

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 83 (1957)

Heft: 12

Artikel: Aspects de la construction des machines-outils

Autor: Mottu, A. / Pettavel, J. / Julliard, M.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-62785>

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: 26.01.2026

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les quinze jours

Abonnements:
 Suisse: 1 an, 26 francs
 Etranger: 30 francs
 Pour sociétaires:
 Suisse: 1 an, 22 francs
 Etranger: 27 francs
 Prix du numéro: Fr. 1.60
 Ch. post. « Bulletin technique de la Suisse romande »
 N° II. 57 75, à Lausanne.
 Adresser toutes communications concernant abonnements, changements d'adresse, expédition à Imprimerie La Concorde, Terreaux 31, Lausanne.

Rédaction
 et éditions de la S. A. du Bulletin technique (tirés à part), Case Chauderon 475
Administration de la S.A. du Bulletin Technique
 Ch. de Roseneck 6 Lausanne

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des Anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale

Comité de patronage — Président : J. Calame, ingénieur, à Genève ; Vice-président : † G. Epitaux, architecte, à Lausanne — Membres : Fribourg : MM. H. Gicot, ingénieur ; M. Waeber, architecte — Vaud : MM. A. Gardel, ingénieur ; A. Chevalley, ingénieur ; E. d'Okolski, architecte ; Ch. Thévenaz, architecte — Genève : MM. Cl. Grosgruin, architecte ; E. Martin, architecte — Neuchâtel : MM. J. Béguin, architecte ; R. Guye ingénieur — Valais : MM. G. de Kalbermatten, ingénieur ; D. Burgener, architecte.

Rédaction : D. Bonnard, ingénieur. Case postale Chauderon 475, Lausanne.

Conseil d'administration
 de la Société anonyme du Bulletin technique : A. Stucky, ingénieur, président ; M. Bridel ; P. Waltenspuhl, architecte ; R. Neeser, ingénieur.

Tarif des annonces

1/1 page	Fr. 275.—
1/2 »	» 140.—
1/4 »	» 70.—
1/8 »	» 35.—

annonces Suisses S. A.
 (ASSA)



Place Bel-Air 2. Tél. 223326
 Lausanne et succursales

SOMMAIRE : *Aspect de la construction des machines-outils*, par MM. A. MOTTU, J. PETTAVEL, M. JUILLARD, C. KOECHLIN, A. YOUSOUFIAN, R. VIRET, M. BARBIER, P. WEHRLI, ingénieurs à la Société genevoise d'instruments de physique, *page 179*. — *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., *page 189*. — *Tours automatiques pour l'industrie horlogère*, par GEORGES MEGEL, ingénieur, *page 198*. — *Capacité de production des tours automatiques*, par MAURICE L. MATTHEY, ingénieur E.P.F., *page 203*. — *DIVERS : Les ingénieurs et l'organisation sociale de notre économie*. — *BIBLIOGRAPHIE*. — *LES CONGRÈS : Exposition européenne de la Machine-Outil*. — *Centenaire de « Stella Valdensis »*. — *SERVICE DE PLACEMENT*. — *DOCUMENTATION GÉNÉRALE*. — *NOUVEAUTÉS, INFORMATIONS DIVERSES*.

ASPECTS DE LA CONSTRUCTION DES MACHINES-OUTILS

par MM. A. MOTTU, J. PETTAVEL, M. JULLIARD, C. KOECHLIN, A. YOUSOUFIAN, R. VIRET, M. BARBIER, P. WEHRLI, ingénieurs à la Société Genevoise d'Instruments de Physique

I. MÉTROLOGIE

Au début, les machines-outils ne possédaient pas d'organes de mesure. Le travail devait se faire en deux temps : un temps d'usinage, puis un temps d'arrêt pour permettre à l'ouvrier de mesurer la pièce avec son pied à coulisse ou son micromètre.

Assez vite toutefois, les vis assurant les déplacements des divers organes des machines furent complétées de tambours divisés accompagnés quelquefois d'un vernier. Cette adjonction d'apparence anodine constitua en fait un énorme progrès, la machine-outil posséda un organe de mesure incorporé, la mécanique s'allia à la métrologie.

La machine-outil pose à la métrologie deux problèmes distincts qui coexistent d'ailleurs souvent sur la même machine. Il faut premièrement pouvoir mesurer une dimension, par exemple le diamètre d'une pièce tournée, la profondeur de passe d'une raboteuse, et deuxiè-

mement il faut pouvoir mesurer une ou plusieurs coordonnées rectangulaires ou polaires pour situer la position de la table ou de la broche d'une aléseuse ou d'une machine à pointer.

Pour obtenir une précision de mesure élevée, on s'aperçut bientôt qu'il fallait respecter certains principes. C'est ainsi, par exemple, que l'élément métrologique devrait toujours être dans le prolongement de l'organe dont on mesure le déplacement, disposition qui est généralement incompatible avec la construction de la machine. Une part importante de l'art du constructeur consiste à rechercher le compromis le meilleur entre un principe inapplicable intégralement et une construction réalisable. La solution trouvée, imparfaite mais concrète, ouvre la porte à des erreurs qui seront d'autant plus faibles que le principe aura pu être mieux suivi.

Les erreurs qui découlent de l'abandon d'un principe peuvent quelquefois être réduites au prix d'une

exécution très soignée et coûteuse. Par exemple, le chariot d'un tour à fileter est conduit d'autant plus fidèlement par la vis-mère que celle-ci est plus proche de la pièce à fileter, et inversement, plus cette distance, appelée aussi parallaxe, est grande, plus la rectitude des glissières devra être soignée pour assurer la précision du déplacement du chariot. Il est évident aussi que les inconvénients provenant de l'usure de ces glissières seront dans ce cas beaucoup plus sensibles.

Ces notions de parallaxe, de courbure de glissières, d'usure, guident le constructeur de machines-outils dans la recherche du compromis qu'il estime le meilleur.

La vis, déjà nommée, est un élément métrologique universellement employé. Sa simplicité la fait souvent adopter bien qu'elle ne soit pas dépourvue de défauts. Citons par exemple l'erreur progressive, provenant de l'irrégularité du pas sur toute la longueur, et l'erreur périodique, due à l'irrégularité du pas sur un tour. Une vis longue, portée à ses deux extrémités, ne reste pas rectiligne, elle fléchit sous son propre poids et exerce sur l'écrou qui la parcourt des efforts anormaux provoquant une usure rapide.

Malgré ces défauts, la vis est l'organe le plus employé pour la mesure des profondeurs de passes; les tours fraiseuses, raboteuses en sont pourvus. Elle est utilisée aussi, quoique d'une façon moins générale, pour la mesure des coordonnées. Pour que les défauts mentionnés plus haut ne rendent pas toute précision illusoire, elle doit alors être accompagnée d'une courbe de correction.

Un autre élément métrologique est représenté par la règle divisée observée à l'œil nu et qui équipe depuis très longtemps les aléseuses. Un vernier et une loupe de lecture, ou un lecteur micrométrique, accompagnent quelquefois avantageusement la règle. La qualité principale de ce système est qu'il est insensible à l'usure. La précision obtenue dépend de celle de la règle et de son emplacement qui a quelquefois le défaut d'être assez éloigné du point de travail.

On utilise également les compositions de cales plan-parallèles ou étalons à bouts, palpés avec un comparateur à cadran. Ce système est simple, mais les manipulations qui échauffent les cales et les poussières qui s'introduisent entre les surfaces en contact rendent sa précision peu sûre.

La règle de haute précision observée au microscope sous un fort grossissement est à l'heure actuelle le moyen le plus précis de mesure des coordonnées. Les règles sont de préférence en acier pour avoir le même coefficient de dilatation que les pièces à usiner. Comme la division microscopique qu'elles portent les rend très délicates, elles doivent être soigneusement enfermées, à l'abri de tous contacts et de toutes poussières. Le microscope d'observation peut être à oculaire (*fig. 1 et 1a*) ou, pour réduire la fatigue de l'opérateur, à écran de projection (*fig. 2 et 2a*). La précision obtenue dépend évidemment de la règle elle-même qui, à l'heure actuelle, peut être très précise. De plus, l'observation au microscope permet de placer la règle en un endroit inaccessible à l'opérateur mais théoriquement favorable, ce qui n'est pas le cas de la composition d'étalons à bouts.

Cette solution présente de tels avantages qu'elle sera sûrement longtemps utilisée. L'avenir verra sans doute

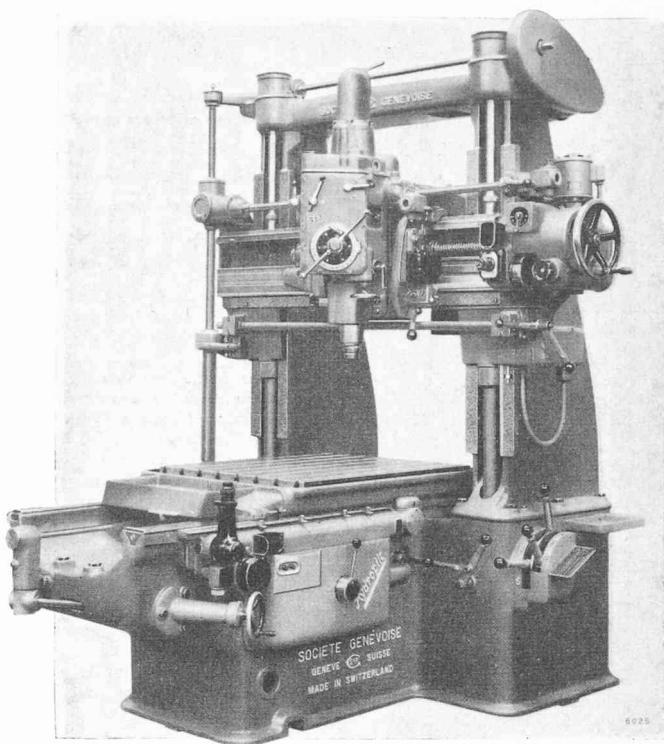


Fig. 1.

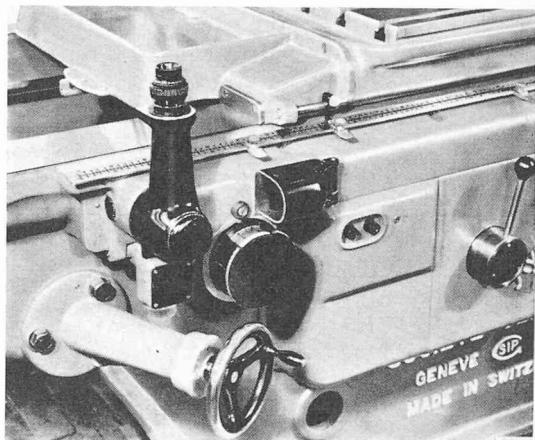


Fig. 1a.

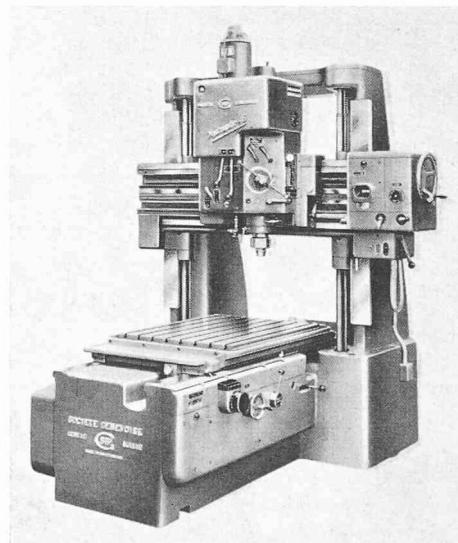


Fig. 2.



Fig. 2a.

des règles toujours plus précises, observées non pas au moyen d'un microscope optique mais photoélectrique, transmettant avec une amplification énorme la lecture à distance, ou arrêtant automatiquement l'organe mobile sur un des traits de la règle de précision.

II. DÉFORMATIONS

La précision et la qualité du travail d'une machine-outil dépendent essentiellement de la rigidité des divers organes qui la composent. Il est donc de toute importance de combattre toute déformation possible de ces organes, que celle-ci soit due à des sollicitations extérieures ou à des tensions internes de la matière.

On distingue généralement les déformations élastiques, les déformations permanentes et les déformations semi-plastiques.

Avec les déformations purement élastiques la pièce ou l'organe retrouve sa forme géométrique initiale lorsque la sollicitation cesse. On constate généralement une certaine « hystérésis », variable suivant le matériau, la tension et la température, et qui correspond à une énergie d'amortissement dissipée sous forme de chaleur. Cette énergie d'amortissement est généralement définie par un coefficient qui est le rapport de la surface d'*« hystérésis »* H à la surface du travail de déformation D (fig. 3).

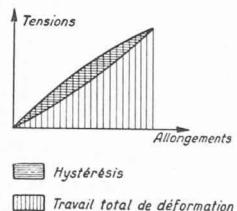


Fig. 3.

Ce coefficient d'amortissement, qui a une grande importance pour la stabilité des constructions, est très élevé pour la fonte grise ordinaire, sensiblement moins pour la fonte ductile et beaucoup moins pour l'acier (fig. 4).

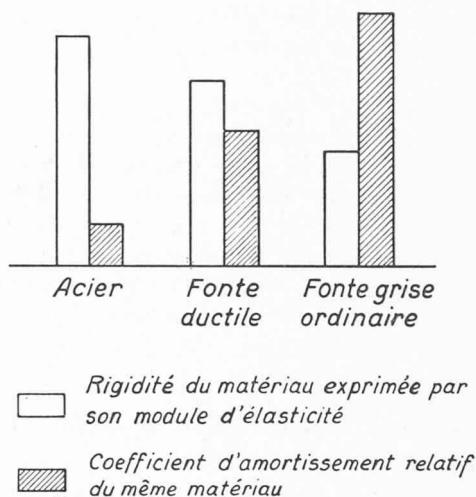


Fig. 4.

Les déformations permanentes ou *flage* apparaissent dès que la tension dépasse la limite d'élasticité. Le travail de déformation nécessaire pour arriver à une déformation permanente, et représenté par le produit de la charge par l'allongement, varie avec les matériaux considérés. À l'inverse du coefficient d'amortissement, il est très faible pour la fonte grise ordinaire, déjà beaucoup plus fort pour la fonte ductile et peut atteindre des valeurs considérables pour certains aciers.

Quant aux déformations semi-plastiques, elles peuvent au premier abord ressembler au flage, mais elles sont par leur essence plutôt une déformation élastique avec une « hystérésis » très lente, le retour à l'état initial pouvant atteindre plusieurs heures. C'est le cas notamment de la fonte grise utilisée pour la grande majorité des constructions de machines-outils.

Ce matériau a en effet un coefficient d'amortissement élevé qui favorise la stabilité des organes, en outre il se prête fort bien à la réalisation des pièces les plus complexes et ses caractéristiques de frottement sont très favorables.

Le problème se complique si on a affaire à des pièces de fonte ou à des assemblages soudés présentant des tensions internes. Il suffit alors d'un léger choc ou d'une sollicitation par ailleurs inoffensive pour déclencher une déformation importante... et permanente.

Cette constatation a depuis fort longtemps amené les constructeurs à « stabiliser » ou « vieillir » leurs pièces en les laissant séjourner pendant des mois à l'air libre où elles sont soumises à toutes les variations de température qui accélèrent ce processus de « vieillissement ».

Le rythme de la vie moderne s'accorde mal de ces pertes de temps et lorsqu'on s'est en outre aperçu que même un vieillissement de plusieurs années ne libérait pas complètement les tensions internes, on a cherché d'autres moyens.

La meilleure méthode consiste à accélérer ces réarrangements moléculaires par la chaleur. A cet effet, les pièces à stabiliser sont placées dans un four dont on augmente graduellement la température tout en restant en dessous du point de transformation structurel. De grandes précautions doivent être prises pour que les pièces prennent une température uniforme, c'est pourquoi le refroidissement doit se faire extrêmement lentement.

Récemment on a imaginé de soumettre les pièces susceptibles de présenter des tensions internes à une stabilisation par vibrations, soit au moyen d'un vibreur mécanique avec des fréquences de l'ordre de 25 à 50 Herz, soit au moyen des ultra-sons. On espère ainsi pouvoir réduire encore la durée du traitement et le coût des installations, mais il n'est pas encore prouvé que ces nouveaux procédés soient aussi efficaces que la stabilisation thermique.

III. VIBRATIONS ET QUALITÉ DE SURFACE

La machine-outil étant constituée par de nombreux éléments forme toujours un ensemble complexe plus ou moins élastique.

Il n'est malheureusement pas possible de construire une machine-outil infiniment rigide, mais il est par contre dans le rôle du constructeur de réduire son élasticité à un minimum. Il sera surtout important pour lui de dessiner les pièces en vue d'une usure réduite et d'une rigidité relativement élevée, ce qui le conduira presque toujours à concevoir des pièces surdimensionnées du point de vue résistance des matériaux. En fait il est rare de voir une pièce de machine-outil se rompre, hors les cas d'accidents de fonctionnement dus à de fausses manœuvres.

Les deux matériaux utilisés le plus généralement dans la fabrication de machines-outils sont la fonte et l'acier. Si leur module d'élasticité leur confère une rigidité particulière, leurs coefficients d'amortissement très différents guideront éventuellement le constructeur dans son choix (*fig. 4*). Toutefois, la part d'amortissement due à la matière ne dépasse guère, en cas de vibrations de la machine, le 10 à 20 % de l'amortissement total de la construction, et ne joue donc pas un rôle prépondérant.

Nous avons déjà vu que la machine-outil pouvait être soumise à des déformations élastiques, permanentes et semi-plastiques. Si nous considérons les déformations élastiques, nous pouvons diviser celles-ci en deux types, les déformations statiques ou apériodiques et les déformations dynamiques et périodiques. Les premières proviennent par exemple du déplacement d'un ou plusieurs éléments de la machine, d'un effort résultant du travail de l'outil, ou du propre poids des divers éléments.

Notre but est d'examiner ici les déformations du deuxième type, soit les déformations dynamiques et périodiques, qui sont en somme des vibrations.

Les domaines de vibrations d'une machine-outil sont extrêmement vastes et ont trois sources principales :

vibrations extérieures,

vibrations dues au déplacement ou à la rotation d'éléments de la machine,

vibrations engendrées par le travail de l'outil.

Les vibrations extérieures sont transmises par le sol de l'atelier et peuvent provenir de machines voisines, de moteurs, d'un chemin de fer ou d'un trafic routier passant à proximité, etc. S'il est souvent difficile d'en déterminer la source, il est relativement aisé d'en préserver la machine en la montant par exemple sur des amortisseurs ou un statif isolant de forte masse. Ces perturbations sont des caractéristiques d'installation.

Les vibrations dues à la rotation ou au déplacement d'éléments de la machine sont, elles, à circonscrire dans le cadre de la construction. Il peut s'agir de vitesses critiques d'arbres, aussi bien que de balourds de moteurs, que de vibrations engendrées par des imperfections géométriques de pignons, de roulements, ou simplement de déformations partielles périodiques de pièces en charge.

Les vibrations provenant du travail de l'outil sont les plus importantes et les plus difficiles à éviter. En effet, elles sont dues au travail de coupe de l'outil, effort discontinu provenant de la forme irrégulière de la pièce, comme sur un tour carrousel, ou succession d'efforts variables, comme sur une fraise, une scie, une broche, etc. Elles peuvent aussi avoir pour cause un affûtage géométrique défectueux de l'outil entraînant un broutage de celui-ci.

Ces vibrations peuvent avoir la forme d'oscillations forcées comme dans le cas du battement des couteaux d'une fraise, ou la forme d'oscillations autoexcitatriques dans le cas où la variation de l'effort de coupe entraîne et est entraînée par une variation de la section du copeau ou de la vitesse de coupe.

Ces trois sources de vibrations peuvent coexister et exciter ainsi un système vibratile formé par toute la chaîne d'éléments reliant l'outil à la pièce usinée. L'analyse des conséquences de ces vibrations montrera infailliblement une perte de production de la machine, soit par perte de puissance à la suite d'énergie d'excitation dissipée en vibrations, soit d'une façon beaucoup plus générale par une perte de la qualité de la surface usinée et par une détérioration rapide de l'outil.

Ces deux dernières conséquences sont issues d'un mouvement relatif de l'outil par rapport à la pièce, autre que la translation de coupe. L'étude d'un tel mouvement est à la base d'une analyse dynamique de la machine, et s'il n'est pas possible d'éliminer toutes les vibrations, il est par contre souvent dans les possibilités du constructeur de limiter leurs amplitudes, c'est-à-dire leurs effets.

Considérant un outil enlevant un copeau de matière à la surface d'une pièce, on se rend compte que tous les axes de déplacements relatifs entre l'outil et la pièce n'ont pas la même importance, et que pour certains, la réduction de l'amplitude revêt une importance particulière.

Si nous prenons par exemple le cas général d'un tour, il est aisément de se rendre compte que la variation du diamètre de tournage due à une vibration normale à la surface usinée est, à amplitude égale, beaucoup plus grande que celle due à une vibration tangentielle. Cette dernière entraînera une usure rapide du burin, alors que la première provoquera un effritement et une destruction de l'arête de coupe de l'outil.

En face de ces deux familles d'oscillations, vibrations forcées dues à une coupe discontinue et vibrations autoexcitées dues à une variation de la section du copeau de matière enlevée, le constructeur sera amené aux constatations suivantes :

Les vibrations provoquées par une coupe discontinue peuvent, par exemple lors d'un fraisage, être fortement influencées par le choix et la dimension de l'outil en regard de la pièce à usiner. Le nombre de dents d'une fraise en fonction de la passe d'usinage, c'est-à-dire la fréquence des battements dus aux dents de la fraise, ou plus généralement la fréquence excitatrice en rapport aux fréquences propres d'éléments de la machine, commande la naissance et la conduite des vibrations forcées.

Les vibrations autoexcitées prenant naissance lors du phénomène initial de coupe sont influencées à divers degrés par les conditions d'enlèvement de matière, vitesse de coupe, profondeur de passe, forme de l'outil, etc.

Ces oscillations ne peuvent donc guère être combattues lors de la construction de la machine, mais leur force d'excitation étant commandée par le système vibratile formé par un ensemble de pièces, il sera dans une certaine mesure possible au constructeur de choisir pour les éléments principaux de sa machine, des formes conduisant à des fréquences propres tendant à limiter l'effet néfaste des grandes amplitudes au niveau de l'outil.

L'étude et l'amélioration du comportement dynamique d'une machine-outil posera au constructeur pour chaque machine un problème particulier. En effet, l'ensemble du système vibratile pouvant osciller aussi bien suivant les fréquences propres de pièces uniques que suivant des fréquences de couplage d'éléments ou de groupe, il sera nécessaire d'étudier séparément chaque partie de la machine.

L'étude analytique de tels phénomènes étant souvent rendue pratiquement impossible par les formes compliquées des pièces en présence et par les jeux incertains de montage, il sera nécessaire d'étudier expérimentalement ce comportement, ce qui nécessitera souvent une installation de mesure complète dont les résultats seront à interpréter par un spécialiste au vu d'expériences antérieures.

IV. COMMANDES HYDRAULIQUES

C'est au lendemain de la première guerre mondiale que les commandes hydrauliques ont fait leur apparition dans les machines-outils.

Depuis cette époque elles se sont de plus en plus répandues de sorte qu'aujourd'hui leur emploi est général. Il faut bien reconnaître qu'elles permettent la réalisation simple et pratique de problèmes qu'il serait généralement plus compliqué et onéreux de résoudre par la mécanique pure.

En principe une commande hydraulique a pour but de réaliser l'une des trois fonctions suivantes :

- transmission d'énergie* (course de travail et de retour d'une raboteuse, variateur de vitesse, etc.) ;
- commande à distance* (déplacement des baladeurs d'une boîte de vitesse, etc.) ;
- système à reproduire* (tour à copier).

A de rares exceptions près le fluide utilisé est l'huile minérale sous pression. On bénéficie ainsi de la très grande capacité de lubrification de cette dernière, alliée à une grande souplesse d'installation, quelques conduites suffisent pour relier l'organe transmetteur (pompe) à l'organe récepteur (moteur rotatif, cylindre, etc.).

On considère en général comme très important que la vitesse de l'organe récepteur ne dépende pas trop fortement de la réaction qui lui est opposée. Cette condition élimine pratiquement le récepteur type « turbine » utilisant l'énergie cinétique du liquide, pour ne laisser que les « transmissions hydrostatiques », lesquelles sont utilisées sous la forme d'un piston se déplaçant dans un long cylindre (par exemple déplacement de la table d'une fraiseuse) ou sous la forme d'un moteur à pistons multiples ou à palettes.

La compressibilité de l'huile minérale, bien que relativement faible, est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-5}$, soit d'environ $0,5 \text{ cm}^3$ par litre pour 10 kg/cm^2 de pression. C'est déjà gênant dans certains cas, mais la présence de l'air complique considérablement les choses.

L'air peut se trouver dans l'huile sous la forme de solution permanente, soit sous la forme d'une émulsion créée par la turbulence dans certaines parties du circuit, angles vifs, raccords défectueux, etc. D'autre part, si le liquide à haute pression est amené dans une zone de basse pression, le degré de saturation de l'air en dissolution change et des bulles peuvent apparaître.

La compressibilité de l'huile change beaucoup avec la proportion d'air en suspension. Le graphique suivant montre la contraction relative d'un volume donné V de mélange air-huile pour des pressions croissantes (fig. 5).

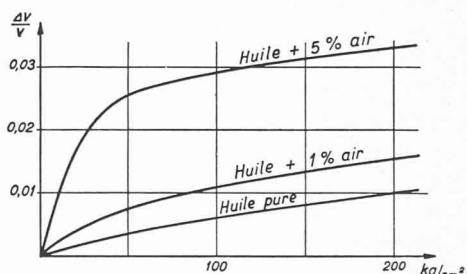


Fig. 5.

En examinant ces courbes on voit que la compressibilité du mélange air-huile est relativement grande pour les faibles pressions et qu'au-delà de 30 à 40 kg/cm^2 tout se passe comme s'il n'y avait plus d'air. Ceci explique la tendance de beaucoup de constructeurs à utiliser des pressions élevées pouvant atteindre 100 , 200 kg/cm^2 , voire davantage, l'unique limitation étant le fonctionnement de la pompe avec un rendement volumétrique acceptable.

De toute façon le constructeur s'organise toujours pour évacuer les bulles dès qu'elles deviennent gênantes. Comme il y a toujours risque d'introduction d'air à la suite d'une réparation ou même simplement après un long arrêt de la machine, on prévoit un dispositif de purge qui peut être à commande manuelle (un bouchon placé au point le plus haut, là où une poche d'air pourrait se former) ou, raffinement plus intéressant, un dispositif à fonctionnement automatique.

Parmi les transmissions d'énergie par voie hydraulique, notons les déplacements de table de fraiseuse, de machine à pointer, de rectifieuse, etc. Cette méthode très souple permet de réaliser une gamme de vitesses sans étage en faisant varier le débit de la pompe d'alimentation.

La figure 6 représente le schéma hydraulique du déplacement de la table d'une raboteuse système Waldrich-Coburg.

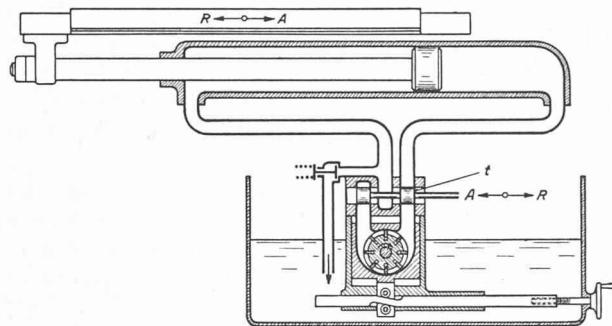


Fig. 6.

Le changement de vitesse se fait par désaxement du stator de la pompe à palettes qui tourne à vitesse constante et toujours dans le même sens. Un tiroir *t* provoque l'arrêt ou le changement de sens de marche de la table. D'autres circuits alimentés par le même réservoir, mais ayant leurs pompes et tiroirs individuels, accomplissent des fonctions accessoires (renversement de sens de marche à fin de course, avance de l'outil).

L'exemple qui précède est muni d'une pompe à palettes, mais il existe de multiples autres types de construction. Ceux à engrenages sont les plus simples ; ils sont généralement à débit unique, mais on en trouve aussi à débit variable. Dans ce dernier cas un des pignons est coulissant axialement et n'enrôle qu'avec une partie plus ou moins longue de l'autre.

On trouve encore des pompes à vis simple ou double, à palettes, dont le nombre peut descendre jusqu'à 2. Celles à piston permettent d'obtenir les pressions les plus élevées.

Lorsqu'une pompe a un rendement suffisamment élevé elle est par cela même réversible et peut donc servir de moteur. En groupant une pompe à débit variable avec un moteur à cylindrée variable on constitue un variateur qui, pour une vitesse d'entrée constante, permet de fournir des vitesses de sortie variant quelquefois entre des limites considérables. Habituellement la pompe seule est à débit variable, le moteur étant de cylindrée fixe.

Les commandes hydrauliques à distance ne sont pas précisément des transports d'énergie proprement dits. Elles permettent de déplacer des organes placés à une certaine distance et généralement peu accessibles et cela avec des efforts minimes.

Prenons par exemple la commande à distance des baladeurs d'une boîte de vitesses. Un tiroir tournant d'un dessin complexe mais très à portée de la main transmet l'huile sous pression à de petits cylindres dont les pistons sont les tiges mêmes des fourches des baladeurs.

Au repos tout est arrêté et le tiroir peut être librement tourné et arrêté devant la combinaison désirée. Dès que le moteur de la boîte démarre, la pompe d'alimentation, qui est entraînée par l'arbre d'entrée de la boîte, entre en action et la pression monte. Le tiroir tournant se bloque automatiquement pour éviter toute fausse manœuvre. L'huile est envoyée vers les fourches des baladeurs qui se déplacent et s'arrêtent dans la position de travail sélectionnée.

Les appareils à reproduire à commande hydraulique sont très répandus actuellement et servent spécialement pour le tournage et le fraisage en partant d'une pièce type ou même d'un gabarit en tôle.

Il existe différents principes de fonctionnement que nous ne pouvons guère énumérer ici. Nous donnerons comme exemple le schéma du tour à reproduire Georges Fischer (fig. 7).

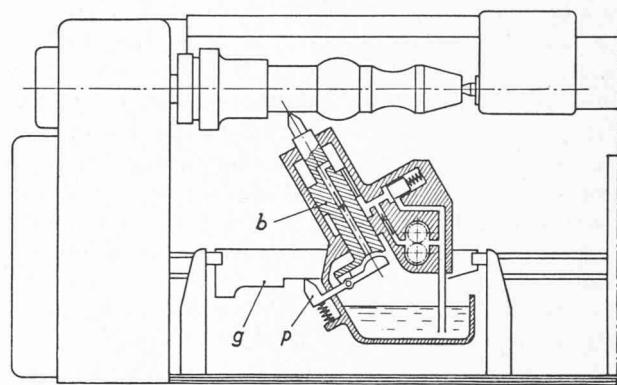


Fig. 7.

Ce schéma est du type dit à « fuites ». Une pompe débite en permanence de l'huile sous une pression de 100 kg/cm². La sortie du liquide est gênée par un boulon du palpeur *p* dont l'autre extrémité prend appui sur le profil du gabarit *g*. Le porte-burin *b* conserve automatiquement une position d'équilibre et suit fidèlement les positions successives du palpeur.

V. AUTOMATISME

L'automatisme est la suite d'une évolution. Après avoir fait appel à la machine pour remplacer la force musculaire de l'ouvrier, on fait appel à l'automatisme, sinon pour remplacer sa faculté de raisonner, du moins pour l'aider. La course au rendement et le manque de main-d'œuvre favorisent ce développement. Après des machines et des groupes de machine, on automatise des usines entières.

Dans une machine automatique, les principes d'organisation du travail sont naturellement respectés, c'est-à-dire qu'il existe des organes directeurs et des organes d'exécution dont font partie éventuellement des organes de contrôle. Une machine complètement automatique peut être représentée par le schéma de la figure 8.

Dans le cas où les organes de contrôle existent, le produit fini est comparé au dessin ou au gabarit de manière à pouvoir agir sur l'organe directeur et faire des corrections (système en boucle fermée). En fait, selon le degré d'automatisation, certaines des fonctions

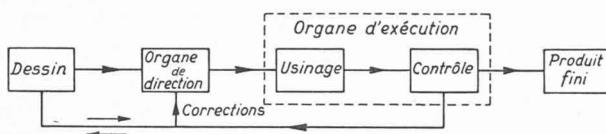


Fig. 8.

représentées à la figure 8 sont remplies par un ouvrier.

Dans ce qui va suivre, nous allons examiner au point de vue fonctionnel tout d'abord les organes directeurs puis les organes d'exécution avec un exemple d'application.

Le plus ancien et le plus utilisé des organes directeurs est la came, qui permet de commander des opérations selon un programme préétabli. Elle se trouve très souvent, entre autre, dans les tours automatiques, mais on lui reproche son manque de souplesse.

Les organes directeurs des machines à reproduire (tour, fraiseuses, etc.) sont constitués par le modèle (gabarit, patronne) et le palpeur. Outre les palpeurs purement mécaniques, qui ne permettent d'atteindre que des précisions limitées, les palpeurs utilisant l'hydraulique, l'électricité ou l'optique, sont très fréquents.

Dans les machines à degré d'automatisation élevé, on a recours à un organe directeur électronique, formé par un calculateur et une mémoire, et qui permet un changement de programme très rapide, directement à partir du dessin.

Les organes directeurs à cames et ceux des machines à reproduire sont du type analogique, c'est-à-dire qu'ils utilisent des grandeurs physiques telles que des déplacements mécaniques, des variations de tensions électriques, alors que ceux des machines à commande électronique peuvent être soit du type analogique, soit du type numérique, c'est-à-dire utilisant directement des chiffres.

Les organes d'exécution sont très divers suivant le type de machine, cependant l'usinage d'une pièce nécessite la commande d'un seul ou de plusieurs déplacements, ce qui, dans les machines automatiques modernes, se fait de plus en plus au moyen de systèmes asservis dont nous allons rappeler les propriétés.

Dans un système non asservi, la relation entre la grandeur d'entrée et celle de sortie dépend de la charge et des perturbations extérieures, alors qu'elle est indépendante de ces facteurs dans un système asservi parfait. Par exemple, prenons le cas d'une fraiseuse dont le mouvement de la table est à commande hydraulique non asservie. A une position définie du levier de commande du distributeur d'huile (grandeur d'entrée) correspond une vitesse à vide déterminée de la table (grandeur de sortie). Suivant les caractéristiques du moteur, l'épaisseur de la passe (charge), la forme de l'outil et l'homogénéité du matériau de la pièce (perturbations extérieures), la vitesse en charge sera différente de celle à vide et affectée d'irrégularités.

Pour avoir un système asservi, il suffit de monter un indicateur de vitesse de la table et d'assigner à un opérateur la tâche de maintenir cette vitesse à une valeur choisie en observant l'indicateur de vitesse et en manœuvrant le levier de commande du distributeur.

Pratiquement, on remplace l'opérateur par un appareillage automatique, la plupart du temps électronique, travaillant plus vite et avec une plus grande précision. Le système complet se présente alors de la manière suivante (fig. 9).

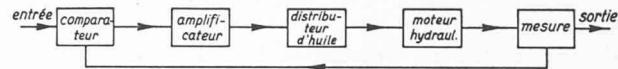


Fig. 9.

La grandeur d'entrée, qui peut être une tension électrique proportionnelle à la vitesse, est comparée à la mesure de la grandeur de sortie, qui peut être une tension électrique donnée par un appareil mesurant la vitesse de la table. Ceci a lieu dans un organe comparateur qui en déduit à chaque instant une grandeur (tension électrique) proportionnelle à l'écart entre la vitesse demandée et la mesure de la vitesse réelle et qui, amplifiée, sert à commander le distributeur hydraulique. La position de ce dernier correspondant à l'arrêt est donc donnée pour un écart nul.

Si, dans l'exemple cité, on remplace la vitesse par une position et l'indicateur de vitesse par un indicateur de position, on obtient un système asservi en position.

On voit donc qu'un système asservi se contrôle lui-même et le schéma de la figure 9 peut être ramené à celui de la figure 8. La précision effective dépend essentiellement de la qualité des organes de mesure et de comparaison. Pour leur réalisation, on fait souvent usage de l'électronique. La linéarité du système joue également un rôle très important. (On dit qu'un système asservi est linéaire s'il est régi par une équation différentielle linéaire à coefficients constants.) Les phénomènes non linéaires tels que le frottement sec, l'hystérèse et la saturation, les jeux dans les engrenages, limitent cette précision.

La vitesse de réaction dépend essentiellement du moteur et de l'amplificateur. Notons à ce propos que les combinaisons comprenant un moteur hydraulique et un amplificateur électronique sont beaucoup plus avantageuses à ce point de vue que celles dans lesquelles interviennent des moteurs électriques et des amplificateurs à thyratrons ou magnétiques, à cause de l'inertie du moteur électrique.

A titre d'exemple, le positionnement automatique de la table d'une perceuse et d'une fraiseuse avec système numérique peut se faire d'après le schéma de la figure 10.

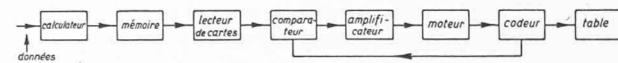


Fig. 10.

Lorsqu'on ne demande que l'arrêt de la table dans des positions de travail successives avec des déplacements rectilignes, on peut utiliser une mémoire à cartes perforées. Le calculateur détermine alors la position des trous dans la carte, au moyen des cotés données pour les points d'arrêt, et la perfore. A chaque série de trous

correspond soit un numéro d'opération, soit le chiffre de la cote, soit une vitesse d'usinage et il y a une carte par opération.

Les directives nécessaires à l'usinage d'une pièce sont contenues dans un lot de cartes qui peut être préparé et conservé hors de l'atelier. Pour l'usinage d'une pièce, on introduit ce lot de cartes dans le lecteur qui engendre des impulsions électriques correspondant à chacun des chiffres enregistrés.

Cette lecture est comparée à la mesure de la position de la table dans l'organe comparateur, mesure qui se fait au moyen d'un appareil appelé codeur. Ce dernier engendre des impulsions électriques correspondant à la position de la table, par exemple au moyen d'un tambour porteur de contacts et d'un système de balais frotteurs.

Le comparateur, comme dans le système asservi de la figure 9, fournit une tension électrique, dite tension d'erreurs, proportionnelle à l'écart entre la position demandée par la carte et la position mesurée de la table, et qui, après amplification, est utilisée pour commander le moteur.

Alors que les impulsions à la sortie du codeur permettent le positionnement de la table, on peut utiliser leur fréquence pour mesurer et commander la vitesse de déplacement. On obtient alors une tension électrique proportionnelle à cette dernière que l'on compare à la tension de référence fournie par le lecteur de cartes. On retrouve ainsi de nouveau le schéma de la figure 9.

On peut aussi avoir à commander des déplacements, par exemple d'un outil, le long d'une courbe quelconque. On a recours dans ce cas à une mémoire à ruban continu perforé. La courbe est décomposée en fractions de droites et le calculateur détermine la position des trous dans le ruban, qui correspondent aux sommets du polygone ainsi formé et aux vitesses d'usinage.

La sécurité du fonctionnement des systèmes automatiques dépend essentiellement du soin apporté à leur réalisation et du choix des composants utilisés. Par exemple, dans les circuits électriques, on doit éviter autant que possible l'emploi des contacts qui sont sujets à usure. La technique des éléments employés en électronique est en constant progrès et il est permis d'espérer que, d'ici quelques années, leur durée de vie dépassera de loin celle de la machine.

VI. COMMANDE ÉLECTRIQUE

L'électricité a contribué au perfectionnement des machines-outils. Elle est en somme à la base de toutes les formes d'énergie qui y sont employées, qu'elles soient de nature mécanique, hydraulique ou pneumatique. Son champ d'application est extrêmement vaste et fait appel à presque toutes les ressources offertes par l'électrotechnique.

La simplicité de la commande des moteurs électriques a incité tout d'abord l'utilisateur et le constructeur à pourvoir les machines de moteurs d' entraînement individuels, puis, au fur et à mesure que la complexité des machines augmentait, à employer des moteurs indépendants pour chacune des fonctions.

La commande de machines complexes et de groupes de machines en dépendance les unes des autres repose

sur la technique des relais et du courant faible. L'électronique a permis la réalisation de certains types de régulateurs, des servo-mécanismes et de la commande d'après un programme enregistré sur cartes ou sur rubans perforés, bandes magnétiques, etc., comme nous l'avons vu au chapitre précédent.

Les moteurs les plus répandus sont du type asynchrone, avec rotor en cage d'écureuil, alimentés par du courant triphasé. Les enroulements actifs sont disposés uniquement dans les encoches du stator. Le rotor étant alimenté par induction, aucune amenée de courant n'est nécessaire pour lui. De ce fait, le moteur asynchrone est d'une robustesse extrême, ne comportant aucune pièce électrique susceptible d'usure et l'entretien se réduit au graissage. On les fabrique pour toutes les puissances, souvent en grandes séries, à des prix raisonnables. Ils tournent sans vibration, ils sont silencieux, leur rendement est excellent.

La caractéristique essentielle de ce type de moteurs réside dans le fait qu'ils travaillent à vitesse constante, indépendamment de la charge. Par contre, le dimensionnement des divers éléments permet d'influencer la caractéristique du couple du moteur dont les cas extrêmes sont les suivants :

- a) Couple de démarrage M_o faible, couple de décrochage M_d élevé. Cette caractéristique est requise pour les moteurs de broche par exemple, démarrant à vide avec surcharge éventuelle temporaire sans perte de vitesse appréciable.
- b) Couple de démarrage M_o élevé, couple de décrochage M_d faible. Cette caractéristique est requise pour les démaragements sous charge, par exemple pour des déplacements d'organes de grande inertie.

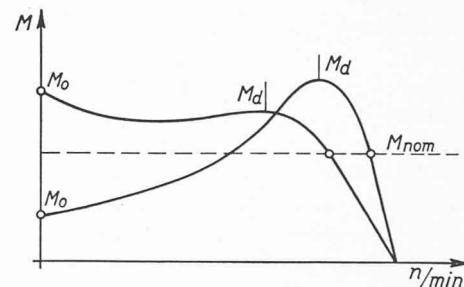


Fig. 11.

Des caractéristiques comprises entre ces extrêmes peuvent être obtenues suivant les besoins.

Il est souvent nécessaire de pouvoir varier la vitesse de rotation d'un moteur. Dans ce but, certaines machines sont équipées de boîtes à vitesse permettant de conserver la puissance totale en diminuant le régime de rotation, donc en ayant un couple inversement proportionnel à la vitesse de rotation. Cette solution présente l'inconvénient de ne pas permettre un réglage continu de la vitesse. Lorsque celui-ci est requis, on doit faire appel au moteur à collecteur. C'est le cas par exemple pour le réglage de vitesses d'avances ou de la vitesse de rotation de plateaux de tours pour coupe à vitesse constante.

Le moteur à collecteur se prêtant mal au raccordement direct sur le réseau alternatif, il faut effectuer les commandes en courant continu qui permet une souplesse de réglage incomparable à l'aide de régulateurs.

Le plus ancien et le plus connu des régulateurs est le groupe *Ward-Leonard*. Il comporte un moteur travaillant à vitesse constante qui entraîne une génératrice à courant continu. Celle-ci alimente à son tour un moteur à courant continu. Le réglage de la vitesse du moteur, qui se fait par l'intermédiaire de l'excitation de la génératrice, ne nécessite que peu de puissance et s'effectue avec beaucoup de souplesse.

Le contrôle de ces groupes à l'aide de commandes électroniques leur a donné une nouvelle vigueur en augmentant sensiblement la finesse du réglage, et en en permettant la commande avec des signaux très faibles fournis par exemple par des bandes magnétiques.

Les régulateurs électriques ou magnétiques (transducteurs) alimentent aussi des moteurs à collecteur. Le principe de fonctionnement de ces deux sortes de régulateurs est le même. L'énergie électrique transmise au moteur à partir d'une source de courant alternatif s'effectue à tension constante, en variant le temps pendant lequel passe le courant (fig. 12).



Fig. 12.

Dans le cas de régulateurs électriques, des thyatron permettent ce réglage, tandis que dans le cas des transducteurs, ce sont des inductivités qui comportent un noyau ferro-magnétique dont on règle la saturation.

Les régulateurs électriques, relativement peu onéreux, ne peuvent toutefois pas être réalisés pour de très grandes puissances, la fabrication des thyatron de grande puissance se heurtant à des difficultés technologiques. La durée de vie des tubes étant limitée à quelques milliers d'heures est souvent un inconvénient.

La construction de régulateurs magnétiques ou transducteurs de grande puissance est limitée par le prix de l'encombrement des inductivités. Par contre, étant basés sur les caractéristiques physiques de la matière, ils ne subissent aucune usure et la sécurité de fonctionnement est extrême.

Pour la commande de l'enclenchement et du déclenchement des moteurs on utilise des interrupteurs manuels ou des contacteurs commandés à distance par des relais ou par des boutons-poussoirs.

Avec l'augmentation de la complexité des machines, le nombre des appareils de commande, de surveillance, de verrouillage, a considérablement augmenté. Il n'est généralement plus possible de disposer d'assez de place sur le bâti de la machine pour placer tous les appareils nécessaires. On les dispose dans des coffrets ou des armoires électriques, en ne laissant sur la machine que le strict nécessaire.

Cette façon de procéder présente de nombreux avantages. L'installation électrique sur la machine est simplifiée. La fabrication des coffrets ou des armoires

formant une entité est préférable. Pour les machines automatiques, l'adaptation aux modifications des programmes de production est beaucoup plus facile. Dans le cas de chaînes « transfert », aucune autre solution n'est possible, puisqu'il s'agit de commander simultanément un groupe de machines en fonction des autres, ce qui nécessite d'une part des organes communs, et d'autre part de nombreuses interconnexions.

Les appareils de commande tels que les contacteurs, relais, interrupteurs, doivent être d'une robustesse à toute épreuve de façon à permettre plusieurs millions d'enclenchements sans perturbation. Ces chiffres ne sont pas exagérés, si l'on considère qu'avec une fréquence de sept enclenchements par minute pendant un an, à une seule équipe, le million d'enclenchements aura été dépassé. C'est du reste ce qui se produit très fréquemment.

L'installation électrique doit être réalisée avec un soin particulier de façon à assurer une sécurité de fonctionnement extrême. Les appareils et les canalisations doivent être montés de façon étanche afin d'éviter les perturbations causées par la pénétration de copeaux, de limaille ou des liquides d'arrosage.

Le soin à apporter au choix des appareils et à l'installation électrique est une nécessité impérieuse qui a été trop souvent négligée par certains constructeurs de machines-outils, car les pertes dues à l'arrêt d'une machine consécutif à une panne électrique peuvent avoir des conséquences financières plus lourdes que le renchérissement dû à l'emploi d'appareils électriques de meilleure qualité.

Il est d'ailleurs significatif que le manque de soins apporté à la partie électrique des machines ait amené, aux Etats-Unis, un regroupement d'industriels utilisant des machines-outils en grand nombre, à édicter leurs propres règles concernant les installations électriques et à faire pression sur les fabricants d'appareils pour qu'ils améliorent la robustesse de leur matériel. Ces prescriptions, les *JIC* (Joint Industry Council) *Electrical Standards*, ont été adoptées aux Etats-Unis et elles ont servi d'exemple lors de l'établissement de prescriptions semblables dans d'autres pays. Elles ne sont malheureusement pas applicables de façon systématique à cause des divergences qui existent entre les prescriptions électriques générales en vigueur dans les divers pays. Souhaitons que les efforts que déploie la Commission électrotechnique internationale, dans le but d'uniformiser les prescriptions nationales, soient couronnés de succès et rendent possible la fabrication de machines de haute qualité dont l'installation électrique uniforme sera admise dans le monde entier.

VII. ROUILLE DE CONTACT

La rouille de contact (en anglais *fretting corrosion*) peut être définie d'une manière générale par une action de surface intervenant entre deux solides soumis l'un par rapport à l'autre à de petits mouvements vibratoires sous une certaine charge.

Ce phénomène, qui est appelé également oxydation de friction, s'observe principalement sur des parties de machines à ajustement précis tels que : arbres à clavettes, fourreaux de broches, etc.

La rouille de contact a été observée déjà en 1911 et correctement diagnostiquée comme issue de vibrations, mais ce n'est guère qu'en 1927 qu'on commença à lui attribuer une certaine importance et à l'étudier. En fait, le phénomène est devenu une sorte de maladie moderne déterminée par l'augmentation des charges statiques ou dynamiques des machines et des vitesses de rotation toujours plus grandes.

Elle se produit souvent lors de transports par chemins de fer, les trépidations étant la cause des vibrations. Un exemple classique est le dommage causé aux roulements à billes des roues d'automobiles durant ces transports.

Les différentes études faites ont démontré que le mal provoqué aux surfaces par la rouille de contact débute par une abrasion mécanique produite par friction d'une surface sur l'autre. Le dommage n'est accompagné d'une action chimique que lorsqu'au moins l'une des deux surfaces peut réagir avec le milieu ambiant. Ce sera le cas des pièces en acier qui peuvent rouiller dans l'air.

Les vibrations apparaissent comme une condition essentielle pour provoquer le phénomène et il suffit d'une amplitude assez faible puisqu'un glissement alternatif de 10^{-7} cm provoque déjà de la rouille de contact. On voit donc que les propriétés élastiques et d'amortissement des matériaux en contact peuvent jouer un rôle en diminuant le glissement, toutes choses égales d'ailleurs.

Les dommages sont produits sur une surface solide, qu'elle soit métallique ou non. On peut provoquer de la rouille de contact aussi bien sur des métaux précieux que sur du verre. L'absence d'air diminue l'ampleur du phénomène d'usure simplement parce que les produits d'usure ne peuvent pas s'oxyder et que ce sont généralement ces oxydes abrasifs et durs qui augmentent la virulence du phénomène. Aucun liquide lubrifiant ne peut complètement prévenir la rouille de contact ; il est toutefois évident qu'une huile grasse, contenant des molécules polaires très adhérentes aux surfaces métalliques, aura tendance à retarder le phénomène, mais ne pourra pas le supprimer complètement.

Certains facteurs influencent favorablement ou défavorablement la rouille de contact ; cependant, il n'y a pas d'accord unanime entre les différents chercheurs s'occupant de cette question, de telle sorte qu'un même facteur apparaît comme un élément positif ou négatif suivant le mode expérimental employé. On peut cependant dire, d'une manière générale, qu'une surface rugueuse provoquera plus facilement de la rouille de contact qu'une surface bien finie. Une forte charge doit être également un facteur défavorable bien que certains auteurs affirment qu'elle n'intervient que secondairement. Il en va de même du jeu entre les surfaces et, suivant le dispositif expérimental utilisé, un faible jeu sera défavorable ou au contraire retardera l'apparition de la rouille de contact. Ainsi, l'ingénieur constructeur de machines-outils se meut souvent dans un dédale de théories contradictoires.

L'influence des métaux en contact a son importance ; en effet, l'oxyde du métal formé pendant l'abrasion joue un rôle important dans la détermination de la vitesse d'attaque ; un métal dur produisant un oxyde tendre résistera mieux qu'un métal mou produisant un

oxyde dur. Comme exemple, disons que l'étain en contact avec l'acier au chrome donne une vitesse d'usure plus grande que l'acier sur le même acier au chrome.

On peut s'attendre à voir les dommages causés aux surfaces augmenter avec l'amplitude, puisque la longueur du chemin de friction augmente ; pourtant, avec des surfaces lubrifiées, ceci n'est vrai que jusqu'à une certaine amplitude au-delà de laquelle la vitesse de friction est suffisante pour qu'un film de lubrifiant hydro-dynamique prenne naissance et isole les deux surfaces.

On sait que l'usure intervenant entre deux surfaces soumises à des vibrations est un phénomène complexe, difficile à reproduire expérimentalement et dont le mécanisme est encore très mal compris. Une théorie veut que l'usure soit produite par une attrition moléculaire causée par un contact toujours plus étroit entre les molécules des deux surfaces soumises l'une par rapport à l'autre à des vibrations, et provoquant un arrachement de matière. Une théorie plus récente fait appel au mécanisme de friction proprement dit : lorsque deux solides sont mis en contact sous une certaine force, il y a une répartition de cette force sur les points de contact formant aspérités. Ces points de contact sont en nombre très restreint, même dans le cas de surfaces soigneusement usinées, de telle sorte que, sur ces points, la pression spécifique est très élevée, trop élevée même, amenant ainsi un fluage et une soudure de ces points jusqu'à ce que la surface devienne suffisante pour supporter la charge. La friction résulte alors de l'arrachement de ces soudures et l'usure de l'attaque de la surface des deux solides. Dans la rouille de contact, l'oxydation des produits de l'usure est probablement déterminée et activée par l'accroissement local de la température résultant de la friction qui, sur ces points, doit certainement dépasser 400° C.

La lutte contre la rouille de contact est une lutte dans laquelle l'ingénieur n'est pas toujours vainqueur. Il ne peut, en fait, appliquer que des palliatifs retardant l'apparition du phénomène. Le graissage par graisse semi-fluide est avantageux parce qu'il empêche l'accès de l'oxygène aux produits de l'usure et ceux-ci se transforment moins rapidement par oxydation en produits abrasifs. Le graissage au bisulfure de molybdène est peut-être plus avantageux en ce sens qu'il permet une séparation plus durable des deux surfaces par les propriétés physico-chimiques d'adhérence exceptionnelles du bisulfure de molybdène. Des métaux mous tels que l'indium et le plomb peuvent, dans certains cas, diminuer la rouille de contact par leurs médiocres propriétés élastiques qui deviennent favorables dans ce cas. La parkérisation, qui est également un moyen de séparer les surfaces, donne de bons résultats, mais toujours limités par la durée de la couche de parkérisation qui disparaît à la longue.

Pour finir, signalons que différents couples de métaux ont été essayés : acier contre chrome, acier contre nickel, etc., dans le but de trouver un lien entre les propriétés physico-chimiques des métaux et leur susceptibilité à la rouille de contact. Mais aucune loi ne peut, pour l'instant, être retenue : l'acier contre le chrome est très néfaste, l'acier contre le nickel améliore plutôt la tenue à la rouille de contact... pourquoi ? Espérons qu'un jour il existera une réponse à cette question.