

Technologies des composants de la cellule élémentaire d'usinage en UGV

6. Etude des contraintes imposées par l'UGV

Nous avons vu précédemment les particularités de la coupe en usinage à grande vitesse. Nous nous rendons alors compte que ce procédé permet de diminuer les coûts de production et les délais tout en améliorant la qualité par rapport à l'usinage "conventionnel". Ce progrès économique ne peut cependant se faire sans un progrès technologique associé. Le développement de la technologie Grande Vitesse a donc impliqué celui des organes de la Cellule Élémentaire d'Usinage (outils, porte-outils, machines, porte-pièces, pièces). Ce procédé permet d'usiner environ dix fois plus vite qu'en usinage conventionnel. Mais, de ce fait, cela impose des exigences particulières aux matériaux et aux géométries de ces éléments en matière de rigidités statique et dynamique et de stabilité thermique, de précision, de comportement dynamique et thermique et de sécurité. L'UGV a imposé également des contraintes supplémentaires sur les motorisations et les asservissements des MOCN.

Nous étudions donc, dans un premier temps, les spécificités des outils destinés à l'usinage à grande vitesse. Nous présentons ensuite les nouvelles technologies de porte-outils d'UGV, et celles des broches hautes fréquences. Enfin, nous remontons la chaîne de la C.E.U. pour décrire l'évolution des machines dédiées à l'UGV. En ce qui concerne les porte-pièces, nous notons simplement que, dans certains cas, une simplification du maintien en position peut-être envisagée du fait de la diminution des efforts en UGV.

7. Les outils en UGV

Dans ce chapitre, nous étudions en partie les différentes évolutions des outils destinés à l'UGV. Dans un premier temps, nous énumérons donc les nouvelles exigences imposées à ces outils. Nous en déduisons ensuite les influences sur le matériau de coupe, sur le revêtement et sur la géométrie de l'outil. Enfin, nous nous attachons à traiter les évolutions des méthodes de préréglage et de lubrification ainsi que l'importance du critère de coût en UGV.

7.1. Exigences imposées par l'UGV

En UGV, les outils sont sollicités mécaniquement par les efforts de coupe (comme lors d'un usinage conventionnel), mais aussi par des forces centrifuges et des vibrations. L'usure (surtout dans le cas de l'usinage de l'acier) est également un paramètre important. Mais l'UGV exige de l'outil un comportement optimal aux grandes vitesses de coupe [16]. Ceci impose donc une adaptation des géométries d'outil, des matériaux de coupe et des revêtements de surface, mais demande également un équilibrage soigné des outils tournants et une conception innovante de l'attachement plaquette/porte-plaquettes.

L'UGV se caractérise également par une épaisseur moyenne de copeau faible. De plus, afin de garantir une répartition homogène des efforts de coupe sur chaque dent de l'outil, les écarts de positionnement (radial et axial) et d'orientation des arêtes de coupe entre elles doivent être minimisés. Ceci étant fait, l'écart de coaxialité entre la partie attachement de l'outil et l'ensemble des parties actives (faux-rond) doit également être réduit au maximum.

Enfin, les performances des outils en UGV et leur tenue aux contraintes thermiques dépendent de la lubrification. Celle-ci a donc également dû s'adapter du fait de l'évolution du couple outil/matière et des conditions d'usinage.

7.2. Matériaux de coupe et revêtements

L'utilisation de la grande vitesse - pour l'usinage d'aciers par exemple - n'a pu se faire sans l'évolution des matériaux d'outils. En effet, il faut garantir un très bon comportement de l'outil et une usure réduite, même lors d'usinages «difficiles». Pour les outils carbures, l'évolution des revêtements de surface apporte une solution au problème d'usure trop rapide.

7.2.1. Les carbures

Les outils carbures de nuances ISO P et K revêtus peuvent être utilisés en UGV, surtout dans le cas de la réalisation d'outillages. En effet, à la différence des outils en acier rapide, le module d'Young élevé des carbures permet l'obtention d'une précision et d'un état de surface acceptables [17]. Cependant, l'utilisation d'outils monoblocs est recommandée du fait des forces centrifuges qui peuvent provoquer la rupture de la vis de fixation des plaquettes dans le cas d'outils combinés [16]. Mais le principal problème réside dans la tenue de l'arête de coupe à l'usure. En effet, les outils carbures ont une durée de vie de 2 à 5 fois inférieure en UGV qu'en usinage conventionnel. Ceci incite donc à l'application de revêtements de surface ou à l'utilisation d'autres matériaux d'outils.

On trouve des revêtements de surface surtout sur les outils carbures. Ceci leur confère une meilleure tenue à l'usure. Dans ce domaine, seuls les procédés basse température et faible épaisseur de couche de type PVD (Physical Vapor Deposition) sont utilisés, ceux du type CVD (Chemical Vapor Deposition) étant moins tenaces [17]. En effet, le procédé PVD est un dépôt qui se réalise à basse température afin de fragiliser le moins possible le substrat carbure alors que le procédé CVD est un dépôt adhérent obtenu dans des fours entre 800 et 1100°C.

Parmi les revêtements de type PVD, on utilise presque exclusivement des couches à base de titane. Le revêtement TiN est relativement peu utilisé car ses performances thermiques sont généralement trop faibles. Par contre, d'après le CETIM, le revêtement TiCN apporte une solution à l'usure rapide et progressive des outils non revêtus. En effet, les outils revêtus TiN ne présentent pas de phase d'usure stabilisée après le rodage de l'arête de coupe, alors que les outils revêtus TiCN ont des durées de vie très élevées grâce à une phase stable beaucoup plus importante (figure 33).

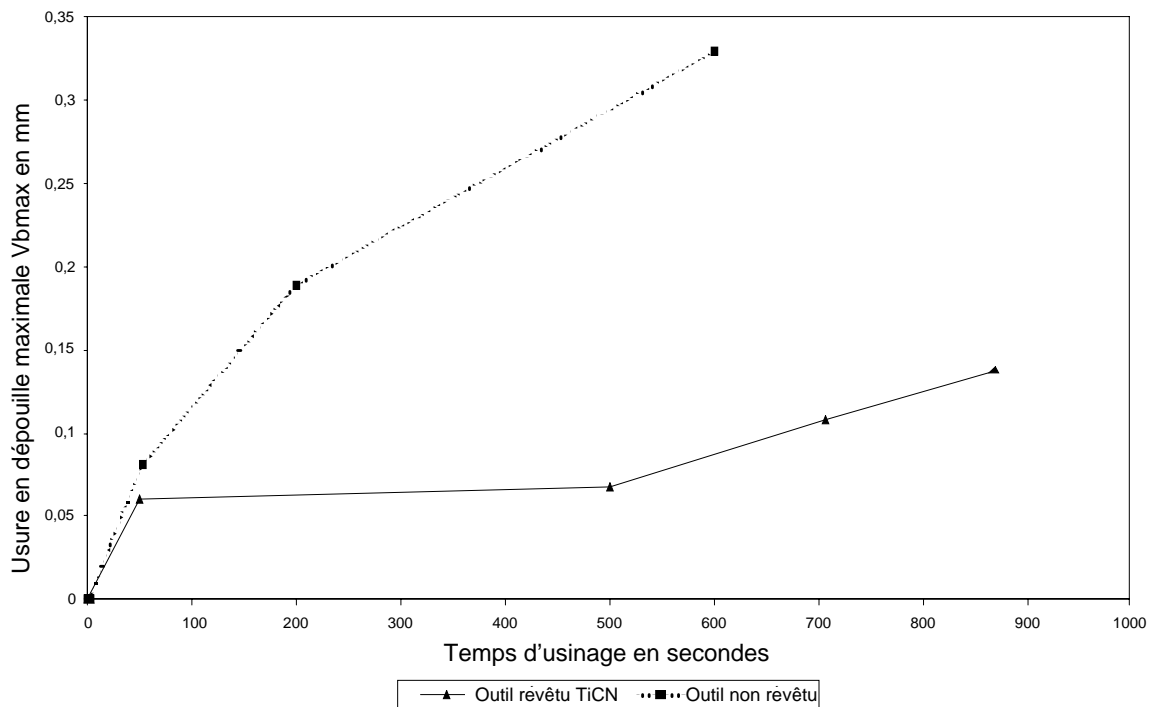


Figure 33 : Influence du revêtement TiCN

Ainsi, on obtient avec ce revêtement, une qualité d'état de surface nettement supérieure. Il permet également l'utilisation d'outils carbure pour l'usinage grande vitesse d'aciers traités jusqu'à 55 HRC.

Par ailleurs, on trouve également le revêtement TiAlN qui, malgré un comportement excellent aux vitesses de coupe et aux températures élevées, est moins performant que le revêtement TiCN. Ceci est dû en grande partie à son adhérence bien moins bonne sur les substrats que le TiCN. Lors de la coupe, une fois le revêtement décollé, on retrouve alors les propriétés des outils non revêtus.

7.2.2. Les cermets

Ce matériau possède une très bonne aptitude aux vitesses de coupe élevées [17]. De plus, étant chimiquement inerte dans les aciers, il élimine quasiment le phénomène d'arête rapportée, bien que la température de l'outil soit élevée. Par exemple, celle-ci peut dépasser 950°C dans le cas de l'usinage avec un outil cermet, à 500 m/min, d'une pièce en 32 CDV 13.

Par contre, P. BAGARD affirme que ce matériau ne convient pas à la coupe en opposition (écaillage rapide et brutal de l'arête de coupe) et supporte mal les chocs et les vibrations (figure 34). Ainsi, l'usinage à grande vitesse de formes complexes est rendu pratiquement impossible avec des outils cermets, même revêtus.

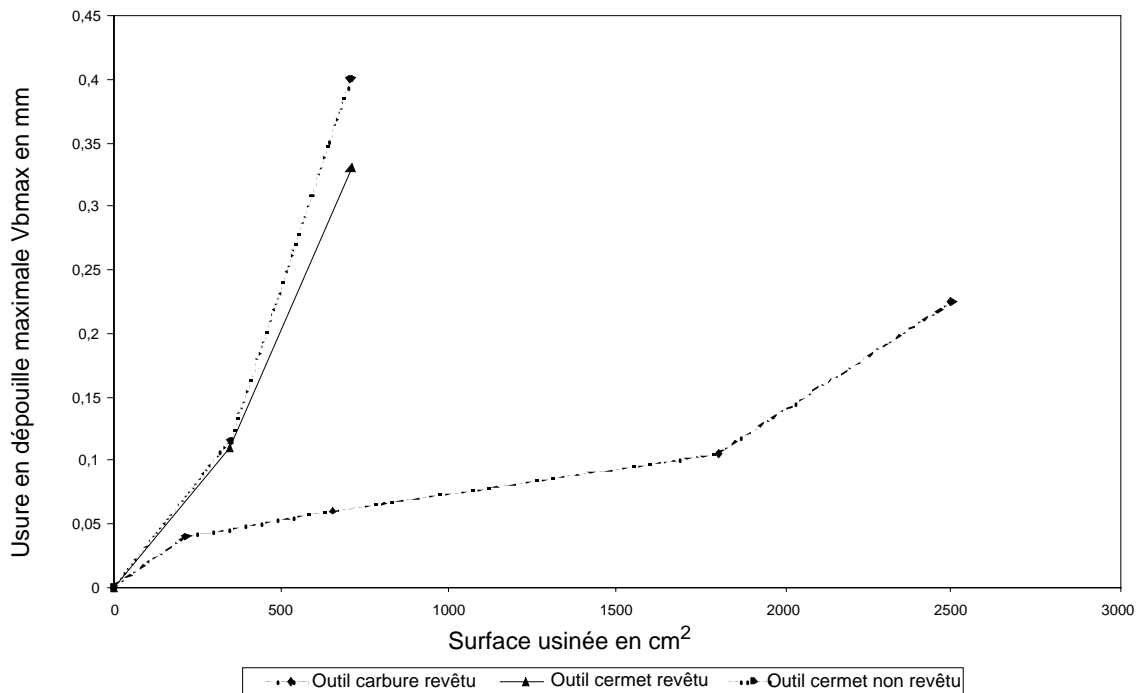


Figure 34 : Comparaison entre les outils en cermet et les outils en carbure

Par ailleurs, le cermet est un matériau très difficile à affûter. Ceci augmente donc le coût des outils monoblocs. De plus, le manque de rigidité des outils cermet entraîne souvent des vibrations dans le cas des outils de petits diamètres. Ce comportement vibratoire accentue indéniablement la dégradation brutale de l'arête de coupe. Les performances des outils cermets en UGV sont donc garanties uniquement lorsque la coupe est régulière et en avalant.

7.2.3. Les céramiques

La haute dureté à chaud est la principale cause de l'utilisation des céramiques en UGV, car elle permet une coupe homogène à des températures élevées. Mais pour la plupart, les caractéristiques mécaniques des outils en céramique les rendent inutilisables pour des opérations d'usinage à grande vitesse des aciers. Les propriétés des céramiques à oxyde d'alumine ou mixtes – noires (Al_2O_3+TiC) et blanches ($Al_2O_3+ZrO_2$) – leurs permettent de n'usiner que les fontes grises et les alliages légers à faible résistance mécanique, voire les fontes traitées thermiquement pour les céramiques mixtes (comprenant des matières dures), car elles supportent mal les chocs dus à une coupe discontinue. En comparaison, les céramiques sans oxyde d'alumine – base nitrure de silicium (Si_3N_4) et les sialons ($SiAlON$) – possèdent une ténacité relativement élevée et conviennent bien pour la coupe interrompue. Les céramiques renforcées par fibres (Al_2O_3+SiC) ont des caractéristiques plus élevées à haute température [17]. Elles donnent donc de bons résultats en tournage dur d'alliages réfractaires (notamment d'alliages à base de nickel) et d'aciers très durs, assistées ou pas (par la coupe au jet d'eau par exemple).

7.2.4. Les Polycristallins de Nitrure de Bore Cubique

Pour toutes les autres applications de l'UGV, on trouve usuellement des outils polycristallins. Ils sont de deux types : les **Polycristallins de Nitrure de Bore Cubique (PCBN)** et les **Polycristallins de Diamant (PCD)**. D'après Peter RIGBY [18], leurs propriétés physiques de dureté, de résistance à la compression et de conductivité thermique leur confèrent une résistance à l'abrasion qui leur permet surtout d'usiner avec des vitesses de coupe plus importantes qu'avec des outils carbures, tout en assurant des états de surface excellents pour des durées de vie plus élevées.

Le nitrure de Bore est un produit de synthèse, que l'on peut obtenir sous deux formes :

- à structure hexagonale (comme le graphite), il est de faible dureté
- à structure cubique (comme le diamant) qui est sa forme la plus dure (il est alors le matériau le plus dur connu après le diamant), dureté qui se maintient jusqu'à 1000°C.

C'est donc la structure cubique qui est recherchée pour les outils d'UGV. Les outils PCBN sont fabriqués par frittage de cristaux de synthèse pour obtenir un compact polycristallin à matrice céramique ou métallique, éventuellement lié à un substrat en carbure de tungstène (figure 35) [19].

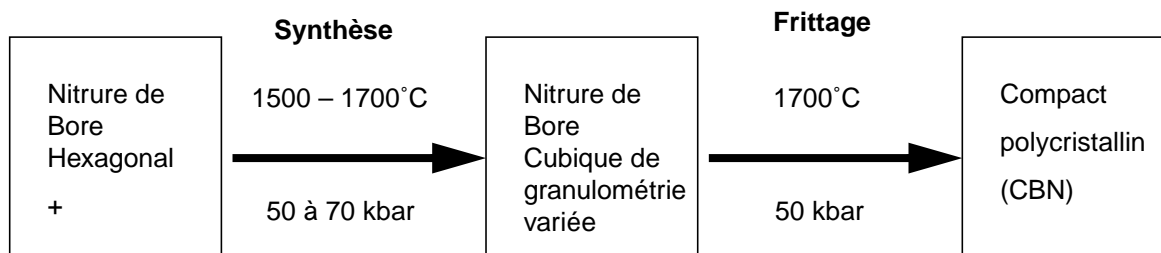


Figure 35 : Obtention de PCBN

Les PCBN sont surtout utilisés sur des aciers et des fontes, pour des duretés allant de 30 à 65 HRC [17]. Des essais ont montré que l'usinage à grande vitesse d'une fonte coulée perlitique avec un outil PCBN donnait de meilleurs résultats qu'avec un outil céramique (SiAlON) [20]. D'une manière générale, si le matériau de coupe contient plus de 75% de CBN, il est plutôt utilisé pour des opérations d'ébauche. Dans le cas contraire, il est réservé au travail de finition.

7.2.5. Les Polycristallins de Diamant

Le diamant est le matériau le plus dur qui soit connu. On le trouve sous forme naturelle ou synthétique. Le PCD est obtenu par frittage de cristaux de diamant synthétique de granulométries différentes (figure 36) [19].

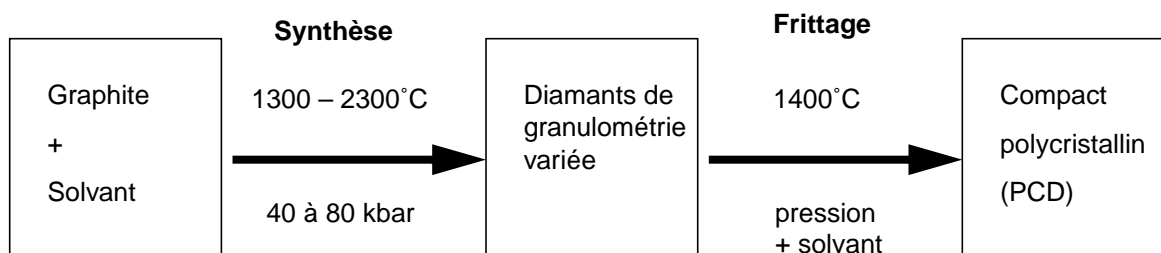


Figure 36 : Obtention de PCD

Contrairement au diamant naturel, le PCD est isotrope, donc plus résilient et plus résistant aux chocs mécaniques. D'autre part, il est, comme le diamant naturel, bon conducteur thermique, ce qui lui permet de réagir chimiquement avec certains métaux. Ainsi, les PCD ne sont pas utilisés pour les mêmes opérations que les PCBN. Ils ne sont performants que sur des matériaux sans carbone puisque le diamant réagit chimiquement avec celui-ci [17].

7.2.6. Résumé : exemples de couples outil/matière

Le choix des matériaux d'outils et de leurs revêtements est important. Il dépend pour beaucoup des différents critères caractérisant le comportement de l'outil en usinage. Ceci est une phase incontournable de la mise en œuvre d'une production de pièces mécaniques par le procédé d'usinage à grande vitesse de coupe. A titre indicatif, des exemples de couple outil/matière sont donnés avec des ordres de grandeurs de vitesse de coupe pour chaque cas (tableau 1). Cependant, le matériau et le revêtement des outils ne constituent pas les uniques paramètres à déterminer. Il reste encore à définir les géométries des outils, qui sont d'une grande importance à des vitesses de coupe élevées.

Tableau 1 : Exemples de couples outil/matière avec ordres de grandeur de Vc

Matériaux à usiner	Matériaux de coupe	Revêtements	Vc (m/min)
Graphite	PCBN	aucun	jusqu'à 5000

Tableau 1 : Exemples de couples outil/matière avec ordres de grandeur de Vc

Matériaux à usiner	Matériaux de coupe	Revêtements	Vc (m/min)
Acier à outil HRC < 50	Carbure monobloc	TiCN	300 - 600
	Cermet	aucun	300 - 800
	Céramique Al ₂ O ₃ + TiC	aucun	60 - 300
Acier à outil HRC < 58	Carbure monobloc	TiCN	200 - 500
	PCBN	aucun	500 - 1000
	Céramique Al ₂ O ₃ + TiC	aucun	50 - 200
Acier à outil HRC < 63	Carbure monobloc	TiCN	50 - 300
	PCBN	aucun	300 - 600
	Céramique Al ₂ O ₃ + TiC	aucun	30 - 140
TA6V4 (titane)	Carbure monobloc	TiCN	100-400
Alliages à base nickel	Carbure monobloc	TiCN	80-250
	Céramique Al ₂ O ₃ + SiC	aucun	120
Fonte GG-25	Céramique Si ₃ N ₄	aucun	500-1200
	PCBN	aucun	1250-3000
Alliages légers Re < 500 MPa	Carbure monobloc K20	aucun	3000-4700

7.3. Géométries

En UGV, les hautes vitesses de coupe imposent aux outils des géométries "parfaites". En effet, il n'est pas permis d'avoir des comportements (vibratoires et centrifuges) et des rigidités médiocres. Ainsi, les angles de coupe et de dépouille, les longueurs libres, les diamètres et les goujures des outils UGV ; mais également la qualité des réglages et des équilibrages de ces outils ont une grande influence sur la coupe. Afin de satisfaire ces exigences, quelques règles simples peuvent être mises en place.

Tout d'abord, l'angle d'hélice a un rôle important dans la régularité de la coupe. On trouve des outils dont l'angle d'hélice varie de 20 à 55° selon les applications [16]. De manière générale, il varie proportionnellement avec le nombre de tranchants. Une coupe régulière demande un angle d'hélice et un nombre de dents relativement élevés. Mais avoir un nombre de tranchants élevé est en contradiction avec l'exigence de grands logements permettant l'évacuation des copeaux [17]. Etant donné que la coupe est différente d'un cas à l'autre, il est donc nécessaire de faire un choix approprié du nombre de tranchants et de leur inclinaison en fonction de la matière à usiner et des paramètres de coupe. De plus, il est courant que les outils possèdent un nombre pair de dents afin de faciliter l'équilibrage de l'outil. Toujours dans la même optique d'un réglage aisé, on préfère des outils combinés sur lesquels des vis de réglage sont prévues. Par contre, la force centrifuge incite plutôt à l'utilisation d'outils monoblocs que d'outils combinés, pour s'affranchir du danger de dévissage ou de bris des vis de fixation des plaquettes [16]. En ce qui concerne le corps d'outil (monobloc ou combiné), les exigences de rigidité et d'inertie faible ont tendance à être contradictoires. En effet, les corps en acier ne sont souvent pas assez rigides pour les outils longs et de petits diamètres mais sont déjà trop lourds pour les gros outils. Ainsi, d'une manière générale, en finition, les outils longs et de faibles diamètres sont monoblocs en acier traité alors que la technologie combinée avec un porte-plaquettes en alliage d'aluminium traité convient bien aux outils courts et de gros diamètres [17].

La bonne rigidité et le comportement vibratoire correct de l'outil passent également par une minimisation des effets d'entaille et donc par un soin particulier à apporter au façonnage des goujures. De plus, l'affûtage doit être de bonne qualité afin de freiner l'évolution de l'usure et d'empêcher la formation d'arête rapportée. Toujours pour éviter les ruptures dues à une usure trop rapide, il est courant de trouver des outils carbures ou cermets avec une pointe biseautée [16].

On trouve également différents angles de coupe suivant l'utilisation de l'outil. De manière générale, l'usinage des aciers et des fontes est recommandé avec un angle de coupe nul. Celui-ci sera optimum vers 8° pour l'usinage d'alliages facilement usinables. Il peut atteindre 12 à 25° pour les alliages difficilement usinables. Enfin, une valeur située entre 5 et 8° est optimale pour l'usinage de matières plastiques renforcées par fibres.

La valeur du rayon de l'arête de coupe a également une influence sur la coupe et notamment sur les efforts de coupe [21]. En effet, de manière générale, ces derniers augmentent sensiblement avec le rayon de l'arête de coupe. Ainsi, l'acuité d'arête est à prendre en compte dans la conception ou le choix d'un outil. A titre indicatif, le rayon de l'arête de coupe peut varier de 6 à 100 μm .

En ce qui concerne la partie attachement de l'outil tournant sur le porte-outil, la préoccupation principale réside dans la minimisation des écarts de faux-rond et de coaxialité. On remarque aussi que les queues des outils sont cylindriques lisses, tolérancées à l'alésage H5 dans le porte-outil.

7.4. Préréglages et équilibrages

Comme nous l'avons vu précédemment, les réglages et équilibrages des outils sont indispensables à grande vitesse de coupe. Généralement, au-dessus de 2500 tr/min, l'équilibrage de l'ensemble outil/porte-outil est nécessaire.

Pour ce, les sociétés spécialisées utilisent des systèmes permettant à la fois préréglage, équilibrage et transmission des données [22]. L'outil est monté sur une broche verticale de haute précision. La chaîne de mesure se charge alors de la correction électronique des adaptations de broche, des défauts de coaxialité outil/porte-outil, voire même de l'indication par pointeur laser de la position angulaire du balourd mesuré. Par la suite, l'équilibrage doit être effectué manuellement. Il est maintenant facilité par l'existence de porte-outils avec bague d'équilibrage. Comme on peut le trouver en usinage conventionnel, les jauges des outils sont mesurées sur projecteur de profil sans contact. Enfin, les données sont ensuite transmises à un PC ou une imprimante.

7.5. Lubrification et arrosage

Il n'est pas possible de donner le lubrifiant idéal en UGV. Suivant les paramètres de coupe et le couple outil/matière, les propriétés de la lubrification sont différentes. On trouve donc plusieurs solutions.

Les huiles solubles et entières restent présentes en UGV grâce à leur efficacité en matière d'évacuation du copeau, de refroidissement rapide des outils ne craignant pas les chocs thermiques, mais surtout grâce à la technologie de lubrification par le centre sous haute pression (sous 4 à 8 bars, elle n'est pas adaptée au travail à vitesse de coupe élevée). De plus, suivant les applications, son utilisation peut améliorer l'état de surface et la durée de vie. La solution d'arrosage extérieur (sous 4 à 8 bars) couplé avec une lubrification intérieure haute pression (30 à 50 bars) convient bien aux applications de type fraisage ou perçage, mais reste chère et difficile à mettre en œuvre. Avec le même type de lubrifiant, on trouve aussi une solution d'arrosage extérieur très haute pression (>100 bars) réservée pour les très hautes vitesses de coupe. Mais ce procédé est peu courant car coûteux, très difficile à mettre en œuvre et polluant [23].

La moins polluante est la lubrification par jet d'air comprimé qui ne change pas le comportement de l'outil en matière de durée de vie mais qui a l'avantage de favoriser l'évacuation des copeaux et de refroidir sans choc thermique mais lentement [17]. L'outil ne doit donc pas nécessiter un refroidissement important. Par ailleurs, ce type de lubrification permet sans problème de très hautes vitesses de coupe. Il est de plus en plus utilisé avec des outils PCBN ou PCD [23]. On préfère également usiner la fonte à sec car le lubrifiant engendre dans ce cas une dégradation de la qualité de l'état de surface.

Un compromis entre les deux dernières solutions est la micropulvérisation. Cela consiste à injecter de l'extérieur en même temps de l'air (de façon continue) et de l'huile (de façon intermittente et réglable). Ainsi, la quantité d'huile injectée est minimale, donc le procédé est économique. Le principe est de fragmenter le mélange air-huile afin que les particules en suspension puissent être amenées jusqu'à l'outil sans grande difficulté et ceci même pour de grandes vitesses de coupe. L'utilisation de la micropulvérisation d'huiles végétales est assez répandue mais donne des résultats différents selon l'application. Elle permet dans certains cas d'augmenter la durée de vie de l'arête de coupe et, dans d'autres cas, de favoriser la qualité de l'état de surface en jouant sur la formation des copeaux. Son utilisation estompe les problèmes dus aux forces centrifuges et favorise le glissement du copeau. Mais de manière générale, elle est moins efficace que l'huile soluble traditionnelle pour l'évacuation des copeaux (aidée par contre par les hautes vitesses de coupe) et ne permet pas un refroidissement rapide de l'arête de coupe [17]. Elle s'avère donc insuffisante pour les gros enlèvements de copeaux donc inadaptée au perçage à grande vitesse. De plus, il faut un ciblage parfait de l'arête de coupe [23]. On trouve donc maintenant le même procédé avec une injection intérieure.

Mais le gros problème des lubrifications centrales réside dans le fait qu'à partir d'une certaine vitesse de rotation, du fait de la force centrifuge, l'huile se colle à la paroi du trou et ne descend plus vers l'outil ; d'où la nécessité, soit de réaliser des orifices d'amenée de lubrifiant intérieurs les plus fins et les plus centrés possibles par rapport à l'axe de rotation de l'ensemble outil/porte-outil (ce qui est impossible dans un foret car l'orifice doit suivre l'hélice), soit d'augmenter la pression d'amenée.

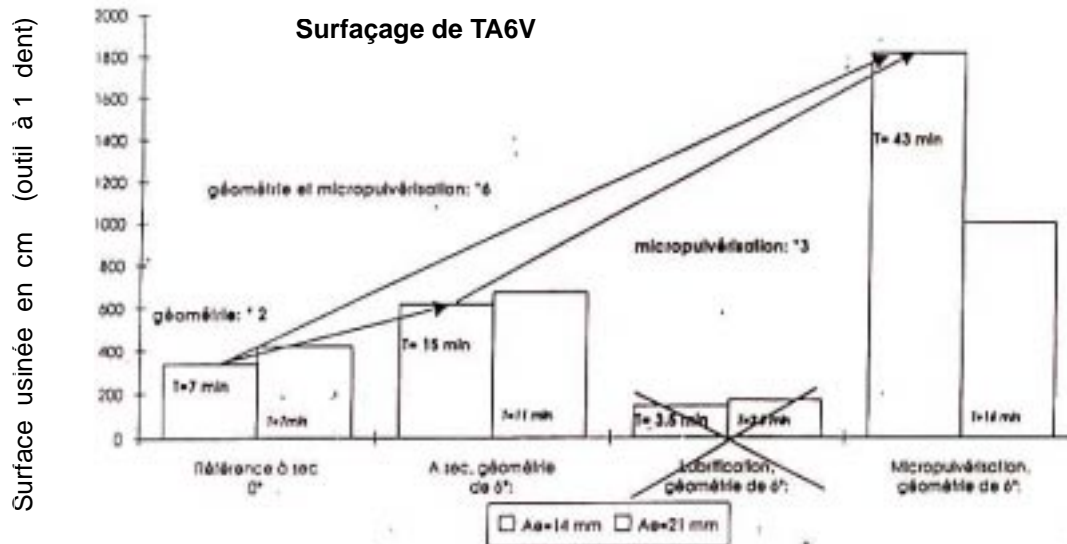


Figure 37 : Comparaison de différents types de lubrification

Par ailleurs, on trouve sur le marché des outils autolubrifiants. Il n'est alors plus question de choisir un type de lubrification puisque le matériau de l'outil est chargé, par la métallurgie inclusionnaire, de particules lubrifiantes.

7.6. Coût

De manière générale, le "coût outil" dépend essentiellement de l'application envisagée. En effet, suivant le matériau de l'outil, sa géométrie, le type de lubrification envisagé et les méthodes de production (préréglages hors sites ou non, type de machine, etc.), les coûts peuvent être très différents. Par exemple, si l'utilisation d'outils polycristallins est souvent recommandée, leur prix est beaucoup plus élevé par rapport aux autres matériaux d'outils : un outil PCBN coûte encore de 5 à 10 fois plus cher que le même outil en céramique.

Le coût dépend également beaucoup de la gestion des temps improductifs qui reste importante en UGV, malgré la nette amélioration de la productivité.

Enfin, on a vu que les constructeurs cherchent à répondre au problème de dévissage des plaquettes en développant des nouvelles technologies de fixation. Ceci illustre donc le fait que l'on cherche toujours à diminuer le coût outil en proposant des outils combinés. En effet, ceux-ci permettent un changement d'arête de coupe peu coûteux par rapport à l'affûtage d'un outil monobloc.

Après avoir étudié les évolutions des outils dédiés à l'UGV, nous allons maintenant nous intéresser aux porte-outils et aux broches hautes fréquences qui transmettent à l'outil le mouvement de coupe.

8. Les porte-outils et broches

Nous avons vu que les outils dédiés à l'UGV doivent répondre à certaines exigences dues aux spécificités de ce nouveau procédé d'usinage. Il en va évidemment de même pour les porte-outils et les broches, qui complètent la partie "coupe" de la cellule élémentaire d'usinage. Nous nous intéressons donc, dans un premier temps, aux exigences imposées par l'UGV aux porte-outils et aux broches. Nous étudions ensuite les nouvelles technologies de ces composants avant de s'intéresser à l'aspect économique.

8.1. Exigences imposées par l'UGV

Le développement de l'UGV a impliqué celui des porte-outils. Tout d'abord, cela leur demande une plus grande rigidité et une transmission de couple et de puissance importante. On comprend également que leur conception, comme celle des outils, doit prendre en compte les problèmes dus aux forces centrifuges. Ainsi, l'équilibrage de l'outil et de son attachement est primordial.

De plus, le cône broche (cône femelle) s'ouvre sous l'effet des forces centrifuges, alors que le cône porte-outil ISO (cône mâle), qui est plein, ne se déforme pratiquement pas. Il en résulte un jeu entre le porte-outil et la broche. Celui-ci, qui est tiré dans la broche, a donc tendance à remonter. Ainsi, il y a une perte en précision lors de l'usinage. De plus, lorsque l'on arrête la machine, le cône se rétracte et le porte-outil se frotte dans la broche, ce qui implique des difficultés de démontage. Ceci a donné naissance aux nouveaux porte-outils HSK (norme allemande) dédiés à l'UGV.

De la même manière, les broches GV sont sollicitées mécaniquement et thermiquement. Elles doivent donc répondre aux exigences de grande rigidité mécanique, d'équilibrage dynamique parfait, de stabilité géométrique radiale et axiale et de précision. Leur motorisation doit permettre les hautes vitesses de rotation sans générer de vibration ni de contraintes thermiques trop élevées.

Le choix d'une broche se fera ensuite surtout en fonction du couple minimum à basse vitesse, de la puissance maximale nécessaire et de l'effort axial minimum souhaités, mais aussi des éventuels besoins d'arrosage par le centre, de temps d'accélération et de freinage ou de système de refroidissement.

8.2. Technologies utilisées

8.2.1. les porte-outils

On trouve deux types de liaison porte-outil/broche pour outils tournants : le cône ISO ou l'attachement HSK communément appelé "cône-face" (figures 38 et 39).

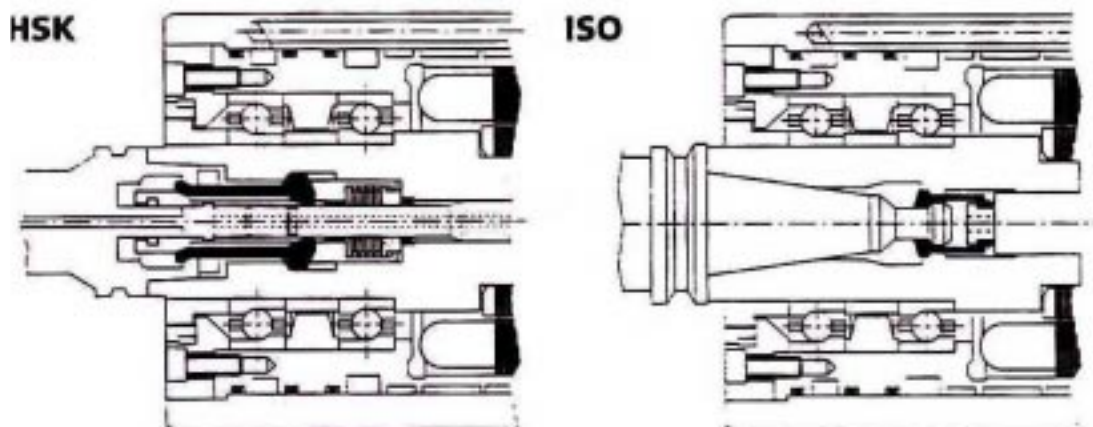


Figure 38 : Attachements ISO et HSK

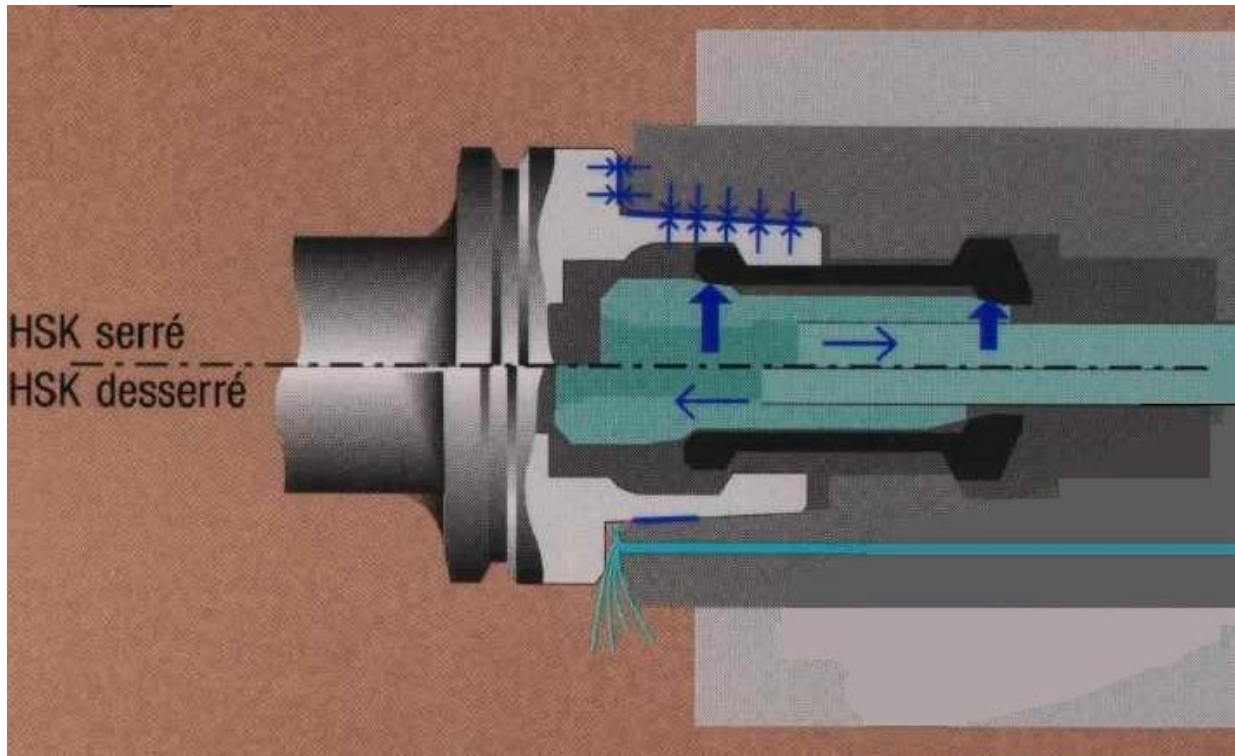


Figure 39 : Fonctionnement du systèmes HSK

Dès que la vitesse de rotation de la broche dépasse 20 000 tr/min, les cônes creux HSK sont les plus performants. En effet, à partir de cette vitesse de rotation, le cône broche a tendance à s'ouvrir. Alors, le porte-outil remonte. On estime donc la vitesse limite d'utilisation des cônes ISO à 20 000 tr/min [24].

L'attachement HSK a été conçu spécialement pour l'UGV. Son principe est simple : s'ouvrir autant que la broche sous l'effet des forces centrifuges. En effet, à la différence du cône ISO, le cône HSK est moins conique et creux. Ceci lui permet donc de rester au contact de la broche sous l'action d'une pince qui vient par l'intérieur le plaquer sur le cône broche. De plus, l'appui plan entre le nez de broche et la face de l'attachement HSK l'empêche de remonter. Ainsi, une très bonne transmission du couple est assurée avec un maximum de sécurité : pour une broche donnée, le "cône-face" HSK propose une force de traction 2 à 3 fois inférieure à celle du cône ISO pour une capacité de serrage jusqu'à une fois et demie supérieure. Enfin, le cône creux HSK permet une répétabilité de remise en position de l'ordre du micron grâce à son système de serrage en forme d'anneau qui s'enclenche dans la broche pour assurer un assemblage précis et sans jeu (figure 40).

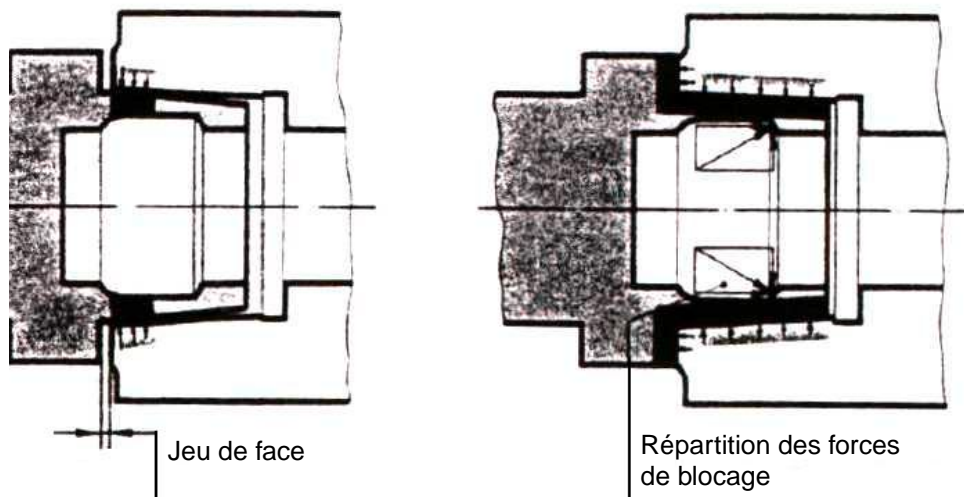


Figure 40 : Emmanchement du cône-face

En ce qui concerne le serrage de l'outil, on trouve maintenant, en complément des pinces de haute précision, les solutions de frettage et de serrage hydraulique.

La fixation par frettage a l'avantage d'être très rigide et précise. Sa mise en œuvre nécessite le chauffage du porte-outil jusqu'à 200°C minimum. On utilise pour cela de l'air chaud ou bien un chauffage par induction électrique. Ensuite, de l'air assure le refroidissement. Cette opération d'assemblage est possible hors site avec le développement de bancs pour le frettage et le défrettage de l'outil.

Les mandrins à serrage hydraulique sont surtout utilisés lorsqu'il faut des changements d'outil rapides. Leur concentricité et leur répétabilité sont toutes deux inférieures à 3 µm.

8.2.2. les broches

Les broches sont parmi les composants qui ont le plus évolué avec le développement de l'UGV. En effet, elles sont un élément indispensable dans la C.E.U. puisqu'elles doivent concilier à la fois l'aspect statique et l'aspect dynamique de l'usinage à grande vitesse.

Il existe trois grandes familles d'électrobroches : dans 90% des cas, on trouve des broches à paliers à roulements (figure 41) ; le reste des électrobroches se divise entre guidage de l'arbre moteur par palier à air – hydrostatique – (8%) ou par champ magnétique [24].

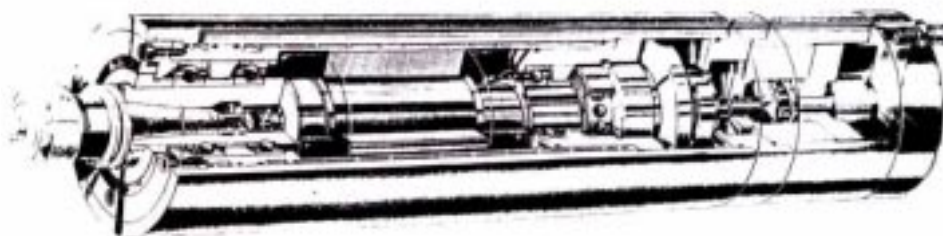


Figure 41 : Broche sur paliers à roulements

Les paliers à roulements utilisent la solution de roulements à billes (ou à rouleaux) à contact oblique pour la rigidité et la précision de guidage de ce type de montage. Le montage de roulements est précontraint hydrauliquement ou par ressort afin d'éliminer tout jeu dans le guidage de l'arbre de broche. Les billes sont en acier ou en céramique. Ces dernières présentent par rapport aux billes en acier les avantages suivants [25] :

- usure plus faible (car leur frottement avec les bagues est plus faible) ;
- meilleure régularité de marche ;
- décalage axial de l'arbre moindre ;
- vitesse maximale plus élevée.

Ceci s'explique par le fait qu'elles sont de densité plus faible. Elles sont donc moins sujettes aux forces centrifuges. De plus, elles sont plus stables thermiquement.

A haute vitesse, toutes les broches à roulements sont soumises à une forte augmentation de la température au niveau des paliers. Les constructeurs de broches y intègrent donc un système de refroidissement par le stator et prévoient la dilatation vers l'arrière de la broche [26]. Par ailleurs, la lubrification des éléments roulants se fait par graissage à vie – solution économique pour les vitesses de rotation moyennes – ou par brouillard d'huile pulvérisé soit par le côté, soit directement radialement à travers la bague extérieure.

En ce qui concerne les motorisations de ces broches, elles ont aussi évolué. On en trouve aujourd'hui de deux sortes : à commande par fréquence ou à contrôle vectoriel. La première technologie utilise une commande selon des courbes préprogrammées (figure 42) [25]. Ceci confère au moteur une puissance maximale en vitesse maximale. Elles sont généralement utilisées pour les opérations de finition car pour ce type d'application, on utilise souvent des outils de petits diamètres. Pour répondre à ce besoin, ces broches offrent une puissance et un couple faibles (<20 kW et <50 m.N) pour une vitesse de rotation dépassant les 30000 tr/min. Par contre, un couple faible impose un temps de montée en vitesse relativement long.

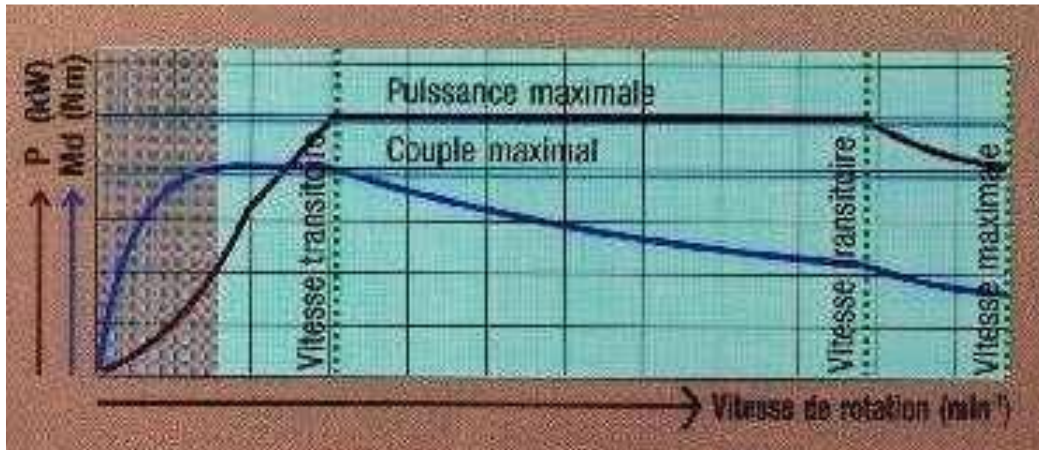


Figure 42 : Courbes de commande

Les broches à contrôle vectoriel intègrent un codeur qui mesure constamment la position et la vitesse de celle-ci. Il permet donc une accélération et une décélération courtes (figure 43) ainsi qu'un indexage de la broche utile pour le changement d'outil avec entraîneur. Cela permet également la synchronisation entre l'axe de rotation de broche et l'axe d'avance Z, pour le taraudage sans mandrin de compensation. Elles sont plutôt destinées aux opérations d'ébauche et de taraudage rigide (sans mandrin de compensation). Ainsi, les broches à contrôle vectoriel ont une puissance de 20 à 40kW, tournent de 15000 à 30000 tr/min et offrent un couple maximum à basse vitesse (de 50 à 300 m.N).

Le choix d'une broche se fait donc en fonction de plusieurs paramètres parmi lesquels les couples vitesse minimale/couple associé et vitesse maximale/puissance nécessaire, les temps de montée en vitesse et de freinage, les capacités de perçage et de taraudage rigide et toutes les caractéristiques géométriques (type d'attachement d'outil, passage de lubrification, refroidissement, paliers, etc.).

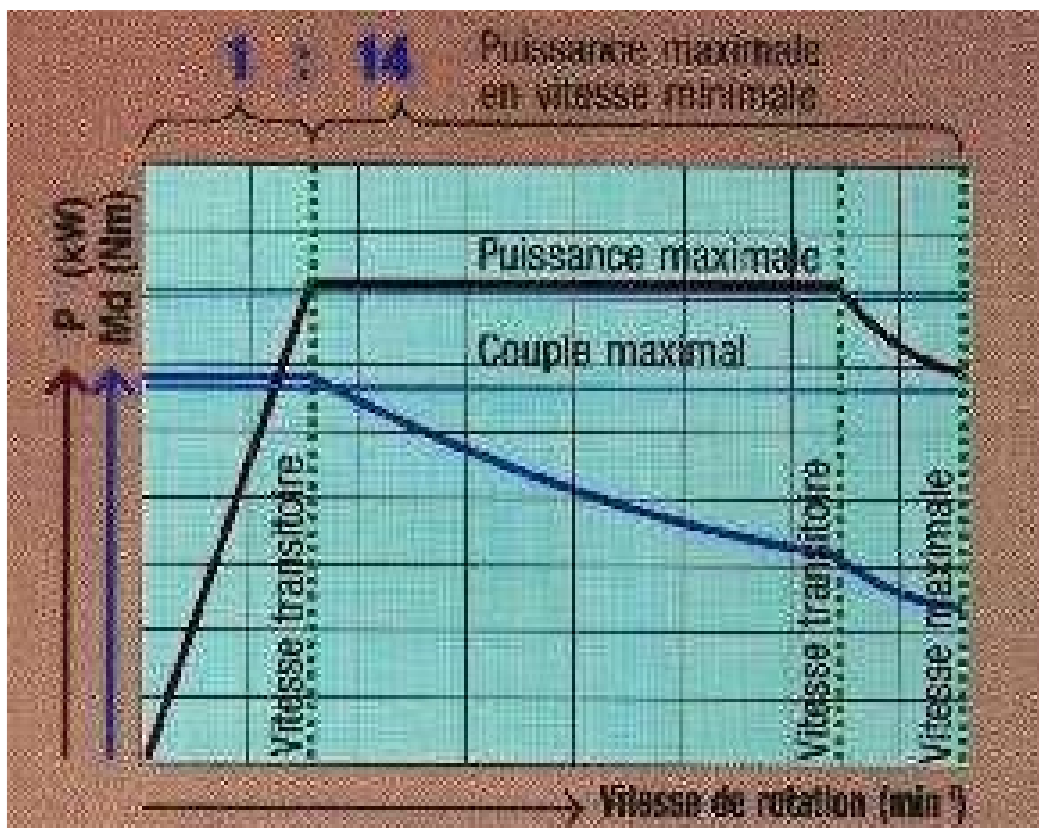


Figure 43 : Courbes caractéristiques des broches à contrôle vectoriel

8.3. Coût

Le cône creux HSK est moins coûteux que le cône ISO. Mais généralement, les industries possèdent déjà des cônes porte-outils ISO. L'achat de cônes HSK est donc un coût supplémentaire. Ainsi, il est indispensable de bien définir le cahier des charges d'un attachement d'outil afin de ne pas créer un coût de surqualité.

Par contre, les électrobroches d'UGV coûte environ 5 fois plus cher que les broches traditionnelles. Et ceci s'accroît d'avantage avec la puissance de la broche ou avec une broche à contrôle vectoriel. Là encore, il est donc important de bien cibler les objectifs.

9. Les machines

Comme les autres éléments de la C.E.U, la machine répond aux exigences que lui impose l'UGV. Certes, on a vu des broches UGV adaptables aux machines CN conventionnelles afin de permettre un travail à grande vitesse de coupe avec un investissement minimal. Mais ce type de raisonnement tend à disparaître avec la prise de conscience des contraintes imposées par l'UGV à tous les niveaux de la C.E.U.

9.1. Exigences imposées par l'UGV

Ce sont surtout des contraintes dynamiques supplémentaires qui s'appliquent aux machines. Bien entendu, les rigidités mécanique et thermique de celle-ci doivent toujours être assurées. Mais surtout, elle doit présenter une stabilité dynamique plus élevée que les machines conventionnelles puisque l'on travaille à des vitesses engendrant plus d'inertie et de vibrations, avec des accélérations et des décélérations plus élevées (jusqu'à 2g). Tous les éléments de la machine sont donc impliqués. Cependant, la validité de cette remarque dépend de la vitesse de travail par rapport à la taille et au poids de la pièce usinée. De plus, travaillant à haute vitesse, la machine se doit de réagir rapidement à un ordre. Ainsi, elle doit proposer une commande rapide et des entraînements d'axes à dynamique élevée. Mais cela ne doit pas se faire au détriment de la qualité du suivi des trajectoires. Enfin, les dispositifs de sécurité et de protection adéquats doivent être prévus contre, par exemple, les projections de copeaux ou les bris d'outils.

9.2. Structures

La géométrie et le matériau qui constituent la structure d'une machine-outil lui confère une grande partie de sa rigidité mécanique. Ils ont donc une influence sur les comportements statique et dynamique de la machine. Ainsi, les bâtis de machines présentent une grande stabilité dimensionnelle et vibratoires. De plus, leur conception permet une évacuation aisée de grosses quantités de copeaux et de lubrifiant. Enfin, l'utilisation de la méthode des éléments finis lors du dimensionnement des structures permet de maîtriser au mieux les comportements de la machine.

Nous pouvons classer les structures de machine suivant leurs dimensions [26]. En effet, selon la taille et la masse de la pièce à usiner, les exigences posées à la structure sont plus ou moins importantes. Pour les machines de grande dimension, on trouve aujourd'hui de plus en plus une architecture à portique en acier soudée, celle-ci étant la plus fiable aux niveaux accessibilité, stabilité et précision. Les machines de petites et moyennes dimensions autorisent pratiquement toutes les configurations de structure (portique ou montant, fixe ou mobile), puisqu'elles nécessitent moins de résistance aux contraintes mécaniques (moins de porte-à-faux). Mais ce sont surtout les structures à portique qui sont utilisées (figure 44). De manière générale, elles sont en fonte ou en béton chargé de résine de réaction (RHB).

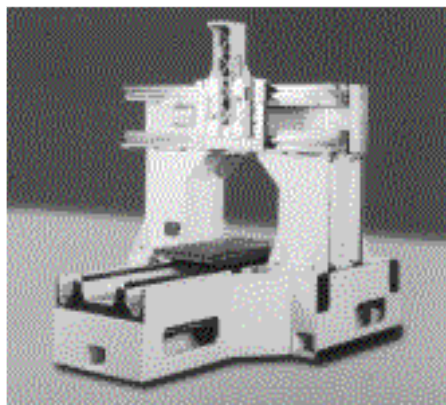


Figure 44 : Machine UGV à portique MIKRON

Le RHB est composé de matière minérale en grains ou en éclats liés par une résine durcissant à froid (par exemple résine époxy, méthacrylique ou polyester insaturé), qui, dans des proportions appropriées, lui confèrent ses propriétés mécaniques et thermiques [27]. Mais il présente une résistance mécanique moins bonne que celle de la fonte. Ainsi, son utilisation oblige à des constructions massives dans lesquelles il faut prévoir au préalable les inserts des guidages et autres éléments rapportés sur la

machine. En général, il est coulé dans un moule perdu en tôle d'acier qui constituera par la suite l'enveloppe extérieure de la machine. Enfin, les études réalisées montrent que le RHB présente une densité plus faible que la fonte ou l'acier, un meilleur amortissement (dû à sa capacité d'amortissement et à une construction massive), ainsi qu'une capacité de chaleur massique plus élevée pour une conductibilité plus faible.

Après avoir vu les évolutions des structures des machines-outils pour l'UGV, nous allons nous intéresser aux éléments mobiles de la machine ainsi qu'à leurs motorisations.

9.3. Guidages et moteurs

Les axes confèrent à l'outil les mouvements d'avance. Ils sont les éléments mobiles de la machine ; ils sont donc souvent la principale cause d'un mauvais comportement dynamique de la machine. Ainsi, les parties mobiles, les guidages et les moteurs qui les composent ont évolué afin de remplir les conditions de rigidité et de stabilité dynamique en UGV.

9.3.1. Les parties mobiles

Des vitesses de coupe importantes impliquent des vitesses d'avance élevées. C'est pourquoi les sollicitations dynamiques que supporte la machine viennent en partie de la conception des éléments mobiles. Ceux-ci sont donc fabriqués avec des matériaux légers et des formes optimisées, afin de réduire l'inertie. Cette réduction peut atteindre 40% de la masse d'une construction actuelle en acier pour un moment d'inertie total de 60% inférieur [27].

L'emploi de matériaux légers reste le meilleur moyen de réduire la masse embarquée, tout en maintenant la rigidité élevée. Le choix du matériau se fait entre trois catégories : les aciers et fontes, les alliages légers ou les plastiques renforcés par fibres. Les plus utilisés en UGV sont les alliages d'aluminium-titane ou les matières plastiques renforcées. Ces dernières conviennent particulièrement pour les pièces qui subissent des charges dont l'orientation est quasiment constante. Mais les caractéristiques mécaniques des parties mobiles dépendent fortement des matériaux utilisés. Ainsi, les parties en alliage léger ou en plastique ne sont pas conçues de la même façon que celles soudées en acier. Il est à noter enfin que les pièces en composite renforcé par fibres présentent un meilleur amortissement que celles en matériau métallique.

Le gain de poids peut également s'effectuer sur l'optimisation des formes des pièces. En effet, la conception des parties mobiles dépend du matériau utilisé ; il est donc nécessaire de tenir compte de l'influence de la forme sur la rigidité de la pièce conçue. Pour cela, on utilise des méthodes informatiques de simulation telle que celle des éléments finis qui permet d'analyser les comportements des matériaux isotropes et anisotropes. Ainsi, on peut réduire la masse des pièces en optimisant leurs formes sans amoindrir leur rigidité.

9.3.2. Les guidages

Les éléments de guidage des machines UGV doivent supporter les sollicitations statiques et dynamiques de l'usinage. De plus, ils doivent, dans un souci d'optimisation du comportement général de la machine, présenter un très faible frottement avec les parties mobiles, afin de réduire l'usure et d'assurer ainsi le respect de la précision requise, sans jeu.

On trouve aujourd'hui des guidages à roulements précontraints qui sont plus performants que les guidages hydrostatiques ou hydrodynamiques [27] (figure 45). En effet, ces derniers peuvent présenter des ruptures du film d'huile, cause d'endommagement, ou des effets de "stick-slip" à faible vitesse. De plus, les guidages à roulements ont des frottements plus faibles et provoquent donc peu d'élévation de température. Par conséquent, les variations de position en cours de fonctionnement sont moins importantes. Par ailleurs, ils permettent des accélérations et décélérations plus élevées que les guidages hydrodynamiques. Leur dernier avantage réside dans leur construction très compacte et légère. Les guidages à roulement les plus couramment utilisés sont les vis à billes ou les vis à rouleaux à filets multiples, à recirculation. On peut tout de même noter que les monorails à rouleaux offrent, par rapport aux guidages à billes, une meilleure stabilité et une plus longue durée de vie. Mais leur utilisation diminue de plus en plus du fait de l'apparition de nouvelles solutions de motorisation.



Figure 45 : Guidages de la machine MIKRON VCP 1000

Il nous reste donc à caractériser les moteurs d'entraînement utilisés sur les machines d'UGV. Ils ont également évolué, puisqu'ils doivent permettre d'atteindre de grandes vitesses de déplacement avec des accélérations et des décélérations élevées.

9.3.3. Les moteurs

On utilise beaucoup la technologie d'axes linéaires classiques avec un moteur rotatif et un système vis-écrou à billes ou à rouleaux. Le moteur est alors un moteur à courant continu ou triphasé [27]. Celui-ci remplit parfaitement ses rôles d'amplification importante de la régulation en boucle fermée de position et de constante de temps faible. Ainsi, la première caractéristique lui permet d'avoir une faible erreur de poursuite et la deuxième d'avoir une réponse rapide et stable. De plus, ils permettent des couples élevés. Ils sont directement accouplés aux vis à billes pour réduire au minimum les pertes de charge. Ces guidages leur permettent, en outre, d'atteindre une vitesse d'avance de 30 à 50 m/min avec une accélération de 10 m/s^2 maximum (sans charge) [27].

Mais on trouve maintenant la technologie de moteur linéaire [26] (figure 46) [28]. Ce système remplace toute la transmission de mouvement mécanique de la solution traditionnelle par un chemin magnétique fixé entre les rails de guidage. Ce chemin magnétique est constitué de deux éléments : un aimant permanent fixé sur le rail de guidage et une bobine fixée sur la partie mobile. Pour éviter la friction entre la table et le rail, deux chemins sont placés face à face.

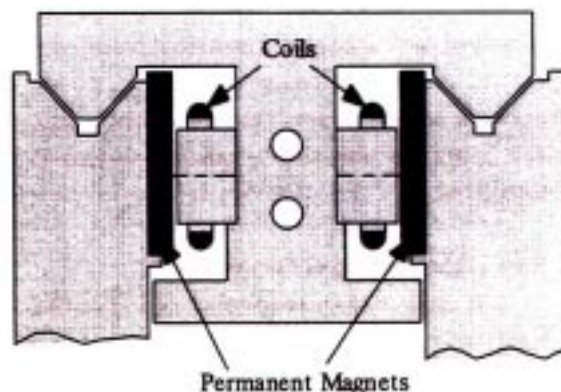


Figure 46 : Structure d'un moteur linéaire

L'inertie et l'usure propres aux moteurs et aux vis à billes ou à rouleaux sont alors supprimées. Cela permet donc de multiplier l'accélération maximale par un facteur 10 et la vitesse de déplacement par 2 par rapport aux moteurs rotatifs, soit 100 m/s^2 et 100 m/min à vide. Les moteurs linéaires sont donc, de ce point de vue, plus adaptés à l'UGV et au développement de machines agiles, puisque cela requiert

de grandes vitesses d'avance et de hautes accélérations. Cependant, les caractéristiques dynamiques des moteurs linéaires dépendent beaucoup plus de la masse embarquée (figure 47).

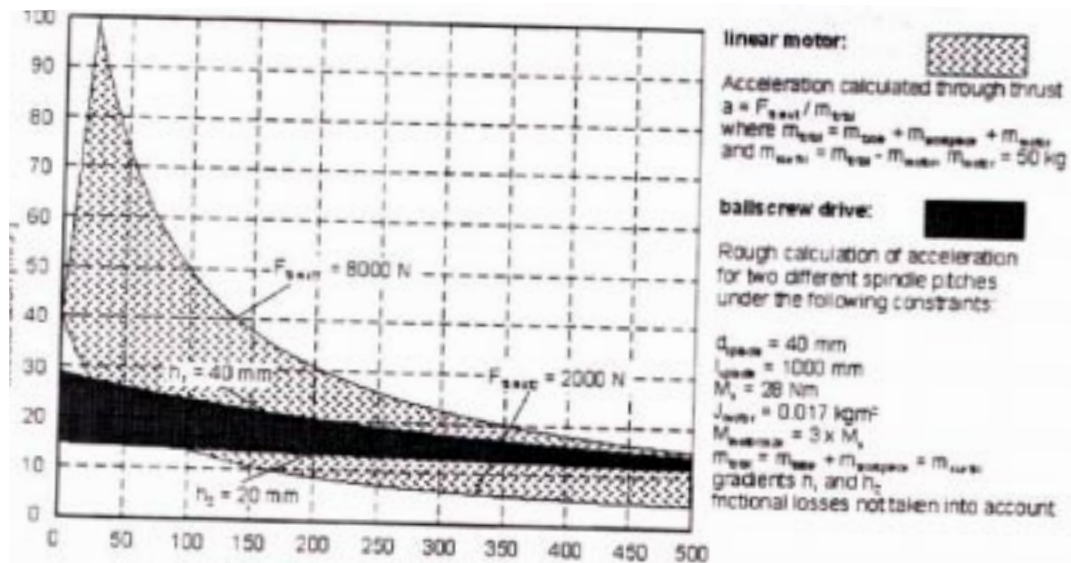


Figure 47 : Relation entre l'accélération maximale et la masse embarquée

Par ailleurs, le fait de supprimer toute la chaîne de transmission mécanique améliore la précision en position et la rigidité du système. Par contre, cette nouvelle technologie coûte encore cher par rapport au système vis-écrou. De plus, il reste des progrès à faire en matière de protection contre les copeaux (eux aussi ferromagnétiques) et de précision à basse vitesse. En effet, à de faibles vitesses d'avance, les moteurs linéaires ont un faible rendement et dégagent de la chaleur qui peut causer des pertes de précision. Il est donc nécessaire de les refroidir, ce qui augmente encore leur coût. Enfin, la force d'attraction magnétique nécessaire est 5 fois supérieure à la force axiale utile. Ceci est dû à la structure même du moteur. Il est donc indispensable de renforcer la structure de la machine si l'on utilise cette technologie. De plus, les moteurs linéaires ne permettent pas de blocage. Ainsi, l'immobilité est maintenue par force magnétique ou par des freins supplémentaires externes au moteur. Mais ceci reste moins efficace que le système vis-écrou dans ce genre de situation.

Par exemple, pour illustrer tout cela, lorsque l'on expose les moteurs à une force verticale instantanée de 1000N, les systèmes vis-écrou se déplacent de 7.5 μm et corrigent ce déplacement en 0.25 s. Par contre, les moteurs linéaires se déplacent de 12.5 μm (soit 2 fois plus) mais corrigent cela en seulement 0.1 ms (soit 2500 fois plus vite).

Cette solution est donc encore réservée aux applications exigeant de grandes accélérations ou des temps de copeaux courts. Par exemple, lors de l'usinage de petites formes complexes, les axes sont constamment en accélération ou en décélération. Le moteur linéaire est alors un bon moyen d'augmenter la productivité. Sinon, les critères de coût et de fiabilité invitent les utilisateurs à opter pour les guidages à roulements précontraints avec des moteurs rotatifs.

9.4. Asservissements et DCN

En UGV, la dynamique élevée a tendance à diminuer la précision de l'asservissement. Cela impose donc des précisions en position et en vitesse de déplacement supérieures à celles d'une MOCN classique. Ainsi, toute la partie commande de la machine est améliorée. Ceci concerne plus particulièrement les vitesses de traitement des données, le contrôle de la vitesse, les réglages et la programmation [29]. Si la stabilité et la précision sont autant importantes qu'en usinage traditionnel, la rapidité de l'asservissement doit être meilleure. En effet, tout en supprimant l'erreur de poursuite, la précision de positionnement est améliorée en adaptant le suivi des profils programmés à la grande vitesse (figure 48). Cette erreur de poursuite ne se trouve, en fait, totalement supprimée que lors de mouvements linéaires ou circulaires continu.

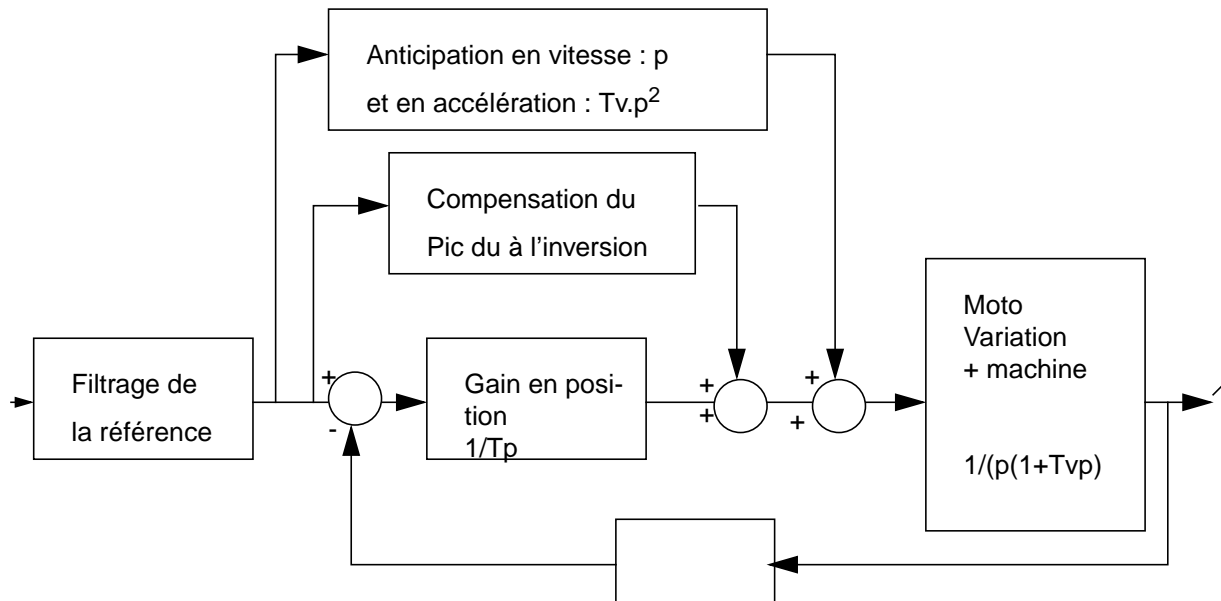


Figure 48 : Asservissement en position d'un axe par NUM S.A.

Les CNC sont donc équipées d'une structure multiprocesseur permettant un faible temps d'échantillonnage et un traitement rapide des blocs (3 à 5 ms de préparation de bloc), tout en gérant les régimes d'accélération et de décélération [17]. Elles fonctionnent également avec des algorithmes de calcul des trajectoires et des vitesses (Look Ahead) plus rapides qui minimisent à l'avance l'erreur de poursuite (anticipation et "lissage" du mouvement). Cette fonction "Look Ahead" permet à la machine de prévoir, sur 60 blocs, les difficultés de parcours sur la pièce (courbure, points anguleux) où une réduction de la vitesse d'avance sera nécessaire.

Le "lissage" du mouvement est permis grâce à une loi de vitesse $V=f(t)$ en "sin²" à deux paraboles raccordées (figure 49) [29]. La loi de vitesse classique impose à la machine une accélération maximale dès que l'écart de vitesse est suffisamment grand. La loi en "sin²" permet de limiter la variation de l'accélération. L'accélération varie en rapport de l'importance de l'écart de vitesse. Cela rend donc le mouvement plus uniforme (figure 50).

De plus, les CNC détectent les inversions de sens sur les axes afin de compenser le freinage intempestif dû aux frottements visqueux (compensation du pic à l'inversion (figure 51)). De la même façon, elles proposent des algorithmes de compensation de dilatation thermique.

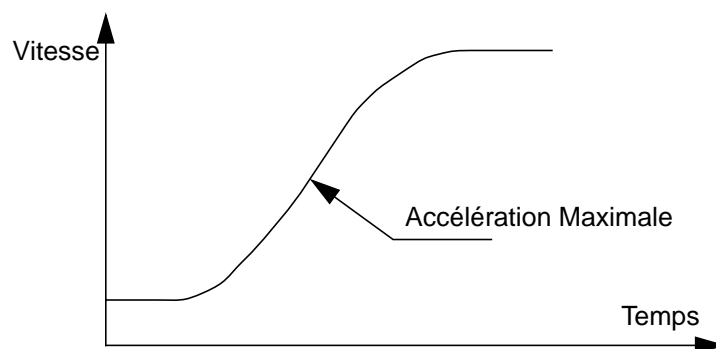


Figure 49 : Loi de vitesse en "sin²"

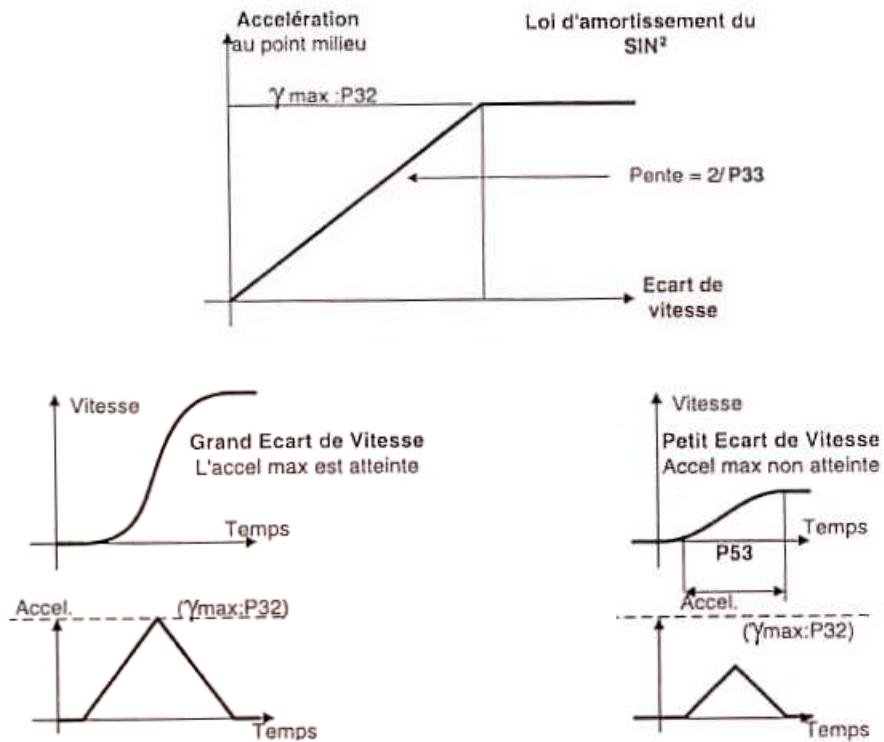


Figure 50 : Rapport entre l'accélération et l'écart de vitesse pour la loi en "sin²"

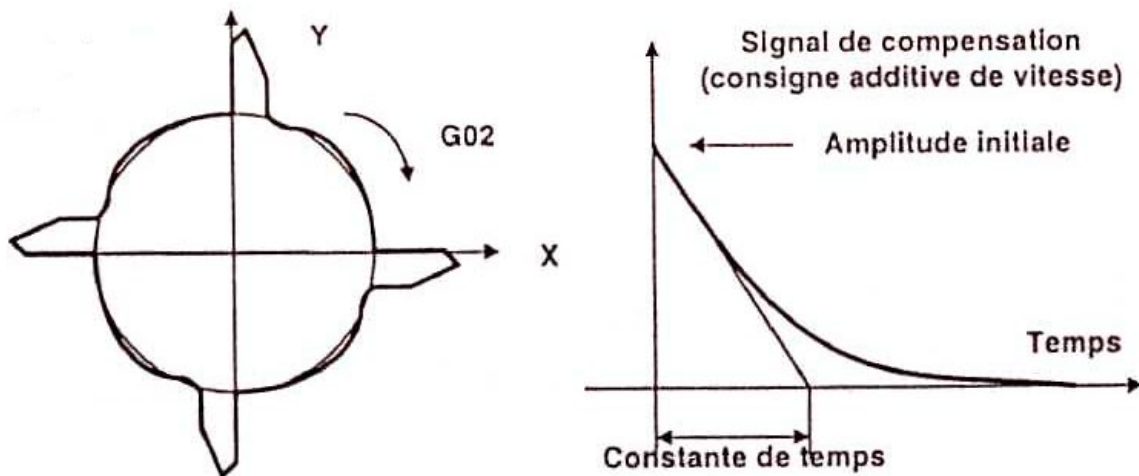


Figure 51 : Illustration du pic à l'inversion en G2

Les paramètres de ces différents algorithmes doivent être réglés. Les réglages sont effectués sur le gain de la boucle de l'asservissement en position ($1/T_p$), sur les boucles d'anticipation en vitesse et en accélération et sur le module de compensation du pic à l'inversion.

Par ailleurs, la programmation des trajectoires spécifiques à l'UGV en CFAO a nécessité une adaptation des DCN. En effet, afin de pouvoir traiter des trajectoires lisses à grande vitesse d'avance, le module d'interpolation de la CN a dû être remplacé en un calculateur performant compatible avec la CFAO, c'est-à-dire capable de calculer les trajectoires de courbes ou de surfaces par interpolation polynomiale au lieu de les interpoler linéairement ou circulairement [27]. Par ailleurs, l'amplification de la régulation a été augmentée afin de minimiser les erreurs en position et de traînage.

La taille des programmes peut poser également des difficultés de traitement. Ainsi, il est maintenant courant de trouver l'adjonction d'un PC à la CNC (PCNC) dont le disque dur peut contenir la totalité du programme. Le PC peut être connecter à un réseau ETHERNET.

9.5. Opérateur – Formation – Protection

L'opérateur est bien assisté dans la conduite des opérations à effectuer manuellement. En effet, la CFAO est de plus en plus présente et les DCNC/PCNC sont interactifs. Du point de vue constructeurs, la sécurité des machines a dû être modifiée.

L'utilisation d'une machine UGV et de son DCNC nécessite une formation spécifique des opérateurs. Ainsi, la phase d'achat d'une machine UGV doit être accompagnée d'une démarche d'information et de formation des opérateurs [26]. L'information concerne les décisions quant à un nouvel investissement. Elle ne doit pas attendre l'arrivée de la machine. Tous les hommes liés au projet doivent pouvoir suivre l'évolution de la démarche de production. La formation se fait à trois niveaux : participation de quelques techniciens aux essais des machines et formation par le constructeur à l'utilisation de la machine. Des intervenants extérieurs finiront cette formation par un apprentissage de la mise en œuvre du procédé.

On a vu plusieurs fois, notamment pour les outils, que l'UGV présente des dangers (une plaquette qui se détache, libère une énergie de l'ordre de celle d'une balle de revolver). Ainsi, les protections classiques ne suffisent pas sur une machine UGV. Il faut également s'attacher à caréner la machine avec des vitres type pare-balles. Ceci est d'ailleurs très important lors de l'équipement de machines conventionnelles avec des broches hautes fréquences, machines qui ne disposent pas initialement d'un dispositif de sécurité adapté à l'UGV.

9.6. Coût

Comme nous l'avons vu tout au long de ce chapitre, tous les éléments de la machine-outil d'UGV ont évolué. Mais les nouvelles technologies restent coûteuses ; une machine UGV peut coûter de 800 à 2000 kF. De plus, ces technologies sont nombreuses et variées pour des secteurs d'applications différents. Il est donc indispensable de bien définir ses besoins et les conséquences (maintenance, formation des opérateurs, etc.) avant de commander une machine UGV.

En ce qui concerne la définition du besoin, il faut tout d'abord établir son origine [26]. Cela peut être dû à un parc machine devenant insuffisant, à un changement de type d'usinage ou bien à une préoccupation économique. En effet, le plus souvent, on veut réduire les coûts, les délais et/ou améliorer la qualité pour rester compétitif ou conquérir de nouveaux marchés. Ceci étant clairement identifié, il est alors plus aisé de voir si ce besoin va durer et si l'investissement dans une nouvelle machine y répond. Enfin, il reste un choix à faire entre trois types d'évolutions : équiper une machine d'une broche UGV avec toutes les adaptations que cela entraîne ; acheter une nouvelle machine UGV en complément du parc machines existant ou bien en remplacement de certaines machines.

Dans le premier cas, l'investissement est fortement réduit mais les possibilités offertes également. Cette option n'est donc à choisir que lorsque l'on a bien vérifié que les capacités de la machine nouvellement équipée étaient suffisantes. Il est également très important dans ce cas de bien adapter le dispositif de sécurité.

La solution dite de "continuité" consiste à utiliser la nouvelle machine UGV comme une machine conventionnelle et en complément de celle-ci, avec des méthodes et des gammes de fabrication similaires. Les gains se font alors sur la vitesse de production, même si toutes les capacités de la machine ne sont pas utilisées. Le gain n'est pas optimal.

L'option la plus radicale est d'utiliser la nouvelle machine en remplacement de machines conventionnelles avec des méthodes et des gammes différentes. Les gains sont alors plus importants, une optimisation des conditions d'utilisation de la machine peut être intéressante. Par contre, la mise en œuvre de la production est plus délicate et peut comporter certains risques au départ.

Il reste ensuite à consulter les constructeurs en leur présentant le cahier des charges fonctionnel ainsi établi. Par contre, la conception de la machine, c'est-à-dire les solutions technologiques utilisées doivent être vues avec le constructeur ; il est risqué d'imposer une technologie que le constructeur ne maîtrise pas forcément. Le cahier des charges ne devra donc comporter que les exigences fonctionnelles et de performances. La comparaison entre les différents constructeurs répondants à l'appel peut alors se faire à l'aide de tests de sélection effectués chez ceux-ci. Ces essais sont comparables aux tests de réception avec lesquels on évalue les machines.

9.7. Evaluation et qualification des machines UGV

Lors des tests de sélection et de réception, il est nécessaire d'évaluer les performances de la machine. Ainsi, les essais doivent porter sur la puissance à basse et haute vitesse de rotation, sur les vitesses réelles par rapport aux vitesses programmées (calcul de la vitesse réelle maximale), sur la précision réelle et sur la qualité de la surface. Les limites des performances de la machine sont alors établies.

Pour effectuer ces essais, sont apparues plusieurs pièces de test. Celle du CETIM est une pièce présentant des discontinuités de type C1 et C2. Elle se présente sous forme d'une succession de vagues que l'on balaye à différentes vitesses jusqu'à "décrochage" de la CN (une erreur de poursuite apparaît). De plus, une mesure de la vitesse d'avance réelle par rapport à celle programmée permet de calculer la vitesse d'avance réelle maximale garantissant le respect du profil et la qualité de la coupe et de la surface. La précision des côtes obtenues par rapport aux côtes programmées et du profil obtenu par rapport au profil programmé est également prise en compte.

Une autre pièce de test est proposée par le LURPA (Ecole Normale Supérieure de Cachan) [30] (figure 52).

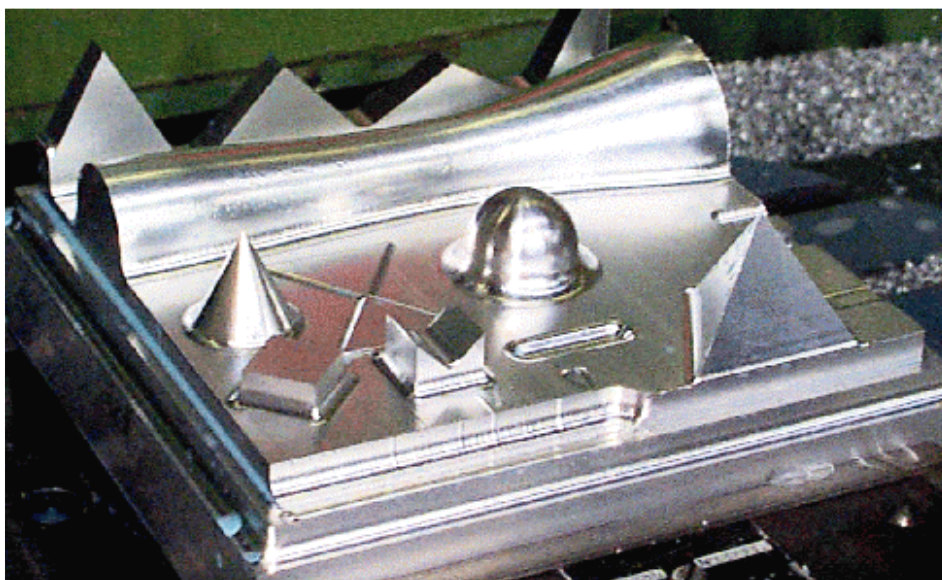


Figure 52 : Pièce de test proposée par le LURPA (Ecole Normale Supérieure de Cachan)

Celle-ci propose des formes susceptibles de provoquer une erreur de qualité et permet ainsi d'évaluer tous les types de générateurs de trajectoires. En bref, cette pièce permet de qualifier dix sept caractéristiques que l'on peut regrouper en quatre familles :

- les problèmes relatifs à la coupe,
- les problèmes de gestion des discontinuités,
- les problèmes de respect de la précision dimensionnelle,
- les autres problèmes.

La première famille regroupe les difficultés d'usinage à l'interface outil/matière, telles que les vibrations, le refus de coupe, l'usure rapide voire le bris d'outil. Les conséquences sur la pièce la destinent souvent au rebut. Ainsi, dans un premier temps, la pièce-test permet d'étudier les quatre caractéristiques suivantes :

- l'influence de la variation de la vitesse sur l'effort de coupe,
- l'influence de l'orientation de la normale à la surface par rapport à l'outil sur l'état de surface,
- l'influence du mode d'usinage (en opposition, en avalant, en zig-zag),
- l'influence de la rotation permanente de la tête en usinage 5 axes sur les états de surface.

La seconde catégorie contient toutes les difficultés d'usinage dues à une discontinuité de la surface de la pièce ou du trajet outil. La pièce-test est donc prévue pour qualifier également :

- le passage des discontinuités C^0 , C^1 et C^2 ,
- l'usinage des arêtes vives,
- l'influence du passage des discontinuités C^2 sur la qualité de la surface,

- l'influence du passage des points d'inflexion ou de multitangence,
- le traitement des surfaces dégénérées (la normale à la surface est impossible à calculer) ou ayant des normales inversées.

Le respect des spécifications est primordial. Ainsi, on conseille d'être en mesure de déterminer :

- la valeur des détails oubliés sous l'outil et sur les flancs,
- les erreurs de posage, de flèche et de hauteur de crêtes,
- la distance entre les surfaces usinées et mesurées et le modèle nominal.

Enfin, la dernière famille recense tous les problèmes non cités rendant la pièce défectueuse. Les caractéristiques correspondantes sont :

- les collisions entre l'outil et la pièce et entre l'outil et les surfaces de contrôle,
- le cas de l'usinage de contre-dépouilles,
- les facettes sur les formes à grand rayon de courbure, dues à une trop grande distance entre les points de posage,
- les mouvements parasites dans le cas de l'usinage 5 axes,
- le comportement de l'asservissement dans des cas de brusques variations de forme.

L'ensemble de la pièce-test est donc défini de manière à contrôler toutes ces caractéristiques. Le tableau suivant donne les contrôles à effectuer pour évaluer chacune de ces caractéristiques (tableau 30).

Tableau 2 : Contrôle des caractéristiques

caractéristiques	surfaces associées	contrôles à effectuer
loi de variation de vitesse	toutes	calcul de la section de copeau, analyse visuelle du fichier APT
orientation de la surface par rapport à l'outil	galbe, sphère, tore, parallélépipède	contrôle visuel de la pièce, mesure de rugosité
usinages en opposition, en avalant, ou en zig-zag,	toutes	contrôle visuel de la pièce
rotation permanente de la tête sur la machine à cinq axes	galbe	contrôle visuel de la pièce
discontinuités à l'ordre 0, 1 et 2	cylindre, parallélépipède, tétraèdre, cône	contrôle visuel de la pièce
usinage des arêtes vives	cylindre	contrôle visuel de la pièce
passage de discontinuités en courbure	sphère, cylindre	contrôle visuel de la pièce
passage des points d'inflexion, ou de multitangence	galbe, sphère, rainure	contrôle visuel de la pièce
traitement des surfaces dégénérées	surface papillon	contrôle visuel du trajet
valeur des détails oubliés	détails	contrôle visuel du trajet
erreurs de posage, de flèche et de hauteur de la crête	toutes	calcul des erreurs
distance entre les surfaces usinées et palpées et le modèle géométrique	toutes	mesure des points de la surface et calcul des écarts géométriques
collisions outil / pièce et outil / surfaces de contrôle	toutes, en particulier le cylindre	analyse visuelle du trajet
usinage de contre-dépouilles	cylindre	analyse visuelle du trajet
facettes sur les formes à grand rayon de courbure	galbe	contrôle visuel de la pièce
mouvements parasites	galbe	analyse visuelle du trajet

Tableau 2 : Contrôle des caractéristiques

caractéristiques	surfaces associées	contrôles à effectuer
brusques variations de forme	surfaces de raccordement, tore	contrôle visuel de la pièce

Enfin, une société savante allemande (German NC-Society) propose une pièce-test (figure 53) qui permet également de qualifier complètement le moyen de production [31].

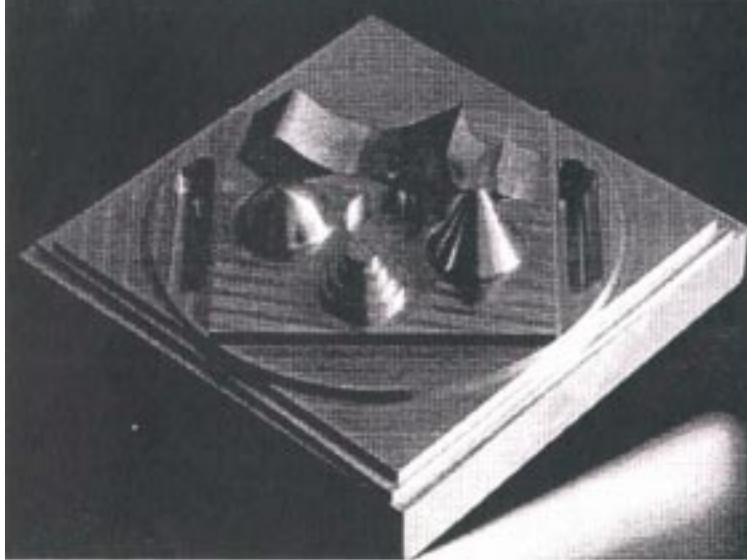


Figure 53 : Pièce-test proposée par German NC-Society

10. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons étudié les contraintes qu'impose l'UGV sur les éléments de la C.E.U. Nous avons remarqué que ce procédé est exigeant envers ces composants et que, de ce fait, ils ont dû évoluer.

Ainsi, dans notre deuxième partie, nous présentons les évolutions des outils dédiés à l'UGV. Tout d'abord, nous avons étudié les différents types de matériaux d'outil que l'on peut rencontrer dans ce domaine. Parmi ceux-ci, nous retiendrons l'apparition des polycristallins (PCBN et PCD) qui offrent de réelles améliorations de la coupe à haute vitesse. Ensuite, nous avons remarqué que la géométrie des outils a également de l'importance. D'ailleurs, cela demande (au-dessus de 25000 tr/min) un équilibrage de l'ensemble outil/porte-outil. Enfin, nous avons étudié les différents types de lubrification ou d'arrosage rencontrés en UGV avant de nous intéresser à l'aspect économique de l'outil spécifique à l'UGV.

Dans la troisième partie de ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux porte-outils et aux broches. Pour ces deux composants de la C.E.U., nous avons présenté les technologies utilisées industriellement. Nous retiendrons l'utilisation du cône porte-outil HSK (cône-face creux) en UGV (généralement au-dessus de 20000 tr/min) et le développement des électrobroches à commande par fréquence (au-dessus de 30000 tr/min) et à contrôle vectoriel (de 15000 à 30000 tr/min)

Enfin, dans la dernière partie, nous avons étudié les évolutions des composants de la machine. Tout d'abord, nous nous sommes intéressés à la structure de celle-ci. Ensuite, nous avons présenté la partie guidages et moteurs de la machine. Celle-ci est relativement importante puisqu'elle définit le comportement dynamique de la machine. En ce qui concerne les guidages, la solution de guidages à roulements précontraints (billes ou rouleaux) est souvent utilisée. Par contre, les moteurs ont énormément évolué avec l'apparition du moteur linéaire qui propose une accélération maximale de l'ordre de 10.g (soit 10 fois plus que le système vis-écrou) pour une vitesse de déplacement maximale de 100 m/min à vide (soit 2 fois plus que le système vis-écrou). Après cela, nous avons étudié les évolutions de la partie asservissements et DCN. Nous avons remarqué que ceux-ci ont dû également évoluer, notamment en précision et en vitesse. Enfin, nous nous sommes attachés à définir les moyens d'évaluer et de qualifier une machine d'UGV.

Il nous reste maintenant à étudier l'aspect gamme et CFAO en UGV. Ceci fait l'objet de notre dernier chapitre.

11. Références bibliographiques

- [16] J.MAUSHART, Le fraisage à haute vitesse – Technologie, outils et secteurs d'application, FRAISA S.A.
- [17] Philippe BAGARD, Outils coupants, conditions de coupe et stratégies en Usinage à grande vitesse des outillages : point de départ de la chaîne CFAO, Journées d'information : Usinage à Grande Vitesse des outillages, CETIM Senlis, 6 et 7 décembre 1994.
- [18] Peter RIGBY – GE Superabrasives, Les Superabrasives et la Grande Vitesse, Journées d'information : Usinage à Grande Vitesse des outillages, CETIM Senlis, 6 et 7 décembre 1994.
- [19] Techniques de l'Ingénieur, Matériaux pour outils de coupe, Techniques de l'Ingénieur, traité Mécanique et Chaleur.
- [20] D.G.FLOM, W.R.REED, High Speed Machining of cast iron with BZN Compacts, General Electric Superabrasives, 1990.
- [21] Vincent GROLLEAU, Approche de la validation expérimentale des simulations numériques de la coupe avec prise en compte des phénomènes locaux à l'arête de l'outil, Thèse Ecole Centrale de Nantes, 27 novembre 1996.
- [22] N° 691 de machines production, 15 juin 1998.
- [23] Alain AUFFRET, La micro-lubrification par le centre broche, PRECISE FRANCE S.A.
- [24] Alain AUFFRET, Broches et attachements outils à grande vitesse, Alain AUFFRET – PRECISE FRANCE S.A., Journées d'information : Usinage à Grande Vitesse des outillages, CETIM Senlis, 6 et 7 décembre 1994.
- [25] Compétence dans les broches haute fréquence pour l'UGV, FISCHER.
- [26] J.C. CRAPART, E.M.O HANOVRE 97 – “Vu pour vous à l'EMO”, Dossier technique : Synthèse des évolutions majeures des machines et outils d'usinage, CETIM – Département Production Mécanique.
- [27] Herbert SCHULZ, Hochgeschwindigkeitsfräsen Metallischer und nicht metallischer Werkstoffe
- [28] T. KOBAYASHI, I. INASAKI, H. AOYAMA, A. YUI, A. HORIKOSHI, Development of surface grinding machine with linear motor driven table system, Proceedings of the International Seminar on Improving Machine Tool Performance, 6-8 juillet 1998.
- [29] Jean Claude REBOLI, 4ème Forum découvertes – NUM L'usinage à Grande Vitesse, 20 mars 1997.
- [30] Emmanuel DUC, Usinage de formes gauches – Contribution à l'amélioration de la qualité des trajectoires d'usinage, Thèse, 9 décembre 1998.
- [31] Herbert SCHULZ, High Speed Machining needs very fast and accurate machine tools, Proceedings of the International Seminar on Improving Machine Tool Performance, 6-8 juillet 1998.

