



Information technique

La précision d'usinage des machines-outils

La productivité et la précision des machines-outils sont d'importants critères en matière de compétition. Mais l'évolution rapide des conditions de fonctionnement des machines-outils rend très difficiles les gains de productivité et l'amélioration de la précision. Pour la production des pièces, on est contraint de plus en plus à usiner de petits lots de pièces à la fois économiques et néanmoins d'une excellente précision. L'industrie aéronautique et spatiale exige à la fois une énorme puissance d'usinage pour l'ébauche des pièces et une très grande précision pour le processus de finition. Pour le fraisage des moules de haute qualité, l'ébauche doit être réalisée avec des taux élevés d'enlèvement de matière et le résultat de la finition doit donner une parfaite qualité de surface. Mais en même temps, ces opérations de contournage doivent s'effectuer à très grandes vitesses pour pouvoir respecter les faibles distances requises entre les trajectoires et ce, avec des durées d'usinage acceptables.

Les conditions de fonctionnement au niveau de la production fluctuent énormément et, par voie de conséquence, la précision thermique des machines-outils revêt une importance croissante. La stabilité thermique est rarement atteinte; c'est le cas notamment de la production de faibles lots de pièces qui impliquent des changements constants des paramètres de production. En même temps, la précision de la première pièce est déterminante pour la rentabilité des ordres de fabrication. Les perpétuels changements entre les opérations de perçage, d'ébauche et de finition contribuent à altérer la condition thermique d'une machine-outil. Pendant l'ébauche, la puissance de fraisage atteint des valeurs supérieures à 80 % tandis que les valeurs sont inférieures à 10 % lors de la finition. Les accélérations et les avances qui ont tendance à croître sont responsables de l'échauffement des vis à billes à l'intérieur des entraînements linéaires. La mesure de position dans les entraînements d'avance joue donc un rôle central dans la stabilisation du comportement thermique des machines-outils.

Stabilité thermique des machines-outils

Les solutions permettant d'éliminer sur les pièces les écarts dimensionnels d'origine thermique s'avèrent de plus en plus cruciales pour l'industrie de la machine-outil. Le refroidissement actif, les machines à structures symétriques et les mesures de température sont aujourd'hui tout à fait courants.

La dérive thermique a sa source principalement dans les axes d'entraînement qui fonctionnent avec des vis à billes. La diffusion de la température le long de la vis à billes évolue rapidement en fonction des vitesses et forces d'avance. Sur les machines-outils qui ne sont pas équipées de moteurs linéaires, les variations de longueur (100 $\mu\text{m}/\text{m}$ typ. en 20 minutes) peuvent engendrer des défauts significatifs sur la pièce.

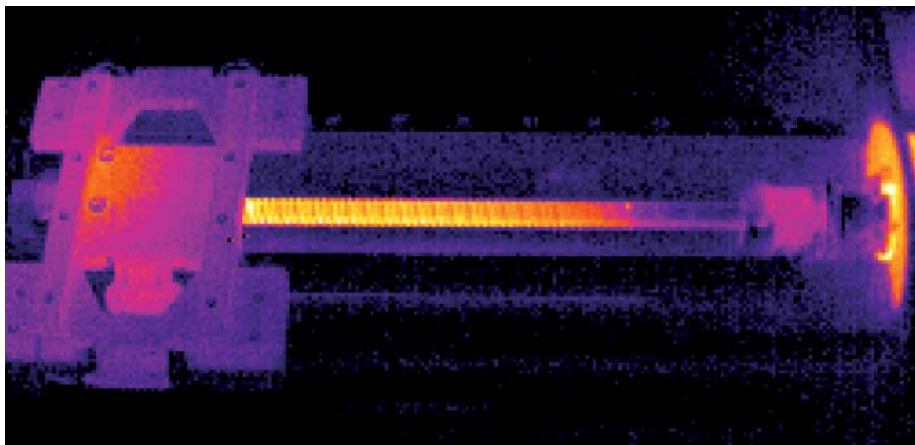


Figure 1 Echauffement d'une vis à billes lors d'une opération de fraisage ligne à une avance moyenne de 10 m/min. L'enregistrement thermographique signale des températures de 25 °C à 40 °C.

Enregistrement de position sur les entraînements

La position d'un axe d'avance CN est enregistrée soit avec la vis à billes en liaison avec un capteur rotatif, soit à l'aide d'un système de mesure linéaire.

Si la position du chariot est calculée au moyen du pas de la vis à billes et d'un capteur rotatif (figure 2, en haut), la vis à billes a dans ce cas une double fonction: En tant que système d'entraînement, elle doit transmettre d'importantes forces et en tant que composant chargé de déterminer la position, on attend d'elle des valeurs très précises ainsi qu'une reproductibilité élevée du pas de vis. Mais la boucle d'asservissement de position n'inclut que le capteur rotatif. Dans la mesure où il est impossible de compenser les altérations du mécanisme d'entraînement dues à l'usure ou à la température, on parle alors d'un fonctionnement en "semiclosed loop". Les erreurs de position des entraînements sont alors inévitables et elles peuvent affecter considérablement la qualité de la pièce.

Si l'on utilise un système de mesure linéaire pour enregistrer la position du chariot (figure 2, en bas), la boucle d'asservissement de position englobe alors tout le mécanisme d'entraînement. On parle dans ce cas de fonctionnement en "closed loop". Le jeu et les imprécisions que peuvent présenter les éléments de transmission de la machine n'influencent nullement sur la précision de l'enregistrement de position. La précision de la mesure ne dépend pratiquement que de la précision et du lieu d'implantation du système de mesure linéaire. Cette considération fondamentale vaut aussi bien pour les axes linéaires que pour les axes rotatifs. Pour ces derniers, la position peut être aussi mesurée avec un réducteur de vitesse en liaison avec le capteur rotatif d'un moteur ou un système de mesure angulaire de grande précision situé sur l'axe de la machine. Les systèmes de mesure angulaire permettent d'obtenir des précisions et une reproductibilité bien plus élevées.

Mesures annexes en "semiclosed loop"

Pour empêcher l'échauffement de la vis à billes et des éléments voisins de la machine, certaines vis à billes sont creuses pour permettre un refroidissement interne. En mode "semiclosed loop", la précision du positionnement est affectée par la dilatation thermique de la vis à billes et dépend donc de la température du liquide de refroidissement. Une augmentation de température d'1 K seulement peut induire des erreurs de positionnement jusqu'à 10 µm sur un

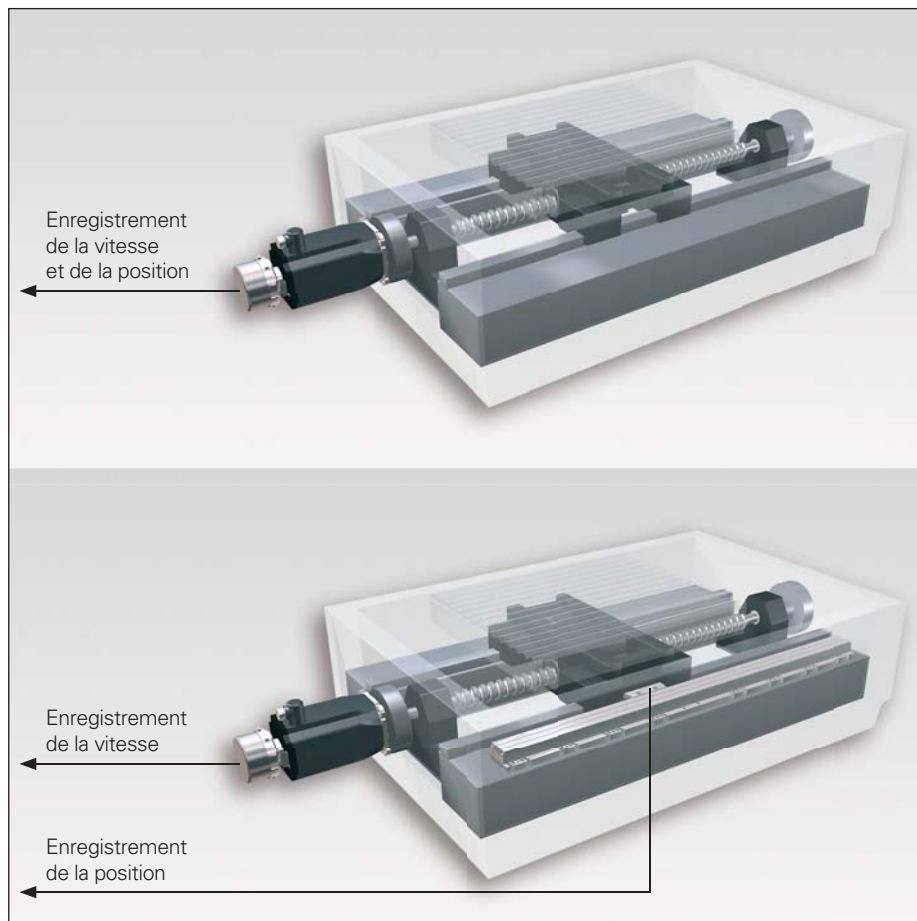


Figure 2 Asservissement de position en modes "semiclosed loop" (en haut) et "closed loop" (en bas)

déplacement de 1 m. Mais les systèmes de refroidissement usuels sont bien souvent incapables de maintenir les variations de température à des valeurs réellement inférieures à 1 K.

Pour les entraînements qui fonctionnent en "semiclosed loop", la dilatation thermique de la vis à billes est parfois approchée avec un modèle dans la commande. Dans la mesure où le profil de température en cours de fonctionnement est difficilement évaluable et où il dépend aussi d'un grand nombre de facteurs d'influence (usure de l'écrou à billes, avance, forces d'usinage, zone de déplacement utilisée, etc.), de considérables erreurs résiduelles pouvant atteindre 50 µm/m sont révélées avec cette méthode.

La vis à billes est parfois munie en ses extrémités de paliers fixes destinés à accroître la rigidité du mécanisme d'entraînement. Pourtant, même des paliers très rigides

sont incapables d'empêcher la dilatation due à l'échauffement local. Les forces générées sont considérables. Elles peuvent provoquer une déformation des configurations de paliers les plus rigides et même d'éléments de la machine. De plus, les tensions mécaniques altèrent le comportement au frottement de l'entraînement et, par là-même, affectent la précision de contourage de la machine.

Compte tenu de ces restrictions, la précision de l'entraînement qui peut être atteinte en prenant les mesures annexes citées ci-dessus n'est pas comparable au fonctionnement en mode "closed loop" avec utilisation de systèmes de mesure linéaire. En outre, les mesures annexes pour fonctionnement en mode "semiclosed loop" sont incapables de compenser les effets des altérations de pré-contrainte dues à l'usure ou les déformations du mécanisme d'entraînement.

Effet de la précision de l'entraînement sur la production des pièces

Dans l'industrie de la construction de machines, on constate une demande sans cesse croissante de faibles lots de petites pièces. La précision de la première pièce produite devient ainsi un facteur de rentabilité déterminant que les entreprises manufacturières prennent en compte. Les machines-outils produisant avec une grande précision de faibles lots de pièces sont confrontées à un réel challenge. Les perpétuels changements entre les opérations de dégauchissage de la pièce, de perçage, d'ébauche et de finition sont source de constantes altérations de la condition thermique d'une machine.

Lors de la production des pièces, les avances classiques pour l'ébauche vont de 3 m/min. à 4 m/min. tandis qu'elles sont comprises entre 0,5 m/min. et 1 m/min. pour la finition. Les déplacements en avance rapide lors des changements d'outils viennent encore accroître les vitesses moyennes de manière significative. Dans les opérations de perçage et d'alésage, les avances moyennes sont négligeables au niveau de l'échauffement des vis à billes. A cause de la forte fluctuation des avances, la diffusion de température le long des vis à billes change au cours des différentes étapes du processus. En mode "semiclosed loop", les fluctuations de la charge exercée sur la vis à billes peuvent altérer la précision de la pièce, même si celle-ci est produite par usinage intégral en un seul bridage. Pour produire des petites pièces avec précision, les machines-outils équipées de systèmes de mesure linéaire ("closed loop") sont par conséquent indispensables.

Exemple d'usinage: Production de plusieurs pièces à partir d'une pièce brute

Une pièce brute de 500 mm de longueur est tout d'abord percée puis alésée à l'alésoir sur une machine-outil. Les avances moyennes utilisées pour ces deux opérations d'usinage sont faibles, la formation de chaleur à l'intérieur des vis à billes reste négligeable. A l'étape suivante, on réalise le fraisage du contour; l'avance moyenne augmente de manière significative et, en même temps, la formation de chaleur à l'intérieur des vis à billes (figure 3).

La dilatation thermique des vis à billes engendre des écarts dimensionnels entre les motifs de perçage et de fraisage si la fraiseuse fonctionne en mode "semiclosed loop". Les écarts maximum qui sont de 135 µm sont mesurés à proximité des paliers libres de la vis à billes. En mode "closed loop", ces erreurs peuvent être intégralement supprimées (figure 4).

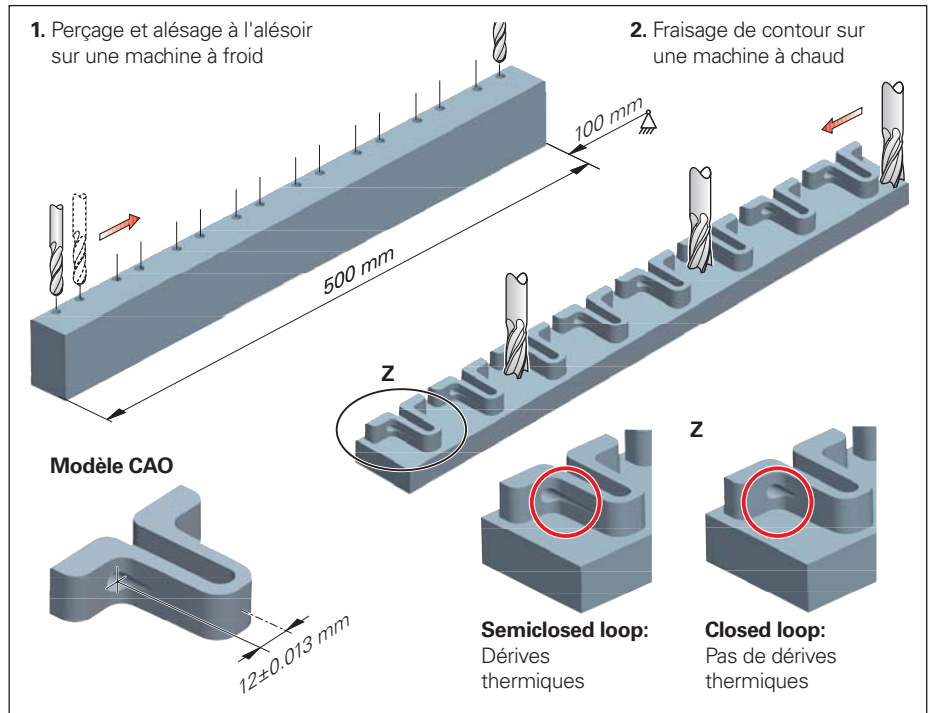


Figure 3 Effet de la précision de l'entraînement sur la production de petites pièces
 = palier fixe de la vis à billes

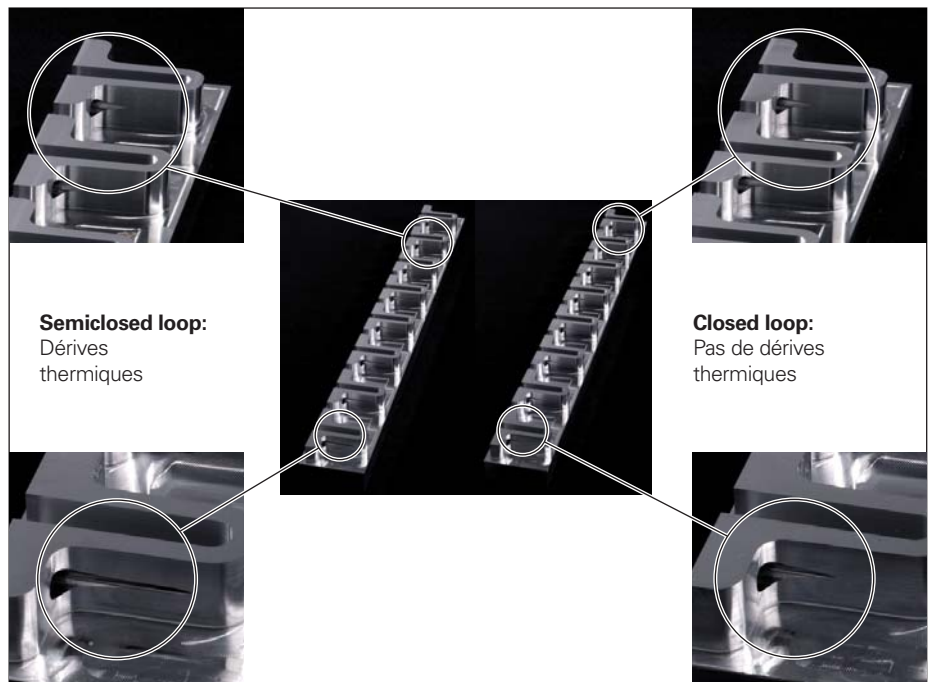


Figure 4 Effet de la précision de l'entraînement sur la production en série de petites pièces

La cote fonctionnelle entre la position du trou et la bissectrice de la pièce est de 12 mm et a une tolérance IT8 dans cet exemple. Il en résulte un écart admissible de $\pm 13 \mu\text{m}$. Lors de l'usinage en mode "closed loop", toutes les pièces sont dans

la tolérance et même bien en-deça. Les écarts mesurés en mode "semiclosed loop" peuvent atteindre 135 µm. Au lieu de la classe de tolérance IT8, la pièce n'atteint que la classe IT13.

Pièces monoblocs à haut degré d'enlèvement de matière pour l'industrie aéronautique et spatiale

Les pièces monoblocs utilisées dans l'industrie aéronautique et spatiale présentent l'avantage de pouvoir combiner de manière optimale les propriétés du matériau utilisé avec le poids minimum de la pièce. Les pièces monoblocs classiques ont un degré d'enlèvement de matière de 95 % et plus. De nos jours, les processus de fabrication sont exécutés à des avances et vitesses de coupe élevées sur des machines-outils UGV très performantes. Le bon taux d'enlèvement de matière lors de l'ébauche est très important pour la rentabilité. Mais les avances et forces d'usinage qui en résultent génèrent aussi dans les vis à billes un échauffement par friction dont il faut tenir compte. Les pertes par friction et aussi les dilatations thermiques de la vis à billes varient en cours d'usinage, par exemple en raison des avances qui diffèrent lors de l'ébauche et de la finition. Avec de faibles lots de pièces et une courte durée du cycle de fabrication, les tolérances de la pièce varient pour chaque pièce usinée en mode "semiclosed loop" (sans système de mesure linéaire). Les tolérances de fabrication prescrites peuvent ne pas être respectées compte tenu de la dilatation thermique. On peut parfaitement éviter de telles sources d'erreurs en utilisant des systèmes de mesure linéaire permettant de compenser intégralement la dilatation thermique de la vis à billes en mode "closed loop".

Exemple d'usinage: Bras de levier pour surface porteuse

La figure 5 illustre la réalisation d'un bras de levier sur lequel on doit usiner deux trous distants de 350 mm suivant la classe de tolérance IT7. Pour permettre d'évaluer la précision obtenue en mode "semiclosed loop", la fabrication de la pièce monobloc est réalisée à deux reprises sur la même pièce brute. La seconde pièce est simplement fraisée 10 mm sous la première. Entre les deux opérations d'usinage, on exécute vingt cycles d'usinage de la même pièce au dessus de la pièce brute.

En mode "semiclosed loop", le contour de la pièce comporte une arête contrairement au contour de la seconde pièce (figure 6). Lors de l'usinage, plus les entraînements s'éloignent des paliers fixes de la vis à billes et plus la dilatation thermique de la vis à billes devient sensible.

La cote fonctionnelle de 350 mm à respecter dans une classe de tolérance IT7 correspond à un écart admissible de $\pm 28 \mu\text{m}$.

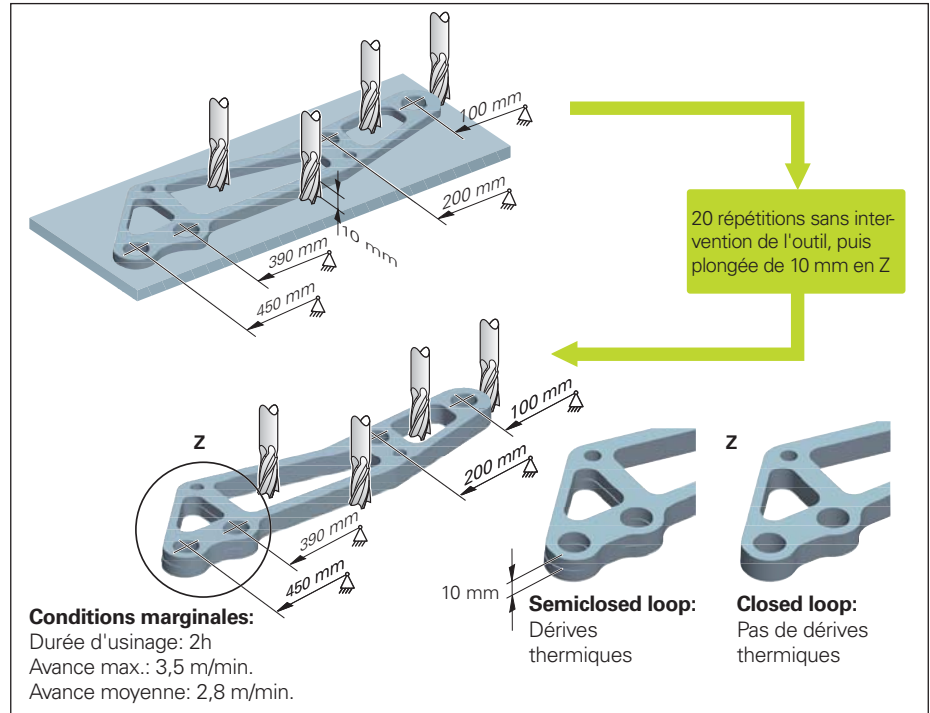


Figure 5 Réalisation du bras de levier
▲ = palier fixe de la vis à billes



Figure 6 Bras de levier, deux usinages sur une même pièce brute

Ceci n'est pas réalisable pour la seconde pièce usinée en mode "semiclosed loop". L'écart est de $44 \mu\text{m}$.

En revanche, si l'on utilise des systèmes de mesure linéaire en mode "closed loop", aucune arête n'est visible sur l'une ou

l'autre pièce. Les écarts résiduels qui sont de $10 \mu\text{m}$ en mode "closed loop" sont dus aux dérives thermiques provenant de la géométrie de la machine. L'entraxe indiqué pour les deux trous peut même être amélioré jusqu'à IT5. La précision reproductible de la première pièce est ainsi garantie.

Répercussions sur la construction de moules

La production de moules pour pièces moulées par injection est une opération lourde car elle implique une qualité de surface, y compris pour des structures très fines. De nos jours de nombreux moules sont fraisés directement de manière à s'éviter le lourd et coûteux processus d'érosion. On utilise pour cela des fraises de plus en plus petites dont le diamètre peut atteindre 0,12 mm. La construction de moules ne s'arrête pas au seul critère de la précision du moule. Elle implique également des avances élevées, y compris sur des matériaux durcis, pour raccourcir les durées d'usinage. Les durées classiques d'usinage des moules sont de l'ordre de 10 minutes à plusieurs jours. L'exécution rapide des moules ne doit pas pour autant sacrifier la précision dimensionnelle. La première et la dernière trajectoire d'usinage doivent coïncider de manière à ce que le temps gagné initialement ne soit pas ensuite perdu par des retouches fastidieuses.

L'échauffement des vis à billes sur les axes d'entraînement dépend essentiellement du profil de déplacement donné par le programme CN pour les différents axes. Il engendre des variations linéaires pouvant atteindre 150 µm/mètre dans les vis à billes. De telles conditions ne permettent pas de garantir la précision dimensionnelle en mode "semiclosed loop". Un échauffement classique de la vis à billes induit un écart de plus de 20 µm sur les bords d'un moule d'une longueur de seulement 150 mm. Par la dilatation de la vis à billes, la matrice obtenue serait si grande que les défauts ne pourraient même pas être corrigés par retouche.

Exemple d'usinage: Fraisage 3D de surfaces de forme libre

L'exemple suivant illustre l'usinage d'une forme représentant le profil caractéristique du mont Watzmann, une montagne de légendes dans les Alpes allemandes. Avec des cycles d'usinage ligne à ligne en avant et en opposition dans le sens de X, on usine une pièce de 500 mm de long avec une fraise boule de 12 mm de diamètre et à un avance max. de 4,5 m/minute. L'usinage du contour prend environ 60 minutes avec une passe en Z et Y de 0,2 mm. L'avance élevée de 4,5 m/min. et les accélérations et décélérations incessantes produisent de la chaleur dans la vis à billes et engendrent ainsi des écarts

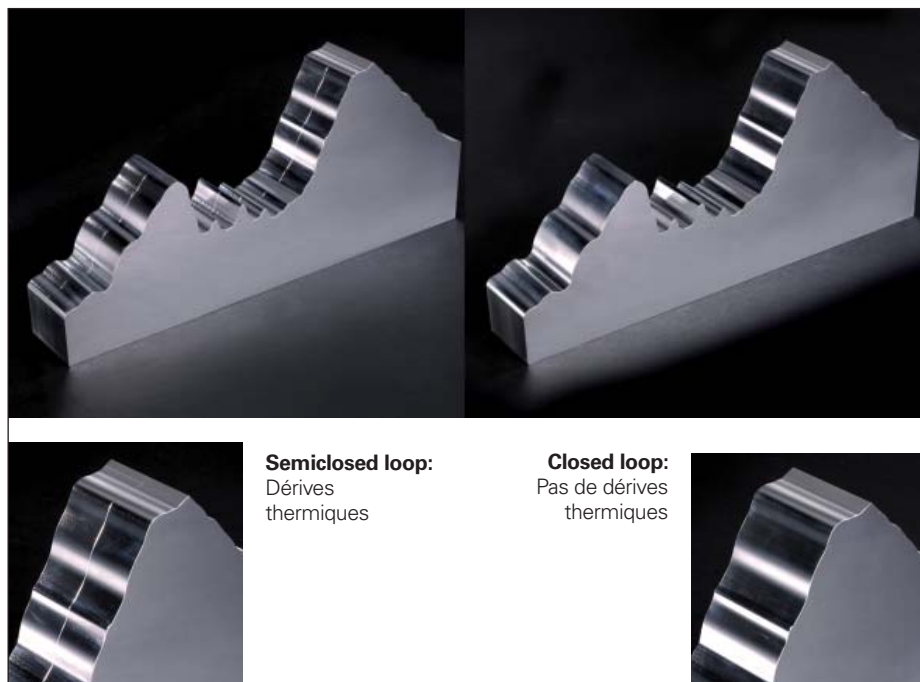


Figure 7 Profil du Watzmann restitué en formes libres

linéaires d'origine thermique de 130 µm en mode "semiclosed loop". Comme l'écart linéaire présent sur cette pièce est difficile à visualiser, on a délibérément commencé l'usinage au centre de la pièce. Les trajectoires initiale et finale sont côte à côte et révèlent nettement la dérive thermique. Plus la position sur la pièce est éloignée du palier fixe et plus la dérive thermique est importante.

Pour satisfaire aux exigences sévères de la construction de moules, il faut donc compenser la dilatation de la vis à billes en implantant des systèmes de mesure linéaire précis. La figure 7 montre le profil du mont Watzmann usiné d'une part en mode "closed loop" avec une très grande précision et une excellente qualité de surface et, d'autre part, en mode "semiclosed loop".

En résumé

Le succès de la réalisation des ordres de fabrication implique l'utilisation de machines-outils thermiquement très stables. La précision de la machine doit être préservée même si les conditions de charges qu'elle subit varient énormément. Par conséquent, les axes d'entraînement doivent engendrer la précision voulue sur toute la course, même si les vitesses et les forces d'usinage fluctuent de manière importante. La dilatation thermique à l'intérieur des vis à

billes des axes linéaires d'avance varie en fonction de la vitesse et de la charge et affecte la précision. Lors de l'usinage, des erreurs de position de 100 µm et plus peuvent être constatées dans un laps de temps de 20 minutes si la position du chariot est déterminée seulement au moyen du pas de la vis à billes et d'un capteur rotatif. Comme d'importantes erreurs au niveau de l'entraînement ne peuvent pas être compensées dans la boucle d'asservissement avec cette méthode, on parle d'un fonctionnement de l'entraînement d'avance en "semiclosed loop". La mise en œuvre de systèmes de mesure linéaire permet d'éliminer complètement cette source d'erreur. Les entraînements d'avance équipés de systèmes de mesure linéaire fonctionnent en mode "closed loop" car les erreurs émanant de la vis à billes sont prises en compte dans l'enregistrement de position et peuvent donc être ensuite compensées par la commande numérique. Les systèmes de mesure angulaire situés sur les axes rotatifs présentent les mêmes avantages car la dilatation thermique affecte également ces éléments mécaniques d'entraînement. En outre, les systèmes de mesure linéaire et angulaire garantissent la précision élevée des pièces usinées, même lorsque les conditions de fonctionnement fluctuent énormément sur les machines-outils.

Systèmes de mesure linéaire pour machines-outils

Les systèmes de mesure linéaire utilisés pour l'asservissement de position sont indispensables pour obtenir une grande précision de positionnement sur les machines-outils. Ils enregistrent directement la position effective sur l'axe. Les éléments mécaniques de transmission n'influent donc nullement sur l'enregistrement de la position: Les erreurs cinématiques tout comme les écarts d'origine thermique ou engendrés par d'autres forces sont mesurés par le système de mesure linéaire et pris en compte dans la boucle d'asservissement de position. On peut donc ainsi éviter toute une série de sources d'erreurs:

- Erreurs de positionnement dues à la dilatation de la vis à billes
- Erreurs à l'inversion
- Erreurs de déformation du mécanisme d'entraînement par des forces d'usinage
- Erreurs cinématiques dues aux défauts de pas de la vis à billes

Les systèmes de mesure linéaire sont par conséquent indispensables aux machines exigeantes au niveau de la **précision du positionnement** et de la **vitesse d'usinage**.

Les systèmes de mesure linéaire pour machines-outils à CN sont utilisables universellement. Ils sont conçus pour les machines et équipements avec axes asservis – par exemple, les fraiseuses, centre d'usinage, perceuses, tours et rectifieuses.

Le bon comportement dynamique des systèmes de mesure linéaire, leur grande vitesse de déplacement et d'accélération dans le sens de la mesure les destinent aussi bien aux axes conventionnels à haute dynamique qu'aux entraînements directs.

	Classe de précision	Période de signal	Longueur de mesure	Interface	Type
Systèmes de mesure linéaire avec règle de mesure de petit profil					
Absolus	$\pm 5 \mu\text{m}; \pm 3 \mu\text{m}$	–	jusqu'à 2040 mm ¹⁾	EnDat 2.2	LC 483
Incémentaux	$\pm 5 \mu\text{m}; \pm 3 \mu\text{m}$	4 μm	jusqu'à 1220 mm	$\sim 1 V_{CC}$	LF 481
	$\pm 5 \mu\text{m}; \pm 3 \mu\text{m}$	20 μm	jusqu'à 2040 mm ¹⁾	$\sim 1 V_{CC}$	LS 487
Systèmes de mesure linéaire avec règle de mesure de gros profil					
Absolus	$\pm 5 \mu\text{m}; \pm 3 \mu\text{m}$	–	jusqu'à 4240 mm	EnDat 2.2	LC 183
Incémentaux	$\pm 3 \mu\text{m}; \pm 2 \mu\text{m}$	4 μm	jusqu'à 3040 mm	$\sim 1 V_{CC}$	LF 183
	$\pm 5 \mu\text{m}; \pm 3 \mu\text{m}$	20 μm	jusqu'à 3040 mm	$\sim 1 V_{CC}$	LS 187
	$\pm 5 \mu\text{m}$	40 μm	jusqu'à 30040 mm	$\sim 1 V_{CC}$	LB 382

¹⁾ avec rail de montage pour longueur de mesure supérieure à 1 240 mm



LC 483



LC 183



LB 382

HEIDENHAIN

HEIDENHAIN FRANCE sarl

2 avenue de la Cristallerie

92310 Sèvres, France

☎ 0141 143000

FAX 0141 143030

E-Mail: info@heidenhain.fr

www.heidenhain.fr

Autres informations:

- Catalogue *Systèmes de mesure linéaire pour machines-outils à commande numérique*
- Information technique *La précision des entraînements sur les machines*

