

Zeitschrift:	Bulletin technique de la Suisse romande
Band:	83 (1957)
Heft:	12
Artikel:	La précision d'usinage sur les machines-outils plus spécialement sur les machines à pointer
Autor:	Mottu, André
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-62786

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 27.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

LA PRÉCISION D'USINAGE SUR LES MACHINES-OUTILS PLUS SPÉCIALEMENT SUR LES MACHINES À POINTER

par ANDRÉ MOTTU, ingénieur E.P.Z. - S.I.A.

1. Introduction

La précision d'usinage sur les machines-outils dépend d'un grand nombre de facteurs dont les caractères généraux se retrouvent sur presque tous les types de machines.

A l'heure actuelle, beaucoup de constructeurs de machines-outils annoncent des précisions très élevées. Or, l'usager constate, lors des travaux qu'il exécute sur sa machine, des résultats qui s'éloignent fortement de ceux annoncés par le constructeur. En effet, si ce dernier peut garantir certaines valeurs de la précision des machines qu'il fabrique, il se limite à quelques éléments seulement sans tenir compte de facteurs perturbateurs qui dépendent des conditions d'emploi, par exemple : le poids de la pièce qu'on fixe sur la machine ou les variations de température de l'atelier dans lequel la machine est installée.

L'étude qui suit a pour but de rendre attentifs les usagers des machines-outils sur le grand nombre de facteurs qui interviennent pour obtenir la précision requise sur des pièces usinées.

Sur toutes les machines-outils, on peut grouper les diverses erreurs qui interviennent lors d'un usinage en plusieurs catégories essentielles, à savoir :

- erreurs dues à l'imprécision de l'organe qui mesure les déplacements ou les mouvements d'un élément mobile (table, coulisseau, broche, etc.).
- erreurs géométriques de la machine à vide, c'est-à-dire lorsque le poids de la pièce en usinage et les efforts de coupe sont nuls.
- erreurs géométriques additionnelles provenant de l'influence du poids de la pièce ainsi que des efforts de coupe.
- erreurs provenant des variations de la température, aussi bien du local dans lequel la machine est installée que celles provoquées par les échauffements locaux inévitables de la machine.
- erreurs provenant de l'usure provoquée avec le temps par les frottements et dont toute machine souffre plus ou moins après un certain nombre d'années de service.

L'analyse de l'influence de ces divers facteurs peut difficilement se faire d'une façon très générale, car elle serait ou incomplète ou trop longue. Nous nous proposons, dans l'étude qui suit, d'analyser plus spécialement les erreurs et les éléments qui jouent un rôle perturbateur lors de l'usinage sur machines à pointer afin de donner un exemple concret.

L'intérêt de l'étude des erreurs d'usinage sur machines à pointer provient, d'une part, du fait que l'on recherche sur ces machines la plus grande précision possible et, d'autre part, du fait qu'elles comportent généralement des organes de mesure, des dispositifs pour assurer

l'exactitude géométrique des organes définissant ses coordonnées et des dispositifs pour la soustraire aux influences des variations de température qui sont tous particulièrement développés. En outre, elle permet de montrer de quelle manière les usagers peuvent se faire une idée plus claire de la précision d'usinage qu'ils peuvent espérer atteindre pour leurs fabrications.

2. Erreurs des organes de mesure

Sur les machines à pointer, on rencontre essentiellement deux types d'organes de mesure, d'une part, la vis mesurante qui sert également à déplacer un coulisseau ou un plateau tournant et, d'autre part, le système de mesure optique des déplacements qui est constitué par une règle de précision ou un limbe divisé et un microscope ou un projecteur, tous deux équipés de micromètres ou de dispositifs permettant la lecture des sous divisions des graduations de la règle ou du limbe.

Il convient maintenant de définir avec exactitude les diverses causes d'erreurs de l'organe de mesure.

21. Précision de lecture

- Pour la vis mesurante, c'est l'exactitude avec laquelle on peut déterminer la position du tambour divisé indiquant la position angulaire de la vis par rapport à un vernier, étant entendu que la lecture du nombre de tours de la vis se fait au moyen d'une échelle ou par tout autre dispositif remplissant cette fonction. Pour les machines à pointer, cette lecture est généralement de 0,001 de mm. Il s'agit, pour les machines équipées de vis au pas métrique, de la précision avec laquelle on peut lire la position de l'organe de mesure qui détermine les chiffres de la coordonnée en dessous des millimètres entiers.
- Pour les machines optiques, il s'agit de l'exactitude avec laquelle on peut lire la position du micromètre optique servant à exécuter les sous-divisions de la graduation de la règle de précision. Les micromètres avec déplacement du repère sont pourvus généralement de divisions permettant de lire 0,001 mm. En revanche, lorsque le micromètre ne possède pas d'organe de déplacement mais comporte des sous-divisions fixes échelonnées aussi finement que possible, la précision de lecture est égale à la valeur de chacun des intervalles des sous-divisions. Ces valeurs sont généralement, sur les machines à pointer, de l'ordre de 2 à 5 μ .

22. Précision de répétition

Nous entendons par précision de répétition, la tolérance à l'intérieur de laquelle le réglage d'une seule et même coordonnée peut être répété un grand nombre

de fois. Cette précision de répétition correspond donc à la dispersion des points d'arrêt dans une seule et même position. Elle a approximativement l'allure d'une courbe de Gauss et la distance des points extrêmes est la mesure du critère de dispersion. Elle est totalement indépendante des erreurs soit de la vis, soit de la graduation de la règle. Du point de vue pratique, elle ne donne aucune garantie pour la précision des déplacements des organes mobiles et ne correspond pas à un critère utile pour l'usager de la machine.

- Pour les machines à vis, elle dépend de la dimension de cette dernière par rapport à l'organe de déplacement (table, coulisseau, etc.), de la rigidité de sa butée, du jeu entre l'écrou et la vis. En effet, si la vis est trop faible, le réglage est délicat car, par suite de son élasticité et du fait des variations du frottement, la table ou le coulisseau avance par sauts brusques et non de manière parfaitement régulière.
- Pour les machines optiques, elle dépend de la netteté des images des traits de la graduation visés par un microscope ou projetés sur un écran et de la forme du repère. Ce dernier est constitué le plus souvent par une ou plusieurs paires de traits qui encadrent l'image de l'un des traits de la graduation. Cette méthode permet une grande exactitude car l'œil humain est très sensible à la dissymétrie.

23. Erreurs de la vis-mère ou de la graduation des règles lues optiquement

Les erreurs de la vis-mère ou de la graduation des règles ou erreurs propres de l'organe de mesure peuvent se définir de deux manières.

La première, selon la figure 1, et qui est généralement admise, prend pour tolérance de l'erreur propre de l'organe de mesure l'écart en plus ou en moins par rapport à la valeur théorique de la distance. Cette erreur peut donc être soit positive, soit négative. Il en résulte aussi que l'erreur de distance entre deux positions peut être le double de la tolérance admise comme imprécision de l'organe de mesure.

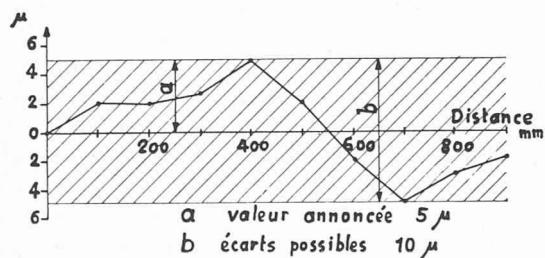


Fig. 1. — Exemple représentant les erreurs d'une vis-mère ou les écarts de position de la graduation d'une règle visée optiquement correspondant à la définition des écarts par rapport à la valeur théorique.

L'autre version, correspondant à la figure 2, donne comme définition de la tolérance, d'une part, que l'erreur est l'écart par rapport à la valeur théorique, mais que, d'autre part, l'erreur de distance entre deux points quelconques ne dépasse pas la valeur de la tolérance. Cette définition signifie que l'exactitude de

l'organe de mesure peut s'écartez de sa valeur théorique de la même quantité que selon la première définition, mais dans un sens seulement. Au point de vue pratique, elle correspond à ce que recherche l'usager des machines à pointer qui désire connaître les erreurs maximum de distance entre les alésages qu'il exécute et leurs erreurs de position par rapport à la valeur théorique.

Il convient donc toujours de faire préciser au constructeur de machines si les indications de précision correspondent à la première ou à la seconde définition pour les déplacements des organes mobiles, puisque les erreurs, si l'on admet la première version, sont le double de celles admises lorsqu'on fait usage de la seconde définition.

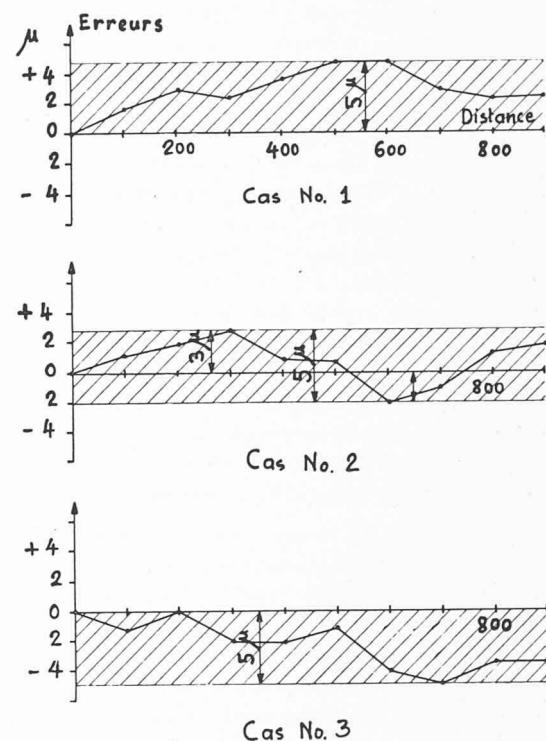


Fig. 2. — Exemple représentant les erreurs d'une vis-mère ou les écarts de position de la graduation d'une règle visée optiquement, correspondant à la double définition des écarts par rapport à la valeur théorique et des écarts maxima entre deux points quelconques.

Cas no 1 : erreur positive. — Cas no 2 : erreur répartie. — Cas no 3 : erreur négative.

24. Erreurs du tambour et du vernier de la vis-mère

L'échelle de la relation entre le déplacement de l'écrou et celui du tambour est donnée par la relation :

$$E = \frac{\pi \cdot d}{p}$$

d = diamètre du tambour

p = pas de la vis

Lorsque le tambour d'un diamètre de 159 mm est monté sur une vis ayant un pas de 5 mm, l'échelle est de :

$$E = \frac{\pi \cdot 159}{5} = 100.$$

Ceci exprime que pour un déplacement de 1 mm de l'écrou ou de la vis, le tambour se déplace de 100 mm par rapport au vernier. Si l'on admet une erreur de division de 0,1 mm sur la graduation du tambour on a un écart de 0,001 mm sur la position du déplacement de l'écrou. Or, il est beaucoup plus facile d'exécuter la graduation d'un tambour avec des erreurs inférieures à 0,1 mm que de fabriquer une vis d'une certaine dimension avec des erreurs de pas inférieures à 0,001 mm.

C'est pourquoi, pratiquement, les erreurs du tambour et du vernier peuvent être considérées comme négligeables. C'est aussi la raison pour laquelle il est parfaitement inutile d'augmenter exagérément le diamètre du tambour de lecture en cherchant à réduire les erreurs des déplacements, car celles de la vis ou de l'écrou sont prépondérantes, et de beaucoup, par rapport à celles du tambour. Cette méthode ne permet que d'accroître la facilité de lecture.

25. Erreurs dues à l'échauffement de la vis

Sur les machines à vis, lorsque celle-ci a la double mission, d'une part, de mesurer la position d'un coulisseau ou d'une table, par exemple, et, d'autre part, d'en assurer le déplacement, divers éléments jouent encore un rôle important, en particulier l'échauffement de la vis sous l'effet du déplacement rapide du coulisseau. Il provoque un allongement qui souvent n'est pas négligeable.

Cet allongement provient de l'accroissement de la température des flancs des filets de la vis surtout en raison de la viscosité de l'huile qui assure le graissage entre la vis et son écrou. Les efforts pour déplacer les organes jouent également un rôle qui n'est pas négligeable, mais il convient toutefois d'observer qu'une vis et un écrou correctement ajustés, même sollicités par des efforts réduits, s'échauffent lorsque leurs déplacements relatifs sont rapides.

En effet, si le constructeur exécute la vis et l'écrou avec des jeux très faibles pour assurer une bonne stabilité des organes et réduire l'erreur de dispersion (ce qui revient à accroître la précision de répétition), les pressions internes du film d'huile, lorsque les mouvements relatifs des surfaces sont rapides, provoquent un échauffement d'une certaine importance. Si les jeux entre la vis et l'écrou sont exagérés, l'échauffement sera plus faible mais la précision de répétition diminuera fortement.

Ce qui est particulièrement dangereux lors de l'échauffement de la vis, c'est qu'elle ne reprend la température ambiante que très lentement. On peut calculer la température T_c d'un corps ayant une température initiale T_0 , placé pendant une durée t dans un milieu à une température T , à l'aide de la formule :

$$T_c = (T_0 - T) e^{-\frac{S\alpha}{Gc} \cdot t}$$

S désigne la surface de contact entre le corps et le milieu (m^2)

α désigne le coefficient de passage de la chaleur ($kcal m^{-2} h^{-1} deg^{-1}$)

G désigne le poids de la pièce (kg)

c désigne la chaleur spécifique ($kcal kg^{-1} deg^{-1}$).

Si, par exemple, une vis-mère en acier de 1000 mm de long ayant un filet trapézoïdal taillé sur un diamètre extérieur de 60 mm, s'échauffe de $1^\circ C$, sans que la température ambiante varie, elle s'allonge de 0,0115 mm et elle devra se refroidir pendant 2 heures et 49 minutes pour que sa longueur ne soit plus que de 2 microns supérieure à sa longueur initiale (fig. 3).

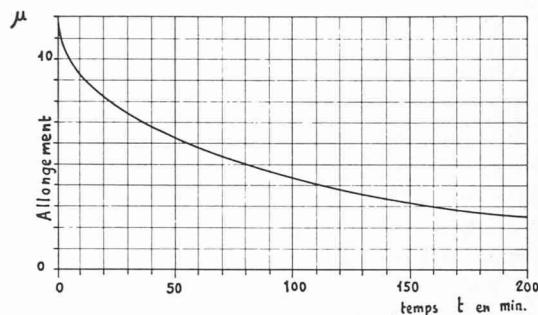


Fig. 3. — Allongement résiduel d'une vis-mère de 1000 mm de long et de 60 mm de diamètre avec filet trapézoïdal après un échauffement initial de $1^\circ C$ lui conférant un allongement de $11,5 \mu$.

26. Erreurs dues aux variations d'épaisseur des films d'huile

La vis-mère est pratiquement toujours associée à un écrou. Or, pour effectuer un déplacement ou une mesure, on tourne soit l'écrou, soit la vis. L'huile qui se trouve sur les filets s'écrase de façon inégale sur les deux flancs suivant le sens et la grandeur de l'effort ainsi que la vitesse relative entre la vis et l'écrou. En effet, le frottement sur les glissières entre la table et le bâti, ou entre le coulisseau porte-broche et la traverse pour les machines à pointer à deux montants, varie fortement selon l'amplitude des mouvements. Il en résulte des inégalités importantes des efforts à fournir entre la vis et l'écrou ; elles provoquent des changements de l'épaisseur des films d'huile, d'une part, entre la vis et son écrou et, d'autre part, dans les butées, et engendrent des erreurs de mesure.

Si la vitesse est élevée, l'écrou tend à se centrer sur les filets de la vis par suite de la pression interne des films d'huile, alors que si la vitesse est faible, l'écrou tend à être décalé par rapport au filetage dans le sens inverse à l'effort fourni. Enfin, en raison du fait que l'opérateur ne termine jamais les réglages de la machine dans des conditions rigoureusement identiques et que les pressions internes des films d'huile ne s'établissent pas instantanément, on constate des erreurs de position, faibles il est vrai, mais qui n'échappent pas à un examen minutieux de la machine. Il en est de même des butées qui lient la vis ou l'écrou aux organes qu'ils doivent mouvoir. Là encore, les variations d'épaisseur des films d'huile en fonction de la vitesse sont loin d'être totalement négligeables.

Ces deux éléments, inégalité des efforts et variations de la vitesse, tendent tous deux à provoquer des erreurs d'une certaine importance dues aux films d'huile.

27. Erreurs du micromètre optique

Sur les machines équipées d'un système de mesure optique, les sous-divisions de la graduation sont généralement lues au moyen d'un micromètre optique qui déplace un repère.

La figure 4 représente schématiquement trois solutions utilisées actuellement sur diverses machines à pointer. Dans la première, les erreurs de la vis micrométrique interviennent pour 1/5 de leur valeur effective car le grossissement de l'objectif est de 5 fois, alors que, grâce à l'oculaire ayant un grossissement de 8 fois, l'ensemble de la lecture s'effectue avec un grandissement de 40 fois. Les conditions, au point de vue de l'influence des erreurs, sont exactement les mêmes pour la seconde solution, la différence essentielle résidant dans le fait que l'oculaire est positif et permet la projection sur un écran. En revanche, dans la troisième solution, à projection directe, les erreurs de la vis micrométrique, qui déplace l'écran muni d'un repère, n'interviennent que pour 1/40 de leur valeur effective.

Il convient donc de choisir de préférence cette solution aux deux autres car dans ce cas les erreurs du micromètre sont pratiquement négligeables.

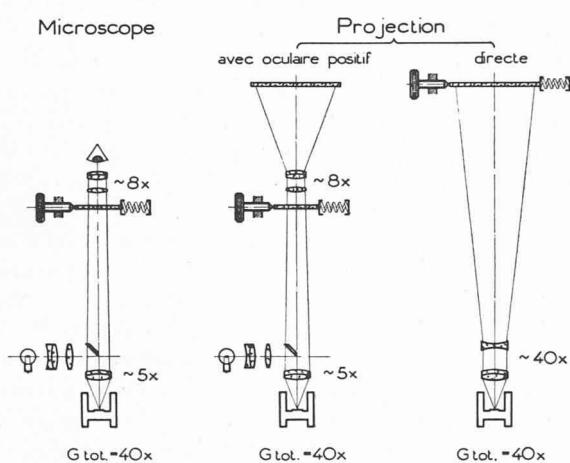


Fig. 4. — Schémas optiques d'un microscope et de systèmes à projection destinés à la lecture de la position des traits d'une règle de précision, le grossissement total, 40 fois, est le même dans les trois cas mais l'erreur due au micromètre est la plus faible dans le cas de la projection directe.

Certaines machines sont équipées d'un écran fixe comportant un grand nombre de sous-divisions et échelonnées aussi finement que possible pour obtenir une précision de lecture convenable. Dans ce cas, c'est l'erreur du réticule qui intervient, divisée par le grossissement avec lequel les traits de la graduation sont projetés à son niveau. Mais il ne faut pas croire que le fait d'équiper un système optique avec un réticule fixe réduise à zéro les erreurs du micromètre optique, car un réticule portant de nombreuses divisions est plus difficile à fabriquer qu'un réticule simple.

3. Erreurs géométriques de la machine à vide

Contrairement à ce que certains usagers de machines-outils semblent croire, il ne suffit pas d'équiper une machine-outil quelconque avec des dispositifs de mesure très précis pour obtenir des usinages exacts. En effet, les erreurs géométriques de la machine jouent un rôle très important et l'on ne saurait le négliger sans aller au-devant de grandes désillusions, car il est pratiquement impossible de respecter lors de la construction les principes de base de la métrologie de haute précision.

D'autre part, il ne nous est pas possible d'étudier de manière détaillée toutes les erreurs géométriques des machines à pointer et nous nous contenterons d'en analyser les éléments principaux, c'est-à-dire ceux que l'on retrouve aussi bien sur les machines équipées de un ou de deux montants.

Enfin, nous analyserons dans un autre chapitre les erreurs géométriques qui proviennent de l'influence des efforts de coupe et de ceux résultant du poids de la pièce en travail.

31. Erreurs de rectitude des glissières

Si l'on analyse les erreurs géométriques de la machine, on constate que l'un des éléments comprend les erreurs de rectitude des glissières. En effet, les déformations des guidages ont une influence directe, d'une part, sur la distance des axes des alésages et, d'autre part, sur le parallélisme des alésages entre eux.

Tout bâti se déforme dans le plan vertical sous les effets du déplacement de la table et de la charge qu'on y fixe. L'erreur qui résulte dépend, d'une part, de la différence des angles que la table prend pour les diverses positions qu'elle occupe et, d'autre part, de la hauteur du plan d'usinage par rapport à l'organe de mesure.

La figure 5 montre clairement que la valeur de l'erreur se calcule au moyen de la formule

$$\Delta m = \Delta\alpha \cdot L$$

où Δm = erreur de distance

$\Delta\alpha$ = écart angulaire de la table en radians

L = distance entre le plan de mesure et le plan d'usinage.

Quoique ces différences semblent faibles, ces erreurs jouent cependant un rôle très important. En effet, si on admet que L soit égal à 500 mm et que l'erreur d'angle soit de 2" seulement, l'erreur de l'entraxe prend déjà une valeur de 5 μ . D'autre part, une machine ayant une rectitude des glissières de 2" est déjà d'une qualité exceptionnellement bonne.

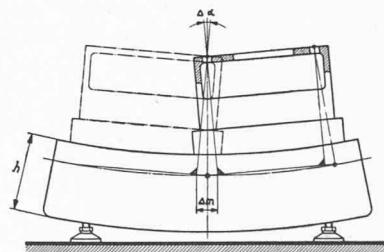


Fig. 5. — Représentation schématique, dans le plan vertical, de l'influence d'un défaut de rectitude d'un bâti de machine-outil.

Les erreurs de rectitude dans le plan horizontal jouent également un rôle qui n'est pas négligeable non plus et se calculent suivant les mêmes principes que plus haut. En admettant que l'organe de mesure soit situé au centre de la table, par exemple, et que la distance a soit 250 mm alors que les erreurs de rectitude sont de 2", l'écart de distance entre les trous situés au haut et au bas de la figure 6 est de 5 μ .

Comme il est évident que ces erreurs peuvent dans certains cas s'additionner, on voit que l'on peut avoir des écarts beaucoup plus importants que ceux auxquels l'usager s'attend.

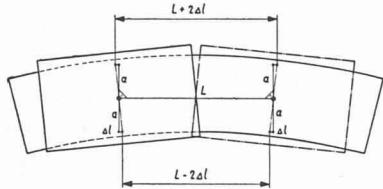


Fig. 6. — Représentation schématique, dans le plan horizontal, de l'influence d'un défaut de rectitude d'une machine-outil.

32. Erreurs de perpendicularité des organes représentant les axes des coordonnées

L'un des éléments qui affectent l'exactitude des machines à pointer réside dans le défaut de perpendicularité des mouvements de la table et de son coulisseau pour les machines monocoulisseau et de la table et du chariot porte-poupée pour les machines à deux montants.

Même si l'exécution des glissières est correcte, on observe, si elles ne sont pas largement dimensionnées, des erreurs qui proviennent du fait que l'organe de déplacement n'est généralement pas situé au centre de poussée des frottements sur les glissières; il existe un couple qui tend à faire appuyer les organes de guidage sur un côté ou sur l'autre de la glissière en Vé, suivant le sens du mouvement, et provoque une très légère rotation de l'organe que l'on déplace parce que les films d'huile s'écrasent de manière inégale sous l'effet des pressions variables. Ce phénomène existe aussi sur les machines dont les glissières sont montées sur des rouleaux ou des billes lorsque leurs diamètres sont faibles. Il faut, en effet, se rappeler que les pressions spécifiques, au contact d'une bille et d'une glissière, par exemple, varient avec le cube du diamètre.

33. Perpendicularité entre la broche et la table

Il est évident que la broche doit être parfaitement perpendiculaire à la surface de la table. Les erreurs peuvent se mesurer facilement en plaçant un micro-indicateur sur un bras de levier fixé à la broche. Mais cette condition ne suffit pas car il faut encore que le mouvement vertical du coulisseau ou du fourreau porte-broche soit perpendiculaire à la table. En effet, si l'axe de ce dernier ne coïncide pas avec celui de la broche, par suite de défauts de concentricité des chemins de roulements et de leurs logements, par exemple, on observe des erreurs de position des alésages s'ils sont exécutés à des niveaux différents et des défauts de perpendicularité qui ne sont pas négligeables.

4. Erreurs géométriques de la machine à pointer en charge

Les machines à pointer permettent de faire des usinages précis et prennent des dimensions de plus en plus grandes. Elles admettent donc des pièces dont le poids est important par rapport à leurs dimensions générales. Cette tendance résulte du fait que la construction aéronautique requiert des pièces dont les formes géométriques doivent être très exactes et dont les dimensions s'accroissent par suite de l'augmentation des puissances elles-mêmes nécessaires, en raison des gains de vitesse que l'on cherche à atteindre.

D'autre part, pour que les usinages soient exécutés rapidement, il faut que la broche porte-outil soit très puissante, d'où il résulte des efforts qui tendent à déformer la machine.

Pour permettre une étude plus aisée, nous considérerons les efforts verticaux dans le sens de l'axe de la broche et ceux qui résultent des efforts horizontaux exercés par l'outil lors de l'usinage.

Si ces erreurs sont souvent difficiles à mesurer, elles n'en sont pas moins néfastes pour l'obtention d'un travail précis. Il est donc certain qu'il faut que la machine soit très rigide et subisse un minimum de déformations sous l'effet conjugué du poids de la pièce et des efforts de coupe. En outre, les vibrations d'usinage, qui souvent dans le cas d'alésages longs limitent la vitesse de coupe, n'apparaissent qu'à une vitesse beaucoup plus élevée sur une machine bien étudiée au point de vue de sa rigidité.

L'exposé des paragraphes qui suivent montre l'importance qu'il convient d'apporter à l'étude du choix d'une machine à pointer, car ce n'est pas seulement la qualité du dispositif de mesure qui intervient mais aussi la rigidité de l'ensemble sous l'effet du poids des pièces et des efforts d'usinage.

41. Défaut de rectitude des glissières dû au poids de la pièce

Dans le plan horizontal, le fait de charger une table avec une pièce relativement lourde n'a pratiquement pas d'influence sur la rectitude des glissières. Les défauts dus à une exécution plus ou moins soignée se maintiennent.

En revanche, dans le plan vertical, les erreurs peuvent atteindre des valeurs élevées si le bâti ou le chariot sur lequel la table se déplace manque de rigidité.

En effet, si l'on compare les machines à pointer à deux colonnes avec celles qui n'en ont qu'une et possèdent un coulisseau intermédiaire qui supporte la table (fig. 7), on constate généralement que la hauteur de la section qui s'oppose au fléchissement est d'environ 2,5 fois plus forte pour les premières que pour les secondes. Or, les valeurs des angles pris par la table et sa charge lorsqu'elle passe d'une extrémité à l'autre de sa course, s'expriment à l'aide d'une formule qui contient au dénominateur la valeur du moment d'inertie de la section considérée. Ce dernier est proportionnel au cube de la hauteur du profil des sections sollicitées. On voit donc que les erreurs d'angle, dans le cas de la machine à deux colonnes et bâti de section 2,5 fois plus haute que la machine monocoulisseau,

sont de 15,6 fois moins élevées que celles de la machine monocolonne. Ce calcul suppose, bien entendu, que le bâti qui supporte le coulisseau guidant la table ne subit aucune déformation. D'autre part, même en répartissant les dimensions des divers éléments pour avoir une hauteur de la section qui s'oppose au fléchissement du bâti de la machine monocolonne égale à la moitié de celle du bâti de la machine à deux colonnes, les déformations sont encore 8 fois plus fortes sur la machine monocolonne.

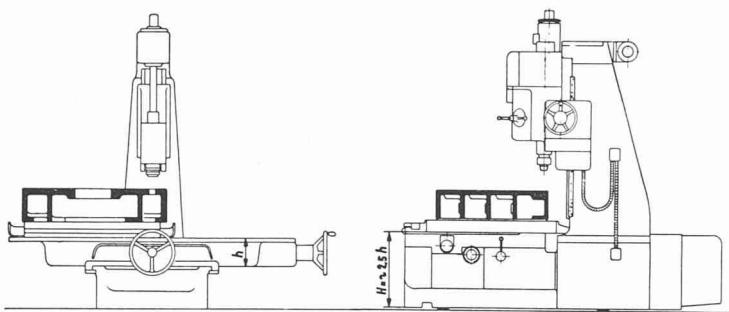


Fig. 7. — Dessin représentant, à gauche, la vue de face d'une machine à pointer monocolonne et particulièrement le chariot porte-table et, à droite, une vue de profil d'une machine à pointer à deux montants.

42. Défauts de perpendicularité des organes représentant les axes de coordonnées

Les inconvénients résultant, ainsi que nous l'avons décrit au paragraphe 32, du fait que l'organe de déplacement n'est pas situé au centre de poussée des frottements sur les glissières se trouvent fortement accrus par l'augmentation due au poids de la pièce en travail.

43. Erreurs dues à l'effort axial de la broche

Pour nous rendre compte de l'amplitude des déformations sous l'effet d'un effort axial dans la broche, lors du perçage, des travaux d'alésage ou du fraisage, il faut se reporter à la figure 8 qui représente, à gauche, une machine monocolonne et, à droite, une machine à deux montants.

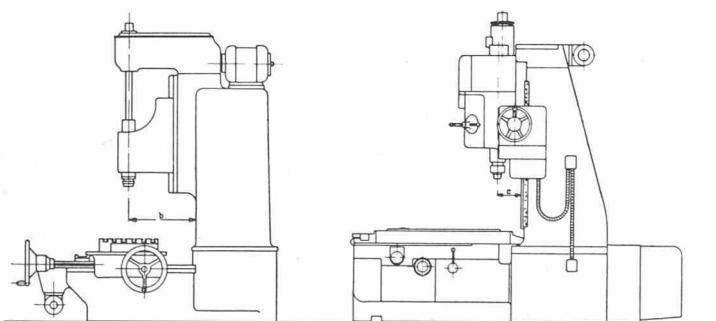


Fig. 8. — Dessin représentant, à gauche, une vue de profil d'une machine à pointer monocolonne et, à droite, une machine à pointer à deux montants.

Dans le cas de la machine monocolonne, la flèche, sous un effort vertical de bas en haut, comprend la somme :

- de la flèche du bras de la poupée ayant une longueur b
- de la flèche due au couple exercé sur le montant.

Dans le cas de la machine à deux montants, la flèche, sous le même effort axial, comprend :

- d'une part, la flèche de la traverse mobile appuyée à ses deux extrémités sur les montants et dont la longueur est égale ou inférieure à $2b$; il en résulte que cette flèche est au maximum $1/6$ de la valeur de la flèche du bras de la machine monocolonne car, pratiquement, les sections ont des profils identiques au point de vue de la résistance des matériaux;
- d'autre part, la flèche due au couple exercé sur les montants, qui est inférieure au cas précédent, car la grandeur du couple est réduite parce que la distance entre l'axe de la broche et le centre des montants est plus petite et parce que la section de deux montants est plus forte que celle d'un seul montant;
- enfin, la flèche résultant de la flexion due au couple qui s'exerce avec le bras de levier c et qui est pratiquement négligeable par rapport à celle du couple exercé avec le bras de levier b puisqu'elle est proportionnelle au cube de ces valeurs. En effet, la valeur de c est inférieure à $1/3 b$.

La somme de ces trois flèches est donc beaucoup plus petite que la somme des deux flèches précédentes, ce qui explique le fait que les machines à deux montants accusent sous l'effort vertical de perçage, d'alésage ou de fraisage, des déformations bien moindres que les machines à un seul montant.

Outre ces flèches, il faut encore considérer que la direction des perçages ou des alésages ne sera plus perpendiculaire à la surface de la table par suite des inclinaisons que prend l'axe de la broche sous l'effet de l'effort vertical.

Lors du perçage, l'effort vertical de bas en haut dépasse couramment 1000 kg. Cette indication montre que la valeur des flèches ne saurait être négligée sous le prétexte que les efforts axiaux sont faibles.

44. Erreurs dues aux efforts perpendiculaires à l'axe de la broche

Tant que les machines à pointer n'ont été utilisées que pour percer et aléser, ces erreurs ont pu être négligées. A l'heure actuelle, il n'en est plus de même car la production exige que l'on puisse effectuer également des fraisages importants, afin de dégrossir et finir les pièces en ne les bridant qu'une seule fois sur la table.

Nous ne pouvons pas, dans le cadre de cette étude, examiner tous les cas qui se présentent, ils sont trop nombreux et demanderaient chacun une analyse très soignée. Toutefois, il est facile de se rendre compte qu'une machine à cadre fermé se déforme moins qu'une machine monocolonne sous l'effet de ces efforts qui

atteignent, dans l'état actuel du développement des machines à pointer les plus puissantes, jusqu'à 750 kg. Là encore, la valeur des déformations ne saurait être passée sous silence sans risquer d'amener certaines désillusions.

5. Principales erreurs dues aux variations de température

Lorsque l'on désire des usinages très précis, on se heurte presque invariablement aux erreurs provenant des variations de température qui engendrent des dilatations de valeurs inégales.

Il est possible de classer les effets de ces variations de température en trois catégories essentielles, à savoir :

- Les erreurs dues à l'échauffement de la machine ou de certaines de ses parties.
- Les erreurs dues aux changements de la température ambiante et qui résultent du fait que l'inertie thermique de la machine et celle de la pièce ne sont pas égales.
- Les erreurs qui proviennent de l'échauffement de la pièce pendant l'usinage.

Pour être complet, nous aurions voulu donner des indications, au moins des ordres de grandeur de ces erreurs. Nous n'avons pu le faire que pour la variation de la position de l'axe d'une broche, car on se trouve dans un domaine dans lequel les généralisations sont difficiles à saisir mathématiquement.

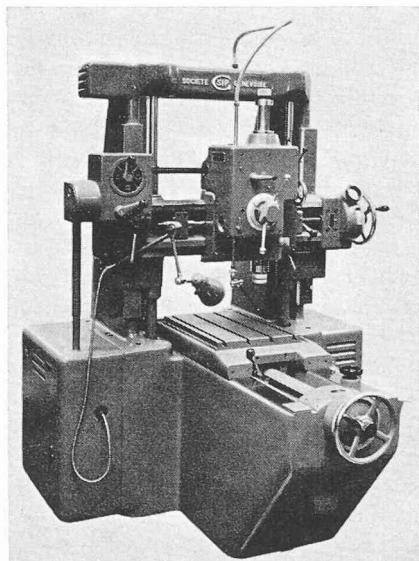


Fig. 9. — Type de machine à pointer dont le moteur, la boîte de vitesse et la broche sont séparés pour réduire l'effet de leurs échauffements. (*Machine MP-3K.*)

51. Échauffement de la machine

La cause principale d'échauffement de la machine est le moteur d'entraînement de la broche porte-outil ainsi que la boîte de vitesse ou le variateur qui donne l'échelonnement de ses vitesses de rotation. En effet, les autres moteurs, servant à déplacer la table ou d'autres organes, ne travaillent pas de manière aussi fréquente et sont dotés de puissances bien moindres.

Le constructeur doit donc chercher à réduire l'effet de l'échauffement du moteur d'entraînement de la

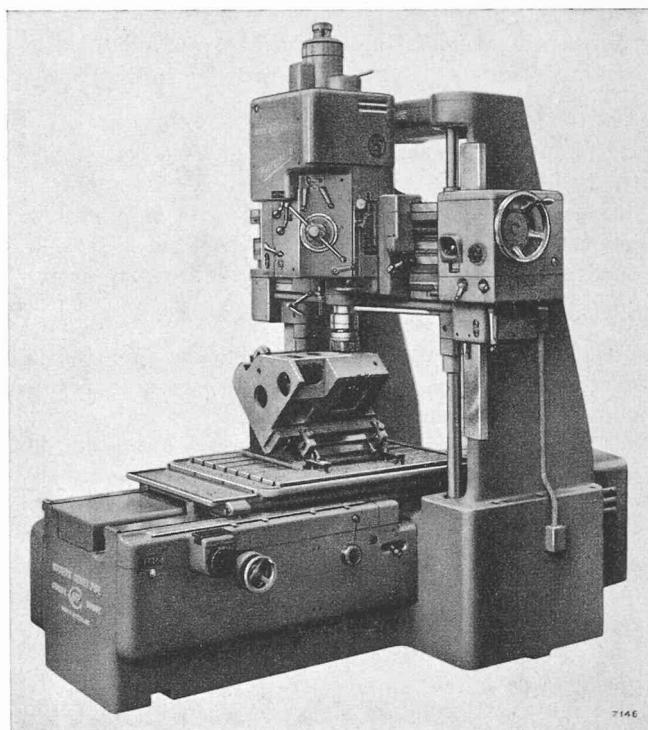


Fig. 10. — Type de machine à pointer dont le moteur et la boîte de vitesse sont situés au-dessus de la broche pour éliminer la chaleur vers le haut de la machine.
(*Machine Hydroptic-6.*)

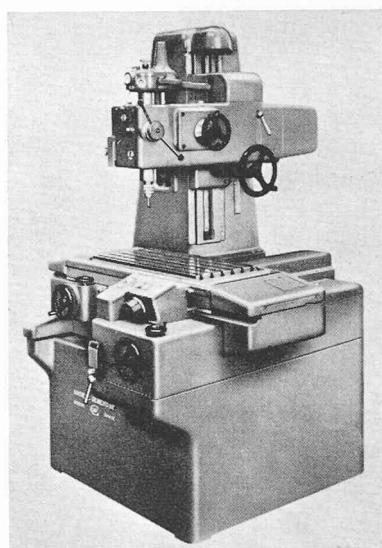


Fig. 11. — Type de machine à pointer monocolonne dont la poupée est montée sur des barres d'invar pour éliminer l'effet de l'échauffement du moteur, de la boîte de vitesse et de la broche. (*Machine MP-2P.*)

broche et de la boîte de vitesse par le choix judicieux de leur position sur la machine.

Dans le cas de la figure 9, par exemple, le moteur est placé dans le carter de gauche du bâti et transmet son mouvement à une boîte de vitesse située sur la gauche de la traverse mobile. La position de la poupée ne sera affectée que par les allongements résultant de l'échauffement des roulements de la broche. Celui-ci

peut être réduit très fortement si les formes géométriques des chemins de roulement sont justes et la qualité de surface très bonne, de sorte que pratiquement la stabilité de la broche est parfaite.

Une autre solution, pour les poupées monobloc, résulte de la considération que l'air chaud monte en raison de la diminution de sa densité et qu'il est judicieux de placer la boîte de vitesse et le moteur vers le haut pour faciliter l'élimination de la chaleur qu'ils dégagent (fig. 10).

Enfin, pour les machines monocolonne, (fig. 11), la solution idéale consiste à monter la poupée sur des barres d'invar fixées, d'une part, dans le plan vertical passant par l'axe de la broche et, d'autre part, à la hauteur du montant. Ce cadre ne se déforme que de façon négligeable pour la pratique courante (fig. 12). Il est supérieur à la solution qui consiste à utiliser des fontes à dilatation thermique réduite, car ces dernières manquent de stabilité dans le temps et leurs propriétés de résistance mécanique sont insuffisantes. D'autre part, leur coefficient de dilatation reste beaucoup plus élevé que celui de l'invar.

Seuls les résultats pratiques comptent, la figure 13 illustre ceux que nous avons obtenus pour une machine de petite capacité.

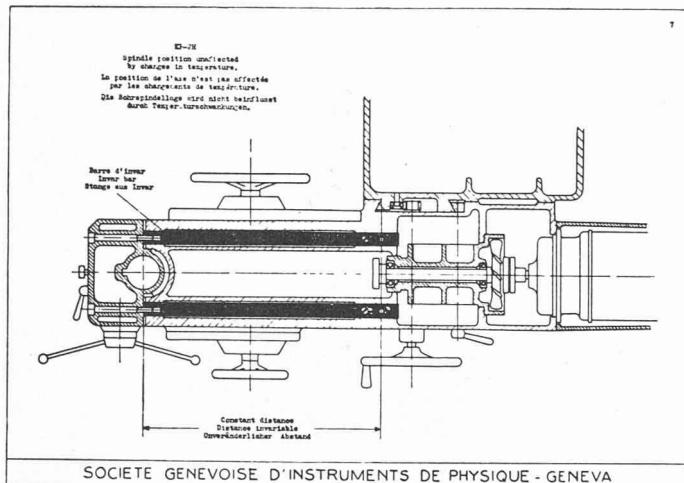


Fig. 12. — Dessin représentant la construction sur barres d'invar de la machine présentée à la figure 11.

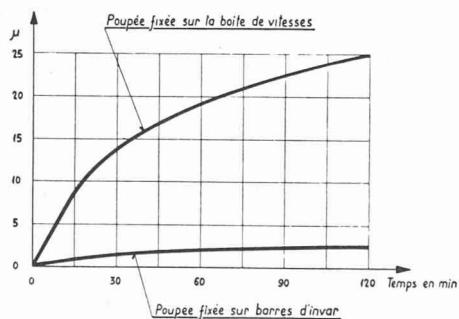


Fig. 13. — Graphique représentant les écarts de position de la broche dont la poupée est fixée directement sur la boîte de vitesse, d'une part, et, d'autre part, dont la poupée est fixée sur des barres d'invar.

52. Variation de la température du local

Il n'est pas nécessaire, pour obtenir des usinages de grande précision, que la température du local dans lequel la machine à pointer est placée soit parfaitement constante. Par contre, il ne faut pas qu'il subisse des variations brusques de température. En effet, la machine possède, de par sa masse, une certaine inertie thermique, elle ne suit pas instantanément la température du local. Il en est de même de la pièce mais, comme elle est beaucoup plus légère que la machine, son inertie thermique est moindre. D'autre part, la surface de dissipation de la chaleur varie beaucoup d'une pièce à l'autre. C'est pourquoi il faut laisser à la machine le temps nécessaire pour suivre les variations de la température ambiante.

D'autre part, il est exceptionnel qu'un local ait la même température au sol qu'au plafond. Il en résulte des erreurs provenant du gradient de température ayant pour effet d'altérer la rectitude des glissières.

Enfin, il est encore très fréquent de voir des dispositifs de chauffage qui provoquent des courants d'air violents néfastes pour la conservation de la bonne stabilité d'une machine de précision.

Bien qu'il soit difficile de donner des chiffres précis, on peut indiquer qu'une variation de 2° C par 24 heures n'affecte pas de manière sensible la stabilité thermique d'une bonne machine à pointer.

53. Echauffement de la pièce

Par suite de son usinage, la pièce subit un échauffement local qui n'est pas négligeable. Toutefois, il faut signaler que l'usage des outils à plaquette de métal dur a permis d'accroître la production des machines à pointer en améliorant la précision des usinages, par suite du fait que la plus grande partie de la chaleur est éliminée par les copeaux. Il faut donc chercher à travailler avec des outils en métal dur.

Lorsque la composition du matériau qui doit être usiné interdit l'emploi d'outil en métal dur, on fera usage de l'arrosage pour éliminer la chaleur dégagée par l'arrachement des copeaux.

Enfin, si l'on recherche une précision particulièrement élevée, on pourra faire tout d'abord une ébauche complète de la pièce, qui sera suivie des opérations de finition. Le travail n'est pas aussi rapide que si l'on ébauche et finit directement les divers usinages, car il faut procéder à deux réglages pour chaque position de travail. En revanche, la pièce subira des déformations moindres, car l'égalisation de sa température dans tout son volume sera bien meilleure.

Là encore, il est malheureusement impossible de donner des chiffres précis permettant de fixer des ordres de grandeur des erreurs, car trop de facteurs influencent les résultats que nous pourrions donner.

6. Erreurs provenant de l'usure de la machine

Il est évidemment difficile, sinon impossible, d'examiner toutes les erreurs qui proviennent de l'usure d'une machine à pointer. En effet, elles sont de nature très diverses et dépendent très souvent des conditions d'emploi et du soin que l'opérateur, comme les services d'entretien, ont pris de la machine.

Toutefois, à condition d'emploi et d'entretien équivalents, certaines machines présentent des erreurs engendrées par l'usure, beaucoup plus rapidement que d'autres.

Pour tenter de classer moins les causes d'usure que les effets de celle-ci, nous avons considéré les groupes suivants :

- Erreurs provenant de l'usure des organes de mesure.
- Erreurs engendrées par l'usure des organes de guidage des éléments déterminant l'exactitude géométrique de la machine.
- Erreurs provenant de l'usure de la broche porte-outil.

Nous allons reprendre plus en détail ces diverses classes d'erreurs pour examiner les moyens propres à en réduire les effets.

61. Erreurs provenant de l'usure des organes de mesure

Nous reprenons la distinction que nous avions opérée au début de cet article entre les machines à vis et les machines avec dispositif de lecture optique.

En effet, dans les machines à vis, l'organe de mesure et l'organe de déplacement se confondent, alors que dans les machines optiques ces deux organes sont séparés.

Pour réduire l'usure sur une vis-mère servant à déplacer un des éléments représentant l'une des coordonnées, il faut qu'elle soit très largement dimensionnée afin que les pressions spécifiques au contact des surfaces de l'écrou soient aussi faibles que possible. L'écrou lui-même doit être assez long, environ 2 à 3 fois le diamètre extérieur de la vis, afin qu'un grand nombre de filets appuient sur le filetage de la vis. Le choix des matériaux qui composent la vis-mère et son écrou est très important, car il faut que leurs matières s'accordent pour réduire le frottement et les effets d'usure par potentiel électrique. D'autre part, la qualité de la surface du filetage, tant de l'écrou que de la vis-mère, doit être impeccable, afin d'assurer un graissage avec un film d'huile d'épaisseur régulière, d'égaliser les pressions spécifiques sur toute la surface de contact et de réduire le jeu à un minimum.

Enfin, mentionnons que l'huile de graissage doit répondre à un grand nombre de qualités afin d'éviter que les films d'huile ne prennent des épaisseurs excessives et nuisent à l'exactitude des mesures.

Les machines à vis-mères équipées d'un dispositif de correction présentent le très grand avantage de pouvoir être étalonnées et ajustées après un certain nombre d'années de service si la vis-mère présente une usure modérée.

On voit donc qu'il est possible de réduire aussi bien l'usure de la vis-mère que les effets de cette usure par le choix judicieux des dimensions des vis et de leurs écrous que par l'adjonction d'un dispositif de correction approprié.

Les systèmes optiques, en revanche, ne présentent pratiquement qu'une usure si minime qu'on peut la considérer comme nulle ainsi que ses effets.

62. Erreurs provenant de l'usure des organes de guidage

Nous avons démontré plus haut que les erreurs des organes de guidage sont néfastes pour l'obtention

d'une bonne précision. L'usure de ces organes joue donc un rôle important. Pour la réduire, il faut, là aussi, que les pressions spécifiques soient aussi réduites que possible et que le graissage soit suffisant.

La réduction des pressions spécifiques implique que les surfaces guidantes soient très largement dimensionnées. D'autre part, la finition par grattage, la seule méthode qui permette l'obtention des rectitudes nécessaires pour une machine de précision, est indispensable pour assurer une lubrification correcte lorsque les mouvements relatifs entre les organes de guidage sont de faible amplitude.

Il convient d'ajouter que le choix des huiles de graissage est très important, car si l'on utilise des huiles très visqueuses, on observe des variations d'épaisseurs des films d'huile en fonction de la vitesse de déplacement qui sont néfastes pour l'obtention d'une grande précision, alors qu'avec une huile de viscosité trop faible on risque de provoquer le grippage.

63. Usure de la broche

Trop souvent, on néglige l'importance des jeux de la broche. En effet, ce jeu altère toute la précision des usinages obtenus sur la machine, car les alésages ne sont plus situés avec exactitude par rapport à la poupée puisqu'ils peuvent être déplacés de la valeur du jeu de la broche.

Les conditions pour le maintien de la broche sans jeu sont multiples, mais nous avons observé que la qualité de surface des éléments qui composent le roulement, soit chemins de roulement externe et interne et galets, ainsi que l'exactitude géométrique de leurs formes, joue un rôle capital. En effet, les erreurs géométriques des formes, si minimes soient-elles, engendrent de légers frottements de glissement qui, en se répétant à chaque rotation des galets, finissent par créer une usure rapide. D'autre part, par qualité de surface, nous entendons non seulement la forme micrométrie de la surface, mais aussi le fait que la matière ne doit présenter aucun cristal ébranlé par l'usinage en surface.

Lors du démontage des roulements de broche de machines à pointer ayant de nombreuses années de service, nous avons toujours constaté que les roulements ne présentaient aucune usure si les conditions mentionnées plus haut avaient été remplies. Mais, pour être complet, il faut ajouter aussi qu'aucun roulement se trouvant actuellement dans le commerce ne remplit complètement les deux conditions mentionnées plus haut.

7. Conclusion

Nous pensons avoir démontré que la précision d'usinage, bien qu'elle dépende directement de la précision des organes de mesure, est largement influencée par la rigidité de l'ensemble de la machine et par la qualité des surfaces de contact entre les éléments mobiles. Les indications de précision que donnent certains constructeurs sont loin de correspondre aux résultats que l'on peut attendre dans la pratique courante des ateliers, car ils les ont limitées à un nombre trop restreint de critères au lieu de s'en tenir à un ensemble de conditions nécessaires pour effectuer correctement des usinages.