

L'objet de cette ressource est l'usinage à grande vitesse de coupe (UGV), et plus particulièrement les critères spécifiques à ce procédé à prendre en compte dans la définition du produit. Après une présentation rapide des principales caractéristiques de l'UGV et des moyens associés, les critères de caractérisation du produit seront développés.

1 – Les caractéristiques de l'usinage à grande vitesse

L'usinage grande vitesse (UGV) est une opération d'enlèvement de matière à des vitesses de coupe élevées. Ces grandes vitesses engendrent un phénomène de coupe spécifique.

11 - La vitesse de coupe

Il est aujourd'hui possible d'usiner des pièces mécaniques sur de larges plages de vitesses de coupe. Selon le matériau utilisé, ces plages varient, mais il est toujours possible de distinguer trois zones de vitesses de coupe distinctes :

- une zone de vitesses correspondant à « l'Usinage Conventionnel »,
- une zone de vitesses inexploitable, parfois surnommée « Vallée de la mort », où les conditions de coupe sont dégradées (usure rapide de l'outil, mauvais état de surface...),
- une zone de vitesses de coupe correspondant à « l'Usinage Grande Vitesse ».

Par exemple, pour l'acier, l'usinage conventionnel correspond aux vitesses de coupe comprises entre 30 et 200 m/min, et l'UGV aux vitesses de coupe comprises entre 500 et 2000 m/min. Ces valeurs dépendent du matériau, et également de l'opération effectuée (fraisage, tournage...). La figure 1 donne quelques ordres de grandeur.

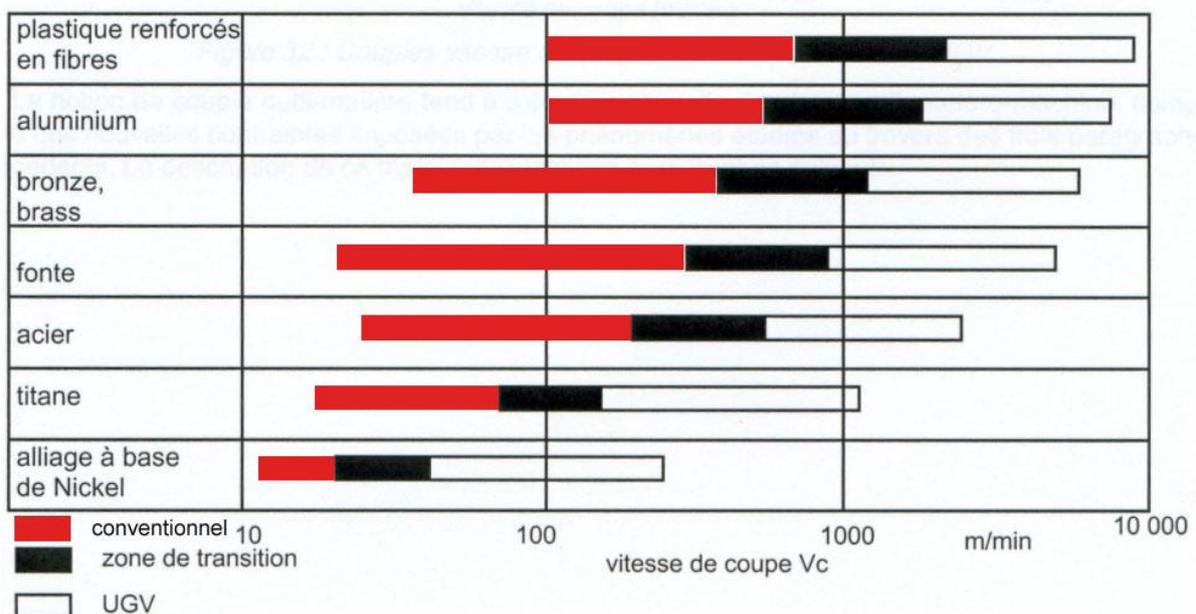


Figure 1 : Plages de vitesses de coupe pour différents matériaux

12 - Le phénomène de copepe

L'UGV offre des conditions de coupe excellentes, qui s'expliquent par les phénomènes de formation du copepeau.

La discontinuité du copepeau

L'image ci-dessous montre le résultat d'un test courant appelé « Quick Stop Test » (la pointe de l'outil est retirée brutalement par un système explosif), qui permet d'étudier un copepeau en cours de formation pour trois vitesses de coupe différentes.

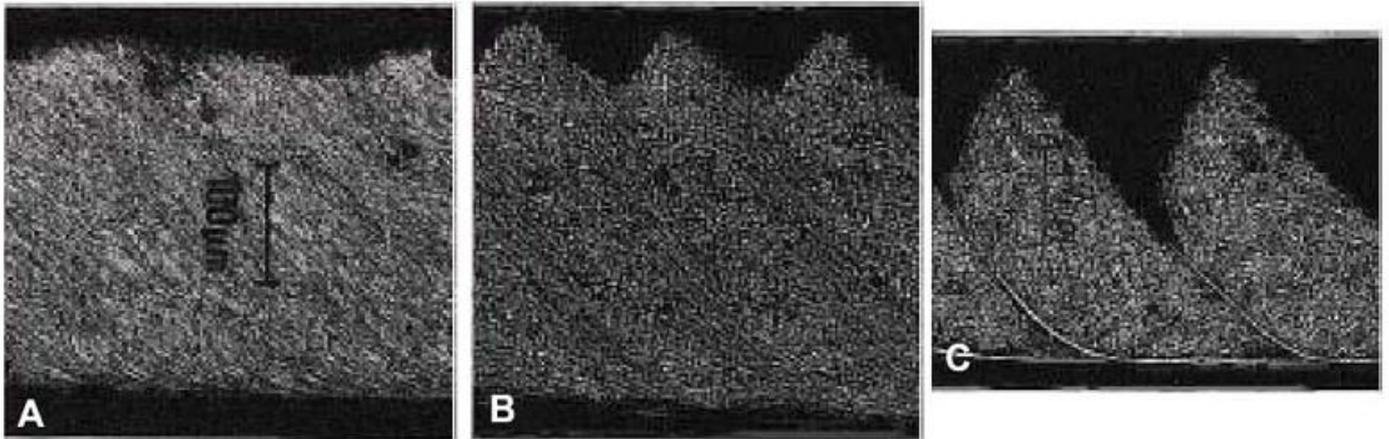


Figure 2 : Evolution des copepeaux suivant la vitesse de coupe
(A: copepeau continu B; copepeau segmenté C: copepeau dentelé)

Pour les métaux, le processus de formation du copepeau est principalement basé sur des déformations plastiques (permanentes) de cisaillement. Aux faibles vitesses de coupe, le copepeau est continu et ces déformations sont quasi-stationnaires (figures 2A et 3).

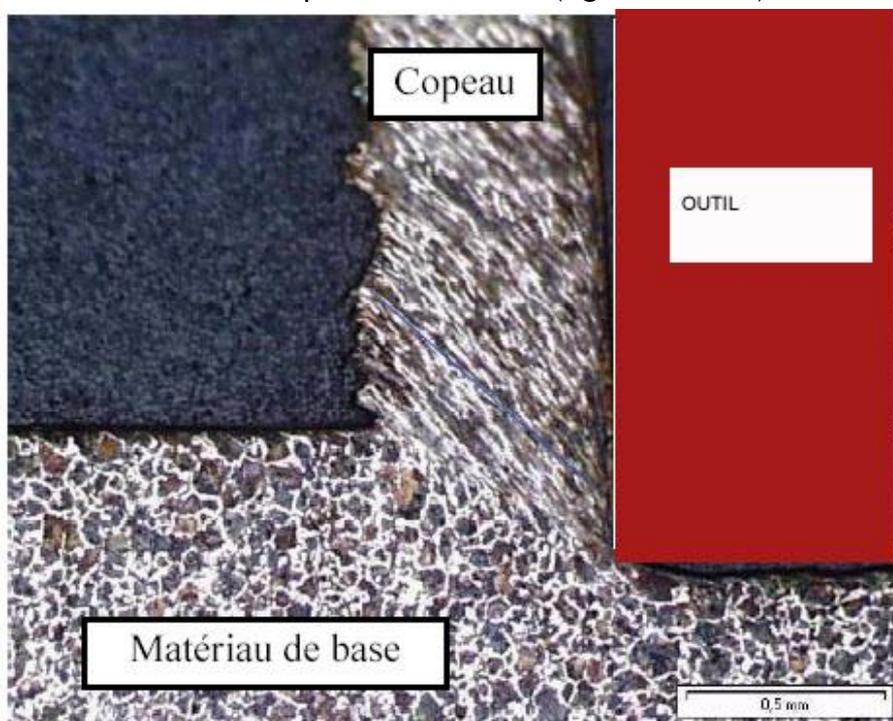


Figure 3 : Formation du copepeau en usinage conventionnel

Aux hautes vitesses de coupe, le copepeau est dentelé et formé d'éléments séparés (figure 2C), ce qui semble être généré par une rupture du matériau plus que par un cisaillement. En UGV, des fragments de copepeaux se détachent par la propagation de fissures, comme l'illustrent les figures 4 et 5.

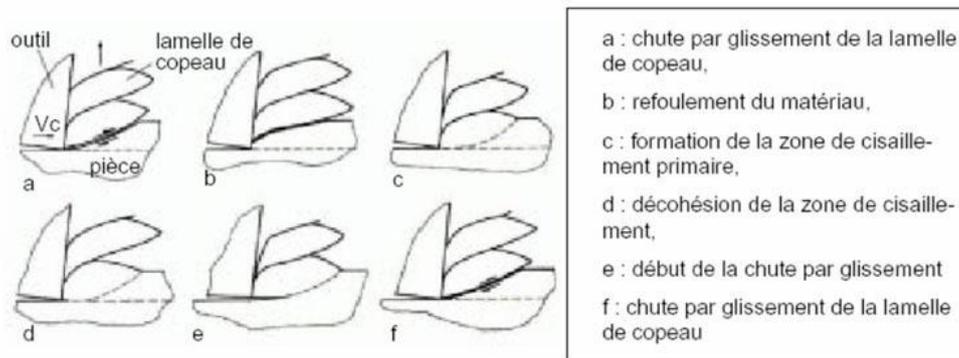


Figure 4 : Représentation schématique de la formation d'une lamelle de copeau

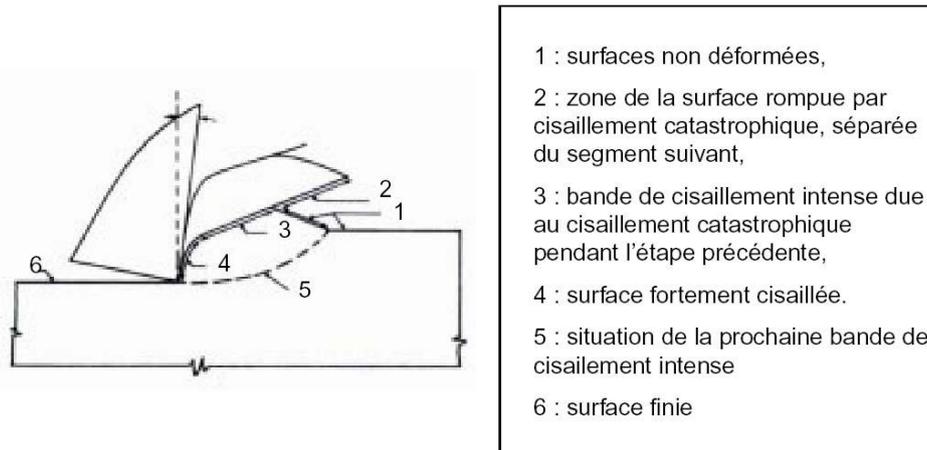


Figure 5 : Détail de la formation du copeau en UGV

Les phénomènes thermiques

L'usinage génère de la chaleur par auto-échauffement du matériau de la pièce et par frottement à l'interface outil/pièce. Les phénomènes thermiques qui en résultent diffèrent entre les deux modes d'usinage.

- En usinage conventionnel, l'énergie calorifique s'évacue dans les copeaux mais également dans la pièce et l'outil dans des proportions non négligeables. Ainsi, le matériau subit un traitement thermique local (trempe superficielle) qui modifie les caractéristiques de la pièce finie.
- En UGV, les échanges thermiques entre le copeau et la pièce n'ont plus le temps d'avoir lieu : la pièce reste pratiquement à température ambiante bien que des énergies plus importantes soient mises en jeu, et l'énergie de la coupe s'évacue à plus de 80% dans les copeaux.

En outre, la température du « point chaud » situé à la pointe de l'outil diffère également : elle varie de 500°C en usinage conventionnel à 1000°C en UGV. Cette température élevée facilite la coupe des matériaux ductiles, car ceux-ci ont tendance à se ramollir localement. La figure 6 représente les résultats d'une simulation thermique de la coupe pour différentes vitesses de coupe (100 m/min en haut à droite, 500 m/min en bas à droite) ; on observe bien une augmentation de la température du point chaud avec la vitesse de coupe.

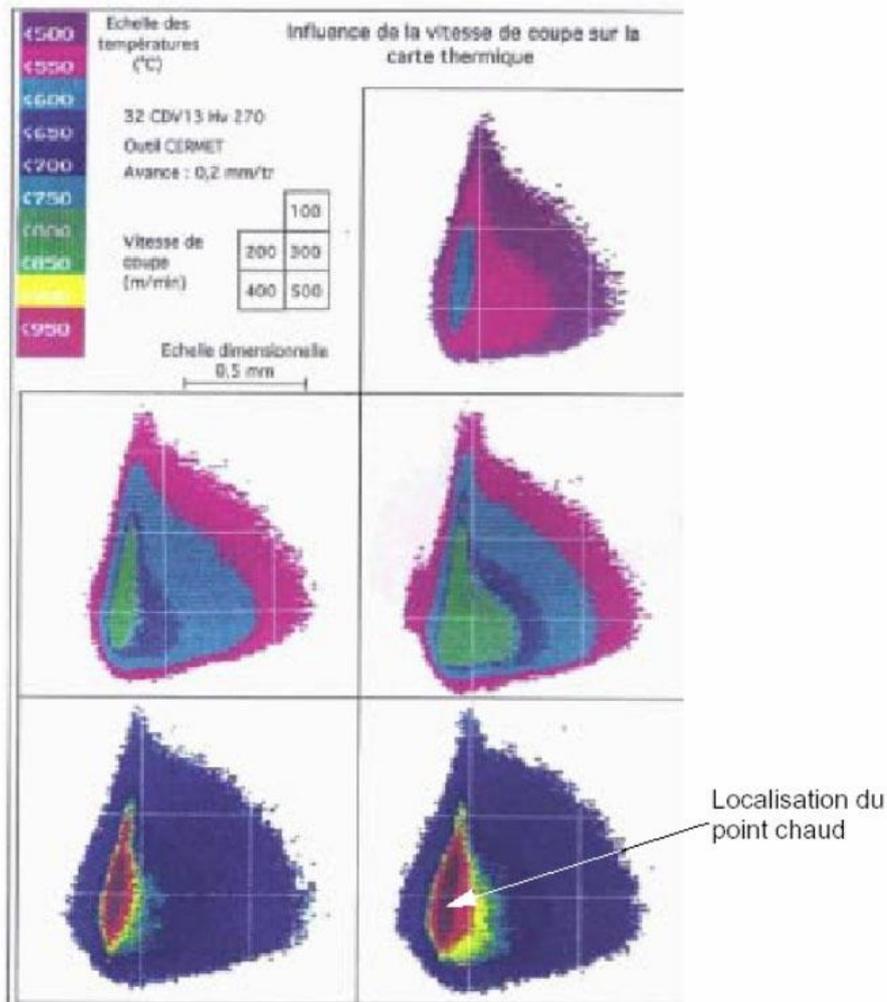


Figure 6 : Carte thermique d'un outil pour différentes vitesses de coupe

Les efforts de coupe

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. L'expérience montre qu'ils sont beaucoup plus sensibles à la vitesse d'avance qu'à la vitesse de coupe : pour toutes autres conditions de coupe égales, l'effort tangentiel augmente à peu près proportionnellement à la vitesse d'avance (figure 7, courbe de gauche) tandis que l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ ; voir figure 7, courbe de droite).

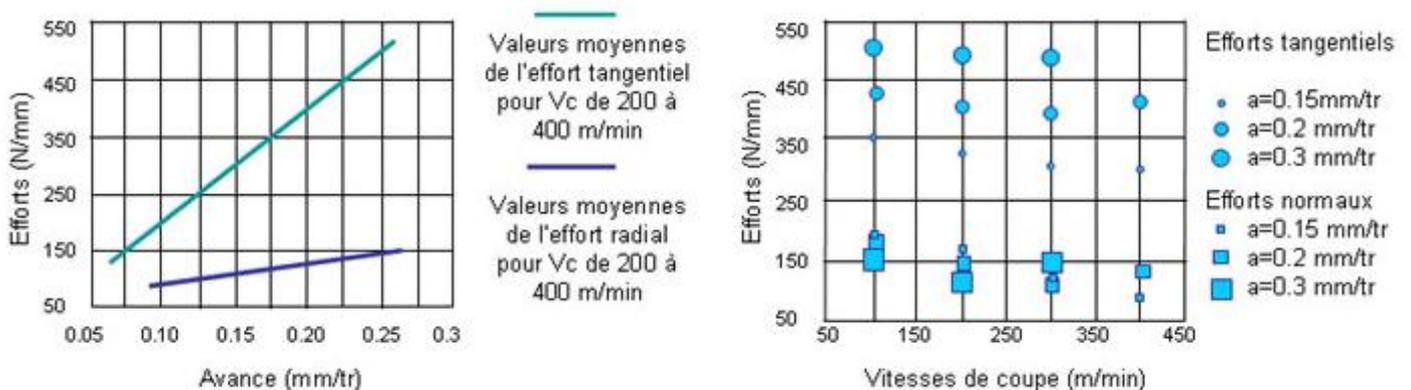


Figure 7 : Variation des efforts de coupe (N/mm de profondeur de passe) en fonction de la vitesse d'avance (à gauche) et de la vitesse de coupe (à droite).

La puissance des broches des machines UGV a des limites. Pour ne pas devoir changer de gamme de puissances, il est nécessaire de réduire les efforts de coupe lorsque l'on augmente les vitesses de rotation de la broche. Pour réduire ces efforts tout en conservant un débit copeau élevé, on choisit généralement d'associer des profondeurs de passe faibles (pour diminuer les efforts) avec des vitesses d'avance élevées (pour augmenter le débit copeaux).

2 – Les moyens

Les phénomènes spécifiques qui apparaissent en UGV et les niveaux atteints tant en vitesse angulaire de la broche qu'en niveaux d'accélération imposent l'utilisation de moyens spécialement dédiés pour l'UGV. Les éléments qui seront étudiés sont :

- la machine-outil (bâti, cinématique),
- la broche,
- les porte-outils et les outils,
- les porte-pièces,
- la commande, et l'environnement.



Figure 8 : Une machine UGV 4 axes dans un environnement scolaire.

21 - La machine-outil



Figure 9 : Une machine à structure transversale.

La cinématique

Les déplacements des éléments mobiles de la machine doivent permettre de grandes vitesses et accélérations. Pour réduire les temps d'usinage, des stratégies avec peu de variations de vitesses sont privilégiées. Traditionnellement, des vis à billes assurent la mise en mouvement des éléments mobiles. Les nouvelles générations de vis à billes donnent des vitesses de près de 60 m/min. Toutefois, l'introduction de moteurs linéaires a permis de coupler des accélérations de 2 à 3 g avec des vitesses de près de 90 m/min.

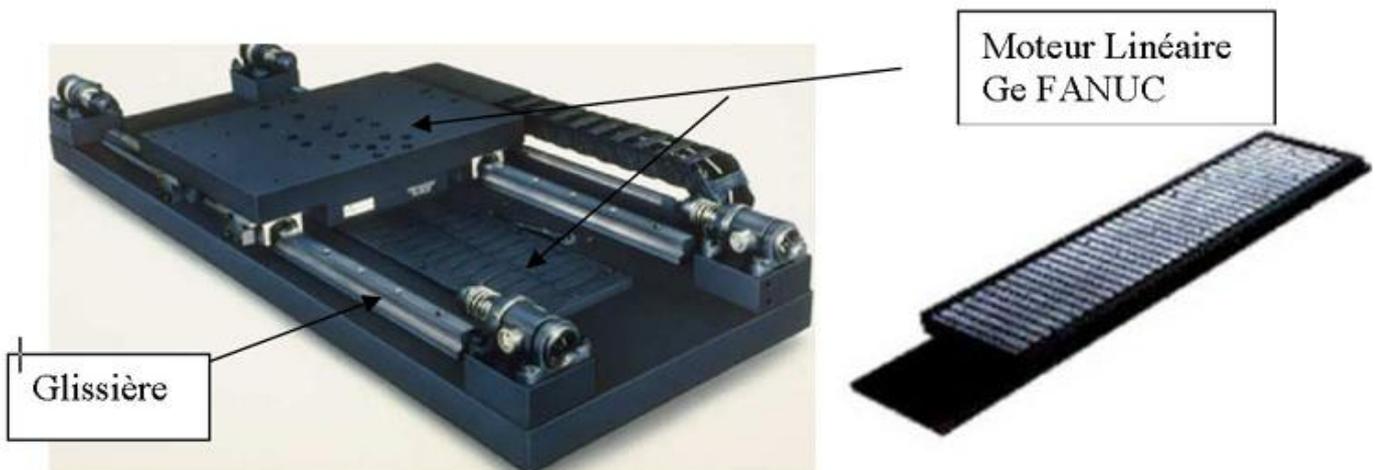


Figure 10 : Une glissière actionnée par des moteurs linéaires.

Dans ces conditions il est nécessaire d'avoir des parties mobiles relativement légères afin de minimiser les effets d'inertie. Ces éléments mobiles ne sont donc pas capables de supporter des efforts aussi importants que certaines machines d'usinage conventionnel.

Deux types de structure de machine-outil cohabitent aujourd'hui : des machines à structure transversale et des machines à structure parallèle. Plusieurs constructeurs proposent des machines à structure parallèle hexapodes (Parallel Kinematic Machine Tool) qui sont adaptées à l'UGV par leur qualité structurelle : elles présentent une grande rigidité, de faibles masses en mouvement, et permettent donc de fortes accélérations et de grandes vitesses de déplacement. Ces machines sont cependant encore en phase de recherche et de développement, et leur champ d'application est encore à confirmer.

Le bâti

Pour obtenir des pièces usinées de grande qualité, la structure de la machine UGV doit être rigide. En effet, pour atteindre les vitesses de déplacement de 60 à 90 m/min, il faut des accélérations importantes ; les efforts transmis à la structure de la machine par les masses en mouvement sont donc conséquents, ce qui amène des déformations et donc des imprécisions au niveau de la géométrie de la pièce si le bâti n'est pas assez rigide. A cet effet, on réalise souvent les bâtis en béton de synthèse précontraint renforcé de fibres et de matériaux spéciaux.

Les bâtis sont également dimensionnés sur des critères vibratoires. En effet, la broche tourne à des vitesses angulaires de 20000 à 50000 tr/min et il est important de prendre en compte les modes vibratoires de l'ensemble de la machine : ils auront une influence sur la géométrie de la pièce usinée.

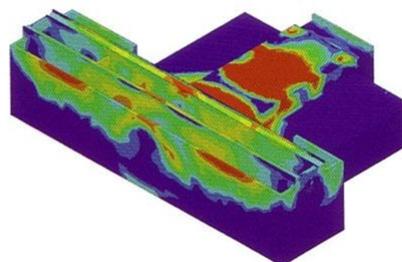
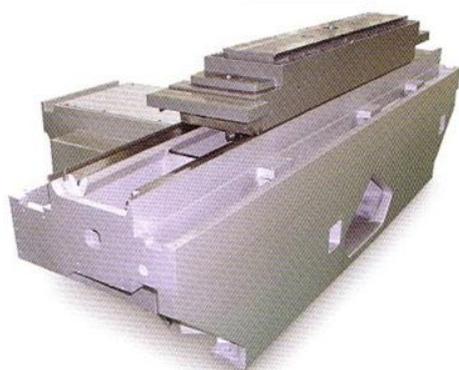


Figure 11 : Le bâti d'une machine UGV. Figure 12 : Le champ de rigidité du bâti de la machine UGV.

22 - La broche

La broche est l'élément principal réalisant la mise en rotation de l'ensemble outil/porte-outil. La broche doit fournir de hautes vitesses de rotation tout en transmettant un couple compatible avec la coupe des métaux.

L'UGV nécessite des broches permettant d'atteindre de hautes vitesses de rotation (couramment de 10000 à 50000 tr/min) avec une puissance de 20 à 50 KW. La technologie des broches a dû s'adapter pour garantir à la fois rigidité mécanique et résistance thermique. Pour cela, les roulements classiques sont remplacés par d'autres technologies moins sensibles aux effets dynamiques prépondérants à ces vitesses :

- roulements à billes céramiques,
- paliers magnétiques,
- paliers hydrostatiques.

De même, la broche doit à la fois atteindre de grandes vitesses de rotation et un couple suffisant à bas régime pour les opérations d'ébauche. Les progrès technologiques permettent aujourd'hui l'utilisation d'électro-broches aux performances suffisantes sans nécessité d'une chaîne de transmission de puissance.

Broche IBAG (Suisse)

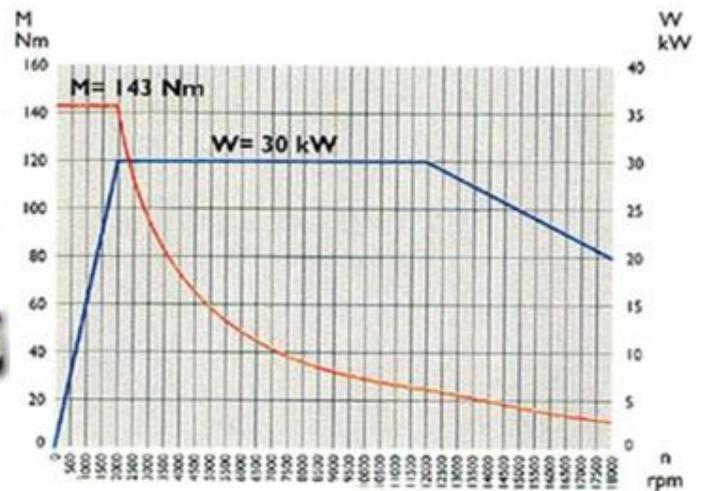


Figure 13 : Des broches IBAG, et leurs courbes de performance (variations du couple et de la puissance en fonction du régime).

23 - Le porte-outil

Cet élément réalise la liaison entre l'outil et la machine. Dans le cas du fraisage, traditionnellement, on utilise un cône normalisé (dit cône ISO). Le passage à de hautes vitesses de rotation entraîne la nécessité d'un comportement dynamique excellent ; malheureusement, les porte-outils classiques ne peuvent être utilisés car les efforts générés désolidarisent le cône mâle du cône femelle. La liaison outil/porte-outil est donc reconçue en UGV.

Un cône de mise en position est conservé mais un système de tirage axial lui est ajouté. Par ailleurs une surface plane perpendiculaire à l'axe permet de maîtriser la position axiale de l'outil.

Par exemple, on utilise aujourd'hui des cônes HSK (figure 14), qui réalisent une liaison avec un appui plan prépondérant garantissant un effort de serrage suffisant, une stabilité face aux vibrations, une grande rigidité et une meilleure répartition des efforts de coupe : ils sont équilibrés pour des conditions de coupe correspondant à l'UGV. Le cône se déforme à hautes vitesses pour venir épouser les formes de la liaison (figure 15).

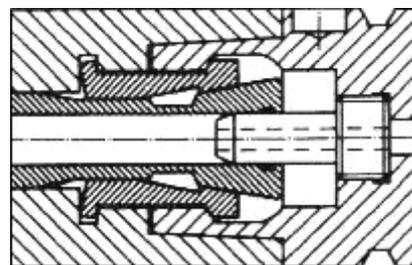
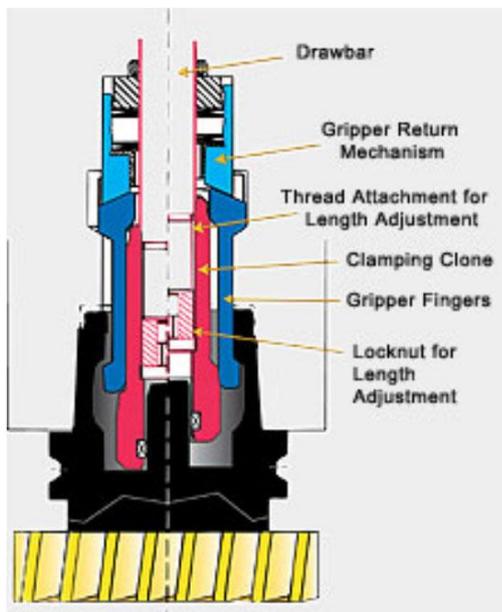


Figure 15 : Les déformations du cône sous sollicitations dynamiques (voir l'animation annexe : animation cône UGV)

Figure 14 : Image du cône HSK

La figure 15 représente le cône de ce type de porte-outil ; ce cône est court et se déforme car sa paroi est mince (voir « *annexe : animation cône UGV* »). La face axiale du porte-outil vient aussi en contact avec la broche, ce qui n'est jamais le cas pour le porte-outil de type ISO traditionnel. Lorsque les forces centrifuges augmentent, le mécanisme de serrage axial vient également assurer une force radiale, ce qui assure le contact même à haute vitesse.

24 - L'outil

Le corps de l'outil est relativement fin pour minimiser les masses en mouvement. En conséquence, les sollicitations mécaniques du couple outil/matière et les effets dynamiques accrus engendrent des déformations à prendre en compte dans les stratégies d'usinage (voir 2.6 : commande, FAO).

En ce qui concerne la pointe des outils, il ne faut pas perdre de vue le couple « outil/matière » pour le choix, mais il faut aussi tenir compte des spécificités de l'UGV : la faible épaisseur de coupe (c'est-à-dire la faible section des copeaux) impose un affûtage précis. Ceci est garanti par l'emploi d'un grain de carbure fin, rendant l'outil cher à l'achat.

La température de coupe élevée engendre une usure prépondérante par diffusion et abrasion ; les carburiers proposent des produits nombreux et de plus en plus pointus, répondant à des applications pratiquement spécifiques pour chaque usineur.

On trouve des outils dans les matériaux suivants :

- en nitrure de bore cubique (CBN),
- en diamant polycristalin (PCD),
- en carbure,
- en céramique,
- revêtus TiN, TiAlN, TiCN...

25 - Le porte-pièce

Les efforts étant faibles, les porte-pièces peuvent être plus fins qu'en usinage conventionnel.

26 - La commande FAO

La commande numérique en UGV pilote les principaux organes de la machine décrits précédemment. Les stratégies employées en UGV diffèrent de celles employées en usinage conventionnel, principalement à cause des effets dynamiques : les changements brusques de trajectoire de l'outil et les variations brusques de la section de copeau (lors de l'entrée dans la matière par exemple) amènent des variations de sollicitations mécaniques importantes, et ont des conséquences sur la qualité et la sécurité de l'usinage. Il est nécessaire de limiter ces variations afin de garantir une déformation constante de l'outil et un meilleur contrôle de la surface usinée, et aussi de maîtriser le risque de bris d'outil.

Les stratégies d'usinage doivent également prendre en compte les phénomènes thermiques, en évitant la formation d'un amas de copeaux au contact de l'outil ou de la pièce pour éviter un échauffement négatif dans les deux cas (usure supérieure pour l'outil, caractéristiques mécaniques superficielles de la pièce modifiées localement).

Pour ces raisons, l'UGV nécessite une augmentation des performances des algorithmes de calcul. Le choix du logiciel de FAO est donc essentiel : l'utilisation d'un logiciel non adapté peut amener des défauts sur la pièce fabriquée. Un logiciel adapté à l'UGV doit permettre de calculer les trajectoires sur une machine 5-axes en prenant en compte les effets dynamiques, et permettre le choix des stratégies d'usinage adaptées à l'UGV ; il s'agit d'une tâche difficile, qui a fait l'objet de nombreuses études.

27 - L'environnement

La sécurité

Les conditions d'utilisation de l'UGV nécessitent un regard particulier sur la sécurité. En effet, le moindre copeau, bris d'outil qui s'échappe de manière imprévue à ces vitesses de coupe représente l'équivalent d'une balle de fusil : les carters sont donc blindés. On pourra par exemple consulter un document publié par l'INRS (Institut national de recherche et de sécurité, chargé de la prévention des risques professionnels) [1].

Les effets thermiques

Comme en usinage conventionnel, il est nécessaire d'atteindre la température de fonctionnement stabilisée pour éviter des dilatations des éléments de la machine et des dispersions géométriques conséquentes : la précision de l'UGV étant meilleure qu'en usinage conventionnel, l'influence relative de cet effet est plus importante.

3 - Les critères de conception

31 - Les épaisseurs des pièces

Les efforts exercés par l'outil sur la pièce lors de la coupe sont plus faibles en UGV qu'en usinage conventionnel (la diminution des efforts est directement liée aux conditions de coupe choisies). En conséquence, pour un même critère de déformation de la pièce lors de l'usinage, il deviendra possible d'usiner des pièces d'épaisseur plus faible. Il devient également possible d'usiner des peaux sans porte-pièces spéciaux.

Les efforts de coupe plus faibles auront aussi pour conséquence une diminution des efforts de bridage.

32 - La géométrie des pièces

Sous certaines conditions, le débit copeaux est multiplié par 10. De plus la réduction des efforts de coupe permet l'utilisation d'outils de formes différentes (outil boule par exemple). Ces deux paramètres autorisent la réalisation dans la masse de pièces prototypes par des stratégies de contournage, aux géométries différentes de celles que l'on peut réaliser en usinage conventionnel.

Il est possible d'obtenir une meilleure définition géométrique de la pièce finie et des meilleurs états de surface en UGV, notamment parce que la surface de la pièce n'est pas dégradée par un traitement thermique superficiel. La précision dimensionnelle est plus grande qu'en usinage conventionnel, et un bon état de surface peut être obtenu sans rectification.

33 - Les matériaux

Les efforts de coupe étant réduits, il devient possible d'usiner certains matériaux qui demandaient un effort de coupe trop important en usinage conventionnel. Il est par exemple possible de faire subir un traitement thermique à la pièce avant usinage, ce qui garantira une meilleure définition géométrique de la pièce usinée que si le traitement est effectué par la suite.

Lors d'un usinage conventionnel, les phénomènes locaux (déformation plastique) entraînent un écrouissage superficiel de la surface usinée. En UGV, les efforts de coupe étant réduits, ce phénomène n'apparaît plus. La résistance à la fatigue pouvant être améliorée par un écrouissage superficiel (qui élimine les causes de formation de micro-fissures à la surface de la pièce), il faudra penser à effectuer le traitement adéquat sur une pièce usinée en UGV.

De la même façon, la surface de la pièce subit une trempe superficielle due à la propagation de l'énergie calorifique en usinage conventionnel. En UGV, il faudra effectuer le traitement nécessaire sur la pièce finie pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées.

4 - Conclusion

L'UGV fait évoluer la manière de concevoir les pièces en permettant d'obtenir des formes jusqu'ici impossibles à réaliser par enlèvement de matière. Il permet aussi l'usinage de matériaux ayant subi un traitement thermique préalable.

L'UGV suppose par contre une adéquation complète entre produit, procédé et moyens. Certains incidents, vibrations ou ruptures d'outil, déjà gênants aux vitesses conventionnelles, prennent des proportions catastrophiques en UGV : les processus et outils de simulation doivent donc être adaptés pour garantir de bonnes conditions d'usinage.

Référence :

[1]: www.inrs.fr/accueil/dms/inrs/cataloguePapier/ND/TI-ND-2187/nd2187.pdf

Ressource publiée sur EDUSCOL-STI : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/>