

Fraisage des métaux à très grande vitesse

par **André GREFFIOZ**

Ingénieur de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon
Chef du Service Recherche et Développement
de la Société Brisard Machines-Outils (Forest-Liné)

et **Jean-Claude CRAPART**

Ingénieur de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon
Chef du Service Coupe des Matériaux
au Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM)

1. Machine à usiner les métaux tendres	B 7 250 - 3
1.1 Clientèle	— 3
1.2 Fraisage TGV des métaux tendres	— 3
1.3 Étude des temps de coupe et des possibilités nouvelles offertes par l'UTGV	— 3
1.3.1 Influence sur la conception de la pièce	— 3
1.3.2 Potentiel d'enlèvement de copeaux d'un outil de petit diamètre	— 3
1.3.3 Ébauche de pièces volumineuses	— 4
1.3.4 Réduction des temps de finition	— 4
1.3.5 Comparaison des résultats d'usinage sur pièces réelles	— 4
1.4 Conception d'une machine UTGV pour métaux tendres	— 4
1.4.1 Choix des paramètres et optimisation	— 4
1.4.2 Broche	— 6
1.4.3 Autres techniques	— 6
1.4.4 Structure de la machine	— 6
1.4.5 Mouvements des trois axes de translation	— 7
1.4.6 Commande numérique par calculateur (CNC) et asservissements d'axes	— 8
1.4.7 Développements prévus dans un proche avenir	— 9
1.4.8 Recherches à l'étranger	— 9
2. Coupe à très grande vitesse de la fonte	— 9
2.1 État de la technique	— 9
2.2 Fraisage TGV de la fonte	— 9
2.2.1 Coupe à grande vitesse	— 9
2.2.2 Conditions de coupe	— 9
2.2.3 Simulation technico-économique	— 10
2.2.4 Comparaison technico-économique	— 10
2.2.5 Bilan technico-économique	— 12
2.3 Moyens d'essais en France	— 12
2.4 Conception d'une machine UTGV pour la fonte	— 13
2.4.1 Broche	— 13
2.4.2 Structure d'une machine UTGV	— 13
3. Coupe à très grande vitesse de l'acier	— 13
3.1 État actuel de la technique	— 13
3.2 Utilisation des lasers pour préchauffer la pièce	— 13
4. Capteurs de surveillance	— 14
4.1 Nécessité d'une surveillance automatique	— 14
4.2 Techniques utilisables	— 14
4.3 Direction des recherches actuelles	— 14
4.3.1 Capteurs de surveillance	— 14
4.3.2 Outil et processus de coupe	— 14
Références bibliographiques	— 15

Depuis 1980, beaucoup d'articles techniques sont consacrés à l'**usinage à très grande vitesse (UTGV)**. Cette technique utilisée depuis fort longtemps par les fabricants de pièces aéronautiques, lors des surfacages de tôles de grandes dimensions, a pris un essor nouveau grâce à l'impulsion d'un chercheur américain, R. King, reprenant un concept théorique de la coupe à très grande vitesse breveté par le docteur Carl J. Salomon en 1931.

L'article donnait entre autres de nombreuses informations sur les gains apportés par l'usinage à très grande vitesse en ce qui concerne l'état de surface, le taux d'enlèvement de copeaux par unité de puissance, le comportement mécanique et thermique de la pièce et des copeaux. Bien qu'un certain nombre de ces informations semblent être difficiles à vérifier, il est certain que la coupe à très grande vitesse offre de nombreux avantages et que cette technique est appelée à se développer dans l'avenir. Les gains immédiats et mesurables se situent au niveau du **taux d'enlèvement du métal**, des **efforts de coupe** et de l'**état de surface quasi poli** obtenu tant dans les métaux tendres que dans les fontes et les aciers.

En fait, on parle de UTGV dès que l'on peut atteindre les performances suivantes :

Matériaux usinés	Vitesse de coupe (m/min)	Vitesse de rotation de la broche (tr/min)
Métaux tendres.....	2 000	20 000
Fonte.....	1 000	5 000
Acier	500	3 000

Ce type d'usinage est envisageable grâce aux progrès technologiques réalisés en particulier sur des outils de coupe, à savoir :

— pour les métaux tendres (principalement à base d'aluminium), emploi de fraises de petits diamètres à plaquettes en carbure rapportées ou en carbure massique demandant des vitesses de rotation de broche et des avances plus importantes (incitation à construire des machines UTGV) ;

— pour la fonte, apparition de plaquettes d'outil en nitride de silicium ou en céramiques mixtes (alumine et carbure de titane) ;

— pour l'acier, outils en nitride de bore (CBN) ou en céramiques mixtes.

En France, un effort particulier a été fait pour financer la recherche dans le domaine du fraisage à très grande vitesse par le biais du ministère de la Recherche ou de l'ANVAR (Agence Nationale de Valorisation de la Recherche). Quelques entreprises à haut niveau technique travaillent sur ce sujet : AMDBA à Saint-Cloud, S2M à Vierzon, Forest-Liné à Capdenac. Des centres de recherches et écoles d'ingénieurs participent également, en particulier le CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques) et l'École Nationale Supérieure de Mécanique de Nantes (ENSM).

À l'étranger, l'Allemagne effectue un travail considérable sur ce sujet, en particulier l'Université de Darmstadt et la société Heyligenstadt. Les États-Unis investissent également beaucoup dans cette technique pour des applications civiles de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) ou militaires. De nombreuses compagnies (LTV Aerospace and Defense Company, General Electric Company, Lockheed Missiles and Space Company) et des universités (Raleigh en Caroline du Nord, West Lafayette dans l'Indiana et l'Université de Floride à Gainesville) utilisent la coupe à très grande vitesse ou effectuent des recherches sur ce sujet. Des congrès ou des symposiums sont régulièrement organisés sur ce thème [ASME (American Society of Mechanical Engineers)].

1. Machine à usiner les métaux tendres

1.1 Clientèle

La clientèle est constituée de toutes les industries utilisant les métaux tendres (alliages d'aluminium) pour leurs produits. Le domaine privilégié est l'aéronautique où, pour des raisons d'optimisation des structures, la quantité de copeaux enlevée par usinage atteint 95 % du poids de la pièce brute. L'UTGV permet d'augmenter encore ce pourcentage dans la mesure où il est possible de réaliser des congés de rayons plus faibles et des fonds plus minces sans pénaliser le temps de fabrication.

1.2 Fraisage TGV des métaux tendres

Les vitesses de coupe couramment utilisées varient de 2 000 m/min à 4 500 m/min. Les limites supérieures sont dues principalement aux efforts centrifuges et au comportement dynamique de la broche et de la machine. L'intérêt initial de la coupe à très grande vitesse est mathématique. En effet, si l'on ne prend en compte que les efforts tangentiels et si l'on suppose un comportement en coupe similaire à la coupe conventionnelle (coefficients spécifiques), on peut écrire :

$$P = F_c v_c$$

avec P puissance mécanique disponible à la broche,

F_c force de coupe tangentielle,

v_c vitesse de coupe tangentielle.

On voit alors facilement que, toutes choses égales par ailleurs, c'est-à-dire puissance de broche donnée et coefficients spécifiques de coupe donnés, la force de coupe est inversement proportionnelle à la vitesse de coupe, d'où l'avantage d'augmenter les vitesses, ce que font tous les jours les utilisateurs de machines-outils et les fabricants d'outils.

En fait, il s'avère que, dans des conditions optimales et avec des outils particuliers, cet effet est encore exagéré par le fait que les coefficients spécifiques de coupe diminuent légèrement. Dans ces conditions, il est courant d'atteindre des taux d'enlèvement dans l'alliage d'aluminium de l'ordre de 80 cm³/(kW · min), soit un coefficient spécifique moyen de coupe de 75 daN/mm² au lieu de 100 daN/mm² régulièrement obtenu en vitesse conventionnelle.

L'augmentation de la vitesse diminuant les forces de coupe, il est naturel de tenter d'affiner les arêtes de coupe des outils. Cela s'avère possible et le résultat se manifeste par une augmentation de la productivité P de l'outil, c'est-à-dire une réduction du coefficient spécifique de coupe.

Le coefficient spécifique de coupe est défini par la relation :

$$F_c = K_s S$$

avec F_c (N) force de coupe tangentielle exercée sur la lame de l'outil,

K_s (N/m²) coefficient spécifique de coupe ou, mieux, pression spécifique de coupe,

S (m²) section du copeau.

Un calcul de régression linéaire :

$$P = P_0 + A v_c + B F_d + C \gamma = \frac{6\ 000}{K_s}$$

effectué à partir d'une centaine d'essais, a permis de déterminer les coefficients A , B et C pour un domaine d'utilisation UTGV moyen en contournage. P_0 désigne la productivité moyenne déterminée expérimentalement, v_c la vitesse de coupe, F_d l'avance à la dent et γ l'angle de coupe. Les résultats figurent dans le tableau 1.

On voit donc apparaître sur ce tableau l'influence positive des paramètres : vitesse de coupe, avance à la dent et angle de coupe, car à une variation positive de ces paramètres correspond une variation positive de la productivité.

Le deuxième paramètre (avance à la dent) est d'ailleurs bien connu des fabricants d'outils et des utilisateurs de machines-outils en vitesse conventionnelle, ce qui explique l'inflation observée ces dernières années sur l'avance de la machine. Certains outils travaillent à plus de 1 mm à la dent (tourteaux à 45° dans les métaux ferreux, par exemple).

1.3 Étude des temps de coupe et des possibilités nouvelles offertes par l'UTGV

1.3.1 Influence sur la conception de la pièce

Le paragraphe précédent explique pourquoi les forces de coupe diminuent lorsque la vitesse augmente. L'UTGV permet alors de réduire les épaisseurs des parois de certaines pièces puisque leur déformation est réduite. On observe en pratique que cela est possible pour les fonds usinés plaqués sur table à dépression (on a atteint 0,3 mm d'épaisseur, figure 1) ; par contre, sur les raidisseurs droits de grande longueur, les modes critiques de vibration interdisent l'usinage sur toute la hauteur lorsque l'épaisseur passe au-dessous de 2 mm. Grâce à certaines précautions et astuces d'usinage, il a pourtant été possible de faire des raidisseurs de 1,6 mm d'épaisseur et de 75 mm de hauteur.

1.3.2 Potentiel d'enlèvement de copeaux d'un outil de petit diamètre

À effort de coupe égal, le volume de matière enlevée par unité de temps est plus que proportionnel à la vitesse de coupe, car nous avons vu (§ 1.2) que le coefficient spécifique de coupe diminuait légèrement lorsque la vitesse de coupe augmentait. Le volume de matière enlevée par unité de temps est égal au produit de la section de passe (largeur × hauteur de passe) par l'avance. Étant donné que, en UTGV, l'avance à la dent, ou par tour dans le cas du tournage, est pratiquement égale à celle habituellement utilisée, l'avance de la machine est sensiblement multipliée par le rapport des vitesses de rotation de la broche. On en déduit donc que, pour un même effort sur l'outil, le volume de matière enlevée par unité de temps en UTGV est très nettement supérieur.

Exemple : soit une fraise de diamètre 20 mm, longueur 50 mm, usinant en ébauche une rainure de 20 × 10 mm ; le tableau 2 permet de constater qu'à effort égal le volume de matière enlevée est 6,25 fois supérieur.

Tableau 1 – Valeurs des coefficients A, B et C

Paramètres	Valeur moyenne	Coefficients
Vitesse de coupe v_c	4 100 m/min	$A = 40,7 \times 10^{-4} (\text{cm}^3 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$
Avance à la dent F_d	0,264 mm/dent	$B = 103,8 (\text{cm}^3 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) / \text{mm}$
Angle de coupe γ	20,4°	$C = 0,72 (\text{cm}^3 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) / ^\circ$

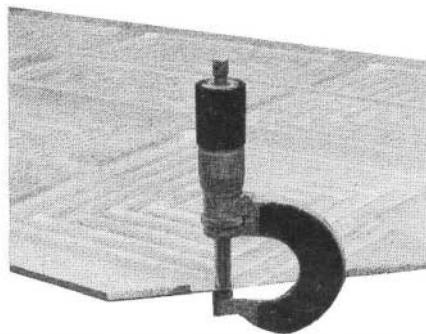
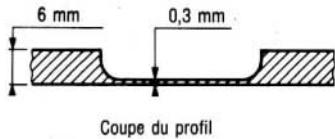


Figure 1 – Usinage des fonds d'alvéoles minces (jusqu'à 0,3 mm)

Tableau 2 – Comparaison des données entre l'usinage conventionnel et l'UTGV

Usinage	conventionnel	TGV
Largeur de passe (mm)	20	20
Profondeur de passe (mm)	10	10
Vitesse d'avance (m/min)	1,25	6,25
Nombre de dents.....	2	2
Vitesse de rotation(tr/min)	6 000	30 000
Coefficient spécifique de coupe K_s(daN/mm ²)	110	90
Débit de matière enlevée.....(cm ³ /min)	250	1 250
Effort approximatif sur l'outil.....(daN)	75	60

L'augmentation du débit d'enlèvement de copeaux avec des outils de petits diamètres apparaît ici comme un avantage important de la coupe à très grande vitesse dans les métaux tendres. Cela est apprécié des fabricants de matériels aéronautiques qui, pour des raisons de gain de poids, sont obligés d'utiliser des fraises de petits diamètres, afin de réduire les rayons des congés au croisement des raidisseurs.

1.3.3 Ébauche de pièces volumineuses

Pour l'ébauche de pièces volumineuses, les machines lourdes conventionnelles font aussi bien sinon mieux que les machines UTGV. En effet, les puissances de broches sont supérieures (§ 1.4) et l'utilisateur a la possibilité d'employer des outils de gros diamètres. Il en est de même pour le surfaçage des pièces de grandes dimensions.

1.3.4 Réduction des temps de finition

L'opération de finition pour une pièce donnée avec un outil déterminé s'exprime par une avance à la dent compatible avec l'état de surface et les déformations admissibles des pièces. La durée de l'opération de finition sera inversement proportionnelle à la vitesse de rotation de la broche, ce qui se traduit donc par un rapport de temps de finition de l'ordre de 5 en faveur de l'UTGV.

1.3.5 Comparaison des résultats d'usinage sur pièces réelles

1.3.5.1 Cadre renfort du fuselage du Falcon 900 (Société Marcel Dassault)

Le gain de temps total estimé pour ce genre de pièce (figure 2) est de l'ordre de 3, montage et démontage compris.

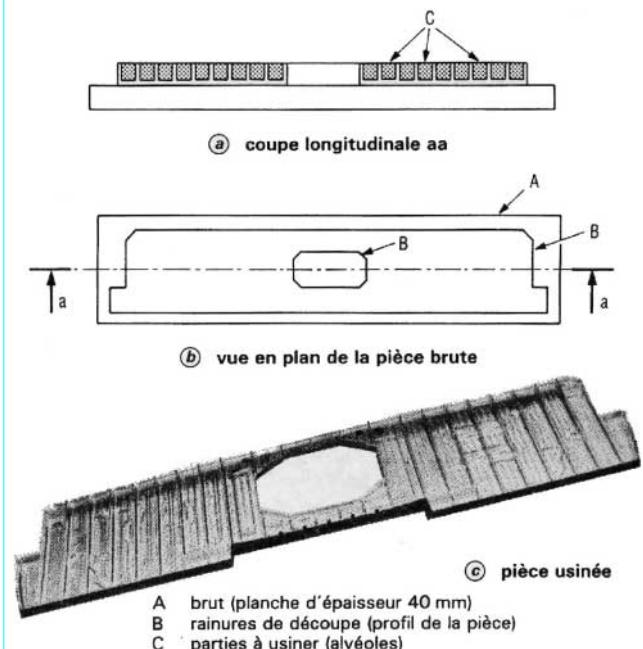


Figure 2 – Usinage du cadre renfort du fuselage du Falcon 900

1.3.5.2 Usinage TGV de pièces aéronautiques à l'étranger (LTV Aerospace and Defense Company, Dallas)

Si l'on compare, pour la pièce (figure 3), l'usinage TGV à l'usinage conventionnel sur machine CNC (commande numérique par calculateur), le rapport estimé des temps totaux d'usinage est très favorable à l'UTGV (de l'ordre de 2,5) comme l'indique le tableau 3.

1.4 Conception d'une machine UTGV pour métaux tendres

1.4.1 Choix des paramètres et optimisation

Les règles de l'art permettent de simuler la machine complète en tenant compte des caractéristiques de la CNC et des gains d'asservissement (type de contrôle de la trajectoire, erreur de poursuite, temps d'échantillonnage, temps de lecture de bloc), de la géométrie de la pièce, des caractéristiques des moteurs d'axes, des vitesses programmées, des bandes passantes mécaniques, des cinématiques d'entraînement, ainsi que du comportement dynamique de la structure (rigidité, masse, amortissement des différents modes naturels de résonances).

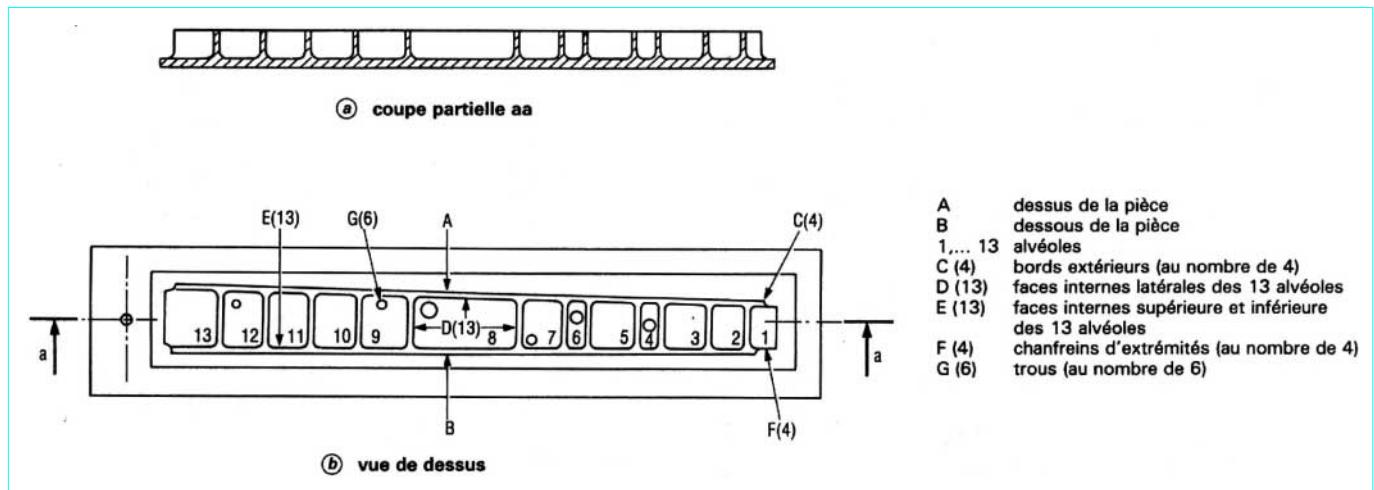


Figure 3 – Pièce aéronautique (LTV Aerospace and Defense Company, Dallas)

Tableau 3 – Données d'usinage d'une pièce aéronautique (figure 3)

Phases d'usinage	Opérations	Zone d'usinage (figure 3)	Temps total par phase		Temps d'usinage (min)	Débit de copeaux (cm ³ /min)	Moyenne et maximum de puissance consommée (kW)
			HSM (min)	LSM (min)			
Ébauche et finition des fonds et sommets des raidisseurs	Surfaçage ébauche dessus et dessous de la pièce brute	A, B	47,0	127,3	2,3	458,8	7,3 à 15,1
	Finition dessus et dessous	A, B			0,5	245,8	7,4 à 12,9
	Ébauche des alvéoles, finition des fonds et des sommets des raidisseurs entre les alvéoles	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13			2,43 2,52 3,08 1,37 3,10 1,40 2,80 5,35 4,06 4,03 3,85 3,56 4,22	245,8 249,1 265,5 258,9 265,5 258,9 303,2 260,6 262,2 268,7 273,7 268,7	14,1 13,9 13,8 13,7 13,9 14,0 14,0 13,9 13,9 13,8 13,9 13,9
	Finition des bords extérieurs et des chanfreins d'extrémités	A, C			1,25	9,3	0,93
	Finition extérieure des flancs et côtés des alvéoles	B			1,75	8,6	1,20
	Finition des extrémités	D			4,75	38,0	2,10
	Finition intérieure des flancs	E			1,83	11,2	1,10
	Finition des extrémités et des trous (6)	F, G			1,50	5,9	0,60
	Sous-total				58,08	200,3	50,50
Changement d'outil	Changement d'outil				35,0	35,0	
	Arrêt et marche de la broche				5,0	5,0	
	Entrée manuelle des données				3,0	3,0	
Total			101,08	243,3			

HSM (High Speed Machine) : machine à très grande vitesse (UTGV).

LSM (Low Speed Machine) : machine à vitesse lente (usinage conventionnel CNC).

La figure 4 donne les différentes étapes de calcul.

1.4.2 Broche

Nous avons vu précédemment (§ 1.3.2) que les vitesses de rotation de la broche devaient être de l'ordre de 30 000 à 40 000 tr/min afin de bénéficier d'un gain appréciable en finition des raidisseurs. Pour ces vitesses, il est difficile de respecter le compromis puissance du moteur/portance du palier/vitesse de rotation/fréquence critique de la broche.

La technique adoptée est l'**électrobroche** : le rotor du moteur électrique est directement fixé sur la broche de la machine, ce qui évite toute transmission par engrenages qui, à ces vitesses, poseraient des problèmes. Il est évident que la masse du rotor réduit considérablement la fréquence critique de l'ensemble rotor/broche qui risque d'entrer en vibration lorsque l'outil usine. Les nombreux tests effectués montrent qu'il est souhaitable d'avoir un coefficient de sécurité très supérieur à 1 sur la fréquence critique, c'est-à-dire fréquence propre de la broche/vitesse de rotation ≥ 1 . Pour les électrobroches classiques (6 000 tr/min), cette condition est très facile à réaliser ; en UTGV, c'est l'inverse, ce qui oblige à réduire la masse du rotor et, par conséquent, la puissance du moteur.

À ce stade, on distingue deux techniques.

■ **Electrobroche à paliers sur roulements à billes** (article *Roulements et butées à billes et à rouleaux* [B 5 370] dans le présent traité) : c'est évidemment la solution la plus classique et apparemment la plus simple à réaliser. En fait, cette technique est applicable aux électrobroches tournant au maximum à 30 000 tr/min pour un outil équipé d'un cône d'entraînement de norme SA 30. En effet, il existe une relation directe entre la vitesse de rotation maximale du roulement et les diamètres intérieur/extérieur de celui-ci ; le cône SA 30 imposant un diamètre à la broche, il n'est pas possible d'augmenter les vitesses indéfiniment. Les principales limitations des roulements sont :

- la dispersion thermique, pratiquement proportionnelle au carré de la vitesse de rotation ;
- la durée de vie, inversement proportionnelle à la vitesse de rotation.

La première limitation peut être repoussée par l'adjonction d'un groupe réfrigérant et par la circulation d'huile refroidie dans les roulements. Il est possible que l'apparition des roulements en céramique repousse un peu plus loin cette limitation. La deuxième limitation peut être augmentée par le contrôle rigoureux de la précharge et elle disparaîtra peut-être si l'on utilise des roulements en céramique.

■ **Électrobroche à paliers magnétiques** (article *Paliers magnétiques* [B 5 345] dans le présent traité) : cette technique, très au point en France, élimine les deux limitations précédentes puisque les frottements, donc l'usure, sont supprimés. Par contre, d'autres limitations apparaissent avec, en particulier, la portance des paliers et le manque d'amortissement naturel de la broche qui *flotte* dans un champ magnétique.

Le premier critère impose un allongement de la broche puisque la portance du palier est proportionnelle au produit longueur \times diamètre du palier et que le diamètre, bien que supérieur aux broches à roulements, est limité à cause des forces centrifuges qui risquent de déformer les tôles magnétiques frettées ; l'allongement de la broche et son alourdissement limitent donc la puissance disponible de la broche à un niveau légèrement supérieur à celui d'une électrobroche à roulements. Le manque d'amortissement interne de la broche est combattu par l'adjonction d'un amortisseur en bout d'arbre qui a, par contre, un effet négatif sur le coefficient de vitesse critique.

Dans ces conditions, on peut considérer que, à vitesse égale, l'électrobroche à paliers magnétiques peut être 1,5 fois plus puissante que l'électrobroche à roulements. Par contre, à cause de la portance limitée des paliers, le programme d'usinage de la pièce devra prendre en compte les variations d'efforts de coupe, dues à des surépaisseurs ou au passage d'angles vifs, par une réduction de la vitesse d'avance.

1.4.3 Autres techniques

Il serait possible de développer des broches UTGV sur coussin d'air. Les caractéristiques seraient proches de celles à paliers magnétiques. Malheureusement, il ne semble pas que ce type de produit ait été fabriqué pour ce domaine d'application.

1.4.4 Structure de la machine

La structure d'une machine-outil travaillant en UTGV dans les alliages d'aluminium est sensiblement différente d'une machine-outil classique. Les accélérations nécessaires doivent être très supérieures du fait de l'accroissement des vitesses.

Par exemple, si l'on suppose que la machine doit effectuer une trajectoire de courbure r , l'accélération centripète qui s'exprime par $\Gamma = V^2/r$ est proportionnelle à V^2 . Dans ces conditions, le parcours x nécessaire pour atteindre la vitesse programmée (la machine étant initialement à vitesse nulle) est comparable à celui d'une machine conventionnelle. En effet :

$$V^2 = 2\Gamma x$$

$$\text{Si } \left(\frac{V_1}{\Gamma_1}\right)^2 = \left(\frac{V_2}{\Gamma_2}\right)^2, \text{ on aura :}$$

$$\frac{x_1}{x_2} = 1$$

avec Γ_1 accélération centripète sur machine classique,
 Γ_2 accélération centripète sur machine UTGV.

La figure 5 permet de constater les différences fondamentales entre une machine classique et une machine UTGV :

- la rigidité est de 2 à 4 fois inférieure (les efforts de coupe sont très faibles) ;
- le portique est 25 fois plus léger ;

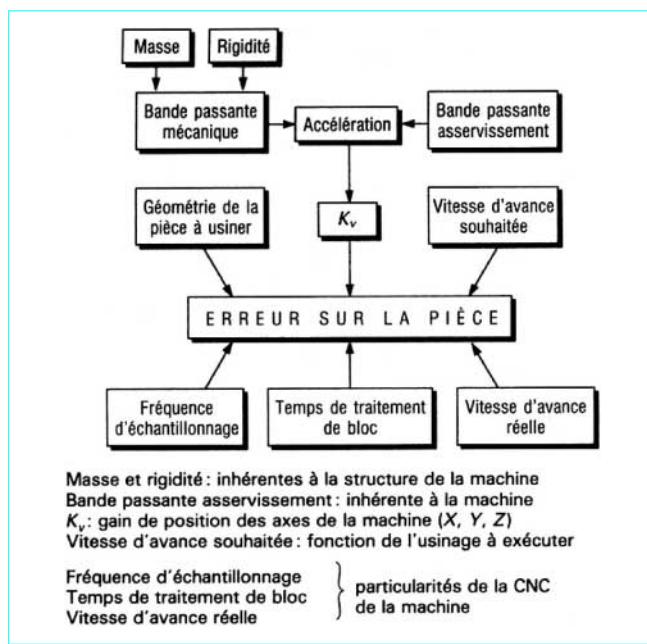


Figure 4 – Schéma de synthèse des étapes de calcul

- la pièce est placée verticalement afin d'évacuer facilement les copeaux et d'éviter de *traîner* des tuyaux d'aspiration avec le portique ;
- les guidages sont aérostatiques ou à patins à galets à haute vitesse ou encore à patins à billes à recirculation.

1.4.5 Mouvements des trois axes de translation

Les figures 6 et 7 donnent respectivement :

- le schéma d'un axe de déplacement de machine-outil contrôlé par une CNC (commande numérique par calculateur) ;
- le schéma-bloc de l'asservissement.

Les cinématiques d'entraînement doivent avoir des caractéristiques très spéciales. En effet, une grande raideur est nécessaire afin d'éviter les oscillations des masses constituant la machine, lors des déplacements à forte accélération. En effet, il est très nuisible d'avoir des résonances mécaniques. Il faut donc augmenter le plus possible les fréquences de résonance des masses mobiles (table, chariot). Cela est réalisable en diminuant la masse et en augmentant la rigidité suivant l'expression :

$$\omega^2 = K/M$$

avec ω pulsation du 1^{er} mode de résonance naturelle,

K rigidité de l'ensemble cinématique,

M masse en mouvement.

Cette condition est très difficile à réaliser, en particulier pour les portiques mobiles, où seuls des couples pignons/crémaillères permettent de respecter presque correctement les critères de fréquences en prenant soin de grossir, autant que faire se peut, les dimensions des pignons et en préchargeant l'ensemble sans l'aide de ressort ou arbre de torsion. Cela nécessite évidemment une précision extrême sur le taillage des pignons et des crémaillères. Pour les organes de plus faibles masses, la vis à billes à petit diamètre/grand pas est une solution simple et économique ; elle permet d'atteindre aisément des courses de 1 600 mm sans risque de rupture par résonances critiques et pour des vitesses de 30 m/min.

1.4.6 Commande numérique par calculateur (CNC) et asservissements d'axes

La CNC doit aller vite aussi bien pour surveiller la trajectoire que pour lire les informations. Cette tâche est difficile à réaliser et les microprocesseurs les plus performants du marché (tels que ceux de la série 68000 de Motorola) sont à peine à la hauteur.

Par ailleurs, si l'on se cantonne au schéma classique d'asservissement de position d'un axe numérique, on peut écrire (figure 7) :

$$V_s = K_v (x_c - x_s)$$

avec V_s vitesse sur l'axe considéré,
 K_v gain de position,
 x_c position commandée à l'instant t , c'est-à-dire déterminée à chaque instant par le calculateur,
 x_s position réelle à l'instant t .

Suivant ce schéma, on peut faire l'hypothèse de ne pas dépasser 5 mm d'erreur de poursuite, la trajectoire réelle étant très proche de la trajectoire linéaire et l'erreur n'apparaissant pas sur la pièce usinée. Si l'on admet de travailler à 10 m/min, on obtient un gain K_v égal à :

$$K_v = \frac{V_s}{(x_c - x_s)} = \frac{10/60}{(5 \times 10^{-3})} = 33,33 \text{ s}^{-1}$$

Dans ces conditions, si l'on dérive par rapport au temps l'expression précédente, on obtient :

$$\Gamma_s = \dot{V}_s = K_v (\dot{x}_c - \dot{x}_s)$$

Si l'on part sur l'hypothèse que \dot{x}_c est un échelon vitesse et que $\dot{x}_c = 0$ pour $t = 0$ (axe arrêté à $t = 0$), on obtient l'accélération :

$$\Gamma_s = 33,33 \times \frac{10}{60} = 5,55 \text{ m/s}^2 \text{ qui est déjà supérieure à } g/2$$

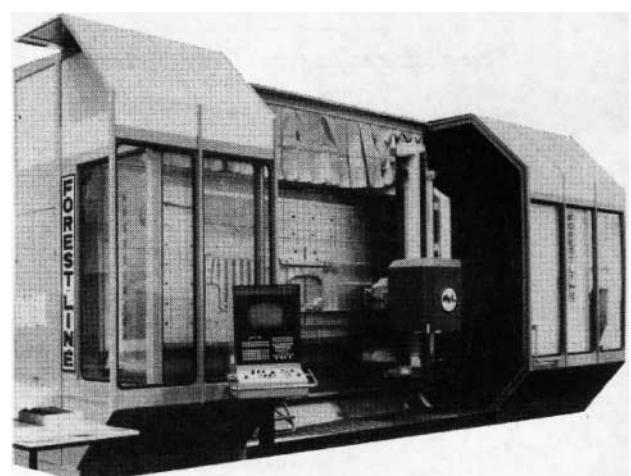
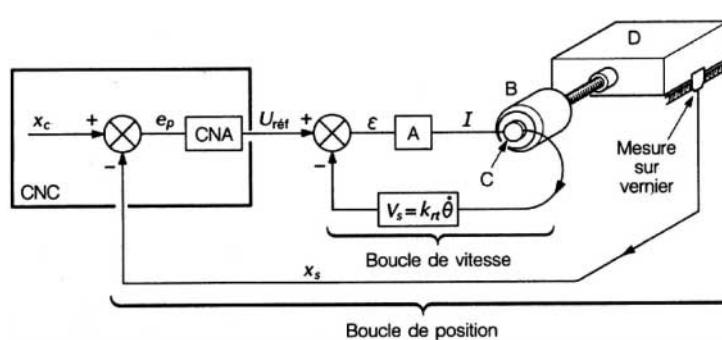
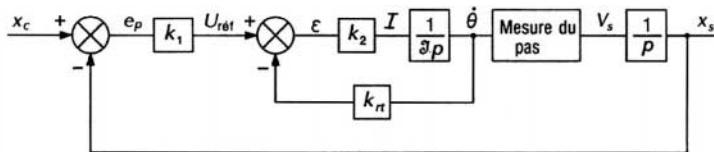


Figure 5 – Machine d'usinage très grande vitesse des alliages d'aluminium



A	variateur
B	moteur
C	génératerice tachymétrique
CNA	convertisseur numérique-analogique
D	table ou chariot de la machine
e_p	erreur de poursuite
ε	écart entre tensions
I	courant généré
$U_{\text{réf}}$	tension de référence
V_s	vitesse de déplacement de l'axe
x_c	position commandée à l'instant t
x_s	position réelle machine à l'instant t

Figure 6 – Schéma d'un axe de déplacement de machine-outil contrôlé par CNC



On peut écrire :

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = \frac{k_2}{g} e = \frac{k_2}{g} (U_{\text{ref}} - k_{rt} \dot{\theta}).$$

$$\text{d'où} \quad \dot{\theta} = \frac{k_2 U_{\text{ref}}}{g p + k_2 k_{rt}}$$

Or $V_s = \text{pas } \dot{\theta}$ et $U_{\text{ref}} = k_1 e_p$

$$\text{donc} \quad V_s = \text{pas } \dot{\theta} = \text{pas } \frac{k_2 k_1 e_p}{g p + k_2 k_{rt}}$$

Si l'on étudie l'asservissement à faible fréquence ($p \rightarrow 0$), on a alors :

$$V_s = \text{pas } k_1 e_p / k_{rt}$$

$$\text{soit} \quad V_s = K_v e_p = K_v (x_c - x_s)$$

avec $K_v = \text{pas } k_1 / k_{rt}$.

e_p erreur de poursuite
 ε écart entre tensions
 I courant généré
 g inertie propre moteur-masse mobile
 k_1, k_2 gains de l'amplification
 k_{rt} retour tachymètre

$$\frac{1}{p} = \int_0^{\infty} e^{-pt} dt \quad \text{transformée de Laplace}$$

pas pas de mesure ($\delta x / \delta \theta$)

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{avec } \theta \text{ (rad/s) vitesse de rotation du moteur}$$

U_{ref} tension de référence

x_c position commandée à l'instant t

x_s position réelle machine à l'instant t

Figure 7 – Schéma-bloc de l'asservissement : axe de déplacement de machine-outil commandé par CNC

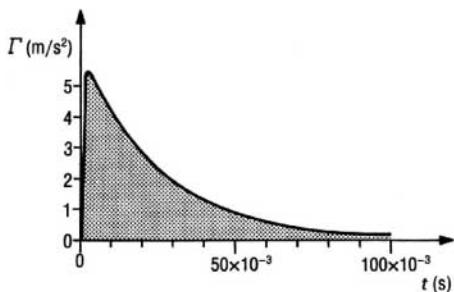


Figure 8 – Courbe d'accélération des masses en mouvement pour une vitesse de déplacement de 10 m/min

Si la vitesse demandée est de 20 m/min, l'accélération nécessaire devra dépasser g , ce qui pose des problèmes sérieux sur les axes de déplacement (X, Y, Z).

De plus, dans ces conditions, l'accélération atteint un maximum pour $t = 0 + \varepsilon$ (conséquence de la dérivée de V_s par rapport à e_p) pour venir s'annuler quelques fractions de seconde plus tard (figure 8). On voit que la forme de la courbe d'accélération ressemble à celle provoquée par un coup de marteau. Il est donc bien évident que, dans ces conditions, il est extrêmement difficile de contrôler en toute circonstance le déplacement des masses de la machine. Pour y remédier, il est possible d'agir de deux manières.

■ **Générer une rampe d'accélération du genre ($v_c = \Gamma t$), le contrôle de la position étant toujours du même type que précédemment** : en fait, seule la position commandée x_c est modifiée dans sa génération dans le temps et les inconvénients précédents sont supprimés. Par contre, il subsiste les erreurs engendrées par la présence de l'erreur de poursuite. Les deux graphiques (figures 9 et 10) donnent les relations existant entre la vitesse d'avance, l'angle entre deux segments de trajectoires linéaires et l'erreur engendrée.

■ **Contrôler la position de l'axe de déplacement en prenant en compte sa vitesse et/ou son accélération instantanée** : dans ce cas, il est possible de réduire considérablement l'erreur de poursuite et de contrôler l'accélérateur de façon plus efficace au cours des opérations d'usinage. L'inconvénient de cette solution est qu'une petite erreur sur les grandeurs mesurées perturbe la position de l'axe et risque de faire des marquages sur la pièce. Des CNC travaillent couramment à quelques dixièmes de millimètre d'erreur de pour-

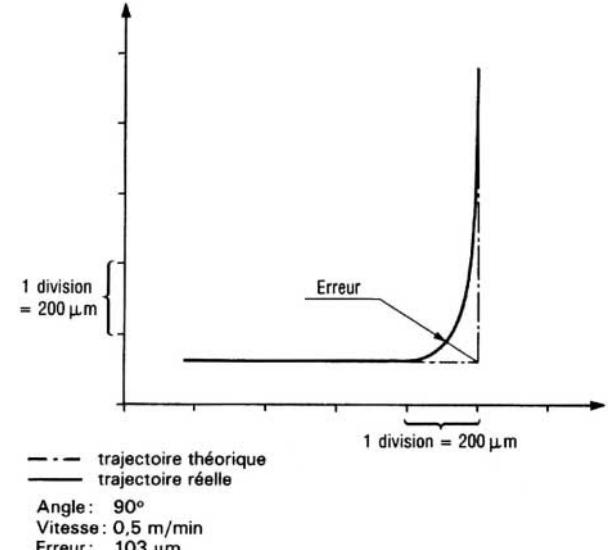


Figure 9 – Visualisation de l'erreur d'usinage due au sommet d'un angle

suite. Cette technique, assez ancienne, redevient d'actualité avec l'apparition des processeurs 32 bits sur les CNC et sur les commandes d'axes numériques par l'intermédiaire des moteurs de *brushless* (moteurs synchrones sans balais).

Il est évident que, pour ce type de machine, les automates programmables doivent également avoir un temps de réponse très court afin d'assurer une sécurité suffisante.

La CNC doit aussi pouvoir recevoir des informations en provenance de capteurs fixés dans la broche en particulier. Ces capteurs permettent une surveillance du processus et de couper instantanément l'avance de la machine en cas de surcharge des paliers. Une application caractéristique de cette technique a été faite avec les broches à paliers magnétiques, qui, pour assurer l'asservissement en position du palier, utilisent des capteurs de déplacement sans contact, à haute bande passante. L'exploitation directe des signaux, délivrés par ces capteurs, permet l'arrêt sur l'avance de la machine dans un délai de l'ordre de 20 ms.

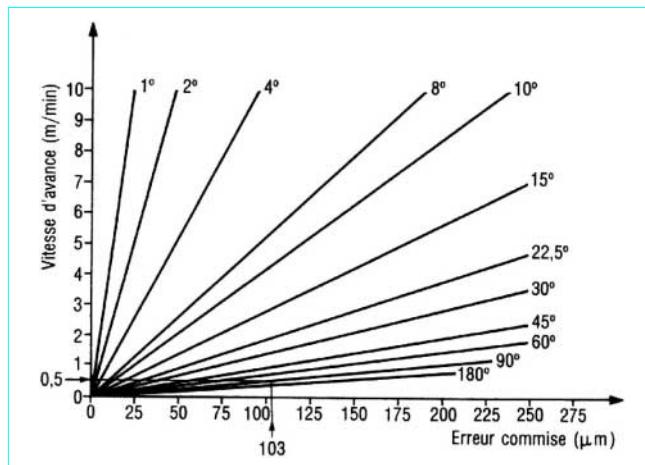


Figure 10 – Calcul de l'erreur d'usinage au sommet d'un angle

1.4.7 Développements prévus dans un proche avenir

Il est certain qu'en Europe et aux États-Unis un intérêt grandissant se manifeste pour l'UTGV. En France, des machines complètement automatisées vont être proposées sur le marché. Tous les facteurs influant sur la productivité de la machine ont été analysés ; des solutions nouvelles ont été apportées qui permettront de réduire les temps morts dus au changement de la pièce, à sa préparation, à l'évacuation des copeaux, au changement d'outil, etc.

1.4.8 Recherches à l'étranger

Les États-Unis publient périodiquement des comptes rendus de recherches sur la coupe à grande vitesse des métaux légers. Des contrats importants sont régulièrement signés entre le Département de la défense et certaines sociétés américaines.

On peut citer :

- LTV Aerospace and Defense Company ;
- General Electric Company ;
- Maxwell laboratoires Inc. ;
- Lockheed Missiles and Space Compagny Inc. ;
- la NASA (National Aeronautics and Space Administration).

En Europe, la France a passé quelques contrats de recherche pour le développement de broches à paliers magnétiques et pour des machines prototypes. En Allemagne, l'université de Darmstadt et la société Heyligenstadt ont travaillé ensemble sur une machine de développement.

2. Coupe à très grande vitesse de la fonte

2.1 État de la technique

Actuellement, l'usinage à très grande vitesse de la fonte grise est bien maîtrisé et la société Forest-Liné teste cette technique en vraie grandeur dans un atelier d'usinage afin d'en cerner les avantages et inconvénients. Une machine (alésouseuse) a été spécialement équipée, pour réaliser ce programme, d'un palier hydrostatique autorisant une vitesse plus de deux fois supérieure à celle des machines conventionnelles. D'ores et déjà, il apparaît que le personnel est très sensible à ce nouveau procédé et que sa conversion est aisée. Par contre, il ressort que les machines doivent recevoir des accessoires

supplémentaires performants, en particulier, des évacuateurs de copeaux, une protection contre les projections, etc. Les vitesses utilisées en usine vont de 600 m/min à 1 000 m/min.

2.2 Fraisage TGV de la fonte

Diviser par dix les temps de coupe, tel était l'objectif du programme de recherches engagé en 1984 par la société Forest-Liné et le CETIM.

Sur le plan coupe, il s'agissait donc de trouver des outils capables de fonctionner à des vitesses de coupe supérieures à 1 000 m/min, garantissant une durée de vie satisfaisante (> 15 min) et dont le coût puisse rester compatible avec l'objectif de réduction des coûts d'usinage.

2.2.1 Coupe à grande vitesse

Elle est obtenue grâce aux **nouveaux matériaux d'outils**.

En dehors des défaillances brutales dues à des conditions opératoires inadaptées ou à une valeur d'usure en dépouille dépassant la limite acceptable (de l'ordre de 0,6 mm) par l'outil, l'usure de ce dernier se produit pour des vitesses de coupe moyennes par :

- écaillages engendrés par les fissures dues aux chocs thermiques et mécaniques sur l'outil ;
- abrasion due aux points durs inclus dans la matière usinée.

L'outil résiste à ces mécanismes de dégradation principalement grâce à sa dureté à chaud et à sa ténacité.

Lorsque des vitesses de coupe élevées sont employées, l'augmentation de température de coupe est importante et l'outil doit alors faire preuve de qualités supplémentaires : stabilité chimique et faible affinité avec le matériau usiné pour éviter les mécanismes de dégradation par diffusion (transfert d'éléments du matériau d'outil dans les copeaux).

Pour le fraisage des alliages ferreux, nous avons utilisé les matériaux d'outils suivants :

- les *céramiques à base d'alumine*, pures ou mixtes (addition de carbures métalliques), dont les améliorations récentes ont conduit à une augmentation de la ténacité ;
- les *céramiques à base de nitrule de silicium (Sialon)*, apparues au début des années 80, qui présentent une meilleure résistance aux chocs mécaniques et thermiques que les précédentes ;
- le *nitrule de bore cubique (CBN)*, matériau de synthèse de dureté légèrement inférieure au diamant.

Le comportement de ces matériaux varie très largement en fonction de leur composition, de leur structure, ainsi que des caractéristiques du matériau usiné, comme le prouvent les résultats des essais entrepris sur les fontes grises et les aciers de construction.

2.2.2 Conditions de coupe

On arrive à des résultats spectaculaires : **débit de copeaux multiplié par 15 et volume de matière enlevée multiplié par 10**.

En surface, les essais réalisés au CETIM et par Forest-Liné ont conduit à des durées de vie supérieures (plaquette CBN) ou égales à 20 min pour des vitesses de coupe supérieures ou égales à 2 000 m/min. Les résultats les plus positifs ont été obtenus avec les outils en céramique à base de nitrule de silicium et en nitrule de bore cubique.

La comparaison des performances réalisables en fraisage à très grande vitesse des fontes grises par rapport au fraisage classique (avec plaque en carbure de tungstène) montre (figure 11) que :

- le débit de copeaux, qui influence directement la productivité, est multiplié par 15 (au minimum) pour des plaquettes *Sialon* et des plaquettes CBN ;

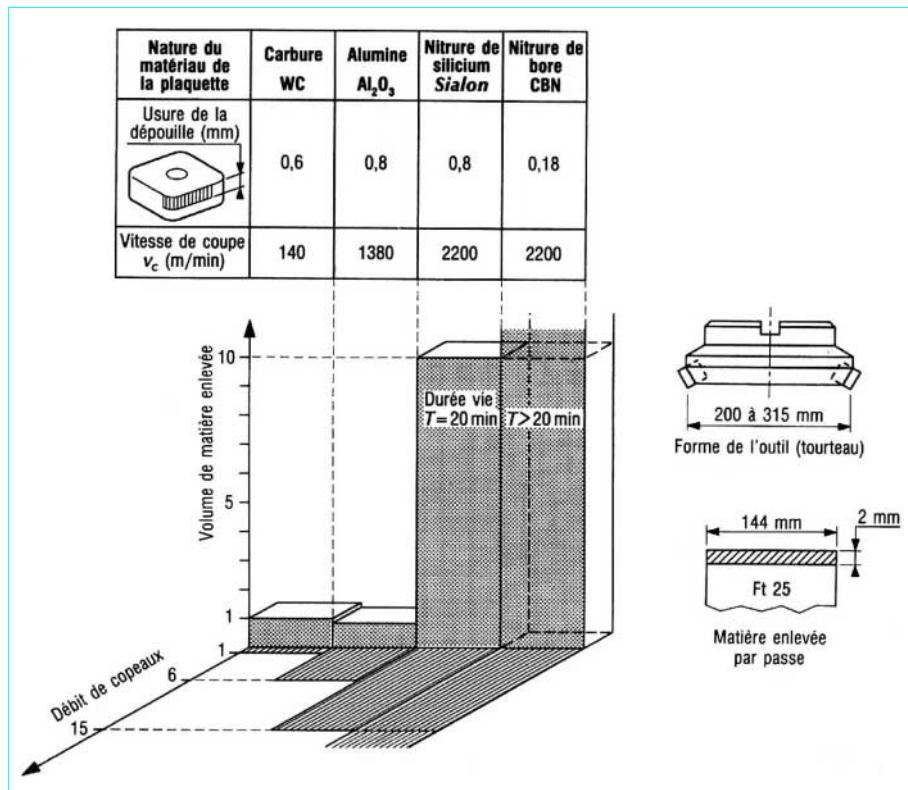


Figure 11 – Performances comparées des essais du CETIM (Fonte Ft 25)

— le volume total de copeaux enlevés par durée de vie d'outil représentatif du nombre de pièces usinées) est multiplié par 10 (au minimum) pour des plaquettes *Sialon*. L'utilisation de plaquettes CBN donne des résultats encore plus spectaculaires ; on ne connaît pas à ce jour les limites d'usure de ce matériau dans les plages de vitesse utilisées.

Des essais de fraisage combiné avec des outils équipés de plaquettes en nitrule de silicium ont confirmé ces ordres de grandeur (vitesse de coupe de 1 800 m/min).

2.2.3 Simulation technico-économique

Elle permet d'obtenir des **coûts d'usinage divisés par 2, même avec des machines conventionnelles**.

La mise en œuvre industrielle du fraisage à très grande vitesse des fontes est actuellement possible sous réserve d'adapter les conditions opératoires aux caractéristiques propres à chaque entreprise :

— caractéristiques des pièces à usiner (nuances, élaboration, dimensions, qualité des surfaces à réaliser) ;

— caractéristiques des moyens de production (puissance des machines, vitesses de rotation, vitesses de déplacement).

À titre d'exemple, nous proposons une étude comparative basée sur la simulation technico-économique d'une opération de surfacage d'une pièce en fonte réalisable sur trois machines de caractéristiques très différentes (tableau 4). Le volume de matière enlevée par passe est représenté sur la figure 12.

Tableau 4 – Comparaison caractéristiques des machines servant de base à la simulation technico-économique

Caractéristiques	Machines		
	Type 1	Type 2	Type 3
Puissance nominale.....(kW)	15	40	36
Vitesse de la broche (nombre maximal de tours)(tr/min)	5 000	4 000	9 000
Vitesse d'avance maximale....(m/min)	5	4	9
Estimation du prix d'achat(MF)	1,5	3	≈ 3
Estimation du taux horaire.....(F)	≈ 300	≈ 500	≈ 500

Type 1 : faible puissance et vitesse classique.

Type 2 : forte puissance et vitesse classique.

Type 3 : banc d'essai Forest-Liné à Capdenac. Machine à couple constant, forte puissance et grande vitesse.

2.2.4 Comparaison technico-économique

Les résultats des comparaisons de productivité et de coût d'utilisation des très grandes vitesses de coupe par rapport à l'usinage classique sont regroupés dans le tableau 5.

À l'examen de ce tableau, il ressort que, pour une faible profondeur de passe ($a = 1$ mm) sur un centre d'usinage type 1, le fraisage à très grande vitesse (vitesse de coupe de l'ordre de 1 000 m/min) peut permettre de diviser environ par 2 les temps et les coûts d'usinage. Une réduction plus importante du temps est possible avec la machine type banc d'essai de Forest-Liné (type 3) mais l'intérêt économique dépend directement du prix de cette machine.

Tableau 5 – Comparaison technico-économique (1)

Conditions opératoires		Machine type 1 (15 kW-5 000 tr/min)	Machine type 2 (40 kW-4 000 tr/min)	Machine type 3 (36 kW-9 000 tr/min)
Vitesse de coupe de l'outil (m/min)	Profondeur de passe a (mm)			
Conditions classiques : $v_c = 150$ m/min Outil en carbure de tungstène	1	$T_c = 0,34$ ch $T_u = 0,57$ ch $C_u = 2,16$ F Limitation outil (avance/dent) = 0,4	$T_c = 0,34$ ch $T_u = 0,57$ ch $C_u = 3,22$ F Limitation outil (avance/dent) = 0,4	Machine mal adaptée Puissance insuffisante à basse vitesse de rotation
	2	$T_c = 0,34$ ch $T_u = 0,57$ ch $C_u = 2,16$ F Limitation outil (avance/dent) = 0,4	$T_c = 0,34$ ch $T_u = 0,57$ ch $C_u = 3,22$ F Limitation outil (avance/dent) = 0,4	
Conditions grande vitesse : $v_c \approx 1 000$ m/min Outil en Sialon	1	$T_c = 0,12$ ch $T_u = 0,31$ ch $C_u = 1,23$ F Limitation machine (vitesse de rotation)	$T_c = 0,12$ ch $T_u = 0,31$ ch $C_u = 1,83$ F Limitation machine (vitesse de rotation et d'avance)	$T_c = 0,08$ ch $T_u = 0,27$ ch $C_u = 1,63$ F Limitation machine (puissance)
	2	Machine mal adaptée (puissance insuffisante)		$T_c = 0,18$ ch $T_u = 0,37$ ch $C_u = 2,13$ F Limitation machine (puissance)
Conditions grande vitesse : $v_c = 2 000$ m/min Outil en Sialon	1			
	2	Machine mal adaptée Vitesse de rotation insuffisante Vitesse d'avance insuffisante Puissance insuffisante		
Conditions grande vitesse : $v_c = 2 000$ m/min Outil en nitrure de bore cubique	1			
	2	Machine mal adaptée Vitesse de rotation insuffisante Vitesse d'avance insuffisante Puissance insuffisante		

(1) T_c temps copeau. T_u temps copeau + temps de déplacement + temps de changement d'outil.

Ces temps sont exprimés en ch (1/100 heure).

 C_u coût de l'usinage = coût machine + coût outil.

Les temps de préparation des outils ne sont pas pris en compte.

Si la profondeur de passe est de 2 mm, on observe que la machine type 2 à vitesse de rotation moyenne (vitesse de coupe de l'ordre de 1 000 m/min) ou la machine spéciale type 3 à vitesse de rotation élevée (vitesse de coupe de 2 000 m/min) conduisent à une réduction importante des temps d'usinage (division par 2) associée à une légère diminution des coûts.

On peut noter, d'ailleurs, que l'utilisation de broches offrant plus de puissance à vitesse de rotation élevée permettrait d'augmenter encore la productivité avec une réduction des coûts plus significative comme le montre l'**exemple** suivant :

Exemple :

- Broche Forest-Liné à couple constant : $P = 60 \text{ kW}$
 $N = 10\,000 \text{ tr/min}$
- Outil *Sialon* : $a = 2 \text{ mm}$
 $v_c = 2\,000 \text{ m/min}$
- Temps d'usinage $T_u = 0,23 \times 10^{-2} \text{ h}$
- Coût d'usinage $C_u = 1,52 \text{ F}$

soit par rapport à l'usinage classique à l'outil carbure un temps d'usinage divisé par 2,5 et un coût d'usinage divisé par 1,4.

Remarques : l'utilisation du nitrure de bore, d'un coût très élevé par rapport au *Sialon*, est pénalisée dans notre simulation par le fait que nous ne connaissons pas actuellement les limites réelles d'usure de ce matériau. Par défaut, nous avons donc pris en compte une durée de vie de 60 min qui est certainement sous-évaluée. Des essais complémentaires, relativement coûteux en temps et en matière usinée, seraient à effectuer si l'on voulait affiner la détermination d'une loi de durée de vie pour ce matériau. De plus, quelques avantages qualitatifs, liés au faible degré d'usure, pourraient être pris en compte : moins de changement de plaquettes donc moins de temps de réglage, plus grande stabilité dimensionnelle des usinages réalisés, etc.

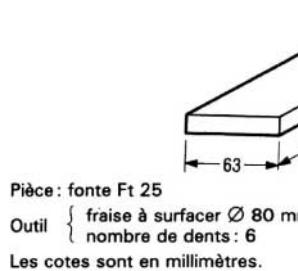


Figure 12 – Représentation du volume de matière enlevée par passe

2.2.5 Bilan technico-économique

L'amélioration de productivité et de compétitivité due à l'utilisation de très grandes vitesses de coupe peut être résumée dans le tableau 6. Les temps T_r et coûts C_r correspondent aux conditions de référence basées sur l'utilisation d'un outil carbure avec :

$$v_c = 150 \text{ m/min sur une machine type 1} \quad \begin{cases} P = 15 \text{ kW} \\ N = 5\,000 \text{ tr/min} \end{cases}$$

Remarques diverses

■ L'usinage TGV de la fonte ne modifie pas les lois de la coupe : pas de modification importante de l'effort spécifique de coupe, la représentation de la durée de vie par le modèle de Taylor reste vérifiée.

■ L'utilisation de grandes vitesses de coupe sur des machines conventionnelles conduit à limiter le nombre de dents en fonction de la puissance disponible. Ainsi, pour un niveau de productivité supérieur ou égal à celui obtenu avec des outils en carbures classiques, cela permet :

- en ébauche, de réduire de façon importante les efforts de coupe et par là même d'alléger des dispositifs de bridage des pièces, les risques de déformation de ces dernières étant également réduits ;
- en surfaçage de finition, d'utiliser un outil à une seule plaquette ronde, permettant d'atteindre des états de surface de l'ordre de 1 μm ce que l'on ne peut faire normalement qu'avec des plaquettes racleuses, prérglées avec soin.

2.3 Moyens d'essais en France

Le CETIM a deux machines capables d'effectuer des essais d'UTGV dans la fonte et dispose de moyens performants pour analyser les efforts, la puissance, l'usure des outils, la qualité des surfaces, etc.

La société Forest-Liné a un banc d'essai polyvalent (ancienne machine) permettant d'effectuer des usinages sous contrôle numérique trois axes, dans des plages de vitesses de 500 à 30 000 tr/min et avec des puissances à la broche atteignant 60 kW. Des moyens de surveillance peuvent être associés pour contrôler le processus puissance-effort sur les axes (X, Y, Z).

Un analyseur de spectre peut également être utilisé pour la surveillance des vibrations.

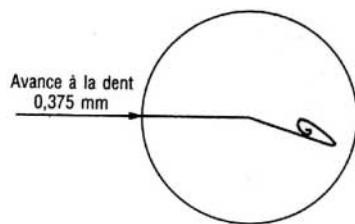
Tableau 6 – Amélioration de la productivité et de la compétitivité par rapport aux conditions de référence avec l'emploi d'un outil en *Sialon*

Machine	Opérations	Profondeur de passe (mm)	Vitesse de coupe (m/min)	Puissance consommée/disponible (kW)	Vitesse de rotation (tr/min)	Amélioration de la productivité : réduction du temps (1)	Amélioration de la compétitivité : réduction des coûts (1)
Type 1	Finition	≤ 1	1 250	14/15	5 000	$T_r/1,8$	$C_r/1,8$
Type 2	Ébauche	2	1 000	24/40	4 000	$T_r/1,8$	$C_r/1,2$
Type 3	Ébauche	2	2 000	30/32	8 000	$T_r/2$	$C_r/1,2$
	Finition	≤ 1	1 250	18/20	5 000	$T_r/2,1$	$C_r/1,3$
	Finition	≤ 1	2 000	27/32	8 000	$T_r/2,5$	$C_r/1,4$

Remarque : l'avance a été ajustée de manière à respecter au mieux l'ensemble des contraintes.

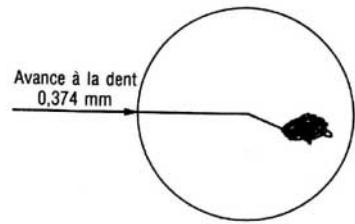
(1) T_r temps de référence (temps de préparation des outils non compris).

C_r coût de référence (correspond au coût d'usinage, c'est-à-dire coût machine + coût outil).



Direction usinage : -1,59869873776
 Puissance : 140014 W
 Vitesse de rotation de la broche : 2000 tr/min
 La machine tend rapidement vers sa position d'équilibre avec très peu d'oscillations.

Ⓐ usinage UTGV



Direction usinage : -1,59821109458
 Puissance : 14503 W
 Vitesse de rotation de la broche : 200 tr/min
 On constate un phénomène d'oscillations auto-entretenues.

Ⓑ usinage classique

Conditions de coupe :
 Diamètre de la fraise : 160 mm
 Nombre de dents : 8
 Largeur de passe : 120 mm
 Profondeur de passe : 5 mm
 Coefficient spécifique : $25 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
 Avance : 6 m/min

Caractéristiques modales de la machine.				
Numéro du mode	Masse kg	Fréquence Hz	Amortissement	Direction
1	534	52	0,16 *	(1,0,0)
2	487	43	0,22	(0,1,0)

Figure 13 – Comparaison des vibrations engendrées par l'usinage

2.4 Conception d'une machine UTGV pour la fonte

Les vitesses de coupe se situent entre 500 et 1 500 m/min. Dans ces conditions, il faut augmenter les vitesses d'avance en conséquence, si bien que la structure d'une machine d'usinage de la fonte va tendre vers celle des machines actuelles usinant les alliages d'aluminium mais avec une robustesse deux fois supérieure car la demande de puissance à la broche est forte.

2.4.1 Broche

Spécifications puissance/vitesse : les essais effectués par le CETIM et Forest-Liné ainsi que les études de simulation de fabrications, réalisées par le CETIM, montrent que la puissance nécessaire est importante et peut atteindre et même dépasser 60 kW pour des

outils standards de 100 à 160 mm de diamètre. La vitesse de rotation nécessaire se situe entre 2 000 et 10 000 tr/min. Les paliers sont du type roulement à billes bien que, à ces vitesses, il soit difficile d'assurer des températures basses de fonctionnement.

Il est certain que la mise au point d'une pareille broche nécessite un lourd investissement de recherche et développement.

La motorisation de la broche est classique, du type moteur synchrone, asynchrone ou synchrone sans balais.

2.4.2 Structure d'une machine UTGV

La structure devra être rigide et légère du fait que les vitesses d'avance peuvent atteindre 9 m/min. Pour cela, il semble que l'acier soudé soit le matériau adéquat capable d'assurer une bonne précision et une bonne stabilité dimensionnelle ainsi qu'une rigidité suffisante en rapport avec une masse faible. En effet, la fonte, à cause de son faible module d'élasticité, ne conviendra pas, du moins pour les parties mobiles. L'aluminium, quant à lui, est écarté pour des problèmes de coûts et à cause de son fort coefficient de dilatation.

La difficulté principale d'une telle machine est d'assurer un **comportement dynamique correct de l'ensemble** sous l'effet des accélérations et des efforts de coupe, en particulier, éviter le phénomène du broutement que l'on rencontre quelquefois sur des machines conventionnelles insuffisamment lourdes et rigides.

Des tests comparatifs ont été effectués sur des structures connues et il s'avère que l'UTGV réduit très souvent les vibrations engendrées par la coupe, du fait que les fréquences sont beaucoup plus élevées. La figure 13, issue d'un programme de simulation, montre bien ces différences. En effet, pour des vibrations du même ordre, l'UTGV permet de multiplier par 10 le volume enlevé par unité de temps, ce qui est considérable. Les tests effectués sur l'alésuseuse hydrostatique en atelier confirment d'ailleurs très bien ces observations.

3. Coupe à très grande vitesse de l'acier

3.1 État actuel de la technique

L'objectif des études et recherches est d'atteindre pour les aciers mi-durs les mêmes résultats que pour la fonte. Actuellement, les résultats obtenus sont encore loin de cet objectif, même avec les matériaux de coupe les plus coûteux tels que le nitride de bore. Des études et recherches appliquées et fondamentales sont effectuées sous l'égide du ministère de la Recherche et de la Technologie sur ce sujet. Des résultats encourageants ont été obtenus.

3.2 Utilisation des lasers pour préchauffer la pièce

Une équipe a été mise en place en France pour étudier la faisabilité d'un tel dispositif et les améliorations apportées.

À l'étranger, la société Ford travaille sur ce sujet depuis 1985 pour les aciers à haute résistance.

Le MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) a travaillé en particulier sur la mise au point d'un tour à deux lasers enlevant des *rondelles* de matière à chaque tour. La société General Electric a effectué des tests sur le titane et l'*Inconel*. Les exposés de ces travaux montrent qu'une réduction des efforts de coupe de respectivement 28 % et 49 % est possible du fait de la coupe à très grande vitesse.

4. Capteurs de surveillance

4.1 Nécessité d'une surveillance automatique

Une machine UTGV permet d'atteindre des vitesses d'avance de l'outil très importantes. Cet avantage pour la productivité peut devenir un sérieux inconvénient en cas d'incident sur l'outil.

Prenons l'exemple d'un fraisage à très grande vitesse de la fonte avec une fraise ayant une vitesse d'avance de 6 m/min. Par suite de rencontre avec un point dur, les plaquettes de la fraise sont brutalement endommagées, les arêtes actives sont brisées. Un compagnon surveillant la machine actionne l'arrêt d'urgence une seconde seulement après la rupture des arêtes. En dépit de cette rapide intervention, pendant ce bref délai d'une seconde, la fraise s'est déplacée de 10 cm dans la matière en usinant avec des plaquettes cassées. On imagine le danger encouru si l'opérateur n'est pas à proximité du bouton d'arrêt d'urgence.

Il y a donc nécessité, sur une machine UTGV, d'installer un *dispositif de surveillance automatique*, assurant une surveillance constante de l'outil et une réaction très rapide en cas d'incident.

4.2 Techniques utilisables

Les techniques de surveillance automatique de l'usinage sont en plein développement et n'ont encore que des applications industrielles limitées.

On distingue, dans les matériels de surveillance de l'usinage, ceux qui effectuent un contrôle hors opération (palpeurs, détecteurs de présence) et ceux qui permettent une surveillance continue avec contrôle *en temps réel* de l'état des outils.

Compte tenu de la nécessité d'intervenir au plus vite en cas d'incident, seuls les dispositifs permettant une surveillance continue de l'outil sont applicables au cas des machines UTGV.

Ces dispositifs, procédant par détection en temps réel, sont des moniteurs d'outils qui utilisent comme principe de surveillance :

— la **mesure des forces ou couples** supportés par l'outil pendant les périodes de formation de copeaux :

- pour la mesure des forces de coupe sur les outils fixes (tournage), on utilise des capteurs à jauge de contrainte ou à quartz généralement placés sur le porte-outil,

- pour la mesure des forces de coupe sur les outils tournants (fraises, forets), on utilise des capteurs à jauge de contrainte placés sur des éléments supportant la broche (bagues de roulement, butées, entretoises),

- pour la mesure des couples d'usinage, on se sert généralement des relations entre le couple moteur et l'intensité ou la puissance consommée par le moteur actionnant la broche de la machine.

A partir de mesures de forces et de mesures de couple ont été réalisés des détecteurs de bris d'outils efficaces. Des détecteurs de limite d'usure d'outils ont également été fabriqués, mais leur efficacité est pour le moment limitée aux opérations de grande série ;

— la **mesure de l'émission acoustique** produite par l'outil pendant l'usinage ; il ne s'agit pas de mesures de bruits, mais de mesures d'ondes élastiques ultrasonores (100 à 500 kHz) se propageant uniquement par voie solide (support d'outil, pièce, table, carter) à partir du point d'action de l'outil.

Cette mesure s'effectue par des capteurs spéciaux collés (à la façon d'un accéléromètre) sur l'un des éléments dans lesquels se propagent les ondes élastiques. À partir de mesures d'émission acoustique ont été réalisés des détecteurs de bris d'outils très sensibles et très rapides.

Les détecteurs utilisant les mesures de force de coupe ou d'émission acoustique sont parfaitement applicables au cas des machines UTGV. Ils permettront de surveiller les bris d'outils et d'actionner très rapidement un arrêt machine en cas d'accident.

Les détecteurs de limite d'usure, en développement pour les machines d'usinage à vitesses de coupe classiques, ne sont pas encore pleinement efficaces pour ces machines, et il serait hasardeux de les utiliser en l'état pour des machines UTGV.

4.3 Direction des recherches actuelles

4.3.1 Capteurs de surveillance

Les détecteurs actuels permettent de détecter efficacement les bris d'outils. Par contre, les méthodes de détection de la limite d'usure des outils ne sont encore fiables que pour des cas de figure limités comme les usinages répétitifs en grande série. Des recherches sont en cours, aussi bien en ce qui concerne les capteurs de force que les capteurs d'émission acoustique, pour définir quelles sont les formes de variation des signaux liées spécifiquement à l'état d'usure d'un outil.

Il s'agit de trouver la *signature* de l'usure dans les variations des signaux provenant des capteurs.

En ce qui concerne la détection de l'usure d'outils usinant à grande vitesse, une première série d'essais a été effectuée par le CETIM, dans les ateliers de Forest-Liné à Capdenac. Ce sont des capteurs d'émission acoustique qui ont été utilisés. Les résultats obtenus montrent des variations des signaux d'émission acoustique avec l'usure de la fraise, mais la *signature* de l'usure n'est pas encore clairement identifiée.

Une seconde voie de recherche est également ouverte et vise à réaliser des capteurs capables de mesurer, immédiatement après le passage de l'outil, la qualité de la surface usinée par l'outil. Si de tels capteurs fonctionnent en usinage classique, l'application aux machines UTGV posera le problème de l'adaptation de la vitesse de contrôle à la vitesse d'avance de l'outil.

4.3.2 Outil et processus de coupe

Les progrès potentiels du fraisage à très grande vitesse des aciers sont intimement liés à une meilleure compréhension du mode de dégradation des outils et de la formation du copeau à grande vitesse.

Des études de simulation théorique du processus de coupe, à partir des lois de comportement des matériaux usinés, sont en cours.

Par ailleurs, les travaux entrepris actuellement dans les laboratoires mondiaux de recherche laissent apparaître les évolutions suivantes :

— **matériaux d'outils** : création de nouveaux produits comme les céramiques composites (renforcées par des fibres de carbure de silicium les rendant plus résistantes aux chocs mécaniques et thermiques) ou de matériaux d'outils très durs, revêtus ou non, à base de nitride de bore cubique ou de nitride de silicium, rendus plus compatibles avec l'usinage des aciers mi-durs ;

— **matières usinées** : recherches envisagées sur des aciers à inclusions qui permettent la création de couches limitant l'usure par diffusion.

Références bibliographiques

- [1] *Outils pour usinage grande vitesse de métaux ferreux.* CETIM, réf. 102630.
 - [2] *Fraisage grande vitesse des alliages ferreux.* CETIM, réf. 106520.
 - [3] Congrès ASME New Orleans (1984).
 - [4] *Hochgeschwindigkeitsbearbeitung.* Technische Hochschule Darmstadt, fév. 1987.
-