourra notablement varier. Par exemple, lorsqu'une seule passe d'usinage est nécessaire (pièce brute forgée ou moulée près des cotes), une stratégie de type « une coupe/une arête » est bien adaptée, les passes longues étant les plus bénéfiques pour l'utilisation de la céramique (figure 5).

La **stratégie** de type « une coupe/une arête » consiste à ajuster la vitesse de coupe pour qu'une arête d'outil atteigne juste sa limite d'usure à la fin de la coupe.

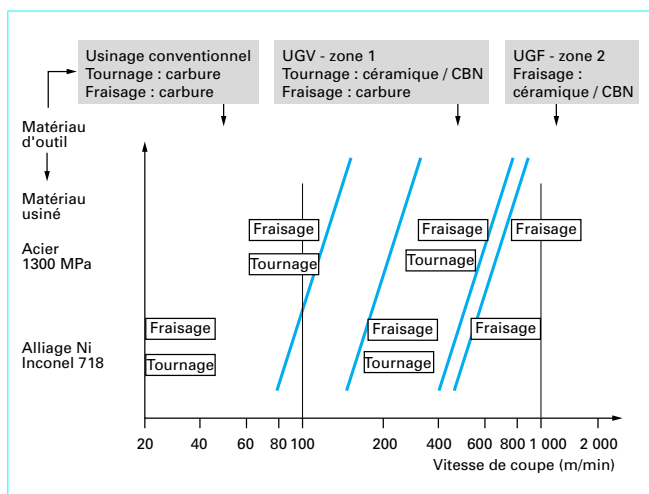


Figure 7 – Zones de vitesse en fraisage et tournage

Le **second niveau** concerne le gain sur le coût global d'une production ; il est fonction du coût de toutes les opérations d'usinage et surtout du nombre de machines-outils nécessaires. Un gain important provient de la diminution du nombre de ces machines qui résulte de la réduction des temps d'usinage. Les machines peuvent alors être utilisées à d'autres usinages ou, dans certains cas, des achats de machines peuvent être évités.

■ Le **tournage des alliages de titane** n'a pas été amélioré par l'utilisation d'outils de coupe en céramique, en raison de la trop grande réactivité chimique entre le titane et les diverses nuances de céramique pour outils.

Le meilleur matériau d'outil est toujours le carbure [4] et les vitesses de coupe sont restées de l'ordre de 40 à 60 m/min pour le TA6V. Toutefois, des améliorations notables sont obtenues avec une assistance à la coupe ainsi qu'il sera vu paragraphe 2.2. Des outils en diamant ou en CBN permettent des vitesses de coupe de l'ordre de 150 m/min, mais le prix de ces outils est, le plus souvent, trop élevé pour qu'ils soient économiquement justifiés.

■ Le **fraisage à grande vitesse (FGV) des superalliages** est encore peu développé.

Cependant, sa faisabilité et son efficacité ont été démontrées en **surfaçage** d'Inconel 718 avec des plaquettes en céramique, à des vitesses de coupe de 600 à 800 m/min [5] [6]. La figure 6b illustre ces résultats en montrant qu'une opération typique qui demande 20 min en fraisage conventionnel avec outils en carbure, est réalisée en moins de 1 min avec des outils en céramique  $Al_2O_3 + SiCw$ . Ce procédé est utilisé industriellement pour des opérations d'usinage de carters. La durée de vie d'outil est très courte, de l'ordre de 1 min, mais il est important de noter que, pendant cette durée, le volume de matériau usiné est le même que pendant la durée de vie d'un outil en carbure.

Pour les **autres types de fraisage**, un programme de recherches supporté par le ministère de la Recherche et de la Technologie, de 1992 à 1995, a montré que des vitesses de coupe de 150 à 300 m/min (c'est-à-dire 7 à 10 fois supérieures aux vitesses conventionnelles), pouvaient être utilisées avec des fraises en carbure, à géométrie optimisée (figures 6a et 7).

■ Le **FGV des alliages de titane** est également en évolution, ainsi que le montrent les résultats obtenus lors du programme de recherches cité précédemment. Des vitesses de coupe d'environ 200 m/min ont été atteintes pour des opérations de finition, avec des outils en carbure optimisés. En outre, pour l'obtention

Il faut observer, sur la figure 7, que les mêmes gammes de vitesses de coupe sont atteintes en tournage avec des outils en céramique et en fraisage avec des outils en carbure. Cette observation est aussi valable pour d'autres matériaux comme les aciers. La raison en est que le tournage est un procédé de coupe continu générant une température élevée sur l'outil, alors que le fraisage est discontinu, alternant des périodes d'échauffement et de refroidissement des arêtes de coupe dont la température maximale reste nettement inférieure à la précédente.

de surfaces polies, il a été montré que l'état de surface obtenu par FGV conduisait à réduire considérablement le temps de polissage.

Les opportunités de FGV décrites précédemment devraient devenir des procédés disponibles industriellement dans quelques années ; mais les principales applications sur les matériaux considérés sont des formes complexes (carters, aubes, disques aubagés monoblocs...) qui nécessitent l'utilisation de machines-outils à 5 axes [14]. De tels centres d'usinage 5 axes à grande vitesse [15] demandent encore des recherches et développements pour optimiser les structures, les rigidités, les pilotages d'axes, la CNC (Computerized Numerical Control ou commande numérique) et les aspects CFAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur).

## 2.2 Assistance à l'usinage

Les procédés d'usinage atteignant plus ou moins rapidement des limites en vitesse de coupe ou en durée de vie d'outils, selon les matériaux usinés, des recherches sur l'assistance à l'usinage ont été menées.

■ Un programme européen Brite Euram s'est déroulé de 1990 à 1993 pour évaluer l'**usinage assisté par laser** (UAL) des matériaux à usinabilité faible, en tournage et fraisage.

L'UAL, avec laser  $CO_2$  de 6 kW, a été étudié en **tournage** d'Inconel 718, pour des vitesses de coupe jusqu'à 350 m/min. L'usure d'outils en céramique a été réduite de 30 à 50 % et les efforts de coupe ont diminué d'environ 20 % (figure 8). Pour le tournage au carbure, l'usure d'outil n'a pas tendance à diminuer en raison de la température élevée de la surface de la pièce ; en effet, la matière qui va être transformée en copeaux doit atteindre environ 900 °C de façon à ce que les propriétés du matériau usiné soient notablement diminuées, alors que le carbure est limité vers 700 °C par des phénomènes d'oxydation. Pour les mêmes raisons, le tournage UAL du TA6V, avec outils en carbure, a une efficacité limitée.

Le **fraisage UAL** de l'Inconel 718 avec outils en céramique conduit à des réductions d'usure d'outils et des efforts de coupe.

En relation avec ce programme, un prototype de machine-outil équipé d'un laser a été construit et exposé à l'EMO (Exposition Mondiale de la Machine-Outil) de Hanovre. Toutefois, le couplage laser-machine étant complexe, la technologie UAL n'a pas encore débouché industriellement ; elle pourrait devenir la seule opportunité d'usinage de l'outil de coupe des superalliages à usinabilité encore réduite, qui pourraient être développés dans le futur.

■ L'**usinage assisté par jet d'eau haute pression** (UJHP) a été testé en tournage des superalliages et des alliages de titane, avec le jet orienté vers l'interface outil-copeau et en utilisant deux dispositifs (figure 9) :

— le premier (figure 9b) est constitué d'une pompe capable de pressions comprises entre 50 et 200 bars et de débits de 7 à 15 L/min ;

— le second (figure 9c) utilise une pompe de découpe par jet d'eau capable de 1 000 à 3 800 bars et 2 à 4 L/min.

La référence est la lubrification conventionnelle à environ 1 bar et 20 L/min (figure 9a).

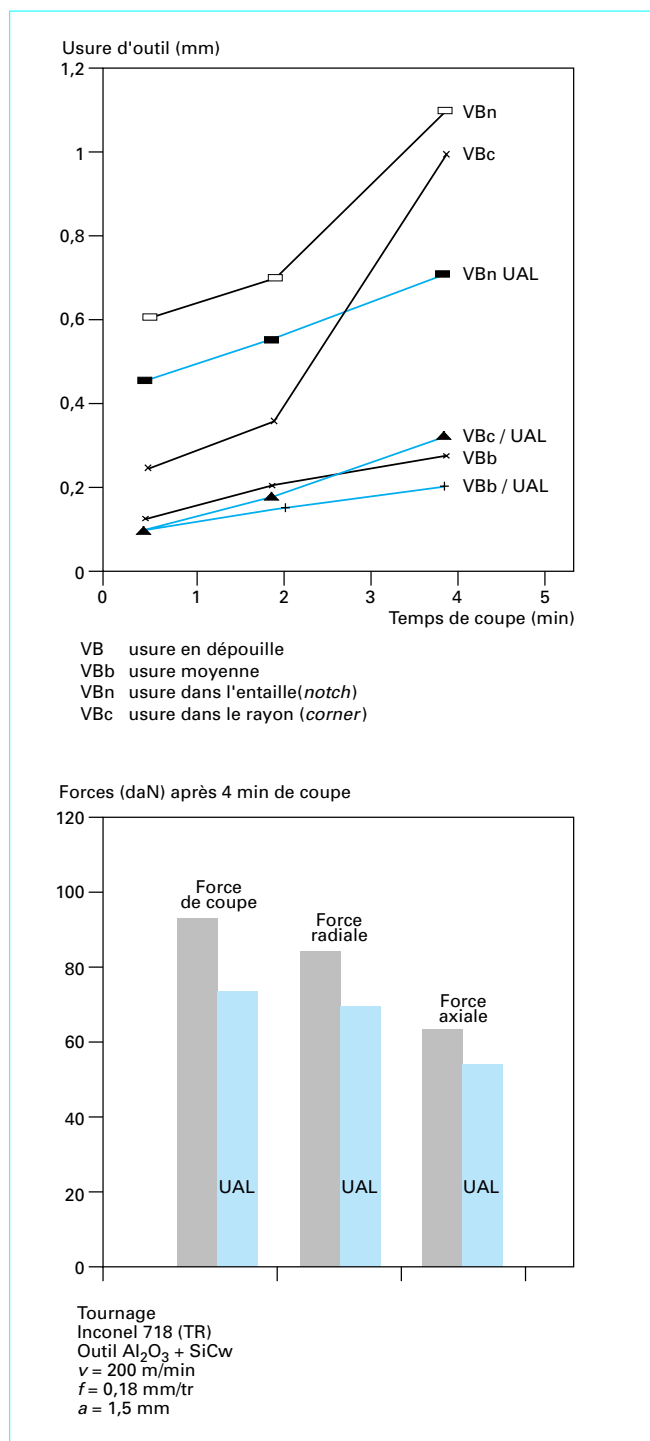


Figure 8 – Usinage assisté par laser (UAL)

En tournage des **alliages de titane** avec outils en carbure (nuance K 20 ; cf NF E 66-304), les observations, figure 10, sont les suivantes :

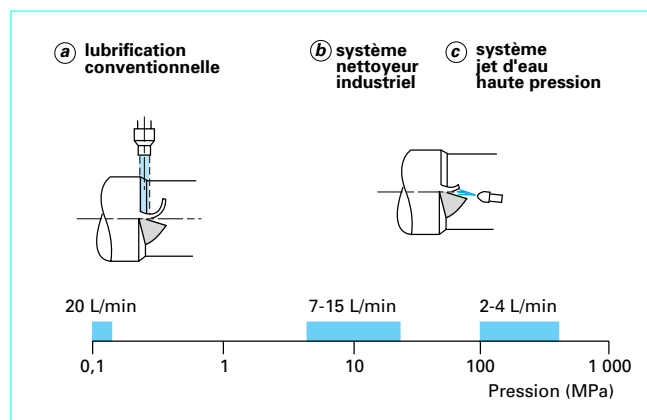


Figure 9 – Systèmes d'assistance par jet d'eau

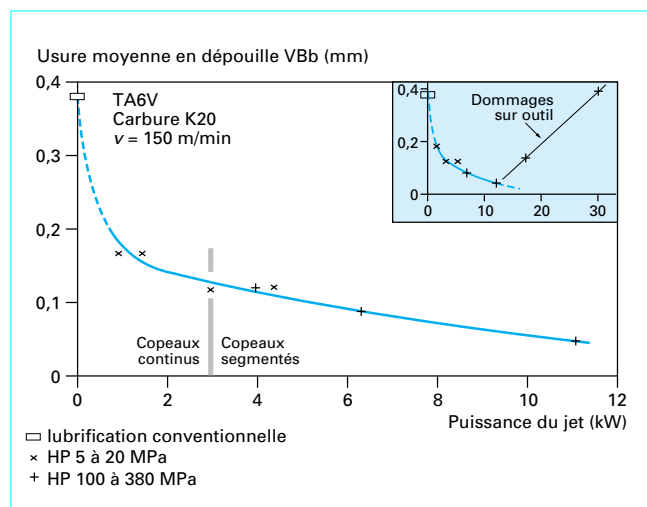


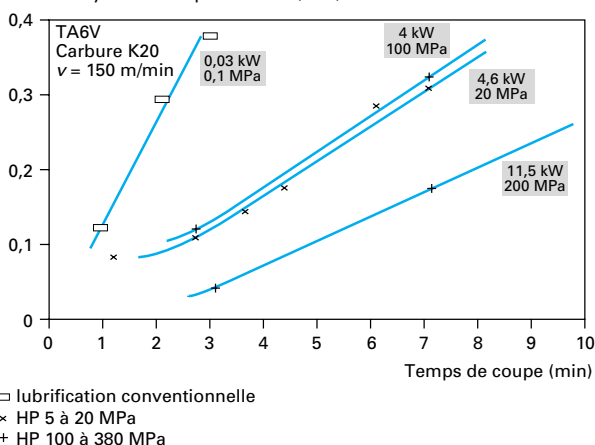
Figure 10 – Effet de la puissance du jet sur l'usure de l'outil de coupe pour tournage du titane

- la puissance du jet, qui est un paramètre intégrant simultanément la pression et le débit, permet une interprétation globale des résultats [7] ;
- l'usure d'outil diminue continûment lorsque la puissance du jet augmente jusqu'à 12 kW ;
- au-delà de 12 kW, le jet creuse un cratère sur la face de coupe de l'outil ; il se brise alors sur la paroi du cratère, ne pénétrant plus dans l'interface et, par suite, l'usure d'outil augmente ;
- pour les puissances supérieures à 3 kW, les copeaux sont fractionnés.

La figure 11 montre que, en tournage de TA6V avec outils en carbure, l'UAJHP autorise des vitesses de coupe de 150 m/min (au lieu d'environ 50 avec lubrification conventionnelle) avec durée de vie d'outil de 7 min pour une puissance de jet de 4 kW et 11 min avec environ 12 kW.

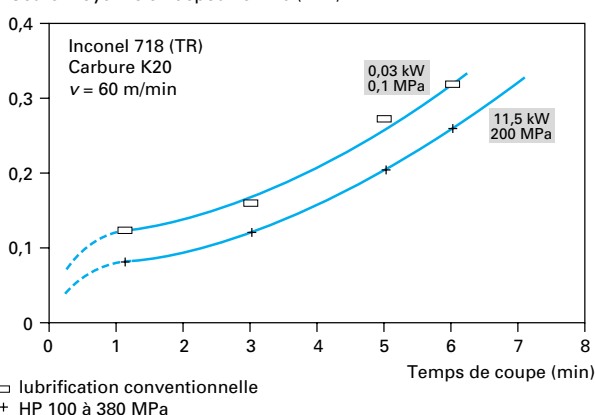
Des applications industrielles d'UAJHP d'alliages de titane existent à SNECMA depuis plusieurs années, à la puissance de 4 kW (qui demande une pompe simple et peu coûteuse), à la vitesse de coupe de 150 m/min et avec des outils conventionnels en carbure. Toutefois le succès de ce procédé demande une intégration complète du

Usure moyenne en dépouille VBb (mm)



**Figure 11 – Tournage du titane avec assistance par jet d'eau haute pression**

Usure moyenne en dépouille VBb (mm)



**Figure 12 – Tournage de l'Inconel 718 avec assistance par jet d'eau haute pression**

système HP dans la machine-outil et sa gestion par la CN, ainsi que l'optimisation de la sortie du jet et son intégration dans le porte-outil.

● L'UAJHP est moins efficace pour l'usinage des **superalliages** avec outils en carbure (figure 12), puisque environ 12 kW sont requis pour obtenir une diminution d'usure assez faible. Cette amélioration pourrait être exploitée en augmentant la vitesse de coupe, mais cela est insuffisant pour devenir compétitif avec les outils en céramique sous lubrification conventionnelle. Cependant, des opportunités existent pour l'UAJHP avec outils en carbure, même à puissance moyenne, pour des opérations spécifiques et difficiles, comme le tronçonnage, lorsque la céramique ne peut être utilisée efficacement [8]. L'UAJHP ne convient pas pour le tournage GV des superalliages avec outils en céramique, en raison d'usures par microécaillages de l'arête de coupe due aux chocs thermiques.

Il faut souligner que UAL et UAJHP conduisent à améliorer certaines configurations d'usinage, mais pour des raisons opposées.

L'UAL facilite l'usinage en chauffant le matériau usiné pour diminuer ses propriétés mécaniques, ce qui requiert un matériau d'outil résistant à des hautes températures, comme la céramique.

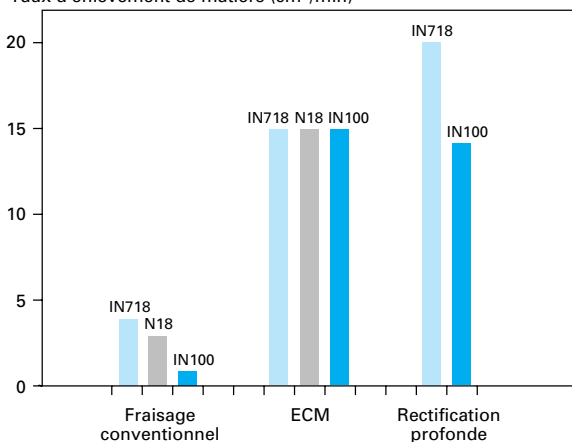
L'UAJHP facilite l'usinage en réduisant le frottement entre le copeau et l'outil, ce qui entraîne une réduction de la température dans la zone de cisaillement secondaire et, par suite, dans l'outil, ce qui convient bien au carbure.

### 3. Autres procédés d'usinage à productivité élevée

L'efficacité de l'UGV (§ 2.1) ou de l'assistance à l'usinage (§ 2.2) n'est pas démontrée pour tous les types d'usinage et tous les matériaux à faible usinabilité, mais d'autres procédés d'usinage peuvent être considérés comme hautement productifs pour des opérations spécifiques : rectification, usinage électrochimique (ECM, Electrochemical machining) [17], laser, etc.

La comparaison des taux d'enlèvement de matière (figure 13) met en évidence des valeurs favorables à certains de ces procédés, par rapport aux procédés plus conventionnels que sont le fraisage et le perçage. Ainsi, la rectification profonde (appelée aussi « à avance lente » ou « dans la masse ») ou l'ECM sont couramment utilisés à la place du fraisage et le laser ou l'électroérosion (EDM, *Electro Discharge Machining*) à la place du perçage à l'outil.

■ La **rectification profonde** est plus efficace que les autres procédés pour l'usinage des superalliages à faible usinabilité, notamment les alliages moulés. Les meules utilisées sont principalement conventionnelles ; leur meilleure efficacité est obtenue par taillage continu, procédé qui demande des rectifieuses spécialement conçues pour cela. Cependant, l'utilisation des meules CBN se développe rapidement avec des avancées vers des grandes vitesses, c'est-à-dire vers 80 à 120 m/s au lieu des 30 à 40 m/s habituels.

Taux d'enlèvement de matière ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )

**Figure 13 – Taux d'enlèvement de matière pour différents procédés**



■ L'**ECM** est couramment utilisé à la place du fraisage pour l'usinage de formes complexes comme des aubes. Cependant l'ECM est un procédé peu flexible en raison des difficultés de conception des électrodes et de maîtrise de l'écoulement de l'électrolyte. De plus, l'ECM entraîne des rejets de produits chimiques et de boues métalliques qui pourraient devenir des contraintes fortes en raison de l'évolution des législations. Aussi, dans le futur, l'ECM devrait être, au moins partiellement, remplacé par le fraisage GV.

■ Le **laser** est utilisé pour percer des grandes quantités de petits trous de refroidissement dans des pièces telles que des chambres de combustion : typiquement 50 000 trous de diamètre 0,5 à 0,8 mm par pièce.

Un laser YAG est capable de percer 1 à 10 trous par seconde, avec un pulse unique, ou en mode percussion (plusieurs pulses) ou trépanation, selon le diamètre et la profondeur des trous concernés.

## 4. Intégrité des surfaces

L'usinage des superalliages et des alliages de titane est susceptible d'avoir des effets marqués sur l'intégrité des surfaces, dont il est indispensable de tenir compte en raison des conséquences sur le comportement des pièces. Ces effets incluent la rugosité de la surface, la microstructure des sous-couches et les contraintes résiduelles. L'initiation de fissures peut être liée à la présence de contraintes résiduelles de tension provoquées par un usinage mal ou insuffisamment maîtrisé. Ainsi, il est important de connaître exactement les effets des procédés d'usinage, notamment ceux en cours de développement, sur l'intégrité des surfaces et, de plus, d'être informé sur l'évolution de ces effets lorsqu'un paramètre d'usinage varie même légèrement, cela particulièrement pour maîtriser les contraintes résiduelles.

Il a été montré que, en **tournage** des superalliages, l'augmentation des vitesses de coupe, depuis le domaine conventionnel jusqu'à la grande vitesse telle que décrite précédemment, conduisait à une diminution du pic de tension en surface et à une augmentation (en valeur absolue) du pic de compression interne (figure 14). Ainsi le tournage GV agit favorablement.

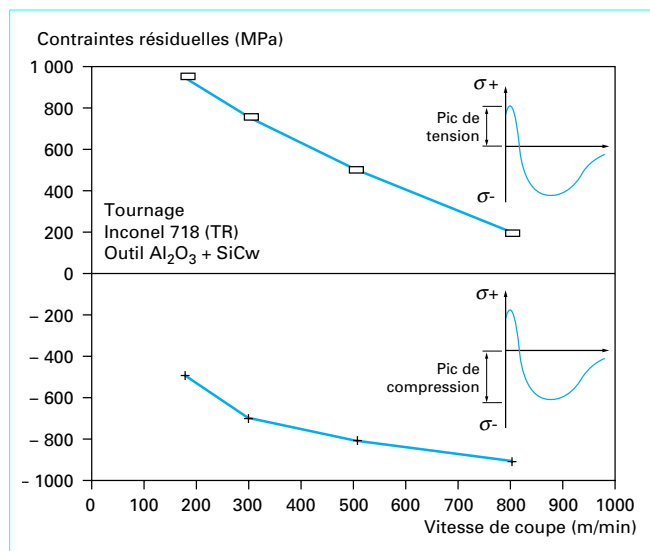


Figure 14 – Effets de la grande vitesse de coupe en tournage sur les contraintes résiduelles

Les effets du **FGV** sont moins bien connus, mais il a été montré au cours du programme français mentionné paragraphe 2.1, que certaines configurations de FGV induisaient de fortes contraintes de tension, ce qui doit inciter à la prudence.

Les procédés d'usinage par **électroérosion** et faisceau **laser** produisent la fusion du matériau usiné ; les surfaces obtenues comportent donc souvent des fissures ou microfissures d'origine thermique. Selon la fonction de la surface, il peut être nécessaire d'enlever par un autre procédé d'usinage (outil de coupe, ECM, abrasion...) la zone thermiquement affectée.

Avec l'**ECM**, il faut veiller à éviter les attaques aux joints de grains, qui pourraient agir comme des amorces de criques.

L'usinage des alliages monocristallins est quelquefois critique en raison du risque de recristallisation en sous-couche, qui pourrait réduire la tenue au fluage. Lorsque ce risque existe, il faut utiliser des conditions d'usinage douces pour éviter ou limiter l'épaisseur de la couche recristallisée ; cette couche peut aussi être éliminée par usinage chimique.

## 5. Concept avancé d'optimisation des paramètres d'usinage

Les besoins d'amélioration de la productivité, de réduction des délais de fabrication, de diminution des coûts, d'obtention de haute qualité conduisent au concept « *faire bien du premier coup* ». Cela signifie que les conditions d'usinage doivent résulter d'une démarche ou stratégie construite et non de données génériques ou empiriques.

Pour cela, des développements sont en cours, notamment en France mais aussi au niveau ISO, pour établir des spécifications des données d'usinage, fondées sur le **concept « Couple outil-matière »** (COM). Il s'agit d'un ensemble de paramètres décrivant une opération d'usinage donnée, pour une matière donnée et avec un outil de coupe donné. Les principaux éléments de cet ensemble sont les suivants.

■ Les **paramètres de coupe** limites sont :

- d'une part, les valeurs minimales et maximales de la vitesse de coupe et de l'avance, générant une énergie spécifique de coupe minimale ;
- d'autre part, les valeurs minimales et maximales de l'avance et de la profondeur de passe bornant la zone de copeaux maîtrisés.

■ Les **paramètres de liaison** sont les coefficients de la relation de Taylor généralisée. Ils servent à calculer les interactions entre les paramètres précédents qui ne peuvent être utilisés simultanément à leur valeur maximale.

■ Les **paramètres auxiliaires** prennent en compte rugosité, efforts de coupe, coefficients correctifs, etc.

Les spécifications décrivent également les **méthodologies d'obtention** des paramètres COM par essais d'usinage ou par calcul à partir de COM expérimentaux. Un objectif est d'obtenir une bonne fiabilité des données, rendant les COM échangeables entre fabricants d'outils et utilisateurs et entre utilisateurs. La disponibilité d'un COM permet le calcul des paramètres de coupe optimaux pour une opération d'usinage, en fonction :

- de **critères préétablis** comme coût minimal, production maximale, changement d'outils, copeaux segmentés, etc ;
- également, de **critères de qualité** comme rugosité, efforts, puissance machine, etc.

La façon d'utiliser les COM dépend des objectifs de chaque utilisateur ; elle est considérée comme un savoir-faire susceptible d'être protégé.



Aujourd'hui, un standard a été établi par l'AFNOR pour le tournage et d'autres sont en préparation pour le fraisage et le perçage. Ces actions sont reprises par l'ISO (TC29) [19] pour être incluses dans des spécifications plus globales d'usinage.

## 6. Conclusion

L'usinage des matériaux à faible usinabilité, que sont les superalliages et les alliages de titane, est réalisable par la plupart des procédés d'usinage classiques, mais c'est seulement l'utilisation des procédés avancés qui conduit à un niveau élevé de productivité. Une bonne connaissance des particularités de ces procédés ainsi que des propriétés des matériaux usinés, sont fort utiles pour maîtriser et optimiser les conditions d'usinage tout en assurant la qualité des surfaces usinées.

Pour l'avenir, les principales **évolutions** qui peuvent être attendues pour l'usinage de ces matériaux sont les suivantes.

■ Le **fraisage à grande vitesse** (FGV) devrait se développer du fait de ses effets favorables sur les temps d'usinage et les coûts. Il pourrait remplacer, au moins partiellement, l'usinage électrochimique (ECM) en raison d'une plus grande flexibilité et de son faible impact sur l'environnement.

■ L'évolution des **outils de coupe** devrait se faire par l'optimisation de la conception et de la géométrie des outils ainsi que par l'amélioration de la reproductibilité de leurs performances ou plus généralement de leur fiabilité. Le développement de nouveaux matériaux de coupe devrait être limité, ceux disponibles n'étant pas encore actuellement utilisés au maximum de leur potentiel.

■ L'**assistance à l'usinage**, notamment par laser, pourrait se développer pour les matériaux présentant les plus fortes difficultés d'usinage et pourrait constituer la seule opportunité d'usinage à l'outil pour de nouveaux alliages.

## Références bibliographiques

- [1] KRAMER (B.) et HUET (J.F.). – *The wear of Ceramic Tools*. Proceeding of NMARC, Conf. SME Toronto, Mai 1982.
- [2] VIGNEAU (J.). – *Influence of the Microstructure of Composite Ceramic Tools on Their Performance when Machining Nickel Alloys*. Annals of CIRP, 1987. Vol. 36/1.
- [3] VIGNEAU (J.). – *Reliability of Ceramic Cutting Tools*. Annals of CIRP, 1988. Vol. 37/1.
- [4] KRAMER (B.). – *Theoretical Consideration of Rare Earth Metal Compounds as Tool Materials for Titanium Machining*. Annals of CIRP, 1993. Vol. 42/1.
- [5] VIGNEAU (J.). – *L'Usinage des Superalliages*: Les Entretiens de la Technologie, 1992, Paris, 1<sup>re</sup> Édition. Vol. 1.
- [6] EL BESTAWI (M.A.) et EL WARDANI (T.I.). – *Performance of Whiskers Reinforced Ceramic Tools in Milling Nickel Based Alloys*: Annals of CIRP, 1993. Vol. 42/1.
- [7] VIGNEAU (J.). – *High Pressure Water Jet Assisting Machining of Titanium and Super-alloys*, 1992. CIRP, STC « C ».
- [8] WERTHEIM (R.), ROTBERG (J.) et BER (A.). – *Influence of High Pressure Flushing Through the Rake Face of the Cutting Tool*. Annals of CIRP, 1992. Vol. 41/1.
- [9] BLANCHARD (P.). – *Alliages de nickel résistant à la corrosion humide*. M 500, Traité Matériaux métalliques
- [10] HABRAKEN (L.). – *Propriétés du cobalt et de ses alliages*. M 505, Traité Matériaux métalliques.
- [11] EUDIER (M.). – *Métallurgie des foudres : généralités*. M 860, Traité Matériaux métalliques.
- [12] GLADEL (G.), TOUS (J.-L.) et GOURDET (D.). – *Matériaux pour outils de coupe*. B 7 080, 1992.
- [13] DE GÉLAS, ARMAND (M.), SÉRAPHIN (L.) et TRICOT (R.). – *Titane et alliages de titane*. M 557, Traité Matériaux métalliques.
- [14] PRUVOT (F.-C.). – *Machines-outils*. BM 7 120, Traité Génie mécanique. 1997.
- [15] SACHOT (M.). – *Fraiseuses et centres d'usinage*. B 7 160, Traité Génie Mécanique, 1995.
- [16] DEFRETIN (A.-L.) et LEVAILLANT (G.). – *Usinage à très grande vitesse*. BM 7 250, Traité Génie mécanique, 1998.
- [17] LECHERVY (P.). – *Usinage électrochimique*. B 7 270, Traité Génie mécanique, 1996.
- [18] BIANCHI (L.) et RIGAL (E.). – *Usinage par électroérosion*. B 7 310, Traité Génie mécanique, 1987.
- [19] ISO TC 19. – *Computerised machining data exchange*.