

Usinage à grande vitesse

par **Alain-L. DEFRETIN**

Ingénieur des Arts et Métiers

Professeur agrégé

Responsable du laboratoire usinage grande vitesse à l'ENSA de Lille

et **Gérard LEVAILLANT**

Ingénieur des Arts et Métiers

Docteur ès sciences

Fondateur de la société TOOL

Chargé de mission à l'ENSA

1. Généralités	BM 7 180 - 3
1.1 Vers l'usinage à grande vitesse.....	— 3
1.2 Évolution de l'usinage.....	— 3
1.3 Définitions.....	— 4
1.4 Techniques concernées.....	— 4
1.5 Matériaux usinés	— 5
2. État de la technique	— 5
2.1 Fraisage des métaux tendres	— 5
2.2 Fraisage des fontes	— 7
2.3 Usinage des formes complexes : application aux outillages	— 10
2.4 Usinage des matériaux durs.....	— 11
2.5 Usinage des matériaux bases nickel et titane.....	— 12
2.6 Les opérations axiales.....	— 12
2.7 UGV et grande série	— 13
3. Éléments du système	— 14
3.1 Broche	— 14
3.2 Moteurs d'axes et leurs asservissements	— 14
3.3 Commande numérique	— 16
3.4 Outils	— 16
3.5 Porte-outils ; les attachements	— 17
3.6 Lubrification. Évacuation des copeaux.....	— 18
3.7 Trajectoire d'outil : CFAO adaptée.....	— 19
3.8 Optimisation de l'opération.....	— 20
3.9 Sécurité	— 21
4. Recherche et développement	— 22
4.1 Commande d'axes.....	— 22
4.2 Dynamique de broche. Cas du fraisage.....	— 23
4.3 Modélisation de la coupe.....	— 23
4.4 CFAO surfacique	— 24
4.5 Grandes vitesses de broche en fraisage.....	— 25
4.6 Grandes vitesses de broche en tournage.....	— 25
4.7 Effets des grandes vitesses de coupe sur les caractéristiques microgéométriques de surface	— 26
4.8 Rectification à grande vitesse.....	— 26
4.9 Caractéristiques de la matière usinée.....	— 26
5. Conclusions	— 26
Pour en savoir plus	Doc. BM 7 180

L'usinage à grande vitesse (UGV) est souvent présenté comme le « fruit » d'une merveilleuse découverte : si l'on augmente les vitesses de coupe au-delà des limites habituelles, on commence par traverser une zone de vitesses inutilisables poétiquement baptisée « vallée de la mort ». Ensuite, on entre dans un paradis de l'usineur ; les énergies et les efforts spécifiques de coupe diminuent, les états de surface deviennent excellents, les durées de vie des outils augmentent pour devenir largement supérieures aux durées obtenues en usinage conventionnel.

Dans cet article, nous montrerons que pratiquer l'UGV ce n'est pas se décider à franchir une barrière de vitesse de coupe : c'est mettre en œuvre, de façon rationnelle, au meilleur niveau de performance économique, tous les éléments entrant dans la définition de l'opération d'usinage concernée et pas uniquement les paramètres de coupe.

Nous montrerons également que les problèmes posés par l'UGV, et leurs solutions, varient suivant les techniques d'usinage et les matériaux concernés.

Nous traiterons ici des **opérations d'usinage par outils à géométrie définie**, ce qui exclut l'usinage par rectification à grande vitesse, technique qui nécessite une étude séparée.

Notations et symboles	
Symbol	Définition
A	section coupée ($A = a_p \times a_e$)
a_e	profondeur de passe radiale ou engagement radial
a_p	profondeur de passe axiale ou engagement axial
d	diamètre de fraise
F	efforts
f_z	avance par dent
h	épaisseur du copeau
m	masse
t	temps
Q	débit spécifique ($Q = A \times V_f$)
V_b	usure en dépouille
V_c	vitesse de coupe (en $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) : $V_c = \pi \times d \times N$
V_f	vitesse d'avance (en $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) : $V_f = f_z \times Z \times N$
W	critère d'ondulation
W_c	énergie spécifique de coupe
Z	nombre de dents de l'outil
α	angle de dépouille
γ	angle de coupe
λ	inclinaison ou angle d'hélice

1. Généralités

1.1 Vers l'usinage à grande vitesse

■ Réalisons une première expérience : usinons par tournage (chariotage) un rondin d'acier mi-dur avec un outil de type CNMG 120408, la géométrie est de semi-finition, le matériau de coupe est un carbure revêtu. Affichons une profondeur de passe de 2,5 mm et une avance de 0,3 mm · tr⁻¹ ; faisons varier la vitesse de coupe à partir d'une valeur de coupe à partir d'une valeur très faible, disons 5 m · min⁻¹. Qu'observe-t-on ?

- Aux très basses vitesses l'outil ne coupe pas ou dans de très mauvaises conditions ; les copeaux sont mal formés, la surface produite est rugueuse et irrégulière, l'outil se charge d'un copeau adhérent qui provoque l'usure rapide de l'outil (**usure par adhésion**).

- Lorsque la vitesse de coupe atteint environ 50 m · min⁻¹, on commence à entrer dans la zone de fonctionnement correcte de l'outil dans cette matière pour les paramètres affichés de profondeur de passe et d'avance.

- Continuons d'augmenter la vitesse de coupe. La surface usinée est maintenant correcte, le copeau bien formé. Une observation plus fine montrerait que le copeau est de plus en plus chaud et que la durée de vie de l'arête coupante, après avoir atteint un maximum, diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe. On est dans la zone d'utilisation dite « **zone de Taylor** ».

- Poursuivons l'augmentation de la vitesse de coupe. Le copeau devient rouge au sortir de l'outil qui produit des étincelles. La durée de vie de l'arête coupante diminue très rapidement. À une vitesse de coupe de l'ordre de 800 m · min⁻¹, l'arête de coupe s'effondre instantanément. On a atteint la « **vallée de la mort** ». **Mais on ne la franchit pas car elle n'a qu'une seule rive...**

■ L'usinage grande vitesse ne serait-il qu'un mythe ? Décrivons deux autres essais.

- Une fraise de diamètre 32 mm, 2 dents, usine un alliage d'aluminium aux conditions suivantes :

- profondeur de passe axiale $a_p = 25$ mm ;
- profondeur de passe radiale $a_e = 1$ mm ;
- avance à la dent = 0,25 mm.

Réalisons cette opération sur 2 machines différentes, l'une limitée à 5 000 tr · min⁻¹, l'autre autorisant 20 000 tr · min⁻¹ (vérifier que l'outil est construit pour supporter cette vitesse de rotation !) et 10 m · min⁻¹. L'outil se comporte sur les deux machines de manière pratiquement identique et nous constatons que nous sommes dans d'excellentes conditions de travail.

L'avance linéaire a été multipliée par quatre et nous n'avons franchi aucune vallée...

- Un outil carbure usine en tournage un alliage réfractaire base nickel (*Inconel 625* par exemple). La vitesse de coupe est de 50 m · min⁻¹ et la durée de vie d'arête de 10 min (autres paramètres non précisés ici). En utilisant une plaque céramique mixte renforcée *whiskers*, la vitesse de coupe autorisée est de l'ordre de 300 m · min⁻¹, pour une durée de vie d'arête qui reste proche de 10 min.

Dans les deux cas nous avons pratiqué l'UGV. Nous pourrions multiplier les exemples.

1.2 Évolution de l'usinage

Certains auteurs font remonter l'origine de l'usinage à grande vitesse (UGV) aux années 1920. Nous préférons la situer dans les années 1930 avec les travaux du professeur Salomon qui fut le pre-

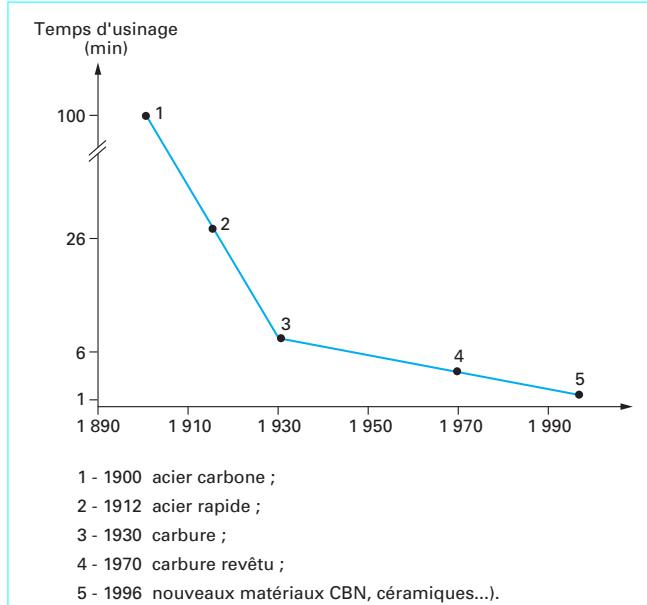


Figure 1 – Évolution du temps d'usinage au cours du siècle (base 100 en 1900)

mier à jeter les bases essentielles d'un concept fondamental à savoir la modification de la répartition des énergies thermiques de coupe avec l'accroissement de la vitesse de coupe : « **A grande vitesse, la chaleur engendrée par le cisaillement du copeau est évacuée totalement par celui-ci ; elle ne peut se propager à la pièce** ».

C'est à cette époque, qu'apparaissent les premiers outils en carbure de tungstène et si l'on compare les performances de ces outils à celles qu'autorisent les aciers au carbone, les stellites ou les aciers rapides, on aurait pu déjà parler d'usinage à grande vitesse (figure 1).

Bien qu'il ne faille pas confondre les notions de vitesse de coupe, de temps de production et de coût de fabrication, il faut constater leur étroite corrélation. De ce fait la recherche de la rentabilité économique pousse la recherche technologique qui ne se limite pas, loin s'en faut, au seul domaine des outils ; les matériaux usinés, les machines-outils, les processus de fabrication et finalement la conception des produits fabriqués évoluent de manière rapide et spectaculaire.

De nombreux essais d'enlèvement de copeaux à grande vitesse ont été conduits à partir des années 1950 sur la base de procédés balistiques : tir au canon ou au fusil de l'outil sur l'éprouvette ou inversement. Les résultats obtenus montrent une formation nouvelle du copeau et l'évolution favorable des efforts de coupe remettait en question le principe de cisaillement et donnait l'espoir d'améliorations considérables de productivité à condition d'obtenir la maîtrise des durées de vie des outils.

Même si ces études révolutionnaires restent d'actualité, ce n'est pas sur leurs résultats que se fonde l'émergence actuelle de l'UGV mais plutôt sur des évolutions :

- qui concernent tous les éléments entrant dans la définition d'une opération d'usinage : les machines, les outils, les éléments intermédiaires et leurs attachements, etc. ;
- qui laissent la physique de l'usinage dans le domaine de l'enlèvement de matière par cisaillement.

Mais il est clair que l'augmentation des vitesses de coupe et l'accroissement correspondant des températures de coupe ont une influence considérable sur le matériau usiné et on observe :

- une « compétition » entre un adoucissement lié à la température et un phénomène d'écrouissage ;
- des changements de phases qui se manifestent, par exemple, par l'apparition de *bandes blanches* aux plans de cisaillement.

Quant aux efforts et énergies de coupe, nous verrons plus loin qu'ils varient peu avec la vitesse dès que l'on sort de la zone de copeau adhérent, c'est-à-dire bien en dessous des vitesses considérées comme appartenant au domaine de l'UGV.

Actuellement de nombreux laboratoires travaillent sur le sujet ; nous ferons dans ce document référence aux travaux réalisés en Allemagne par le P.T.W. de l'Université de Darmstadt, par le W.Z.L. de l'Université d'Aix-la-Chapelle, par le département d'ingénierie de la production de l'Université de Brême, et en France par les membres (industriels et universitaires) de l'association AUTGV dont les travaux officiels ont été publiés par le CETIM sous la forme d'un ouvrage intitulé *Les atouts de l'usinage à grande vitesse*.

1.3 Définitions

À partir de quelles vitesses entre-t-on dans le domaine de l'UGV ? La question, plus délicate qu'il n'y paraît, se subdivise comme suit :

- de quelle vitesse s'agit-il ?
- quelle est sa valeur limite ?

Dans l'esprit de nombreux usineurs, la vitesse concernée est la vitesse de coupe. Mais on s'est aperçu que les grandes vitesses de rotation de broche présentaient en elles même un intérêt et certains auteurs ont même tenté de distinguer **l'usinage à grande vitesse (de coupe)** de **l'usinage à grande fréquence (de rotation)**. La tendance actuelle est de réunir ces deux techniques sous la même appellation : usinage à grande vitesse (UGV). Dans la suite de cette étude nous serons conduits à examiner l'UGV sous ses deux aspects (coupe et rotation).

Nous ne pouvons donner de limite précise aux vitesses concernées :

- les **vitesses de coupe** considérées comme « grandes » dans un matériau peuvent rester du domaine conventionnel pour un autre ; et pour un même matériau usiné les limites entre grande vitesse et vitesse conventionnelle dépendent encore de la technique concernée (tournage, fraisage...) ;
- quant à la notion de **grande vitesse de rotation**, elle est en étroite dépendance du couple délivré par la broche.

Qu'il s'agisse de grandes vitesses de coupe ou de rotation, nous donnerons plus loin des ordres de grandeur et, pour l'instant, nous demandons au lecteur d'accepter la définition suivante.

L'UGV recouvre l'ensemble des technologies d'usinage dans les domaines des vitesses de coupe et des vitesses de rotation de broches élevées et supérieures aux vitesses considérées « actuellement » comme industriellement maîtrisées.

Ainsi, dès les années 70, en fabrication aéronautique (usinage des structures intégrales), le surfaceage des panneaux en alliage léger, requérant des fraises-tourteaux de diamètre 300 à 400 mm tournant à une vitesse (classique) de $3\ 000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ environ, conduisait à la vitesse de coupe de $3\ 000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ et plus ! On faisait de l'UGV sans s'en rendre compte, en appliquant les théories et pratiques relatives au fraisage classique : rien ne semblait donc différencier UGV d'usinage classique... et on observait pas « d'effet UGV coupe ». Malheureusement, atteindre les mêmes vitesses quelle que soit l'opération (pocketing en particulier) s'avérait impossible : impossibilité d'entrainer les petites fraises à de hautes vitesses de rotation.

Dans l'état actuel de cette technique, il est difficile de séparer franchement les domaines et la figure 2 n'est donnée qu'à titre indicatif ;

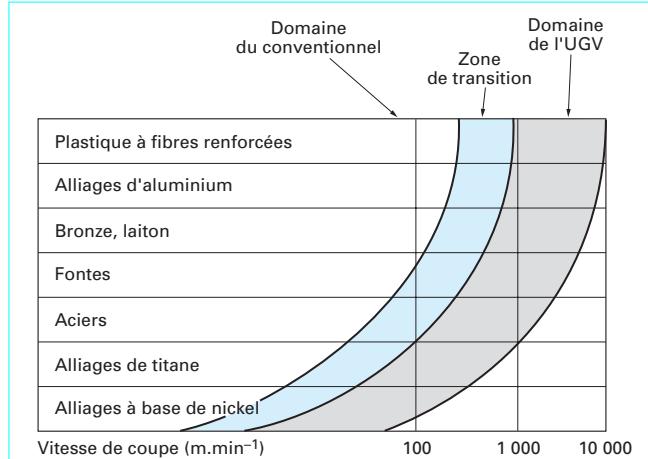


Figure 2 – Vitesses de coupe selon les matériaux usinés

de plus les limites « hautes » des vitesses dépendent essentiellement des possibilités de l'élément d'entraînement (broche) : d'ici quelques années ces valeurs seront sans doute dépassées.

1.4 Techniques concernées

Toutes les techniques d'usinage par enlèvement de copeaux sont concernées, en voie de l'être ou susceptibles de l'être par l'usinage grande vitesse.

Mais il est clair que deux facteurs interviennent prioritairement pour favoriser l'entrée d'une technique dans l'UGV :

- l'importance économique de cette technique ;
- la facilité (relative) de l'accession de cette technique à l'UGV.

Nous verrons que dans ces conditions les trois premières techniques concernées sont le fraisage suivi du tournage et du perçage. Mais il ne faut pas oublier la rectification, le sciage, le taraudage/filetage, et même le taillage d'engrenages...

Comme nous le verrons plus loin, l'accès à l'UGV est conditionné par l'évolution et la bonne utilisation de l'ensemble des éléments participant à l'opération d'usinage : la machine, l'outil mais aussi la pièce elle-même (par l'influence de sa morphologie donc de sa conception), le montage d'usinage ou les accessoires d'entraînement, les éléments intermédiaires entre la machine et l'outil, le lubrifiant éventuel et son mode de distribution, le mode d'évacuation des copeaux, les modes d'attaque, de dégagement et d'usinage (opposition et concordance) et bien entendu, les paramètres d'usinage.

En schématisant, on peut dire qu'il y a compétition constante entre les performances potentielles des machines et celles des outils, chacun de ces deux éléments étant susceptibles d'être l'élément « freinant » ou l'élément « freiné » mais que les autres éléments peuvent interdire l'accès aux meilleures performances de l'ensemble machine-outil/outil. C'est ainsi que l'on assiste actuellement à d'importantes innovations en matière d'attachments, dispositifs de liaison entre les broches des machines, les outils et les éléments intermédiaires (rallonges, adaptateurs...) ; ces innovations sont indispensables à l'entraînement des outils aux vitesses de rotation élevées.

Rappelons d'autre part qu'il ne suffit pas qu'un outil soit capable de travailler la matière considérée dans des conditions réputées appartenir au domaine UGV. Il faut encore que la durée de vie de

l'outil (ou plutôt des arêtes de coupe) soit « économiquement viable », expression qui recouvre des durées très variables suivant la matière et le coût de changement d'arête. Disons pour l'exemple que cette **durée d'arêtes économiquement viable** peut descendre à quelques minutes en usinage de certains matériaux d'usinabilité délicate comme les alliages réfractaires base nickel. Cette « durée d'arêtes » s'exprime parfois en terme de volume de matière enlevée, de longueur usinée (perçage), voire de nombre de pièces produites.

1.5 Matériaux usinés

Comme pour les techniques, les critères d'entrée des matériaux dans le domaine de l'UGV sont l'importance économique et la facilité. Ainsi, on usinera principalement en UGV :

- les alliages légers d'aluminium ;
- les aciers faiblement alliés pour traitement thermique à l'état traité ;
- les fontes à graphite lamellaire ou sphéroïdal ;
- les alliages réfractaires (base nickel) ;
- les alliages à base titane.

Il est clair que cette technique intéresse également les matériaux anisotropes (bois, composites et plastiques entre autres).

2. État de la technique

Dans ce paragraphe, nous tenterons, aux travers d'exemples significatifs, d'illustrer l'application de l'UGV aux différentes techniques et matériaux cités plus haut.

Pour chaque exemple présenté nous nous efforcerons de préciser :

- le principal critère d'optimisation de l'opération ;
- les principales contraintes à respecter ;
- le principe mis en jeu pour entrer dans l'UGV.

En se souvenant que l'industriel vise toujours une amélioration de rentabilité globale, mesurée sur la pièce complète et non sur l'opération élémentaire.

2.1 Fraisage des métaux tendres

Cette technique concerne principalement l'usinage des panneaux aéronautiques.

Le critère d'optimisation est le coût de production très directement lié au temps d'usinage. Les durées de vie d'outil sont importantes (plusieurs heures de coupe) et rendent le coût de celui-ci négligeable dans le calcul du coût global de l'opération.

Les principales contraintes sont relatives :

- au respect des tolérances dimensionnelles ;
- aux limites imposées par la technique à la conception ;
- aux déformations macrogéométriques dues à l'usinage ;

à la nécessité d'organiser les opérations en séquences (groupe-ment d'opérations effectuées avec le même outil, à la même vitesse de rotation).

On peut signifier, dans ce cas, que le principe d'UGV est basé sur l'extrapolation des vitesses de coupe conventionnelles : on passe sans difficulté majeure de $500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ à $5000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$...



Figure 3 – Essais de mesure d'efforts sur machine UGV
(photo ENSAM)

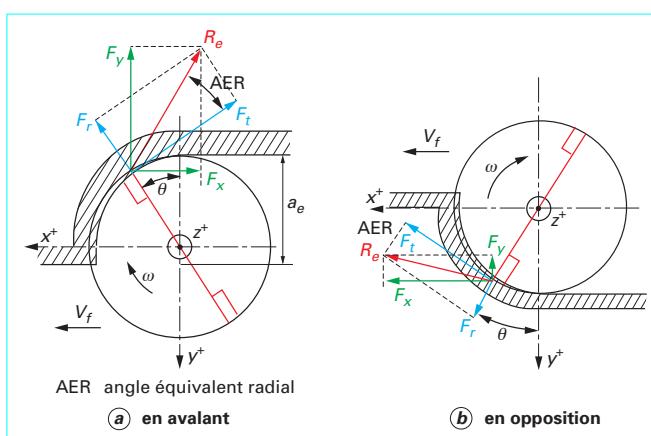


Figure 4 – Axes et référentiel mesure d'efforts : travail en avalant et opposition (doc. ENSAM)

Enfin, l'UGV oriente les équipements vers des machines monobroches (broche horizontale, le plus souvent) à tête rotative (machines 5 axes).

2.1.1 Résultats d'essais

Les premiers essais réalisés, dès l'apparition de la broche à palier magnétique, ont prouvé l'intérêt de la technique car, pour une puissance mécanique disponible, la force de coupe tangentielle diminue avec la vitesse, il a pu être réalisé des pièces à fond mince et à hauteur d'ailes plus importante (figure 3).

Afin d'affiner les conditions d'utilisation de machines-outils GV et avec l'apparition de nouveaux outils dédiés, nous avons ces dernières années, et selon la méthodologie du couple outil-matière, comparé les performances sous différentes conditions et paramètres d'usinage. Notre approche est industrielle (productivité) et non scientifique (modélisation).

Par mesure de la puissance (électrique : méthode des deux wattmètres), nous pouvons étudier l'**évolution de l'énergie spécifique de coupe** W_c , rapport de la puissance consommée au débit de matière. Ces mesures de puissances sont corrélées avec des mesures d'efforts moyens et instantanés effectuées dans un référentiel pièce (figure 4).



Figure 5 – Fraise HSC
TIZIT Ø 25

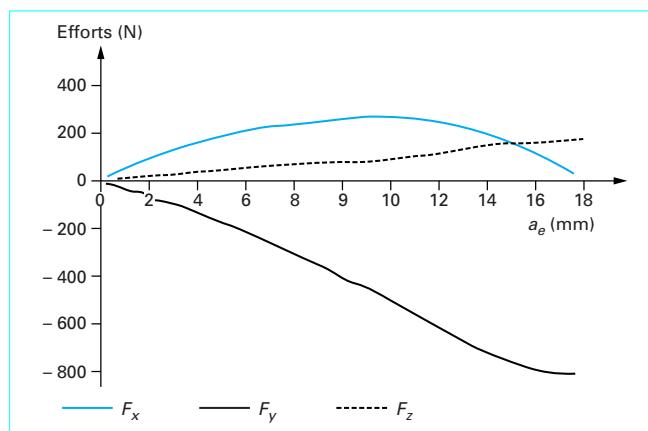


Figure 6 – Évolution des efforts moyens avec l'engagement radial
(TOOL, ENSAM)

Nous donnons ici quelques résultats d'essais dits de qualification ayant conduit à la validation de différents outils dédiés (figure 5) aux opérations de pocketing dans un alliage de type AlCu ou AlZn, alliages couramment utilisés en aéronautique.

La fiabilité des mesures d'efforts à grande vitesse dépend directement de la réponse dynamique de l'appareil de mesure, aussi connaître l'effort « instantané » sur la dent nécessite l'analyse fine de la réponse en fréquence de l'ensemble capteur + éprouvette. Des travaux de recherche, menés conjointement par l'ENSAM et le CETIM, portent sur la séparation de l'effort appliquée par l'outil de l'effort mesuré (signal), par résolution de l'équation fondamentale de la dynamique :

$$m \cdot x''' = F_{\text{mes}} + F_{\text{appl}}$$

Néanmoins, pour valider un modèle d'efforts satisfaisant, nous avons fait confiance aux relevés d'efforts moyens (figure 6).

À partir de ces mesures, nous avons mis en évidence l'évolution de l'**effort spécifique de coupe** (rapport de l'effort tangentiel à la section coupée) avec l'angle de coupe orthogonal à l'outil, ainsi qu'avec l'angle d'hélice λ (inclinaison). Nos résultats confirment ceux du professeur Schulz qui figurent dans son ouvrage *Fraisage à grande vitesse*.

Remarquons en particulier :

— que lorsque la vitesse de coupe croît, l'énergie spécifique de coupe diminue (mais ne « s'évanouit » pas comme il a parfois été dit !) (figure 7) ;

— que lorsque l'épaisseur de copeau croît l'énergie spécifique de coupe varie selon une forme semblable à celle que l'on connaît en usinage à vitesse de coupe conventionnelle (figure 8) ;

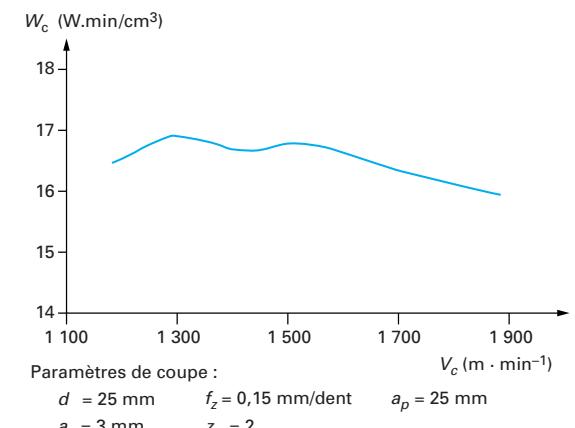


Figure 7 – Énergie spécifique de coupe en fonction de la vitesse de coupe

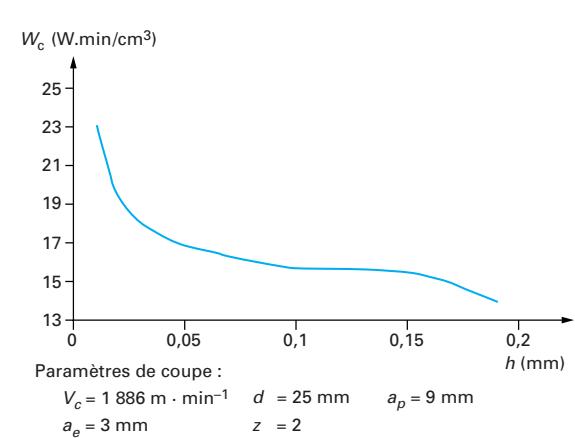


Figure 8 – Énergie spécifique de coupe en fonction de l'épaisseur de copeau

— qu'il convient de rechercher les paramètres optimaux de l'outil de coupe (figure 9). Ces études, qui restent à parfaire, conduisent à une nouvelle méthodologie de réalisation des pièces de structure aéronautiques.

2.1.2 Applications industrielles : usinage des pièces aéronautiques

Donnons l'exemple (simplifié) d'une pièce de structure intégrale d'avion. Gamme conventionnelle en cinq phases :

- réception des tôles corroyées et vérification de l'état matière ;
- ébauche sur fraiseuse trois axes (surfâçage) de la partie extérieure ;
- finition des fonds et des alvéoles (raidisseurs) en trois ou cinq axes ;
- mise en forme par déformation plastique (métier de la chaudronnerie) ;

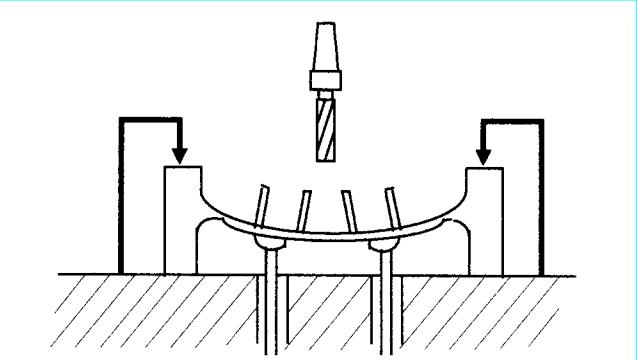
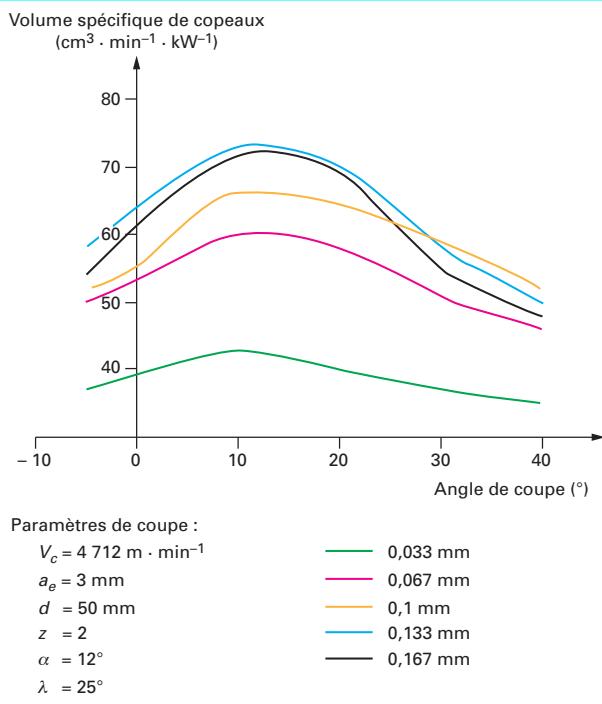


Figure 11 – 2^e opération. Après retournement, usinage de l'intérieur en l'air d'une pièce aéronautique

— un surfaçage de l'extrados directement « à la forme » : surfaçage en cinq axes en adoptant la technique du fraisage en dépinçage à la fraise torique ;

— ébauche et finition des alvéoles avec la même fraise rayonnée en optimisant la durée d'utilisation de l'outil : calage avec le temps de cycle pièce ;

— détourage en cinq axes sur la même machine ;

— parachèvement après revenu.

Si dans la première sous phase, la tôle corroyée est bridée sur la table, la prise de pièce après retournement doit, pour éviter les déformations, assurer la rigidité : une des solutions nouvelles consiste en une mise en position sur un grand nombre de points d'appui dont l'enveloppe respecte la forme de l'extrados (réglage par la commande numérique). Le maintien est assuré par ventouses de dépression disposées autour de chaque point.

Cette méthodologie, qui vient d'être adoptée par le constructeur Boeing, nécessite la parfaite connaissance des phénomènes vibratoires liés à la coupe car, comme on le constate, la pièce est « suspendue ». Les risques de broutage dans les fonds doivent être minimisés et il faut donc à la fois valider le couple outil-matière du procédé et la méthodologie de processus : sens de balayage des poches. L'analyse modale de l'ensemble pièce/porte-pièce sollicité (efforts de coupe) s'avère nécessaire, car de la raideur de cet ensemble dépend la qualité des états de surface usinée ; plus que les efforts, l'UGV demande et nous le répétons, une parfaite maîtrise des vibrations ; en particulier dans le cas du fraisage de pièces fines de grandes dimensions telles que les panneaux de voilure (figure 12).

2.2 Fraisage des fontes

Nous sommes ici dans le cas de l'UGV par changement de matériau de l'outil.

Présentons le cas du surfaçage des blocs cylindres en fontes à graphite lamellaire. L'usinage conventionnel utilise des fraises tourteaux de grand diamètre (300 à 400 mm) munies d'un nombre élevé de dents (16 à 46).

Des tests UGV conduits dans l'esprit de la démarche couple outil-matière, furent entrepris avec des fraises dites homothétiques de diamètres plus faibles (80 à 100 mm) équipées de plaquettes rondes ou carrées, pour des opérations d'ébauche et de finition, dans

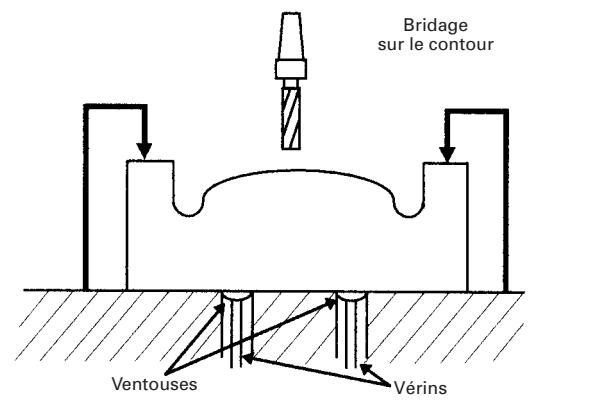


Figure 10 – 1^e opération. Usinage de la face extérieure d'une pièce aéronautique

— traitement (revenu) et parachèvement par grenaillage et traitement de surface.

Avec la maîtrise de la grande vitesse, les aéronauticiens envisagent l'utilisation d'une seule machine de fraisage (machine cinq axes forcément) réalisant toutes les opérations d'ébauche et de finition de la pièce en supprimant de ce fait, l'opération de mise en forme (figures 10 et 11).

Les particularités nouvelles de cette gamme consistent en :

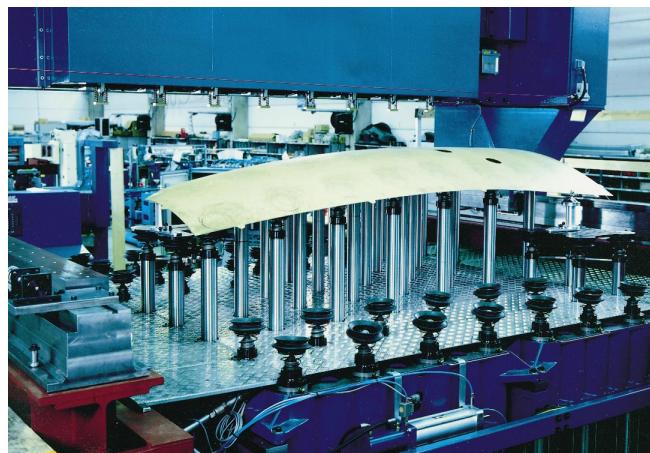
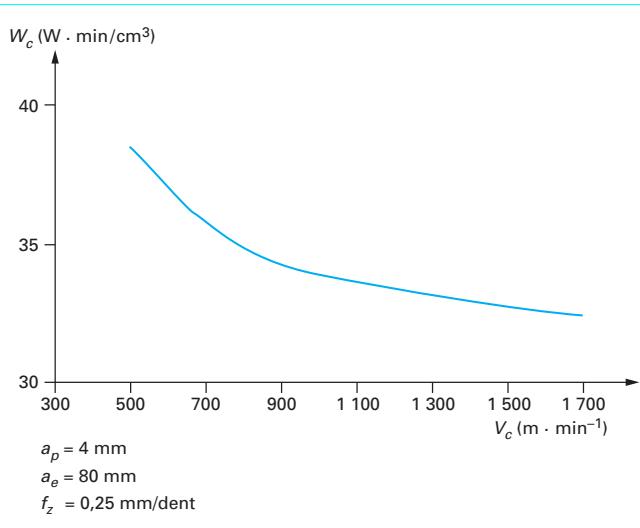
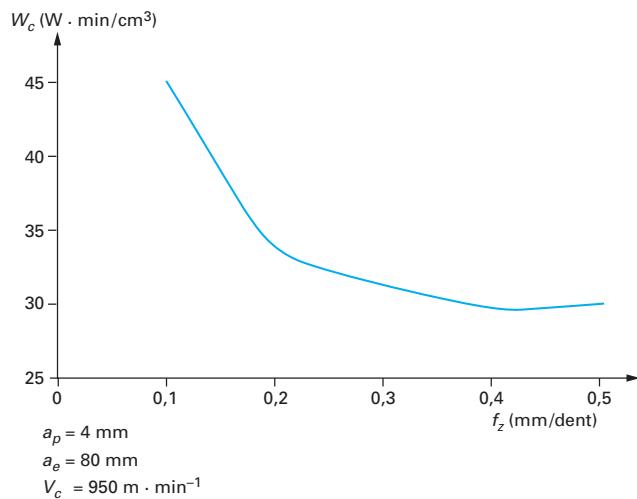


Figure 12 – Usinage d'un panneau sur machine 5 axes
(photo MODIG)

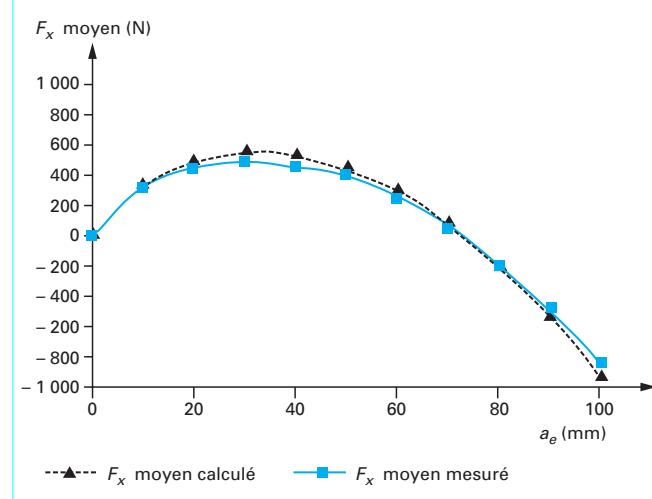


une plage de vitesses de coupe comprises entre 1 000 et 2 000 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$. Les matériaux de coupe testés furent le nitride de bore cubique (CBN), la céramique renforcée ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) et le nitride de silicium (Si_3N_4). Les principaux paramètres de sortie furent : l'énergie spécifique de coupe W_c , l'état de surface obtenu, les caractéristiques des copeaux dont l'observation est toujours très riche d'enseignements pour l'usineur. Le choix des points de fonctionnement valides était soumis à la contrainte d'un nombre de pièces minimal produit entre deux changements d'arêtes.

2.2.1 Essais en ébauche

Les essais reproduits figure 13 ont permis de déterminer une vitesse de coupe minimale.

Les vitesses maximales prospectées n'ont pas dépassé 2 000 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ pour tenir compte des limitations en vitesses d'avance imposées par les machines.



Les essais reproduits figure 14 ont permis de limiter les avances à la dent par des avances à la dent minimale et maximale ($f_{z\min}$, $f_{z\max}$).

Les essais reproduits en figures 15, 16 et 17 ont permis de paramétrier les modèles de calculs des efforts de coupe et de puissance.

2.2.2 Essais en finition

L'opération de finition impose des contraintes supplémentaires :

- des tolérances d'état de surface qui conduisent à l'utilisation soit d'une « dent racleuse », soit de plaquettes de planage ;
- une limitation à $a_p = 0,5 \text{ mm}$ maximum de la profondeur axiale de passe.

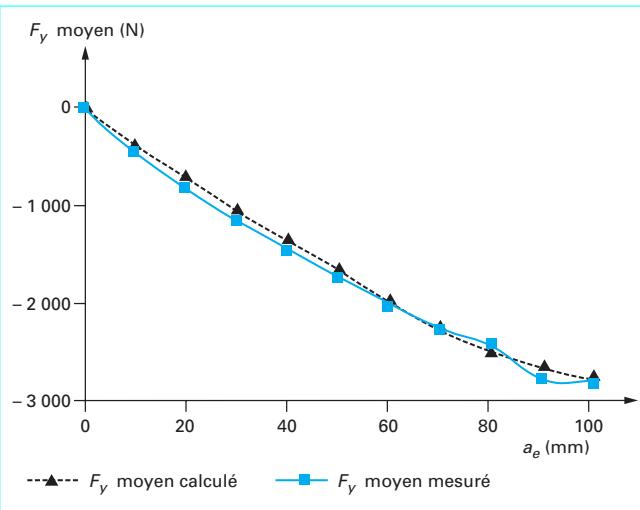


Figure 16 – Graphe comparatif des efforts moyens mesurés selon la direction perpendiculaire à l'avance

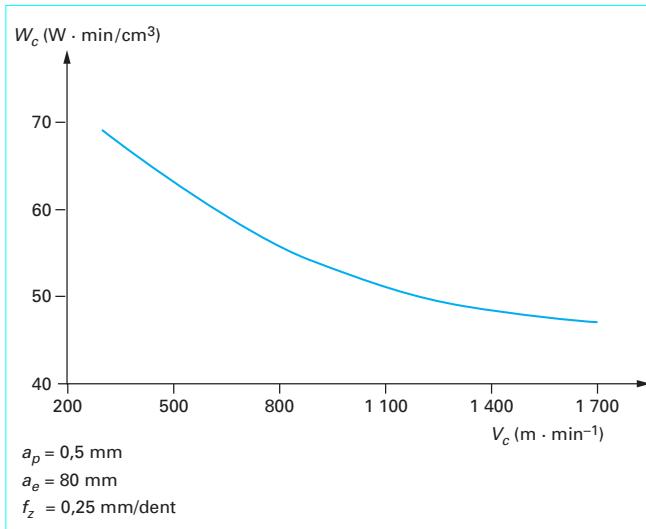


Figure 17 – Évolution de l'énergie spécifique de coupe en fonction de la vitesse de coupe

Un essai complémentaire portant sur la variation de l'énergie spécifique de coupe en fonction de la profondeur de passe axiale a permis d'attribuer à ce paramètre une limite inférieure.

Cette première phase d'essai (validation d'un domaine de fonctionnement en ébauche comme en finition par étude quantitative) met en évidence que dans la fonte les modèles énergétiques comme les modèles d'efforts et de puissance ne se diffèrent pas des modèles retenus pour le fraisage conventionnel ($V_c < à 500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$). Cela a permis de poursuivre l'étude sur les mêmes bases à savoir la validation et l'évolution de ces modèles avec la durée d'utilisation (nombre de passes).

Des essais effectués, on peut retenir que :

— la **fraise à plaquettes rondes** présente des modes de dégradation en écaillage pouvant entraîner la mort de manière impromptue,

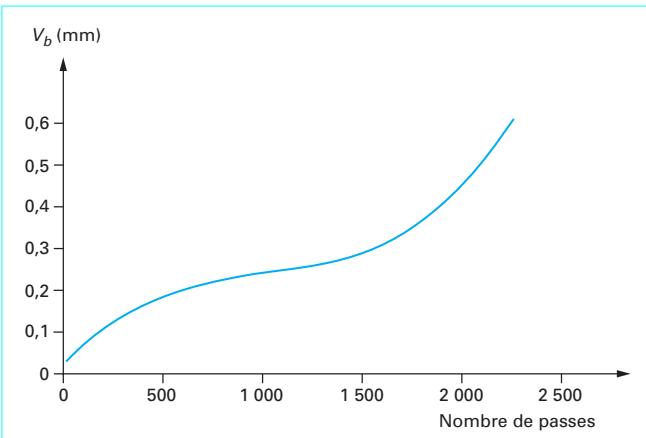


Figure 18 – Évolution de l'usure en dépouille de la dent racleuse

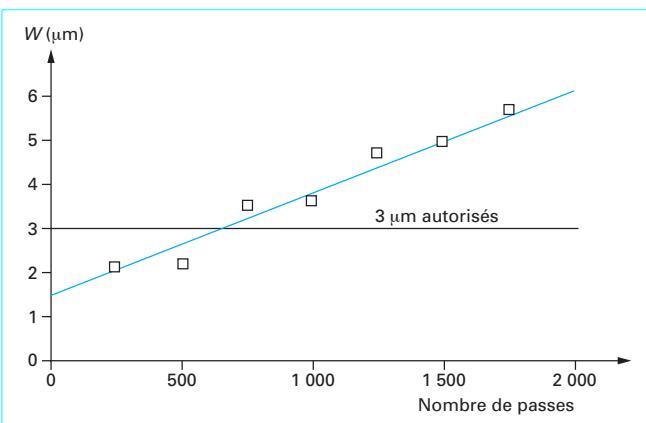


Figure 19 – Évolution du critère d'ondulation W (2^e ordre)

sans alerte préalable en conditions d'ébauche, sous forte profondeur de passe. Par contre cette fraise peut convenir pour l'opération de finition à condition d'y adjoindre une plaquette racleuse. C'est l'observation de l'usure en dépouille de cette dernière qui a conditionné le nombre de passes pratiqué entre deux changements d'outils (figure 18) ;

— la **fraise avec insert CBN**, sous grande vitesse linéaire ($2200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), n'offrait pas les garanties suffisantes pour être utilisée en finition, la rugosité et la planéité évoluaient trop rapidement avec le nombre de passes (figures 19 et 20). Il faut remarquer que ces essais ne mettent pas en cause le matériau de coupe en tant que tel mais l'outil qui a été testé, défini par le matériau de coupe et la géométrie de coupe.

2.2.3 Synthèse des résultats

Ces essais, datant de 1993, ont été repris pour une étude plus approfondie dans le cadre de l'Association AUTGV. Cette étude a permis d'obtenir des données complémentaires relatives :

- aux caractéristiques de l'outil optimal ;
- aux qualités, tolérances de forme et d'état de surface susceptibles d'être atteintes ;

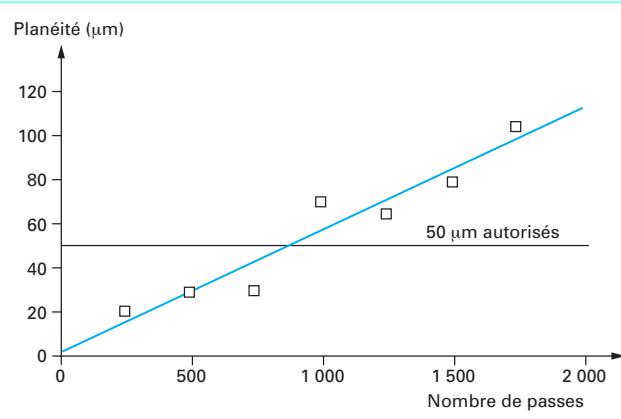


Figure 20 – Évolution de la planéité de la face culasse du bloc-cylindre



Figure 21 – Ébauche d'un poinçon (doc. CETIM)

- aux caractéristiques de la machine adaptée à l'opération et en particulier aux exigences de rigidité ;
- à la productivité envisageable avec cette technique.

2.3 Usinage des formes complexes : application aux outillages

Sous cette appellation nous désignons l'usinage, sur fraiseuse trois axes (et cinq axes), des surfaces définissant la forme extérieure des moules et modèles de fonderie comme par exemple :

- des éléments constitutifs d'un outillage d'emboutissage ;
- des empreintes de moules pour injection plastique.

Ce domaine est vaste et constitue une des priorités quant à la mise en place d'une politique industrielle nationale visant à concurrencer les pays à main-d'œuvre moins onéreuse. C'est surtout aussi un domaine où les PME révèlent souvent leur dynamisme en choisissant les outils les plus performants : CFAO et maintenant fraisage grande vitesse. Aussi, après enquête de l'AFIMM (Association française des industries du moule et modèle), le CETIM et certains partenaires de l'Association AUTGV ont travaillé sur un projet de recherche et développement visant à mettre en évidence le bien fondé de la technique GV pour la réalisation de pièces aux formes complexes. Une synthèse des premiers résultats expérimentaux a fait l'objet de présentations successives visant à convaincre les outilleurs de faire le pas vers l'UGV.

Quels furent les objectifs visés par ce projet ? On peut citer :

- la réduction des coûts et des délais par suppression (si possible) des opérations de polissage ;
- l'évaluation des moyens : en particulier la qualification de certaines machines dédiées UGV ou transformées en telle (adaptation d'une broche rapide) et de sa commande numérique ;
- l'analyse des performances des outils environnants et en particulier les outils CFAO.

2.3.1 Description de l'opération de surface

Afin d'obtenir la forme en creux ou en relief d'une empreinte de moule, l'outilleur doit enchaîner des opérations d'ébauche, de demi-finition et de finition suivies d'un polissage à partir d'un bloc initial en matière du type acier fortement allié (Z 38 CrMoV 5 à 1 600 MPa par exemple pour une matrice de forge). L'ébauche peut se faire avec une fraise torique (à plaquettes rondes) afin de conserver une



Figure 22 – Finition d'une matrice (doc. CETIM)

vitesse de coupe significative si, bien sûr, la matrice ne présente pas de surfaces concaves empêchant le passage de l'outil (figure 21).

La finition se réalise à la fraise hémisphérique, le choix du sens d'usinage (aller simple ou aller-retour) conditionne la qualité de l'état de surface. En effet, il y a toujours une différence de sollicitation entre chaque sens, provoquant des flexions différentes (outils souvent « longs ») à laquelle peuvent venir s'ajouter les défauts de gestion d'axes (erreurs de poursuite).

Le matériau à usiner et l'opération, quant à eux, conditionnent plus spécifiquement le choix de la nuance du matériau à outil. Avec l'apparition de matériaux de plus en plus performants tels que les carbures à multirevêtements, les céramiques, le CBN, le diamant polycristallin, il est maintenant possible de réaliser par fraisage des moules après traitements thermiques alors que, auparavant, seule l'électroérosion en permettait la finition (figure 22).

Nous nous trouvons là aussi, dans le cas de l'AUTGV par changement de matériau d'outil.

2.3.2 Résultats d'essais

Nous reproduisons ici quelques résultats publiés par le CETIM.

■ Outilage de forge : Z 38 CDV 5 (R = 1 600 Mpa)

Outil renforcé, Ø 6 mm, 2 dents, en CBN et carbure de tungstène en bout :

- pas de balayage $p = 0,25 \text{ mm}$;
- surépaisseur $a_p = 0,5 \text{ mm}$;
- vitesse de coupe $V_c = 500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$;
- avance par dent $f_z = 0,04 \text{ mm}$;
- vitesse d'avance $V_f = 2120 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$;
- sens de travail aller simple.

Résultats :

- surface balayée $> 2500 \text{ cm}^2$;
- durée de vie de l'outil $> 500 \text{ min}$;
- état de surface $Ra = 1 \mu\text{m}$.

■ Outilage d'emboutissage en FGL 250 (finition)

Fraise hémisphérique, $\varnothing 25 \text{ mm}$, 2 dents, en carbure K05 revêtu TiCN :

- pas de balayage $p = 0,5 \text{ mm}$;
- surépaisseur $a_p = 0,5 \text{ mm}$;
- hauteur de crête théorique $h = 0,0025 \text{ mm}$;
- vitesse de coupe $V_c = 1950 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$;
..... $N = 25000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$;
- avance par dent $f_z = 0,3 \text{ mm}$;
- vitesse d'avance $V_f = 15000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$;
- sens de travail aller-retour, plan à 45° .

Résultats :

- longueur usinée $L = 9,4 \text{ m}$;
- surface balayée $S = 470 \text{ dm}^2$;
- débit surfacique $D = 45 \text{ dm}^2/\text{h}$;
- temps de coupe $T = 626 \text{ min}$;
- usure de l'outil $V_b < 0,15 \text{ mm}$;
- état de surface $1,9 \mu\text{m} < Ra < 3,2 \mu\text{m}$ max.

Ces deux résultats ont pu mettre en évidence les grains réalisés à la fois :

- en temps d'usinage : gain de 50 % en moyenne ;
- et en coûts : environ 30 %.

Pour un outil donné, la crête, constitutive du défaut de surface, est en étroite corrélation avec le pas de balayage.

Les conditions précédentes permettent de réduire les temps et coûts de polissage mais non de les supprimer. Pour parvenir à la suppression complète de l'opération de polissage, il a été envisagé de diminuer encore le pas de balayage – donc le défaut de crête – mais cela ne s'est pas avéré rentable.

De même, si l'UGV ne peut prétendre se substituer à l'électroérosion, son emploi peut se révéler économique pour réaliser des électrodes en graphite ou en cuivre, comme l'ont montré des essais satisfaisants conduits à l'ENSAM.

2.4 Usinage des matériaux durs

2.4.1 Tournage des matériaux durs

Nous considérons qu'il s'agit d'UGV car si la vitesse de coupe est peu élevée en valeur absolue, elle l'est relativement à la dureté des matériaux usinés.

De nombreuses études ont été faites et sont actuellement menées sur ce sujet.

Les matériaux de coupe utilisés sont principalement les céramiques renforcées par du carbure de silicium et le CBN.

La formation du copeau est modifiée et l'on passerait du cisaillement à la fissuration.

La motivation industrielle est ici d'éviter les opérations de rectification. Il s'agit donc d'opérations de finition poussée qui se pratiquent à faibles profondeurs de passe et d'avance.

Le seul frein au tournage finition des matériaux durs était l'absence d'outils adaptés. Ces outils étant maintenant disponibles cette technique prend un essor rapide.

Cette affirmation peut être illustrée quantitativement de la manière suivante :

Nous utiliserons le modèle de Taylor généralisé sous la forme :

$$a_p^F f^E t^G V_c = C$$

On constate que lorsque la dureté du matériau usiné augmente, G diminue pour un même matériau d'outil et que lorsque la dureté du matériau d'outil augmente, G croît pour un même matériau usiné (tableau 1).

Tableau 1 – Valeur du G de Taylor pour différents matériaux d'usinage

Acier	HB	Carbure P30	Carbure P15	Céramique Al_2O_3
C10	125	0,25	0,36	0,60
42CrMo4	290	0,15	0,20	0,38

Données extraites du chapitre 31 (Georges Bittes, Enrico D'Eramo, François Leroy) du livre *Les aciers spéciaux* (ASTER TEC & DOC).

Une trop faible valeur de G rend l'outil difficilement utilisable : pour $G = 0,15$ et tous autres paramètres inchangés, une augmentation de vitesse de 11 % entraîne la division par 2 de la durée de vie de l'arête de coupe.

Après avoir rappelé que 290 HB correspondent approximativement à 29 HRC, donnons maintenant un exemple de paramètres d'usinage dans un matériau à 60 HRC :

$$a_p = 0,1 \text{ mm} \quad f = 0,1 \text{ mm} \cdot \text{tr}^{-1} \quad V_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \quad t = 25 \text{ min}$$

D'autres essais ont permis de déterminer $G = 0,337$ (données ENSAM).

Il faut toutefois noter que les conditions économiques d'exploitation du tournage finition des matériaux durs diffèrent profondément du tournage conventionnel : le coût d'usure des outils devient prépondérant par rapport au coût de main d'œuvre. En conséquence, pour être économiquement valable, le tournage des matériaux durs doit s'appuyer sur une bonne connaissance des paramètres du modèle d'usure et le calcul de la vitesse de coupe optimale.

Le tournage des matériaux durs est donc un UGV qui s'appuie à la fois sur le changement du matériau de coupe et sur une bonne exploitation du modèle d'usure.

2.4.2 Fraisage des matériaux durs

Certains industriels s'intéressent vivement au fraisage des matériaux durs. Comme dans le cas du tournage des matériaux durs il s'agit clairement d'UGV. Les progrès semblent moins rapides car les problèmes à résoudre sont plus complexes mais cette technique est très prometteuse.

En fraisage la coupe est interrompue et la section coupée varie pendant l'engagement de l'arête dans la matière ; l'arête subit donc des chocs tant mécaniques que thermiques. De plus la formation et l'évacuation du copeau sont très importantes. En contreparties, à

matériaux de coupe et matériaux usinés identiques, on peut utiliser des vitesses de coupe plus élevées.

Appliqué à l'usinage de matériaux durs, tout ceci conduit à rechercher le matériau de coupe et la géométrie d'outil optimales sans oublier la délicate « protection d'arête » ; un outil de fraisage se définissant par un nombre important de paramètres géométriques, de telles études sont longues et difficiles.

Le domaine de validité du couple outil-matière est alors bien souvent étroit ce qui renforce l'exigence de sa détermination précise.

Si des résultats non négligeables ont été obtenus avec des outils en carbure, c'est l'utilisation du CBN qui permet d'obtenir les résultats les plus spectaculaires.

Comme en tournage il s'agit d'opérations de finition ; des durées de vie économiquement valables sont obtenues avec des vitesses de coupe supérieures à $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ dans des aciers à 60 HRC.

Le fraisage des matériaux durs est donc un UGV qui s'appuie à la fois sur le changement du matériau de coupe, sur l'optimisation de la géométrie d'outil et sur une bonne exploitation du domaine de validité du couple outil-matière et du modèle d'usure.

2.5 Usinage des matériaux bases nickel et titane

Les matériaux à base de titane et de nickel sont généralement usinés à faible vitesse de coupe et pour certains à faible avance, de manière à conserver des durées de vie d'arête économiquement admissibles.

La nature du matériau de coupe revêt ici une importance particulière :

- problèmes d'affinité chimique rencontrés lors de l'usinage d'alliages de titane avec des carbures revêtus de carbures ou nitrides de titane ;
- problèmes d'usure en entaille caractéristiques de l'usinage des alliages de nickel ;
- tenue à haute température des matériaux de coupe usinant ces matériaux à caractéristiques réfractaires.

On peut donc distinguer deux voies principales pour usiner ces matériaux par UGV :

- le **changement de matériau de coupe** : nous y avons fait allusion (§ 1.1) ;
- la **recherche de paramètres optimaux** : nous savons que, pour un couple outil-matière donné, les paramètres d'usinage et la durée de vie sont liés par un modèle d'usure ; en particulier, l'augmentation de vitesse de coupe peut être compensée par une diminution adaptée des paramètres de profondeurs (axiale et radiale) et d'avance. C'est cette seconde voie que nous allons illustrer ici.

Si, par cette voie, l'UGV permet d'obtenir des résultats encourageants voire brillants, les difficultés apparaissent fréquemment dans les cas concrets ; les utilisateurs ont alors tendance à revenir aux techniques (paramètres) conventionnelles. C'est pour surmonter ces difficultés que les utilisateurs concernés ont confié une étude à l'AUTGV. Voici quelques-uns des résultats obtenus.

■ Performances comparées : essai dans l'*Inconel 718*

Ce matériau, particulièrement tenace, a pu être testé en balayage comme en détourage à des vitesses de coupe de 200 à $800 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (soit de 4 000 à 16 000 $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ pour une fraise de diamètre 16 mm) avec de nouvelles nuances de carbure micrograin. L'avance par dent et la profondeur de passes ont été limitées, le but étant essentiellement d'effectuer un gain substantiel en vitesse de coupe : facteur multiplicatif de 10 à 50.

● Cas du détourage

L'état de surface est très sensible au mode d'usinage : le travail en opposition est défavorable.

L'engagement radial a_e a une forte influence sur l'usure qui devient catastrophique si ce paramètre dépasse 1 mm. La vitesse de coupe a été limitée à $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ avec l'outil carbure utilisé.

La maîtrise de l'état de surface conduit à limiter l'avance à la dent.

Les conditions de coupe optimales pour cette configuration ont été les suivantes :

- sens de travail avalant ;
- vitesse de coupe $V_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$;
- avance par dent $f_z = < 0,04 \text{ mm/dent}$;
- engagement radial $a_e < 1 \text{ mm}$;
- angle d'hélice $\lambda = 55^\circ$;
- angle de coupe $\gamma = 10^\circ$.

● Cas du balayage

L'usure est sensible à l'augmentation de tous les paramètres de coupe à l'exception de l'avance par dent. Il apparaît possible de travailler au-delà de 0,08 mm/dent.

Les petits diamètres d'outils sont également plus sensibles à l'usure.

La rugosité est principalement sensible à l'augmentation de l'engagement axial ($a_p > 0,5 \text{ mm}$).

Les conditions de coupe optimales pour ces opérations ont été les suivantes :

- vitesse de coupe $V_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$;
- avance par dent $f_z = > 0,08 \text{ mm/dent}$;
- engagement axial $a_p < 0,2 \text{ mm}$;
- hauteur de crête théorique $0,0025 \text{ mm}$;
- angle de coupe $\gamma = 15^\circ$;
- diamètre 12 mm.

■ Performances comparées : essai dans le *TiAl₆V₄*

Malgré une capacité thermique faible ($7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ce matériau a pu être usiné sans lubrification dans les conditions de finition (limitation de la profondeur de passe qui influe sur la durée de vie).

Les facteurs les plus influents sur la durée de vie d'arête sont :

- en premier lieu l'avance à la dent ;
- puis la profondeur de passe axiale.

Les durées de vie obtenues sont restées faibles et inférieures à 8 min.

Les conditions de coupe optimales pour cette configuration sont les suivantes :

- vitesse de coupe $V_c = 132 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$;
- avance par dent $f_z = > 0,2 \text{ mm/dent}$;
- engagement axial $a_p < 0,5 \text{ mm}$;
- engagement radial $a_e = 3/4 \text{ Ø}$;
- angle de coupe $\gamma = 0^\circ$;
- nuance K05.

Nous sommes persuadés qu'il y a beaucoup à attendre de la recherche systématique de géométries d'outils adaptées à ces différentes configurations d'usinage.

2.6 Les opérations axiales

Cette appellation englobe les techniques à mouvement de coupe circulaire et avance axiale pure ; la vitesse de coupe peut être fournie par l'outil, la pièce ou les deux simultanément. Les résultats obtenus en UGV concernent actuellement le perçage à outil tournant et sont rendus possibles par l'utilisation de matériaux de coupe et de géométrie de coupe adaptés. Dans ces opérations « à surface fermée » la formation et l'évacuation du copeau ont une importance fondamentale et nécessitent des paramètres de coupe parfaitement

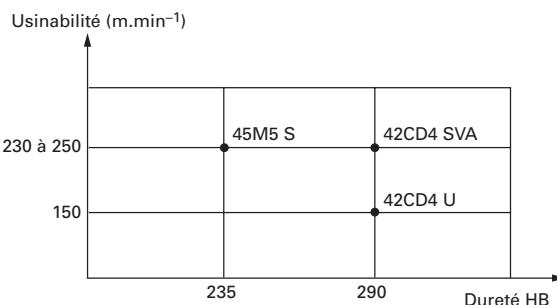


Figure 23 – Recherche du V6M sur trois aciers

adaptés (formation) et une lubrification centrale sous forte pression (évacuation). Notons que l'on peut actuellement atteindre des pressions de 30 bar.

■ Performances comparées

Nous faisons ici référence à une étude faite par les partenaires de l'AUTGV, dont l'objectif principal était d'augmenter la productivité tout en maîtrisant la qualité des trous percés. Ces opérations étaient effectuées dans trois aciers de construction, dont un à haute usinabilité.

Un foret en carbure micrograin, avec un revêtement TiN, de diamètre 6 mm a été testé entre 150 et 250 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ sous avance constante de $0,24 \text{ mm} \cdot \text{tr}^{-1}$. Il a été constaté, par mesure des efforts, par analyse de l'usure et par mesure de l'intégrité des surfaces (contraintes résiduelles) l'existence d'une vitesse optimale permettant de percer 6 m de trous (V6M) sans que l'usure soit importante (figure 23).

L'analyse micrographique des copeaux met également en évidence le phénomène de coupe adiabatique : comme pour les autres techniques, l'énergie thermique générée est évacuée dans le copeau, modifiant de ce fait la structure du matériau (changement de phase).

2.7 UGV et grande série

En France dans dix ans, la machine d'usinage en grandes séries sera rapide, ou ne sera plus... Les machines spéciales qui ont caractérisé les fabrications en grandes séries seront remplacées par des machines plus universelles, flexibles mais aussi rapides au sens vitesse de déplacement principalement. Pourquoi ce virage ? Dans l'automobile, les constructeurs s'accordent sur le constat :

- les séries de pièces diminuent ;
- la durée de vie des produits raccourcit et ne dépasse pas actuellement 5 ans ;
- les pièces subissent de fréquentes modifications qui ont pour origines principales l'amélioration des performances et la prise en compte de nouvelles normes relatives à la sécurité, la pollution...

« L'équation » est donc particulièrement difficile à résoudre puisqu'il faut concilier l'universalité et la productivité.

La solution semble résider dans la définition de machines plus universelles associant le concept monobroche à de grandes vitesses de déplacements d'axes ; ce type de machines commence à arriver sur le marché, et la France concurrence son voisin européen allemand, en proposant deux produits de haute technologie (figures 24 et 25).

Mais l'utilisation de ce type de machine impose des contraintes ; la simple transposition d'une gamme d'usinage (suite d'opérations



Figure 24 – Centre d'usinage URANE 20 (doc. Renault Automation)



Figure 25 – Centre d'usinage METEOR 5 (doc. PCI-SCEMM)

logiques) validée sur les machines spéciales ne permettrait en aucun cas d'atteindre le niveau requis de productivité.

Comment utiliser au mieux ce type de machine ? Il faut profiter de son « agilité » c'est-à-dire de ses qualités de vitesse et d'interpolation des trajectoires.

Donnons d'abord quelques exemples :

— il faut éviter les changements d'outils ; ainsi une succession d'alésages étagés sera de préférence exécutée avec le même outil par interpolation et non par plusieurs outils prérglés aux diamètres voulus. D'une part, les changements d'outils sont pénalisants en temps global, d'autre part les changements d'outils répétés fatiguent les éléments de serrage. Plus généralement il faut envisager l'optimisation au niveau de la gamme et non au niveau de l'opération élémentaire ;

— il faut souvent privilégier les grandes vitesses de coupe et non plus les grandes sections de coupe. Cette inversion par rapport aux règles traditionnelles de choix des paramètres d'usinage s'explique par les profondes différences entre les domaines de fonctionnement des outils conventionnels et UGV. Nous en avons donné un exemple (§ 2.2) dans le cas de l'usinage des blocs cylindres.

Il faut gérer les trajectoires planes en évitant les phénomènes d'âcous qui provoquent des variations brusques d'efforts sur les axes ; ainsi, la réalisation d'un simple contournage plan ne peut plus être traité seulement comme un problème géométrique, il faut aussi y associer une logique d'optimisation énergétique.

Plus généralement l'établissement d'une gamme d'usinage sur machine agile passe par une analyse fine :

— fonctionnelle des outils : regroupement d'opérations, de trajectoires, de points de fonctionnement adaptés ;

— fonctionnelle de la machine : mise en valeur de ses performances intrinsèques (grande vitesse de déplacement liée à une accélération importante), capacité à évoluer (passage rapide d'un type de fabrication à un autre en optimisant les équipements : la flexibilité).

Si les machines à la fois agiles et UGV semblent être la solution aux exigences conjointes de flexibilité et de productivité, on voit que l'utilisation de telles machines ne saurait se résumer à la simple transposition des gammes d'usinage conventionnelles. Il s'agit d'une refonte complète des gammes d'usinage ; et cette refonte qui doit s'opérer rapidement ne peut être obtenue par suite d'un long et patient « rodage ». Ce qui justifie les recherches actuelles en matière d'élaboration rationnelle des gammes.

Ces profondes modifications des méthodes d'usinage a d'évidentes incidences sur la conception même des produits : l'ingénierie simultanée n'est pas une mode mais une absolue nécessité !

Actuellement, quelques machines agiles sont introduites dans les chaînes de fabrication sérieuse ; elles réalisent certaines opérations d'ébauche ou de finition sur des culasses ou des carters de boîtes de vitesses ou de départs d'usinage dans des fonderies d'alliage d'aluminium. Nous citerons ici l'exemple de la machine URANE qui, à Renault – usine de Cléon –, réalise la fabrication des chapeaux de paliers d'arbres à cames (figure 26). La gamme requiert l'utilisation de deux montages et de cinq outils ; la durée totale du cycle est de 55 s.

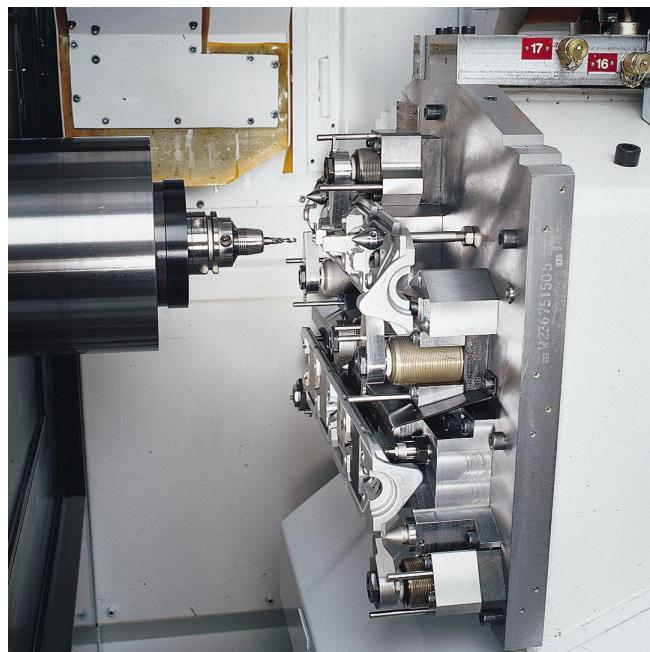


Figure 26 – Poutres paliers sur centre URANE (doc. Renault Automation)

3. Éléments du système

Nous vous présentons dans ce paragraphe les éléments essentiels et les spécificités liés à cette technique en insistant sur le fait que, dans bien des cas, les évolutions et progrès sont si rapides qu'il devient difficile d'en figer les performances.

3.1 Broche

Les broches à grande vitesse sont des électrobroches ; elles sont construites suivant trois principes différents :

- les **électrobroches à roulements à billes** (figure 27) ;
- les **électrobroches à paliers magnétiques** (figure 28) ; dont le fonctionnement repose sur la création d'un champ magnétique qui « suspend » le rotor entre les électroaimants dans une position contrôlée quels que soient les efforts exercés sur l'outil ;
- les **électrobroches à paliers hydrostatiques** qui équipent depuis peu certaines machines à grande vitesse (figure 29).

Ce sont les électrobroches à palier magnétique qui ont équipé les premières machines à grande vitesse, bientôt concurrencées par les électrobroches à roulements à billes céramiques. Dans l'état actuel des choses, ce sont les électrobroches à roulements à billes qui détiennent la plus grande part du marché.

Sans présager de l'avenir de ces techniques en constante évolution, notons que leurs arguments principaux sont :

- pour l'électrobroche à roulements à billes :
 - le coût,
 - le couple disponible aux faibles vitesses de rotation,
 - la conception en fourreau facilitant leur intégration.

Ces broches permettent par exemple d'atteindre $40\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ pour une puissance de 40 kW et un couple à basse vitesse de 300 m · N :

- pour l'électrobroche à paliers magnétiques :
 - l'absence de risques de ruptures de billes en cas de choc,
 - le contrôle actif qui permet d'intervenir sur la position zéro de l'arbre, de mesurer les efforts et d'éviter les vibrations dues aux balourds.

Ces broches permettent par exemple d'atteindre 20 kW à $45\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ ou 15 kW à $60\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$:

- pour l'électrobroche à paliers hydrostatiques :
 - les qualités de rigidité, d'amortissement et de concentricité,
 - la grande durée de vie.

Ces broches sont intéressantes pour les travaux de finition leur puissance restant actuellement inférieure à 5 kW.

3.2 Moteurs d'axes et leurs asservissements

La chaîne cinématique classique du mouvement d'axe comporte les éléments suivants :

- un moteur du type asynchrone sans balais ;
- un réducteur ;
- une vis à billes ;
- un écrou.

Ces transmissions équipent encore la plupart des machines GV, tours comme fraiseuses lorsque les vitesses de déplacement restent inférieures à $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Dans l'architecture des asservissements numériques récemment mis sur le marché (figure 30), les boucles de vitesse comme de posi-

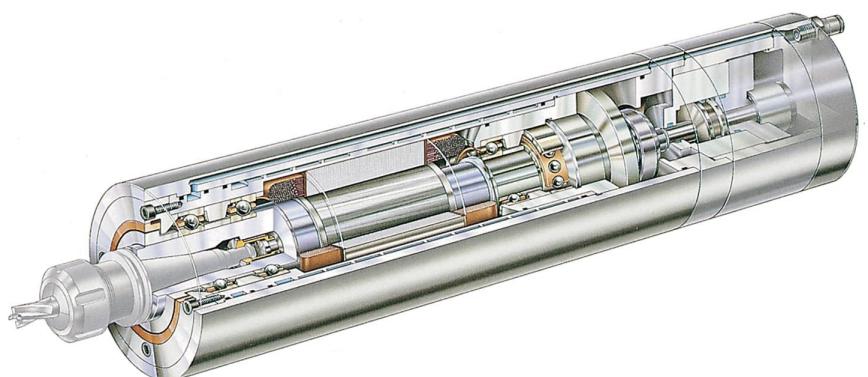


Figure 27 – Broche à roulements hybrides
(doc. Fischer)

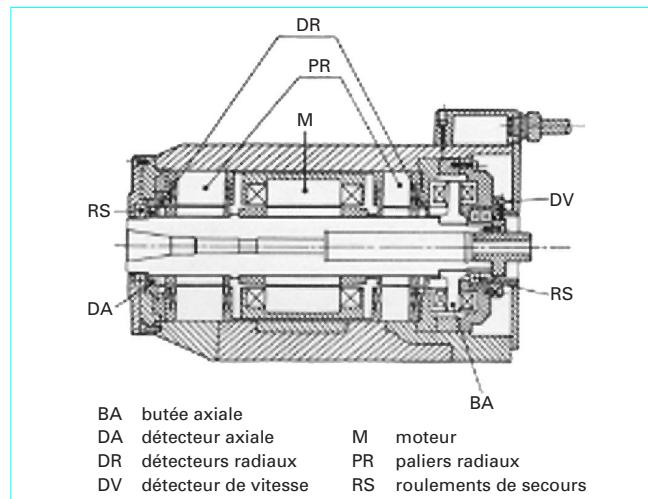


Figure 28 – Broche à paliers magnétiques

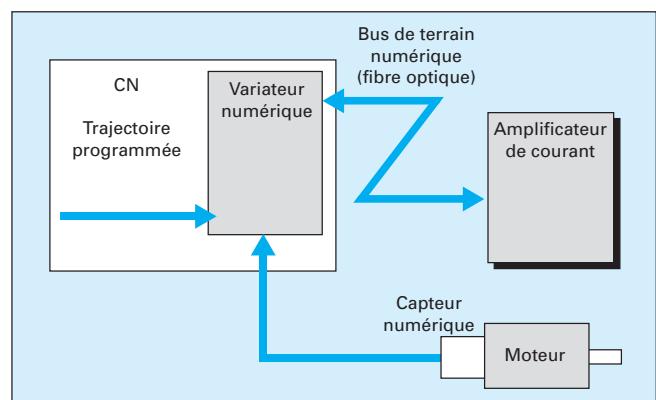


Figure 30 – Asservissement numérique pour le pilotage des axes machines

tion sont traitées par la commande numérique, le variateur n'ayant plus qu'un rôle d'amplificateur de courant chargé de l'alimentation en puissance du moteur. Cette solution apporte les avantages significatifs suivants :

- les performances sont accrues en précision, vitesse, accélération ;
- le réglage et les diagnostics sont facilités par l'emploi de logiciels qui optimisent les paramètres numériques ;
- le raccordement entre variateur et amplificateur est simplifié.

L'emploi de moteurs linéaires (figure 31) révolutionne la conception des machines ; pourtant certains constructeurs hésitent encore à les utiliser, en particulier parce que l'usinage des matériaux ferromagnétiques impliquerait une excellente étanchéité entre les zones de travail et les moteurs. De plus, actuellement, la technologie par moteurs linéaires reste plus chère que la technologie classique.

D'importants progrès ont été réalisés dans la conception des moteurs linéaires tant asynchrones que synchrones dédiés aux machines-outils. Ces moteurs présentent les avantages suivants :

- une grande raideur qui assure en particulier la précision des interpolations ;
- de grandes vitesses de déplacement et des accélérations dépassant 1 g ;
- la suppression de l'asservissement de la vitesse par dynamo tachymétrique ;
- une construction plus simple utilisant moins de composants ;
- la suppression de la conversion entre rotation et translation ;

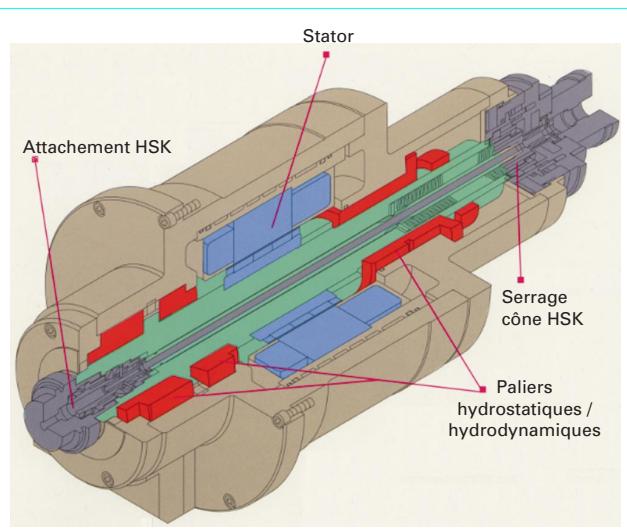


Figure 29 – Broche hydrostatique hydrodynamique (doc. Ingersoll)

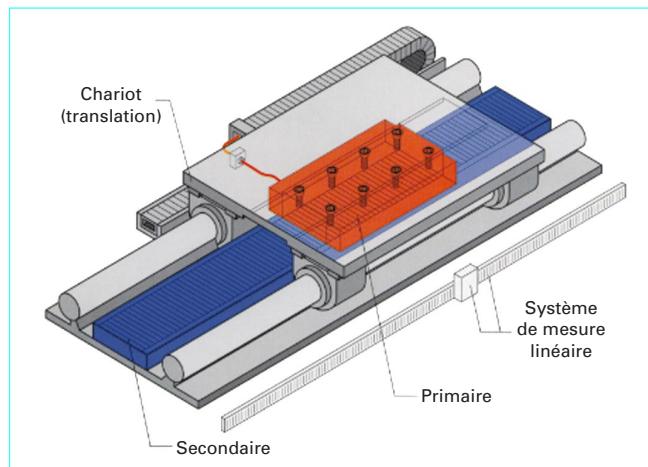


Figure 31 – Schéma d'un moteur linéaire

- une meilleure répétabilité des positionnements.

La technologie des moteurs linéaires reste en évolution ; les constructeurs japonais (MORI, SEIKI et ITACHI) annoncent des moteurs linéaires offrant des vitesses de $120 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ et des accélérations de 2 g .

3.3 Commande numérique

Outre la fonction « programmation » avec tout ce que cela comporte en outils dits d'assistance, dont le but est de faciliter la tâche des utilisateurs, une commande numérique dédiée grande vitesse doit avoir ses propres spécificités liées au type d'usinage réalisé.

Dans le cas du fraisage surfacique (cas d'usinage des moules et modèles) à partir d'un système CFAO, la commande numérique (CN) doit répondre aux exigences suivantes :

- vitesse de traitement des blocs suffisante (de l'ordre de la milliseconde) ;
- erreur de poursuite nulle par modulation anticipée des vitesses ;
- accélération contrôlée et modulée suivant des rampes programmées de manière à « contraindre » les entraînements à évoluer de façon continue ;
- analyse de la trajectoire en amont : fonction *look-ahead* (anticipation) prévoyant les erreurs et accidents de parcours et réduisant la vitesse d'avance sur les points critiques de cette trajectoire (actuellement, certaines commandes numériques assurent la vérification de 80 000 blocs d'avance) ;
- correction des défauts perceptibles à chaque changement de quadrant lors de la programmation d'un cercle, par exemple, lorsque le moteur d'axe inverse son sens de rotation.

Cette fonction (*l'anti-pitch*) permet d'assurer en interpolation circulaire, un défaut de circularité inférieur à $3 \mu\text{m}$ pour un diamètre de 50 mm ce qui révolutionne la méthode d'exécution des alésages précis puisqu'il devient possible de réaliser plusieurs alésages de diamètres différents avec le même outil du genre fraise. La qualité de réalisation est bien entendu liée à celle de la machine et en particulier à la bonne perpendicularité des mouvements.

Un autre progrès relatif aux CN mais qui n'est pas spécifique à la grande vitesse est le couplage de plus en plus fréquent avec un micro-ordinateur qui peut prendre en charge des opérations annexes comme le stockage de programmes volumineux ou le palpage des pièces avant usinage. Le micro-ordinateur pourra égale-

ment supporter les logiciels de calcul et d'optimisation des conditions de coupe et de gestion de trajectoire.

3.4 Outils

Un outil d'usinage se définit par un grand nombre de paramètres (nature des matériaux, géométrie...) en interactions complexes et imparfaitement maîtrisées. Dans ces conditions, la conception d'un outil de coupe est largement d'origine expérimentale. Comme, par essence, les paramètres de l'UGV sont très différents de ceux de l'usinage conventionnel, il est clair que l'outil pour UGV doit être lui-même très différent. C'est ce que l'expérience confirme. De plus, il est presque certain que, pour une opération dans une matière donnée, le « meilleur outil » aujourd'hui ne le sera plus demain :

- les matériaux de coupe restent en pleine évolution ;
- les connaissances sur l'usinage évoluent rapidement (en raison même du regain de vigueur que l'UGV donne à leur étude) ;
- il est difficile de comparer deux outils qui offrent des caractéristiques différentes : l'un sera plus universel, l'autre plus performant dans un domaine plus étroit ;
- même si l'on sait maintenant définir le domaine de validité d'un couple outil-matière, l'utilisation des techniques rationnelles d'essai ne sont pas généralisées dans l'industrie.

Nous pouvons toutefois dire que, d'une manière générale l'usinage GV nécessite l'emploi de matériaux de coupe acceptant de travailler à haute température mais résistant également aux chocs mécaniques, tout en gardant une durée de vie économiquement acceptable.

La figure 32 donne un aperçu des différents matériaux actuellement disponibles, sachant que des recherches incessantes font évoluer ces produits, en particulier en matière de revêtement :

- nombre et épaisseur de couches : jusqu'à 22 couches déposées pour une épaisseur totale de $12 \mu\text{m}$ de revêtement ;
- nature de ce dépôt : composés de nitrule de carbure, d'oxydes... ;
- méthodologie de déposition : PVD et CVD, bien sûr, mais aussi dépôt ionique ;
- traitement de l'acuité et des renforts d'arête : *honing* par exemple.

Le substrat des carbures revêtus est lui-même en évolution :

- modifications de la structure pour améliorer l'accrochage des couches (carbures durs « éloignés » de la zone active) ;
- dimensions de grain $< 0,5 \mu\text{m}$ permettant d'améliorer l'acuité d'arête et d'éviter le polissage de la face d'attaque.

Les acuités d'arêtes obtenues combinées au superpolissage de la face de coupe autorisent l'obtention d'excellents états de surfaces : $Ra < 0,4 \mu\text{m}$ en surfacage GV d'un alliage d'aluminium de fonderie (Al Si) ou corroyé (Al Cu).

Comme on l'a vu dans le paragraphe précédent, la plupart des UGV ont pu être mis en œuvre par l'arrivée ou plutôt la vulgarisation des matériaux autres que le carbure. C'est ainsi que la céramique (pure ou mixte) prend un nouvel essor, car si celle-ci est apparue dans les années 1960, elle ne pût avoir d'applications vraiment industrielles à cause du manque de vitesse de rotation de broche. Rendue également moins fragile (insertion de matrices), ce matériau est utilisé en fraisage (technique à coupe interrompue) des fontes comme des aciers durs. Elle rivalise actuellement avec le nitrule de bore (cubique) plus onéreux, mais permet de monter encore en vitesse sans subir les conséquences de la dureté superficielle du matériau usiné (acier à 63 Hrc).

Quant au diamant, son emploi se limite encore au fraisage (surtout) des alliages non ferreux mais il se justifie surtout en usinage grande série, par une durée d'arête équivalente à celle du poste, ou plutôt à plusieurs milliers de pièces, car le coût d'un insert diamant (préparé sur un support type plaquette amovible) avoisine les 750 F.

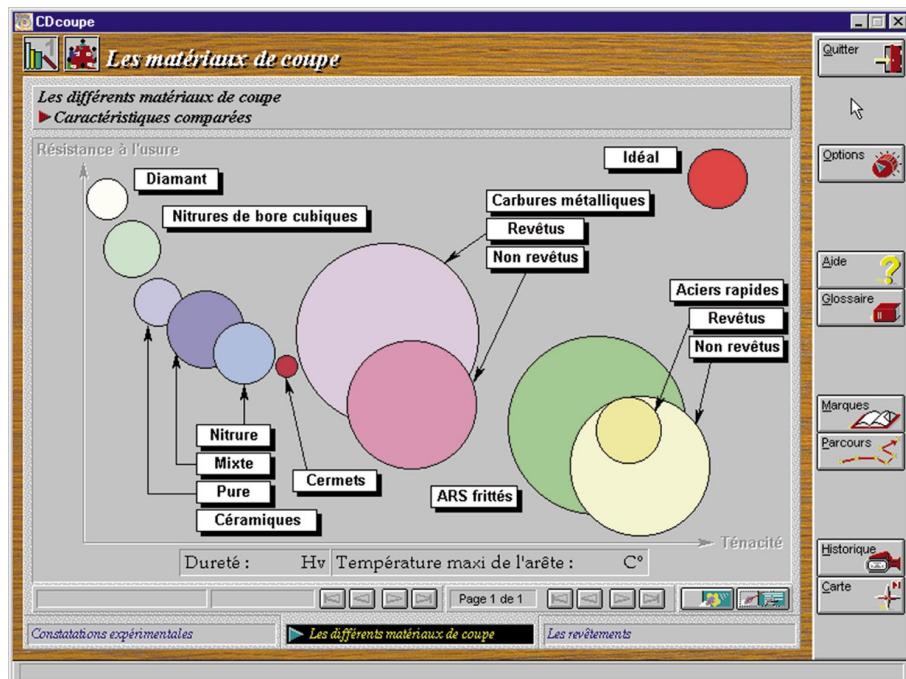


Figure 32 – Classification des matériaux à outil
(doc. TOOL)

De tels coûts justifient à eux seuls la nécessité de valider préalablement les points de fonctionnement de l'opération car toute modification structurale du matériau usiné peut entraîner des conséquences catastrophiques sur cette durée de vie des arêtes de coupe.

Dans les années à venir, nous verrons apparaître des matériaux nouveaux qui devront résister à des températures de coupe de plus en plus élevées (1 500 °C) car, irrémédiablement l'usinage se fera sans lubrification.

3.5 Porte-outils ; les attachements

Entraîner un outil, en toute sécurité, à une haute vitesse de rotation qui supporte des efforts dissymétriques en module comme en direction, impose une qualité d'attachement irréprochable :

- serrage efficace pour transmission de couple élevé ;
- centrage parfait, très haute précision, sans balourd ;
- rigidité maximale en statique comme en dynamique ;
- stabilité identique quelle que soit la sollicitation (centrifuge) sans toutefois entraîner un coût excessif. En effet, comme il est dit dans le paragraphe précédent (§ 3.4), le budget outil devient de plus en plus primordial en UGV, faisant, pour l'instant, « reculer » certains utilisateurs potentiels. Aussi, il ne faut pas que l'investissement outillage ne grève ce budget. Nous verrons plus loin l'intérêt de l'utilisation de porte-outils plus universels.

3.5.1 Liaison entre broche et porte-outil

En fraisage, la liaison broche/porte-outil évolue vers la solution dite cône-face, remplaçant la liaison classique cône mâle/femelle (ISO ou BT). Une telle solution favorise les qualités souhaitées, tout en évitant l'effet de fretting-corrosion due à la différence de dilatation de la partie conique (dilatation proportionnelle aux diamètres).

La solution de type HSK normalisée en Allemagne (DIN 69 893-1) tend à se généraliser. Elle se traduit par l'adjonction d'un cône court de faible conicité et d'un plan d'appui dont la distance par rapport au plan de jauge est très précise (figures 33 et 34).

Le serrage est assuré par tirage : celui-ci, contrairement au serrage cône-cône, multiplie la capacité de serrage pour une même force de traction (tableau 2).

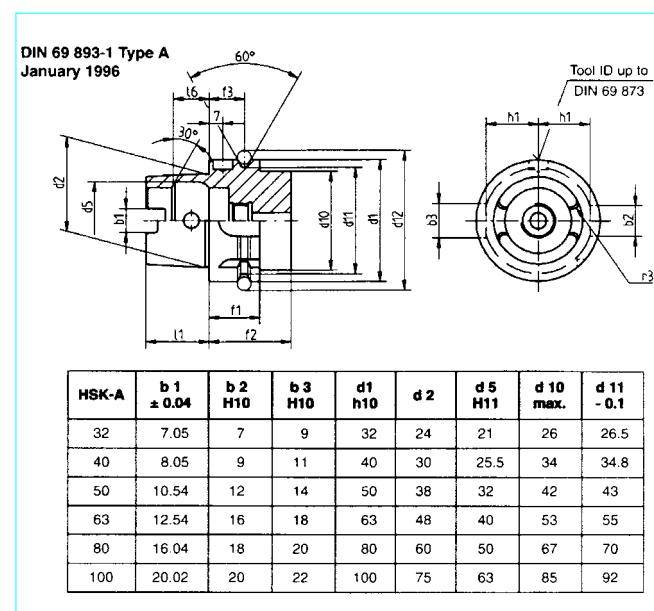


Figure 33 – Norme HSK. Définition

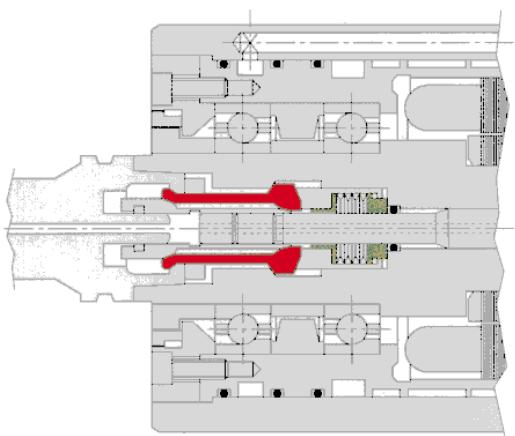


Figure 34 – Attachement HSK, liaison porte-outil/broche



Figure 35 – Système « CAPTO » (doc. Sandvik)

Tableau 2 – Comparaison pour attachesments HSK / ISO

Attachement HSK analogue Din 69893			Attachement ISO		
Cône	Force de traction (N)	Capacité de serrage (N)	Cône	Force de traction (N)	Capacité de serrage (N)
A 25	900	2 800	25	2 750	2 750
A 40	2 160	6 800	30	5 000	5 000
A 50	3 500	11 000	40	8 000	8 000
A 63	5 700	18 000	40	13 750	13 750

L'attachement HSK présente toutefois un risque de cisaillement au niveau de la collette en cas de sollicitation anormale. Or l'UGV exige une vigilance particulière en matière de sécurité. Pour pallier ce risque, Sandvik propose un attachement utilisant un profil polygonal et non circulaire ce qui élimine tout risque de rotation différentielle entre partie mâle et femelle (figure 35).

3.5.2 Liaison entre porte-outil et outil

Aux solutions classiques (outil monobloc, pince de précision serrée mécaniquement avec contrôle du couple) se substituent en UGV tant pour des raisons économiques que de sécurité :

- le frettage ;
- le serrage par mandrin hydraulique (figure 36).

Le couple transmis est suffisant dans le cas du mandrin hydraulique et surpuissant dans le cas du frettage ($300 \text{ N} \cdot \text{m}$ à $20 000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ pour un outil de 25 mm de diamètre et un serrage de $30 \mu\text{m}$, ce qui correspond à une puissance de 600 kW) (figure 37).

Le frettage assure une excellente précision mais son emploi est limité au montage des outils carbures sur attachement acier (la différence de dilatation est une condition nécessaire au défrettage). De plus il faut disposer d'un banc de frettage (figure 38).

La solution par mandrin semble actuellement préférée par les utilisateurs.

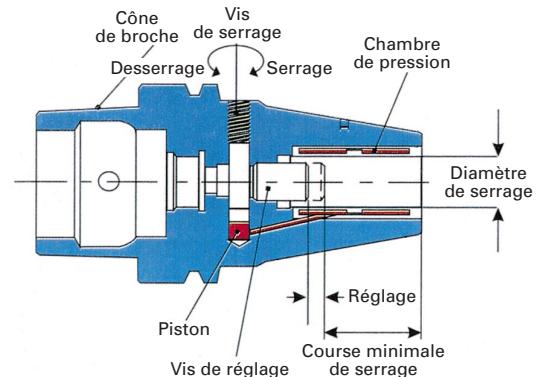


Figure 36 – Mandrin à serrage hydraulique (doc. Kelch)

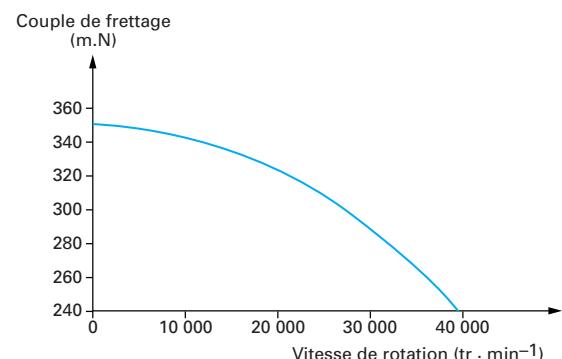


Figure 37 – Courbe de frettage

La norme ISO 1940 définit l'excentration résiduelle permise en fonction de la vitesse de rotation ce qui permet de limiter le déséquilibrage (figure 39).



Figure 38 – Machine de frettage (doc. Kelch)

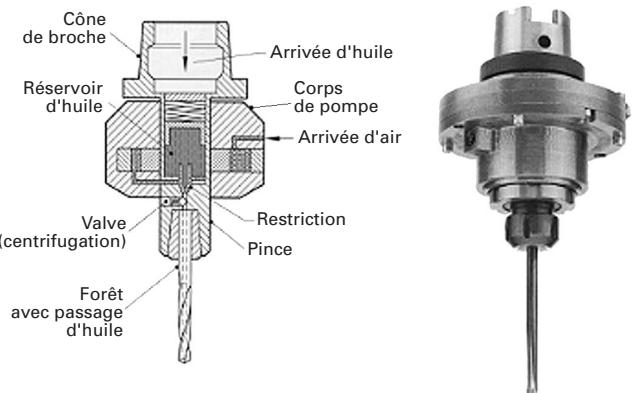


Figure 40 – Système de micropulvérisation (doc. Guhring)

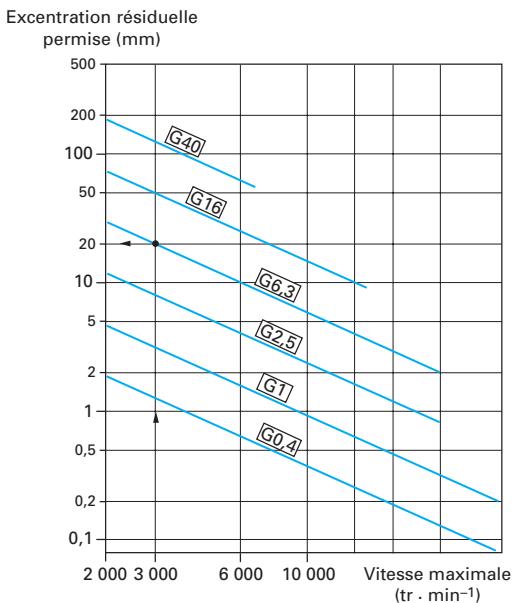


Figure 39 – Niveau de qualité de l'équilibrage (ISO 1940)

3.6 Lubrification. Évacuation des copeaux

Dès les débuts industriels de l'UGV, une polémique est apparue concernant le bien-fondé d'une lubrification à grande vitesse...

Indépendamment de la nature du lubrifiant, il existe plusieurs modes de lubrification :

- gros débit sous faible ou moyenne pression ;
- micropulvérisation sous forte pression ;
- lubrification externe ou par le centre ;
- simple soufflage pour évacuation des copeaux, etc.

Si les effets de la lubrification peuvent être mis en évidence par des essais rationnellement conduits :

- les mécanismes de la lubrification ne sont pas clairement élucidés ;
- la lubrification coûte cher ;

— l'utilisation des lubrifiants et leur élimination pose des problèmes d'hygiène et d'écologie.

Discutée en usinage conventionnel, la lubrification l'est encore plus en UGV. Mais en UGV l'évacuation des copeaux doit impérativement être assurée, hors du champ de coupe pour éviter leur recyclage et hors de la pièce qui ne doit pas absorber les calories évacuées dans les copeaux.

La tendance actuelle en UGV est de se tourner vers la micropulvérisation ou l'usinage à sec. En matière de micropulvérisation, c'est la solution présentée par la société Guhring (figure 40) dans laquelle un aérosol air/huile est expulsé à travers l'outil ; le débit est fonction de la vitesse mais la consommation de lubrifiant est donnée comme « négligeable ».

La recherche d'usinage à sec oriente les études relatives aux outils, choix du matériau de coupe qui doit conserver sa dureté aux températures de coupe mais aussi choix de la géométrie et en particulier du renfort d'arête.

3.7 Trajectoire d'outil : CFAO adaptée

Pour bénéficier des gains de productivité qu'apporte l'UGV, il faut que les parcours d'outils issus d'une FAO soient optimisés et prennent en compte les contraintes propres à cette technique. À l'heure actuelle, certains logiciels de FAO (3 axes, avec fraise hémisphérique ou torique) proposent des stratégies orientées UGV dans un but d'amélioration de la qualité finale de la surface.

Les principales stratégies permettant d'optimiser les trajectoires d'outils en UGV sont présentées en encadré et illustrées par les figures 41, 42, 43, 44, 45 (doc. DELCAM).

Il est indispensable de vérifier les parcours d'outils avant leur mise en application car les vitesses d'avance pratiquées en UGV rendent bien souvent inopérantes les interventions d'urgence. Ces vérifications se faisaient en général sur une maquette en matériau tendre, mais il existe maintenant des logiciels de simulation avec détection d'erreurs tels NCSIMUL, VERICUT, VisuNC. Les progrès de la CFAO participent également au gain de temps global en diminuant les temps de préparation (figure 46).

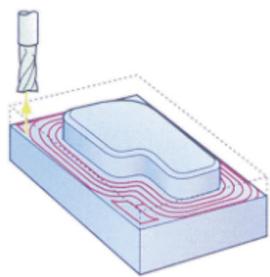


Figure 41 – Ébauche par niveau (ou offset)

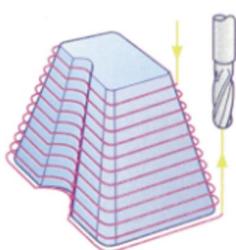


Figure 42 – Fraisage à niveaux constants selon l'axe Z

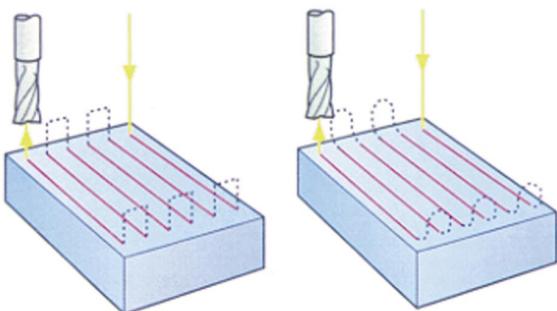


Figure 43 – Engagement d'outil

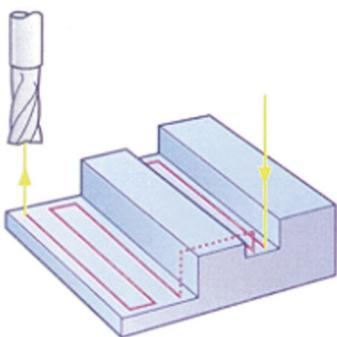


Figure 44 – Mode « rase-mottes »

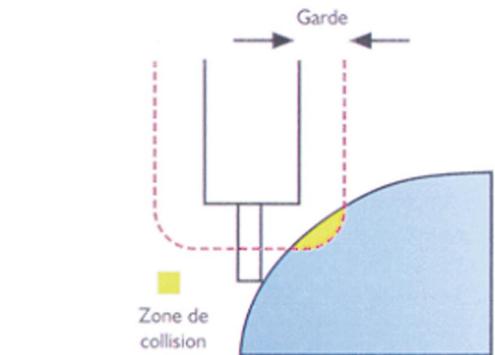


Figure 45 – Contrôle des collisions (doc. Delcam)

Stratégies de gain de productivité en usinage grande vitesse

■ Analyse et gestion des surfaces elles-mêmes :

- détection des défauts de raccordement, de recouvrement de trous ;
- gestion en automatique ou en manuel des pentes ;
- définition possible de « zones » d'usinage.

■ Stratégie d'ébauche :

- ébauche par plans parallèles ;
- ébauche par niveau : contours parallèles successifs (figure 41).

■ Stratégie de finition particulière :

- finition d'arêtes saillantes ;
- finition en montant ou en descendant (gestion de la hauteur de crête) ;
- finition parallèle à une courbe 2D ou 3D (figure 42).

■ Stratégie de reprise :

- définition partielle du brut ;
- recherche et affichage de la matière résiduelle ;
- reprise par niveau, en contournage.

■ Stratégie de plongée et d'attaque :

- plongée inclinée, hélicoïdale, en zigzag ;
- attaque en forme d'arc, tangentielle ;
- possibilité de prolongement automatique de la surface elle-même.

■ Stratégie de transition entre trajectoires :

- liaison entre deux parcours : en arc de cercle, en boucle... (figure 43) ;
- déplacement rapide en « rase-mottes », plutôt que remonter au plan sécurité (figure 44).

■ Stratégies particulières :

- fraisage en continu ;
- optimisation des trajectoires retour (balayage en aller simple) ;
- usinage de parois minces (usinage en pocketing) ;
- adaptation de la vitesse de coupe et d'avance aux conditions de contact local ;
- recherche de l'outil adapté (en fonction des concavités) ;
- gestion des collisions (outil et intermédiaire) (figure 45).

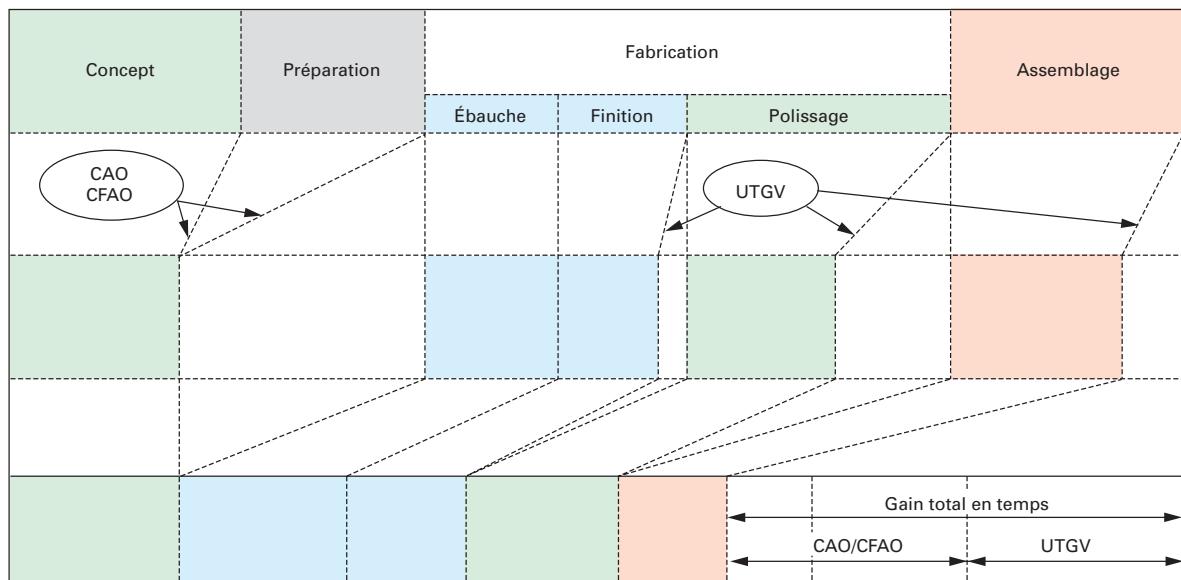


Figure 46 – Gains liés à la CFAO et à l'UTGV (doc. Schulz)

3.8 Optimisation de l'opération

L'usinage conventionnel a souffert et souffre encore souvent d'une exploitation trop empirique des connaissances et données. Une évolution récente (début des années 1980) permet la pré-détermination et l'optimisation des conditions et des paramètres de coupe. Pré-détermination et optimisation s'appuient sur la notion de couple outil-matière (NF E66-520) qui permet d'exprimer le domaine de validité de l'outil (référencé) dans un matériau à usiner. Des modèles adaptés permettent ensuite d'opérer la restriction de ce domaine en tenant compte de différentes contraintes apportées par les exigences de qualité, la machine, les difficultés particulières d'usinage.

Faut-il chercher à appliquer ces méthodes à l'UGV ? Les spécialistes consultés répondent affirmativement. Mais comme les études relatives à l'adaptation du COM (couple outil/matière) et des modèles sous-jacents sont récentes et encore incomplètes, les informations suivantes ne peuvent être données qu'à titre provisoire :

— la modélisation selon la démarche « COM usinage conventionnel » reste globalement satisfaisante en UGV ;

— le modèle de Taylor généralisé en fraisage :

$$a_p^F f_z^E (a_\theta/\delta)^D V t^G = \text{Constante}$$

s'est révélé satisfaisant sur de nombreux essais UGV ;

— l'aspect vibratoire ou plus généralement les phénomènes dynamiques doivent être pris en compte aux hautes vitesses de rotation broche (à partir de $12\ 000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$) ;

— en particulier, on sera conduit à paramétriser le comportement d'ensemble outil/intermédiaire/broche par essais pour définir les « fenêtres d'utilisation » des vitesses de broche (figure 47).

Mais l'optimisation de l'opération ne se limite pas à celle des paramètres, et il faut se préoccuper des parcours d'outil et du partage des passes. Lorsque l'on se trouve en condition UGV, le mode optimal valable en conventionnel ne l'est généralement plus, certaines stratégies deviennent envisageables voire prioritaire en UGV : citons l'excellent contrôle des flexions de fraise permettant des finitions sur flancs d'un raidisseur avec découpage axial sans défauts aux reprises (figure 48).

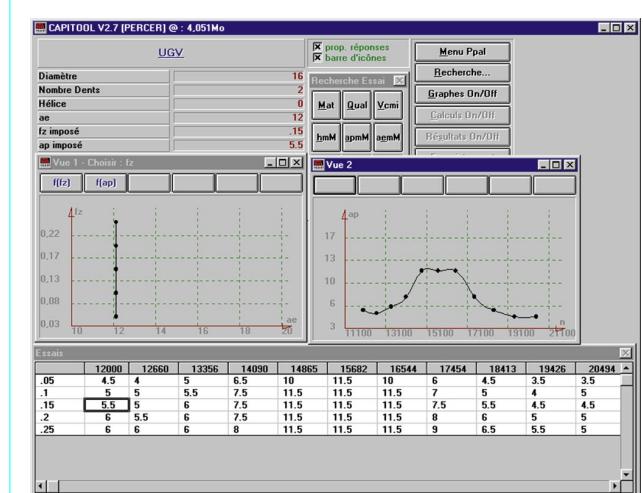


Figure 47 – Couple outil/matière UGV (doc. TOOL/ELPS)

tions sur flancs d'un raidisseur avec découpage axial sans défauts aux reprises (figure 48).

3.9 Sécurité

L'UGV qui se caractérise par des grandes vitesses, de coupe, de rotation, de déplacements, doit faire l'objet d'une attention particulière aux problèmes de sécurité. Les énergies cinétiques mises en jeu lors de la rupture d'un élément sont souvent comparées à celle d'un choc frontal en voiture.



Figure 48 – Finition d'un raidisseur d'épaisseur 0,1 mm et de 25 mm d'élançement

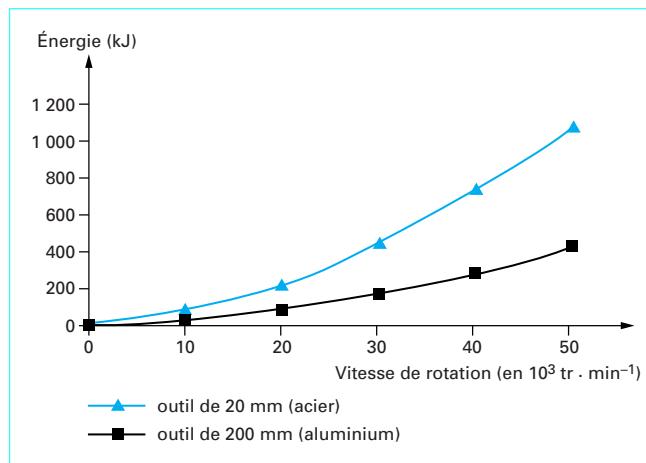


Figure 49 – Comparaison d'énergie d'usinage de matériaux différents (Doc. WZL Darmstadt)

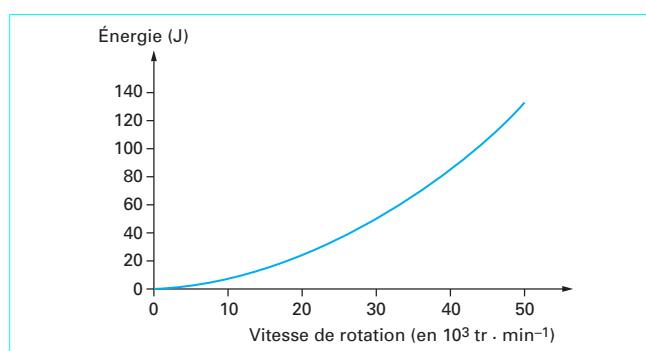


Figure 50 – Énergie cinétique de translation d'un insert de masse 10 g pour un outil de diamètre 63 mm (Doc. WZL Darmstadt)

La conception des outils et porte-outils peut être vérifiée par une simulation numérique (méthode des éléments finis) qui en assure le dimensionnement correct, met en évidence les distributions de contraintes et évite ou simplifie les tests à la rupture.

Les machines doivent être soigneusement protégées car il faut prendre en compte les erreurs d'utilisation (mauvais serrage d'un élément, collision suite à une erreur de trajectoire...) et prévoir la défaillance d'un élément défectueux. Les énergies cinétiques mises

en jeu pouvant être considérables, les carters de protection doivent être blindés et construits en tôles d'acier de même nature que celui des chars de combat ou en tôles de composites stratifiés résistant aux impacts. Il faut prendre en compte les dangers liés à la tenue des outils, à l'éjection des copeaux, au liquide de refroidissement, même si les niveaux d'énergie ne sont plus du même ordre de grandeur (figures 49 et 50).

Les personnels doivent recevoir une formation adaptée qui les conduit à respecter scrupuleusement des procédures rédigées au niveau des postes de travail et au niveau des gammes.

Il est urgent que les normes de sécurité prennent en compte les machines UGV.

4. Recherche et développement

Technique en pleine évolution, l'UGV suscite de nombreuses études de la part des constructeurs de machines, des fabricants d'outils et intermédiaires mais aussi des utilisateurs en collaboration avec les centres techniques, les écoles d'ingénieurs, les universités. L'AUTGTV souvent nommée dans cet article a initié des programmes de recherche tel le « saut technologique » encouragé par le ministère de la Recherche et de la Technologie, développé pendant 4 ans et qui avait pour missions : « d'étudier, évaluer :

- le fraisage GV des matériaux à hautes caractéristiques ;
- le perçage GV des aciers et de la fonte ;
- le fraisage GV de la fonte ».

Actuellement, un projet élargi (GPI : grand projet industriel) sur le travail à grande vitesse est en cours de développement. Il s'organise autour de partenaires utilisateurs (regroupés pour les aéronauticiens au sein du GIFAS), des constructeurs et fabricants de composants (regroupés au sein du SYMAP). Les études et recherches entreprises seront validées par un comité scientifique indépendant (composé d'un certain nombre de laboratoires spécialisés).

L'objet principal de ce projet est la caractérisation des machines et composants pour tout travail à grande vitesse. Il va de soi que tout ce qui concerne l'usinage bénéficiera des retombées du projet.

Nous évoquons ci-dessous certains thèmes relatifs à l'UGV sur lesquels les auteurs et leurs collègues s'investissent particulièrement. Tous ces thèmes sont issus de besoins industriels.

4.1 Commande d'axes

Les opérations de fraisage en contournage, comme les opérations de pocketing, requièrent nécessairement des changements fréquents de direction et, à grande vitesse de déplacement, ces changements engendrent des décalages entre trajectoire réelle et trajectoire programmée.

Lors d'un usinage de précision (finition d'outillages), ces oscillations (qui peuvent atteindre une amplitude de 100 μm) ne sont pas tolérables, aussi est-il important de les maîtriser dans la commande d'axe. On sait qu'elles sont directement liées aux inerties en présence et aux raideurs de la structure de la machine, qui ne peuvent être considérées comme infinies (machine infinité rigidité). L'idée est donc de chercher à compenser cette impossibilité mécanique par intégration du comportement dynamique dans le réglage de la commande.

Des travaux de recherche, déjà publiés, ont permis d'identifier un modèle uniaxial d'une transmission de mouvement d'axe en identifiant pour chaque élément, le système masse ressort amortissement équivalent (figure 51).

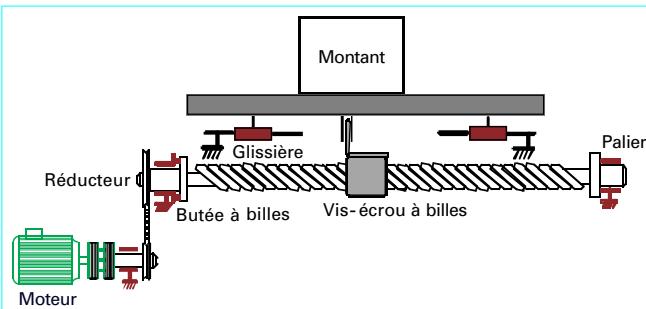


Figure 51 – Principe de fonctionnement d'un axe numérique

(doc. ENSAM L2EP)

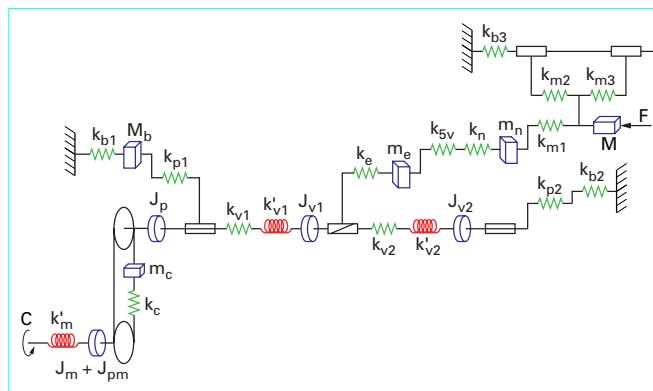


Figure 52 – Chaîne cinématique. Modélisation mécanique

(doc. ENSAM L2EP)

Par écriture des équations de Lagrange, il est possible d'établir les équations différentielles de mouvement qui après résolution donnent a priori les pulsations propres du modèle (figure 52).

Le modèle doit être recalé expérimentalement (analyse dynamique de la structure).

Si le modèle est bien identifié, il est possible alors de définir une loi de commande capable de gérer la transmission sur l'axe de telle manière que, pour la gamme de vitesse requise et avec les accélérations souhaitées, le positionnement soit le plus précis possible.

Mais l'important est de maîtriser le déplacement réel de l'outil ; est-il possible donc de trouver un modèle mécanique calé sur les déformées de tous les modes propres, et intégrable dans la loi de commande sans que sa complexité perturbe le temps de calcul ? À cette question, les spécialistes répondent qu'il est impossible de maîtriser par la loi de commande, toute la dynamique de la structure machine, néanmoins compte tenu des performances des calculateurs de CN, il est fort probable que certains modes propres (les plus perturbants pour la coupe) pourront être pris en compte sans que cela retarde la boucle de position.

4.2 Dynamique de broche. Cas du fraisage

Comme on l'a vu plus haut, pour obtenir des voiles très minces en fraisage de profil, la connaissance initiale du comportement dynamique de l'ensemble machine/outil/pièce est un élément fondamental de validation d'une opération d'usinage à grande vitesse. En effet, alors qu'auparavant les régimes de rotation n'engendraient pas de modifications du comportement vibratoire de la machine ou

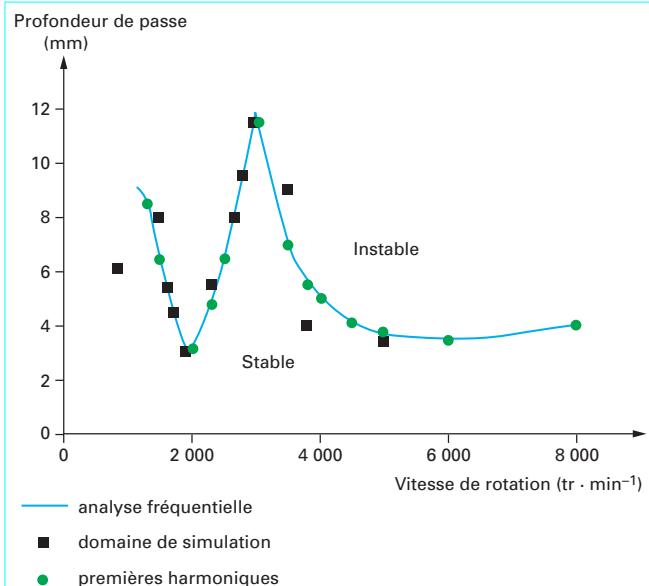


Figure 53 – Prédiction des limites de stabilité d'un point de vue analytique et multifréquentiel par Smith et Tlusty (1990)

de la broche, actuellement, avec les vitesses atteintes, il devient primordial d'en tenir compte. Il faut se focaliser sur la connaissance du couple outil/matière, des modes de vibration de l'ensemble outil/porte-outil/broche en sachant qu'une modification de la « charge », due à la coupe, engendre une modification de ces modes.

Il est alors important de faire au préalable une analyse vibratoire de cet ensemble. L'objectif est d'éviter certains « tâtonnements » de réglage lorsqu'on veut obtenir une qualité de surface avec, éventuellement, des outils dédiés. Ces tâtonnements peuvent provenir d'un montage aléatoire ou d'une inadaptabilité du porte-outil (masse ou élancement).

La littérature scientifique (annales du CIRP) nous renseigne sur les zones de stabilité dans le référentiel : vitesse de rotation/profondeur de passe, dans le cas d'un rainurage (figure 53).

Pour obtenir ces limites de stabilité, il est primordial de simuler le comportement du système broche/porte-outil/outil (en négligeant pour l'instant la dynamique machine). Il faut adapter un modèle à deux degrés de liberté dans les deux directions orthogonales à l'axe broche (figure 54). Ensuite par connaissance des efforts tangentiels de coupe (définition d'un modèle de calcul à partir de l'effort spécifique et mesure pour calage) dans l'objectif de trouver les instabilités, il faut déterminer la réponse en déplacements de l'ensemble. La difficulté réside dans l'expression de la fonction de transfert (directe et croisée) relative au modèle : une première analyse modale doit définir les paramètres caractéristiques de la broche (outil monté) donnant ainsi la matrice de rigidité $[G(i\omega)]$. La méthode de calcul des instabilités met en évidence une relation causale que l'on constate bien lorsque l'on fait des essais en UGV :

C'est à la fréquence propre de rotation que l'on obtient les meilleures conditions de stabilité.

La maîtrise du fraisage à grande vitesse de broche implique celle du comportement dynamique de l'outil monté, de la pièce à bloquer, de l'influence de l'usure de l'outil quand on veut obtenir un état de surface « fin » sans dérive. Désormais lorsqu'on investira dans la technologie UGV, il ne faudra pas oublier d'y adjoindre un système

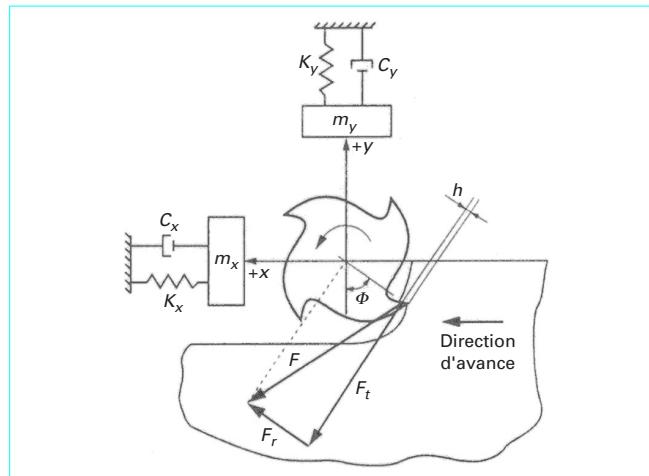


Figure 54 – Modélisation à deux degrés de liberté du fraisage en roulant (doc. Altintas)

expert fiable, capable de donner les points de fonctionnement précis, qui intégrera logiquement les modèles dynamiques. Des essais initiaux normalisés caleront ces modèles pour une machine donnée.

4.3 Modélisation de la coupe

Les modèles mécaniques et thermomécaniques ont fait et font encore l'objet d'un grand nombre de publications. Ils sont tirés du modèle de coupe orthogonal initialisé par M.-E. Merchant dès les années 1945-1950, des formulations complexes bâties autour des phénomènes physiques permettent de prédire les contraintes mécaniques et le champ de température à l'interface copeau/outil. Cette création de modèles analytiques pour trouver les paramètres de coupe n'en reste pour l'instant qu'au stade de modèles à usage simplifié du fait de l'acceptation de la linéarité du problème.

En dépit de la performance de la simulation numérique, les premiers travaux créateurs de modèles de représentation de la coupe n'ont pas eu d'effet immédiat : la thermique et la mécanique étant traitées séparément, alors qu'elles devraient être couplées par les vitesses de déformation élevées. Avec les travaux de grands laboratoires spécialisés (citons, en France : ceux de l'École Centrale de Nantes, de l'École d'Ingénieurs de Tarbes, de l'Université de Metz et de l'ENSAE de Paris) des modèles plus complets permettent de traiter correctement les couplages, d'aborder la coupe discontinue (appliquée au fraisage) et d'établir des corrélations avec les observations expérimentales (usure de l'outil).

L'étude de la coupe orthogonale ne suffit pas à la construction d'un modèle « prédictif ». Les performances des logiciels actuels autorisent une approche tridimensionnelle (figure 55) et renseignent sur les températures et les contraintes dans la zone de coupe, en excellente corrélation avec les températures sur la face d'attaque de l'outil, observée lors des expérimentations à la caméra CCD.

Il est certain que, à haute vitesse, des difficultés subsistent :

- le modèle rend-il compte de l'évacuation de la chaleur dans le copeau aux grandes vitesses de coupe ?
- comment évolue l'état de contrainte (au sens Von Mises) sur la face d'attaque avec l'usure et peut-on prédire une durée de vie ?

Seules des expérimentations fiables viendront alimenter le paramétrage de ces modèles et des tests en balistique donnent des indications sur la morphologie 2D du copeau (cisaillement pur) corrélée avec le niveau des forces de coupe mesurée par extensométrie.

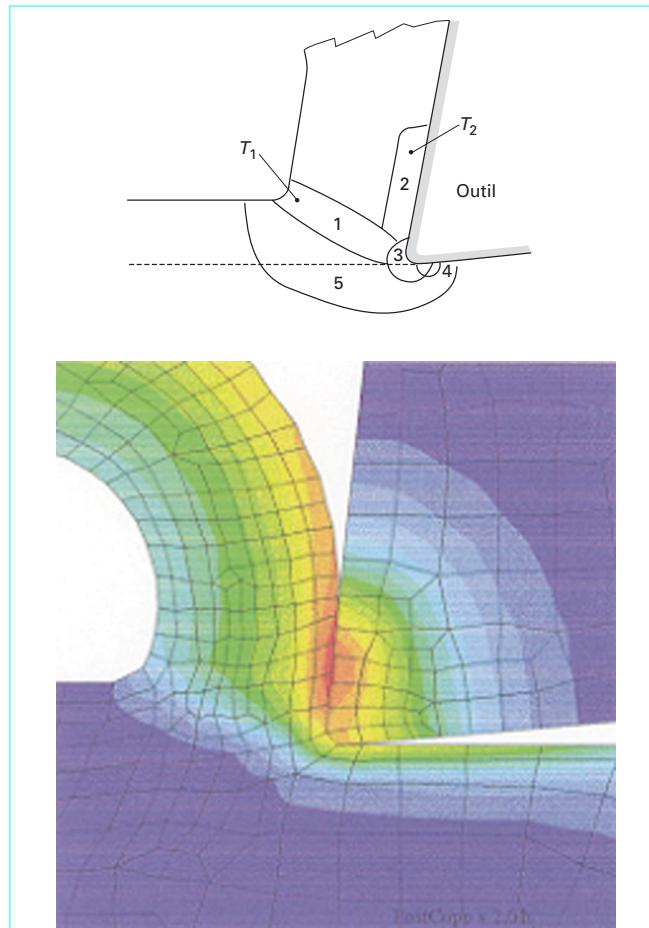


Figure 55 – Thermique de coupe (simulation) (doc. ENSAM)

4.4 CFAO surfacique

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, les logiciels de FAO commencent à prendre en compte la particularité du fraisage GV des surfaces ; avec l'évolution des performances et, en particulier, la mise sur le marché des machines multiaxes GV (machines classiques 5 axes ou spéciales de type « hexapodes ») les logiciels de FAO devront reconstruire la stratégie d'usinage sur de telles machines et en particulier traiter efficacement :

- le profilage des surfaces vrillées ;
- la technique de fraisage dite « par dépinçage » avec fraise torique ou hémisphérique (figure 56).

L'usinage par dépinçage peu utilisé actuellement s'avère intéressant pour la réalisation des outillages de grandes dimensions (outils d'emboutissage par exemple). L'avantage de cette technique réside dans la conservation d'une vitesse de coupe quasi constante tout au long du parcours de l'outil.

La solution optimale consisterait, pour des surfaces non « tourmentées », de minimiser (et même d'annuler) cet angle de dépinçage et de l'adapter aux courbures locales. Ainsi, l'on passerait d'un fraisage de type balayage (ponctuel) à un fraisage de type surfacage (technique maîtrisée).

La première étape consistera en une évaluation des méthodes de calcul des logiciels de FAO et des tests sont actuellement en cours



Figure 56 – Usinage avec dépinçage sur machine 5 axes
(doc. ENSAM)

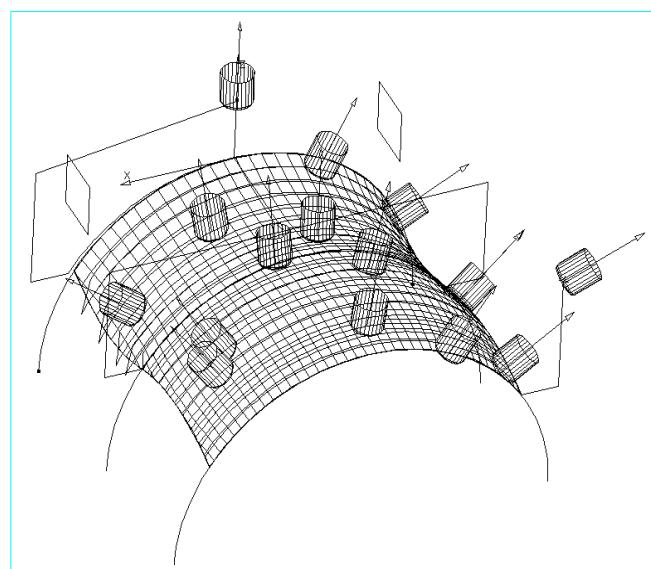


Figure 57 – Vérification de trajectoires 5 axes
(doc. LURPA-ENS Cachan)

sur le progiciel CATIA de Dassault Systèmes, tests permettant de vérifier les interférences entre outil et surface (matière) par calcul d'intersection. Une telle méthodologie, reposant d'abord sur la puissance de calcul des logiciels, devrait s'industrialiser lorsque les machines cinq axes intégreront réellement la grande vitesse, quelle que soit leur configuration (position relative des axes de rotation et de translation) (figure 57).

Des tests d'aptitude sur machine conventionnelle puis grande vitesse (d'avance) permettront de vérifier la qualité des trajectoires calculées par le logiciel, en particulier si des interférences existent lorsque le dépinçage s'annule.

Cette étude, entrant dans le cadre des thèmes de recherche lancés par l'Association AUTGV, contribuera à l'évolution des logiciels de CFAO intégrant le fraisage 5 axes dans leurs applications. A terme, un produit qui ne proposera pas de spécificités UGV en 5 axes ne survivra pas à la concurrence.

4.5 Grandes vitesses de broche en fraisage

Les grandes vitesses de broche permettent l'utilisation de matériaux de coupe inutilisables aux vitesses de broche conventionnelles ; c'est ainsi que pour atteindre une vitesse de coupe de $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ avec une fraise de diamètre 8 mm, il faut afficher une vitesse de broche de $16\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$. Les broches à grande vitesse ouvrent donc au carbure des domaines d'utilisation qui étaient réservés à l'acier rapide.

Mais là n'est pas la seule contribution des grandes vitesses de broche à l'UGV.

Les défauts de rugosité comprennent les défauts d'ordres 3 et 4. Les défauts d'ordre 4 sont principalement les « arrachements d'outils » ; ils diminuent lorsque la vitesse de coupe augmente et deviennent pratiquement négligeables. On constate que les améliorations de rugosités en fraisage GV sont supérieures à ce que l'on peut attendre de la diminution des défauts d'ordre 4 et concernent également les défauts d'ordre 3. Cette intéressante constatation peut recevoir deux explications :

— la première, évidente, est que les paramètres d'avance en UGV sont souvent inférieurs aux paramètres d'avance en usinage conventionnel ;

— mais on suppose également que la variation de flexion, source importante de défauts d'ordre 3 peut être diminuée aux hautes vitesses de broche. Des études sont en cours pour confirmer et modéliser ce phénomène.

Un cas particulièrement intéressant est celui du **fraisage latéral en finition (fraisage en roulant)** : le défaut de centrage des dents par rapport à l'axe de rotation de la fraise reste généralement supérieur à la profondeur du défaut de rugosité. Dans ces conditions le défaut de rugosité obtenu est aléatoirement compris entre le défaut qui serait provoqué par l'avance à la dent et celui qui serait provoqué par l'avance au tour. Et il devient intéressant d'utiliser une fraise à faible nombre de dents (2 voire 1) et tournant à grande vitesse.

4.6 Grandes vitesses de broche en tournage

Les broches de machines industrielles montent à $8\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$; des broches expérimentales montent à $30\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.

À $8\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, le chariotage d'un diamètre de 40 mm s'effectue à $1\,000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ de vitesse de coupe ce qui est du domaine de la grande vitesse au moins dans les aciers. Pourtant il n'existe que peu d'applications industrielles du tournage UGV ; essentiellement pour des raisons de sécurité. Il faut en effet prendre en compte :

— **les effets de la force centrifuge** qui réduisent jusqu'à l'annuler l'effort de serrage en prise extérieure du genre mandrin 3 mors. Pour pallier cet effet on étudie actuellement des « mandrins adaptatifs » ;

— **les effets des déséquilibrages**. Les éviter complique la réalisation des broches et peu s'avérer incompatible avec la morphologie des pièces finies ou ébauchées (excentration de parties brutes par rapport aux parties usinées) ;

— **l'hygiène et la sécurité** ; en particulier :

- les nuisances dues au bruit conduisent à insonoriser les machines,

- les projections de copeaux nécessitent le capotage de la machine et la protection de ses glissières. La centrifugation de l'éventuel lubrifiant par la pièce nécessite une bonne étanchéité du capotage,

- les risques de ruptures d'outils et de pièces nécessitent des machines « blindées » pouvant absorber de grandes énergies de choc,

- notons enfin que les règles générales de sécurité doivent être renforcées ce qui nécessite une formation complémentaire des personnels concernés.

4.7 Effets des grandes vitesses de coupe sur les caractéristiques micrométriques de surface

Il s'agit des structures cristallines, des réseaux cristallins, des contraintes résiduelles.

Ces modifications apportées à la surface usinée ont en particulier des répercussions sur la tenue à la fatigue des pièces usinées.

Ceci est vrai de l'usinage conventionnel comme de l'UGV. L'usineur en sait trop peu sur ces sujets et est en général incapable de pré déterminer les caractéristiques de la surface usinée en fonction des caractéristiques de l'outil et des paramètres et conditions de coupe (lubrification...).

L'urgence de ces problèmes va apparaître plus vivement avec l'émergence de l'UGV qui fait usiner sous des paramètres très différents des paramètres habituels.

4.8 Rectification à grande vitesse

Ne fait pas partie de notre étude car c'est un tout autre sujet : comparé à l'usinage par outils à géométrie définie, la rectification qui est classée dans les « usinages par outils à géométrie non définie » et qui procède par abrasion, a toujours été de l'usinage à grande et même très grande vitesse puisqu'on atteint depuis longtemps de vitesses de coupe de supérieures à $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ soit $3600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Les modes d'usure et de renouvellement d'arête sont très différents.

Mais la rectification fait sa propre « révolution TGV » puisque l'on atteint des vitesses de coupe de l'ordre de $260 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Très utilisée en Allemagne, la rectification GV se développe en France où elle intéresse industriels, grandes écoles et universités.

4.9 Caractéristiques de la matière usinée

La construction mécanique fait de plus en plus appel à des matériaux à caractéristiques élevées plus difficilement usinables. D'où la recherche de matériaux à usinabilité améliorée sans diminution (ou faible diminution) des caractéristiques d'usage. De tels matériaux se retrouvent en UGV en favorisant l'accès aux hautes vitesses de coupe mais parfois aussi en améliorant la fragmentation des copeaux.

Le choix d'un matériau à usinabilité amélioré peut grandement faciliter l'accès aux UGV. A contrario, le choix du matériau sans considération de son usinabilité peut conduire à de graves mécomptes (voir *Les Aciers spéciaux*, chapitres 14 et 31).

Le lecteur trouvera dans les annales du CIRP des exposés sur des thèmes plus spécialisés relatifs en particulier :

- aux comportements des matériaux usinés (voir plus haut, contraintes résiduelles) ;
- aux nouveaux matériaux à outils ;
- à l'UGV des matériaux composites.

5. Conclusions

Les points suivants ressortent de cet exposé.

1. **L'UGV est une réalité industrielle** et non pas une curiosité de laboratoire. Pour s'en convaincre il suffit de considérer les résultats obtenus – et exploités – dans une grande variété de matériaux, de techniques, d'industries.

2. **Les progrès de l'UGV et de ses applications industrielles** sont conditionnés par l'ensemble des éléments qui entrent dans la définition d'une opération d'usinage :

- les machines : broches, axe de travail (vitesses, accélérations) ;
- les outils : matériaux de coupe, géométries d'outils et aussi coûts qui permettent ou non de rentabiliser l'UGV ;
- les éléments intermédiaires (précision, équilibrage, répétabilité des montages...) ;
- les matériaux usinés (usinabilité dans le respect des caractéristiques à l'emploi) ;
- les accessoires de l'environnement (lubrification, aspiration/ évacuation des copeaux).

Répétons-le : pour une opération dans un matériau donné, chacun de ces éléments est, à son tour, l'élément limitatif des performances globales.

3. **Pour pratiquer et rentabiliser l'UGV**, il ne suffit pas que les éléments nécessaires soient disponibles sur le marché, il faut encore être en mesure de les assembler judicieusement et de les utiliser à l'intérieur de leur domaine de validité global. Pour y parvenir et compte tenu de la complexité du problème, il faut en pratique utiliser la méthodologie du couple outil-matière.

4. **L'UGV se présente sous des facettes multiples.** Suivant les cas, « usiner à grande vitesse » peut consister à :

- augmenter simplement les vitesses de coupe ;
- augmenter les vitesses de coupe en changeant de matériau de coupe ;
- accéder à un matériau de coupe en disposant de broches rapides ;
- remplacer le matériau usiné par un autre matériau de meilleure usinabilité ;
- exploiter judicieusement les paramètres du couple outil-matière et en particulier du modèle d'usure ;
- optimiser la gamme d'usinage en exploitant tout ou partie des possibilités ci-dessus.

5. **L'UGV ne sera pas une « technique sur catalogue »** : l'usineur ne pourra se contenter de suivre les judicieux conseils d'un fournisseur et d'utiliser les paramètres proposés dans sa documentation.

L'usineur devra maîtriser l'ensemble de la chaîne « CN – machine – broche – intermédiaire – outil – pièce – montage d'usinage » et le tout dans une optique d'optimisation économique.

6. **L'UGV est incontournable pour l'usineur qui veut rester concurrentiel.** On est conduit à se tourner vers l'UGV :

- pour abaisser le coût direct de production ;
- pour réduire les en-cours de fabrication (avec une refonte complète de la gamme) ;
- pour obtenir la flexibilité sans perte de productivité, etc.

Nous pensons que l'accès aux techniques UGV est à la fois indispensable et assez difficile ; mais qu'il est vain d'attendre que « l'UGV soit au point », car, technique multiple, l'UGV sera aussi une technique en constante évolution qu'il est urgent de pratiquer pour la connaître.

L'apprentissage de l'UGV, des UGV ne doit pas se faire par tâtonnements mais de manière rationnelle compte tenu du grand nombre de paramètres à maîtriser.

Remarquons enfin que l'émergence des techniques UGV influe non seulement sur la conception des gammes mais sur celle des produits (ingénierie simultanée). Il est donc fondamental que les industries qui veulent et doivent rester à la pointe de la conception soient et restent au fait de ces nouvelles techniques et de leurs implications.

Usinage à grande vitesse

par **Alain-L. DEFRETTIN**

Ingénieur des Arts et Métiers

Professeur agrégé

Responsable du laboratoire usinage grande vitesse à l'ENSAM de Lille

et **Gérard LEVAILLANT**

Ingénieur des Arts et Métiers

Docteur ès sciences

Fondateur de la société TOOL

Chargé de mission à l'ENSAM

Bibliographie

Usinage à grande vitesse dans outillages. Recueil des conférences Journées CETIM : 6-7/12/1994.

Les atouts de la grande vitesse : Publication CETIM.

Synthèse des évolutions des M.O. Vu à l'EMO 97 : rapport CETIM.

SCHULZ (H.). – *Le fraisage à grande vitesse des matériaux métalliques et non métalliques.* Université de DARMSTADT. Tome 1 : traduit par Pr. Serge TORBATY, Université de TOULON.

1^{re} Conférence franco-allemande sur l'UGV. Recueil des conférences ; Metz, 6 et 7 juin 1997.

Machine AUTOMATION : Renault Automation magazine.

Le monde de l'usinage : publications SANDVIK FRANCE.

Machine Production : revues françaises.

BARRE (P.-J.). – *Stratégies de commande pour un axe de MO à usinage grande vitesse.* Thèse de doctorat ENSAM.

Projets de fin d'études ENSAM sur l'UGV (années 95-96-97).

Annales du CIRP (vol. 43/1/94 et vol. 44/1/95).

Les Aciers spéciaux : ASTER Tec & Doc.

Dans les Techniques de l'Ingénieur

PROD'HOMME (G.). – *Commande numérique des machines-outils.* Traité Génie mécanique, B 7 130 (1996), volume B7II.