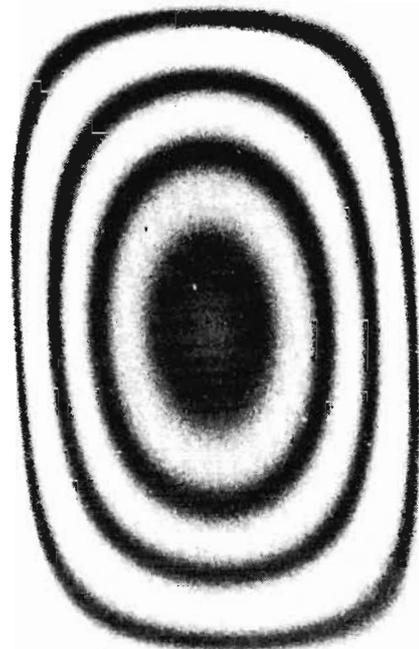


# LES LASERS



Marc FERRETTI

## LE LASER S'ADAPTE AUX MACHINES-OUTILS

**L**ORSQU'ON cherche un exemple de système mécanique faisant appel à des moyens métrologiques, le premier qui vient à l'esprit est la machine-outil.

Le problème dominant, en fabrication, est, et a toujours été, celui de la précision d'usinage. Les tolérances acceptées au début de ce siècle se chiffraient en dixièmes de millimètre; elles sont rapidement passées à l'échelle du centième et, aujourd'hui, le micron est souvent souhaité, voire imposé par l'utilisateur.

Pour se mettre à l'abri des imperfections propres à la machine et de l'action des divers paramètres liés au travail sur machine-outil (forces d'usinage, force de bridage,...) on peut faire des mesures sur la pièce en cours d'usinage et arrêter celui-ci lorsque les dimensions exactes sont obtenues, ou encore donner au système des références indépendantes de l'ambiance. La mise en œuvre du premier de ces deux modes opératoires est difficilement réalisable; la seconde méthode revient à améliorer la définition métrologique de la machine-outil en substituant à ses références internes (règle, glissières,...) des références externes (mesures des déplacements par interférométrie, guidage par rayon lumineux).

### PRÉCISION, RAPIDITÉ, ABSENCE DE CONTACTS MATÉRIELS

Grâce aux références externes, les positions et les guidages ne sont plus faussées par les influences perturbatrices liées à l'environnement.

Les caractéristiques optiques des lasers sont très diverses. Le laser est, en particulier, une source optique cohérente; la cohérence revêt en fait deux aspects: cohérence temporelle, cohérence spatiale.

La cohérence spatiale signifie que l'état de vibration de la lumière, en un point du faisceau, est en relation constante avec l'état de vibration de tous les autres points du faisceau émis au même instant.

Alors que la cohérence spatiale caractérise le comportement de l'émission laser à un instant déterminé, la cohérence temporelle va caractériser le comportement, au cours du temps, du champ lumineux en un point. Celui-ci est une vibration périodique, dont la fréquence et la phase sont parfaitement déterminées: la lumière du laser est parfaitement monochromatique. Entre les états de vibration lumineuse, en un même

point, à deux instants différents, existe une relation qui ne dépend que de l'écart entre ces instants.

Cette dernière propriété permet de faire interférer les vibrations lumineuses émises à deux instants différents de même que la cohérence spatiale permet de faire interférer entre elles des vibrations simultanées, mais provenant de points différents du faisceau.

La cohérence temporelle est caractérisée par la distance maximale à laquelle deux points d'un même faisceau sont encore en

phase. Pour une source classique, cette distance n'excède pas 53 cm (pour les sources au krypton); dans le cas du laser, la distance correspondante atteint plusieurs kilomètres!

Lorsque deux faisceaux lumineux d'égale intensité sont dirigés de façon telle qu'ils se mélangent, l'intensité totale dépend de la différence de phase entre les deux faisceaux. La combinaison de deux ondes lumineuses ne donne pas nécessairement lieu à un accroissement d'intensité (fig. 1); il est tout à fait possible qu'elles se

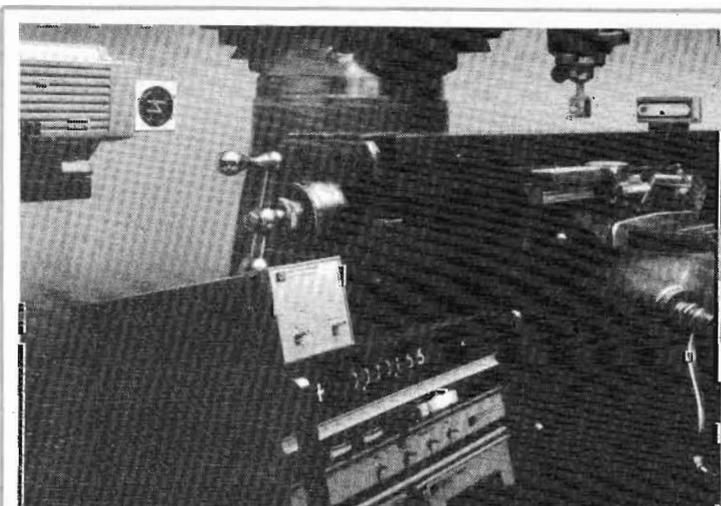


Photo 1 - L'interféromètre à laser: « une règle de 70 mètres graduée au centième de micron ». (Cliché Hewlett-Packard).

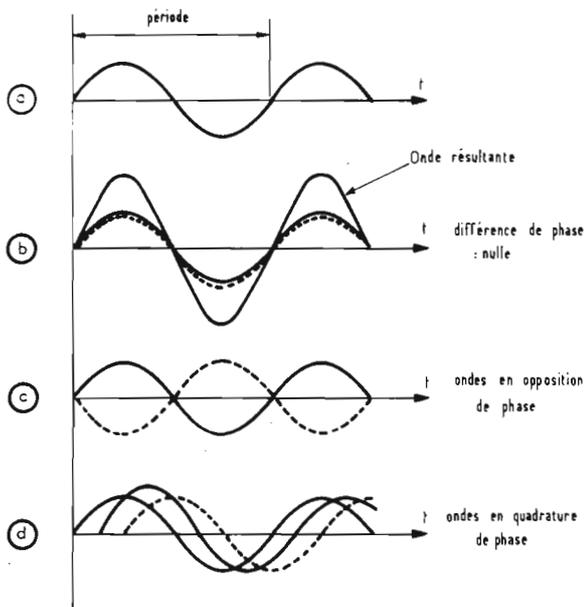


Fig. 1 - Les interférences : (a) Considérons une vibration sinusoïdale tracée en fonction du temps. (b) Si deux telles vibrations se combinent, elles se renforceront mutuellement donnant une vibration d'amplitude double. (c) Si par contre une onde a exactement une

demi-période d'avance sur l'autre, les vibrations se détruiront complètement. (d) Interférence entre deux ondes déphasées de  $90^\circ$  : l'amplitude résultante est alors 1,4 fois supérieure à l'amplitude de chacune des vibrations.

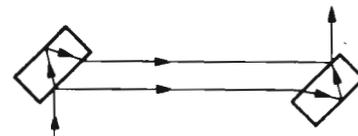


Fig. 2 - Interféromètre de Jamin.

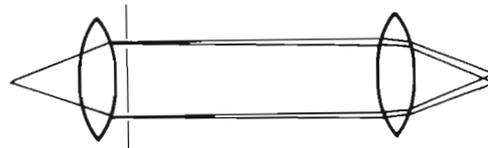


Fig. 3 - Interféromètre de Rayleigh.

détruisent partiellement l'une l'autre, et même complètement. L'intensité optique passera alors par des valeurs maximales et minimales dans un champ d'interférences, donnant lieu à des franges claires et sombres.

Néanmoins deux faisceaux de lumière incohérente ne peuvent interférer. En effet, les changements de phase, dans deux faisceaux entièrement indépendants sont uniquement déterminés par le hasard : même si à un instant donné, il se trouve que les phases soient les mêmes, de telle façon que les deux faisceaux se renforcent mutuellement, l'instant d'après, elles ont changé si radicalement qu'ils se détruisent l'un l'autre. La distribution d'intensité

va donc fluctuer très rapidement, trop rapidement pour que ces fluctuations puissent être observées.

Deux faisceaux lumineux, pour interférer, doivent donc être cohérents.

Avec une source classique, l'on ne peut avoir d'interférences que si deux parties d'un même faisceau sont amenées à se rencontrer, car alors tout changement de phase d'une partie sera accompagné par un changement de phase identique dans l'autre partie. Pour obtenir des interférences, il est donc nécessaire de diviser en deux ou plusieurs parties un faisceau lumineux et de les faire se rejoindre après. La différence entre les chemins parcourus par les

deux faisceaux ne doit pas cependant être trop grande : si le temps nécessaire pour parcourir les deux chemins diffère de plus de 10 nanosecondes, les deux parties deviendront incohérentes, puisque la phase du faisceau original aura, durant ce temps, changé au hasard.

Avec un laser, ces difficultés sont immédiatement levées, il est possible de mesurer des différences de chemin optique de plusieurs mètres !

Il existe plusieurs types d'interféromètres.

Dans le cas de l'interféromètre de Jamin (fig. 2), un faisceau lumineux tombe sur une épaisse lame de verre à faces parallèles et est séparé en deux faisceaux lumi-

neux qui sont rassemblés ultérieurement par une autre lame à faces parallèles d'égale épaisseur. Si les deux lames font entre elles un petit angle, les deux chemins optiques ne seront pas identiques et un système de franges pourra être observé : l'interféromètre permet donc de mesurer un angle par l'identification des franges. Il est possible, également, d'insérer, sur l'un des chemins optiques, des milieux transparents créant une différence de phase entre les deux faisceaux : par exemple, un tube dans lequel on fait le vide par pompage. La différence de phase va engendrer un déplacement (mesurable) du système de franges : le phénomène peut être mis à profit pour mesurer une densité.

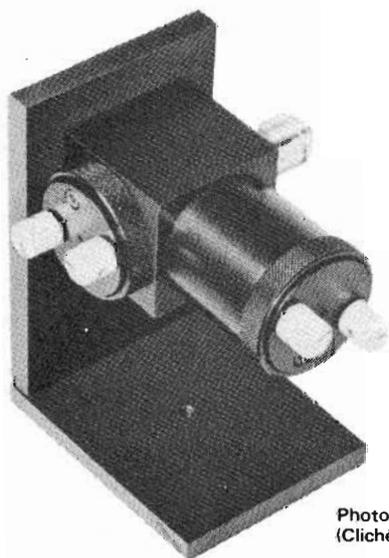


Photo 2 - Interféromètre de Michelson. (Cliché El-Don).

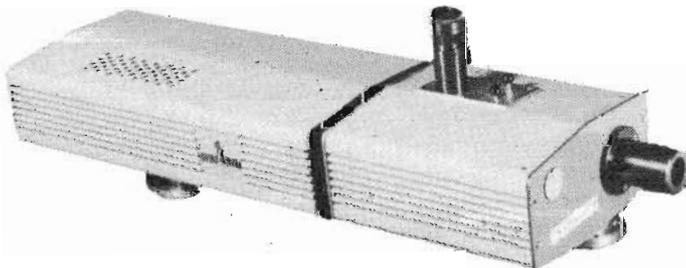


Photo 3 - Laser pour interféromètre industriel. (Cliché Siemens).

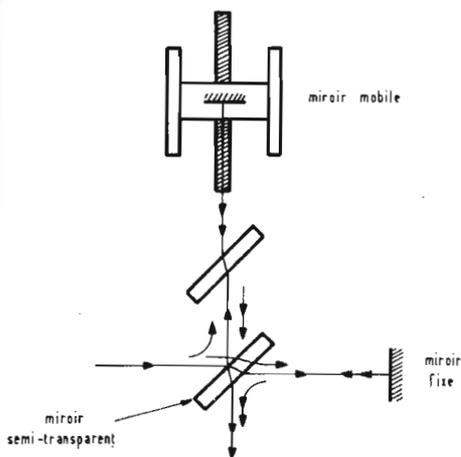


Fig. 4 - Interféromètre de Michelson.

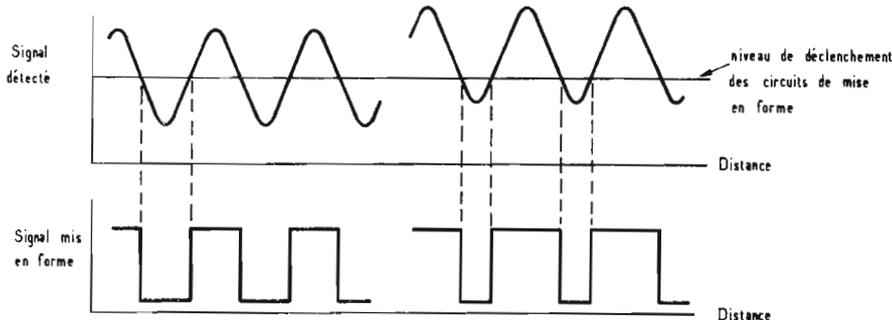


Fig. 5 - Une fluctuation du signal optique peut modifier profondément la forme des signaux de comptage. Les performances de l'interféromètre s'en ressentent nettement.

une pression ou une température de gaz.

L'interféromètre de Rayleigh (fig. 3) est constitué par une fente-source étroite, placée au foyer d'une lentille optique, derrière laquelle est placé un écran percé de deux fentes. Ces dernières jouent le rôle de deux sources cohérentes. Une seconde lentille focalise au même point les deux faisceaux parallèles et l'on observe des interférences.

Enfin, dans l'interféromètre de Michelson (fig. 4), le faisceau est tout d'abord divisé en deux parties par un verre semi-argenté. Chacun de ces deux faisceaux suit un chemin différent et se trouve réfléchi par un miroir; l'un des miroirs est monté sur une glissière qui peut se déplacer de façon mesurable. Un système de franges prend naissance en sortie. En déplaçant le miroir mobile, on déplace le système de franges. On peut donc alors mesurer des déplacements, par exemple, en comptant le nombre de franges se présentant devant une cellule photosensible.

L'interféromètre de Perot-Fabry est conçu sur un principe très voisin de celui de l'interféromètre de Michelson.

Comme la longueur de cohérence du faisceau laser est pratiquement illimitée, il est possible de mesurer avec de tels interféromètres des différences de trajets de plusieurs mètres.

Ce comptage des franges qui se déplacent devant les cellules photoélectriques requiert l'emploi d'un dispositif électronique « bidirectionnel » (les franges peuvent se déplacer dans deux sens opposés). Les signaux optiques provenant de l'interféromètre donnent naissance à des signaux

électriques de forme quasi-sinusoidale. Pour déclencher les circuits logiques de comptage et de détection de sens de déplacement, les signaux sinusoidaux sont transformés en impulsions carrées par des triggers de Schmitt. Il peut arriver que des fluctuations de l'intensité du faisceau laser, dues par exemple à des défauts d'alignement pendant le déplacement du miroir mobile, ou à des variations atmosphériques, engendrent des fluctuations d'amplitude des signaux électriques (fig. 5). Pour éviter de tels ennuis, il faut pouvoir agir sur le seuil de déclenchement des circuits de mise en forme à triggers de Schmitt. Un circuit (fig. 6) ajustant en permanence ce seuil a été mis au point au National Physical Laboratory (Teddington Angleterre); et il sert à compenser toutes fluctuations des signaux optiques.

**OÙ L'EFFET ZEEMAN EST MIS EN ŒUVRE**

Un laser est un milieu oscillant, et comme tout milieu oscillant, il peut fonctionner, en théorie, sur plusieurs modes; à chaque mode est associé un niveau d'énergie. Le nombre de modes est fini: il est compris, selon les lasers, entre l'unité (lasers à CO<sub>2</sub>) et une centaine (laser à néodyme).

Considérons un laser à hélium-néon oscillant sur un mode: la radiation d'un tel mode est limitée à une bande de fréquences extrêmement étroite et l'on parle, en général, de la fréquence du laser. Cette fréquence est fixée par la distance entre les miroirs de laser; néanmoins sa valeur ne peut

être connue avec suffisamment de précision, en raison d'un effet, l'effet Doppler, des molécules de gaz; la fréquence est connue à 10<sup>-6</sup> près. Pour accroître le degré de précision (par exemple la porter à 10<sup>-7</sup>, ce qui permet de mesurer des déplacements de l'ordre du mètre et avec une précision de quelques dixièmes de micron), on utilise une méthode développée dès 1964 et faisant appel à l'effet Zeeman. Le laser à hélium-néon est placé dans un champ magnétique axial, dont l'effet est de décomposer chaque raie spectrale en deux composantes à polarisation circulaire en sens opposé. Ces deux composantes n'ont pas exactement la même fréquence

(écart de fréquence voisin du mégahertz).

L'interféromètre utilisant ce faisceau à deux composantes peut être conçu selon la figure 7. Le faisceau frappe d'abord un miroir semi-transparent; la radiation réfléchie est détectée par une cellule photoélectrique placée derrière un analyseur ne laissant passer que la lumière à polarisation linéaire dans une direction privilégiée. La superposition de ces deux composantes à polarisation circulaire correspond à une onde à polarisation linéaire; comme les fréquences des deux composantes sont légèrement différentes, le sens de polarisation de l'onde résultante tourne « lentement » à

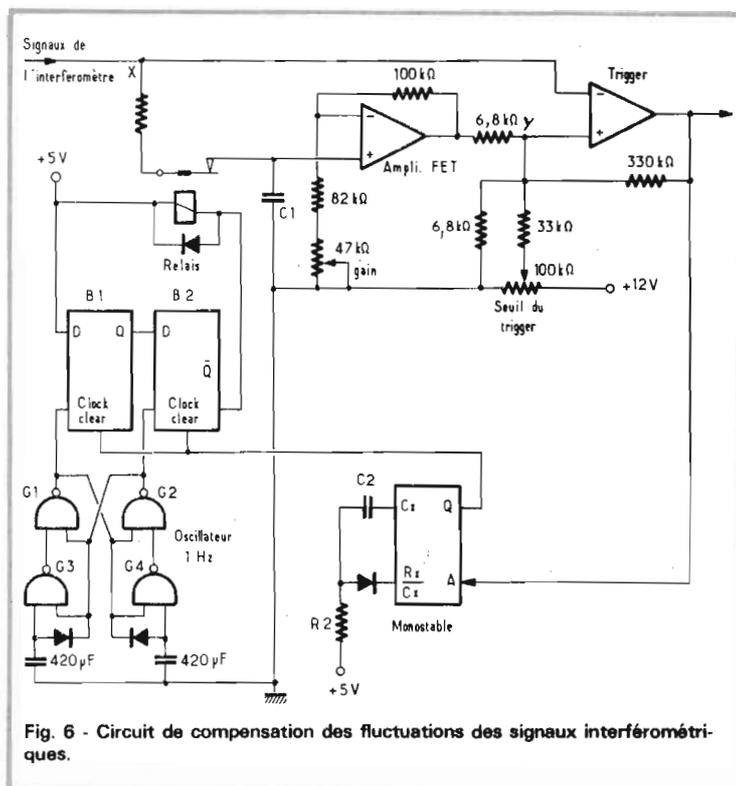


Fig. 6 - Circuit de compensation des fluctuations des signaux interférométriques.

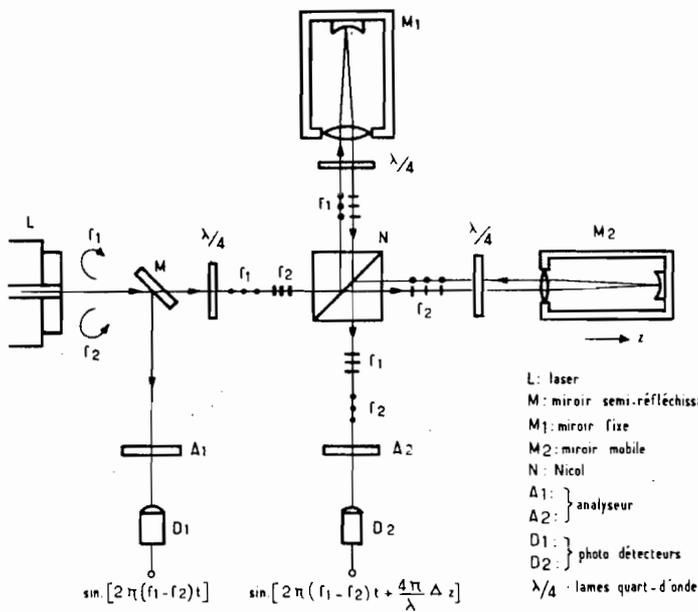


Fig. 7 - L'interféromètre à laser.

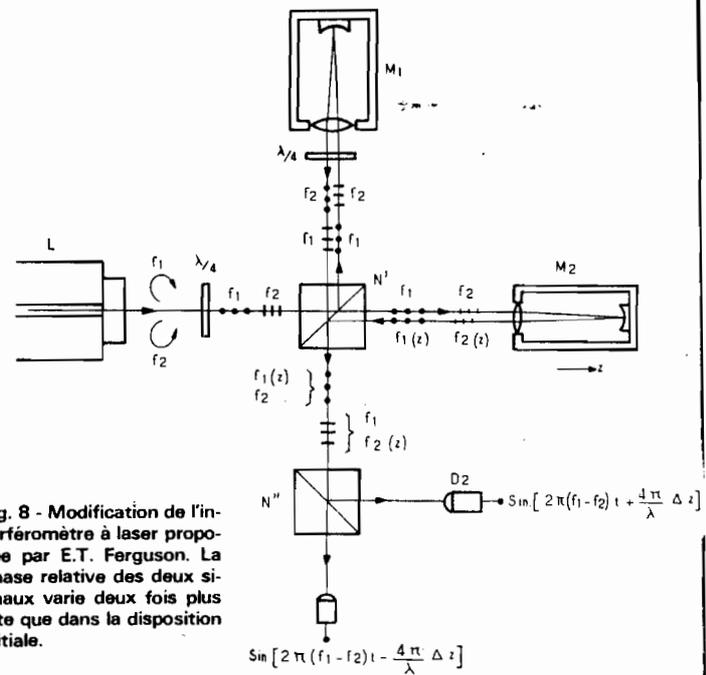


Fig. 8 - Modification de l'interféromètre à laser proposée par E.T. Ferguson. La phase relative des deux signaux varie deux fois plus vite que dans la disposition initiale.

la fréquence d'un mégahertz environ. C'est le signal de référence.

La partie du faisceau laser non-réfléchi par le miroir semi-transparent traverse une lame quart-d'onde qui transforme chacune des deux composantes à polarisation circulaire en une onde à polarisation linéaire; les deux ondes obtenues ont des sens de polarisation à angle droit entre elles.

Ces deux composantes sont alors introduites dans l'interféromètre proprement dit. Elles y frappent un cristal dénommé « Nicol », qui sépare les composantes. L'une d'elles est presque totalement transmise, tandis que l'autre subit une réflexion totale. L'une des composantes va traverser un système fixe, tandis que l'autre va passer dans le système mobile de l'interféromètre.

Des lames quart-d'onde sont placées sur le parcours de chaque composante qui, à chaque passage, fait pivoter de 45 degrés la direction de polarisation. De sorte qu'après avoir été réfléchi par les miroirs, chaque composante a vu son plan de polarisation pivoter de 90 degrés en arrivant de nouveau sur le Nicol (puisque les faisceaux traversent deux fois les lames quart d'onde).

La composante qui, initialement, avait été réfléchi par le Nicol, est correctement polarisée pour être transmise intégralement.

L'autre composante subit une réflexion totale.

Pratiquement, les deux fais-

ceaux se trouvent alors de nouveau mélangés et viennent à interférer. Sur le détecteur, on obtient un signal de fréquence voisine du mégahertz, mais dont la phase est une fonction linéaire du déplacement du miroir mobile.

Ce déphasage peut être déterminé en grandeur et en direction

(selon le sens de déplacement du miroir) en comparant la phase du signal d'interférence à celle du signal de référence.

Une modification a été proposée par E.T. Ferguson, des laboratoires Philips; au lieu de séparer immédiatement les deux composantes par un prisme polarisant (le

Nicol), on envoie les deux composantes vers chacun des deux miroirs (fig. 8).

### POUR LES MACHINES-OUTILS

La première application de l'interféromètre à laser concerne l'étalonnage de machines-outils à commande numérique.

L'interféromètre à laser peut, par exemple, mesurer la dilatation thermique axiale d'une poutre de tour.

L'interféromètre peut également mesurer la vitesse de déplacement du miroir mobile (et en évaluant la vitesse de variation de la phase du signal): il peut donc servir à étalonner la vitesse d'avance d'une machine-outil, en même temps que l'on mesure la précision du réglage de position.

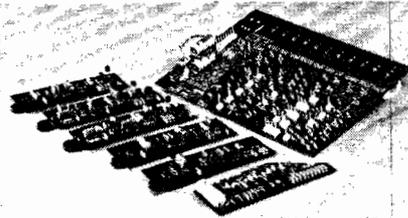
Hewlett-Packard, qui dispose d'un système interférométrique à laser, a constitué un ensemble automatique en associant ce système à une calculatrice électronique modèle 20. Un ensemble de programmes a été développé pour des applications typiques en métrologie: étalonnage de table granite, tracé et analyse des erreurs de vis-mères, analyse de la géométrie de machines-outils ou de machines à mesurer comprenant la rectitude, le parallélisme et la perpendicularité.

Nous y reviendrons le mois prochain...

Marc FERRETTI  
No 1478 - Page 307

## NOUVEAUTÉ KITORGAN 1974

### GÉNÉRATEUR DE RYTHMES ARMEL RO1 10 Rythmes



● Reproduit automatiquement 10 rythmes différents avec un réalisme surprenant (Swing, Blues, Slow-Rock, Western, Marche, Valse, Tango, Bossa-Nova, Samba, Cha-Cha, et toutes combinaisons de ces rythmes).

● Comporte: un compteur de temps; un circuit de décodage, de combinaison et de commutation (logique à diodes), sur lequel sont fixés le potentiomètre de tempo, et les 10 interrupteurs de rythmes, ainsi que les générateurs d'instruments.

Cinq générateurs d'instruments: Bongo, Claves, Grosse Caisse, Balais, Cymbales.

● Montage sans circuit intégré, ni fils de liaisons; télécommandable à distance (33 transistors, 181 diodes).

● Démarrage au 1<sup>er</sup> temps de la mesure. Voyant de 1<sup>er</sup> temps.

● Réalisation hautement élaborée constituant une excellente initiation aux circuits logiques complexes.

● Peut s'inclure dans un orgue KITORGAN, ou peut s'utiliser seul (Alimentation: 12 V continu; Sortie: 1 V). Prévu pour recevoir ultérieurement des compléments tels que l'accompagnement automatique.

L'ensemble RO1, à monter, en KIT: ..... Franco: **860,00 F**

Demandez dès aujourd'hui la nouvelle brochure illustrée: **CONSTRUIRE UN ORGUE KITORGAN**

Une documentation unique sur l'orgue et la construction des orgues électroniques. NOMBREUX SCHEMAS ET ILLUSTRATIONS. La brochure: 5 F franco.

Démonstration des orgues KITORGAN exclusivement à notre studio: 56, rue de Paris, 95-HERBLAY - sur rendez-vous - tél.: 997.19.78

## S.A. ARMEL BP 14 - 95-HERBLAY

BON POUR UNE BROCHURE à adresser à S.A. ARMEL:

Veillez m'envoyer votre nouvelle brochure « CONSTRUIRE UN ORGUE ». Ci-joint un mandat - chèque postal - chèque bancaire (\*) de 5 F

(\*) Rayer les mentions inutiles.

NOM: .....  
Profession: .....  
Adresse: .....  
Signature: .....

H.P. NOV. 74