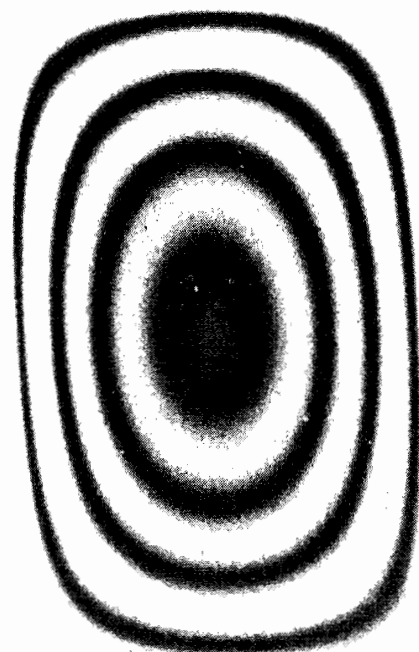


LES LASERS



Marc FERRETTI

DU VELOCIMETRE... A L'INTERFEROMETRE

LE Salon de la Physique qui s'est tenu au mois de décembre dernier, fut le point de convergence de l'industrie des lasers : la CILAS, Micro-physic, Optilas, Quantel, RMP, les Equipements Scientifiques S.A., Soro Electro-Optics, Spectra-Physico y présentaient leurs derniers équipements, tandis que le CNET, les Laboratoires de Marcoussis, les Laboratoires de recherches de Thomson-CSF, la CEA firent part des derniers développements, et des recherches les plus récentes entreprises dans l'industrie des lasers.

Au Salon de la Physique, furent également démontrées les dernières applications technologiques des lasers. Parmi celles-ci figurent un vélocimètre de conception française, commercialisé par CERMÉ Electronique et développé à la Direction des Etudes et Recherches de l'E.D.F. L'appareil offre la possibilité d'effectuer des mesures instantanées, ponctuelles, et sans contact d'une vitesse de fluide, ou de défilement de la surface d'un solide. Comme dans tout vélocimètre à

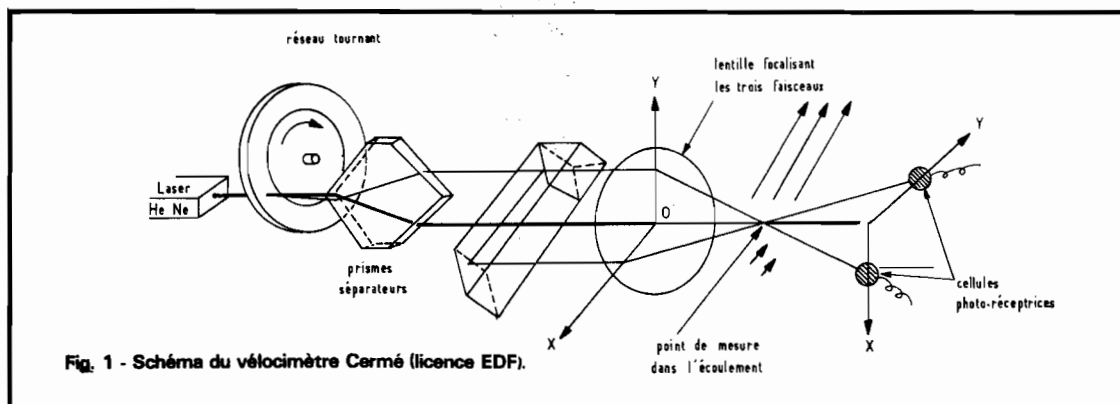
laser, la mesure repose sur l'analyse de la lumière diffusée par les particules en suspension dans un fluide, ou par la surface d'un objet en mouvement ; l'émetteur de lumière est un laser à hélium-néon ; la variation de fréquence de la lumière, provoquée par l'interaction de l'onde avec les particules en mouvement (effet Doppler) est liée, par une relation simple à la vitesse de ces particules (*) : la mesure du battement de fréquence obtenu permet d'accéder simplement à la vitesse (fig 1). Le matériel comporte un émet-

teur laser dont la lentille frontale focalise en un même point quatre faisceaux laser. Les faisceaux sont polarisés perpendiculairement deux à deux. Un réseau tournant, dont la vitesse de rotation est commandée par un moteur asservi en vitesse, permet de provoquer un décalage du zéro de vitesse sur chacune des composantes correspondant aux deux groupes de faisceaux.

Du point focal, intersection des quatre faisceaux, naissent deux signaux simultanés lorsqu'une particule traverse le volume de

mesure. Deux cellules photoélectriques recueillent les signaux transmis. Les fréquences de ces signaux sont respectivement proportionnelles aux deux composantes de la vitesse dans le plan perpendiculaire à l'axe de l'émetteur. Chacune des cellules est reliée à une unité électronique de traitement du signal Doppler.

Les applications de ce vélocimètre sont diverses : étude des échanges thermiques, étude de la turbulence et des couches limites, étude des flammes, étude de la houle. Ce dispositif permet de



OÙ L'ON MET À PROFIT L'EFFET RAMAN

Un gaz, lorsqu'il est éclairé par un faisceau monochromatique, diffuse la lumière qui le traverse ; le spectre de la lumière diffusée présente, de part et d'autre de la longueur d'onde centrale (celle du faisceau éclairant) une série de bandes ou de raies beaucoup moins intenses. La diffusion « Rayleigh » caractérise la diffusion sur la longueur d'onde du faisceau éclairant ; la diffusion « Raman » concerne les longueurs d'ondes supplémentaires apparaissant dans le spectre du faisceau diffusé. Ces raies Raman sont spécifiques du corps analysé.

La lumière Raman diffusée par une molécule est incohérente : la lumière diffusée par N molécules est proportionnelle au nombre N ; ces considérations ont été mises à profit par M. Merian, à l'ONERA, pour la mesure de densités gazeuses ponctuelles, en soumettant le milieu à analyser à un rayonnement laser et en mesurant point par point les intensités diffusées par effet Raman.

On a ainsi utilisé la raie à 0,5145 micron d'un laser à argon ionisé de puissance égale à 0,5 watt pour

erreur sur la mesure de 0,4 %, en plus, lorsque la distance entre les deux faisceaux est de 0,4 mm au point de mesure). Pour analyser correctement un écoulement turbulent, il convient d'effectuer un grand nombre de mesures simultanément dans l'espace et dans le temps. Ainsi, pour une zone de l'écoulement, il est préconisé de réaliser jusqu'à 1 000 mesures dans le temps, en raison du caractère aléatoire d'un écoulement turbulent : les résultats d'essais doivent, ensuite, être analysés par les méthodes statistiques classiques, afin de déterminer une densité de probabilité. On peut, ainsi, connaître la direction et l'intensité de la vitesse moyenne locale de l'écoulement turbulent, et évaluer l'importance de la turbulence.

Pour appliquer cette technique à l'investigation des turbomachines, il faut compléter le montage expérimental par un modulateur optique ; celui-ci ne transmettra le faisceau laser vers la zone expérimentale que pendant un court instant ; la durée de l'impulsion laser, et sa fréquence dépendront de la vitesse de rotation du rotor, et du nombre d'aubes, ainsi que du nombre de points de mesure dans un canal entre deux aubes.

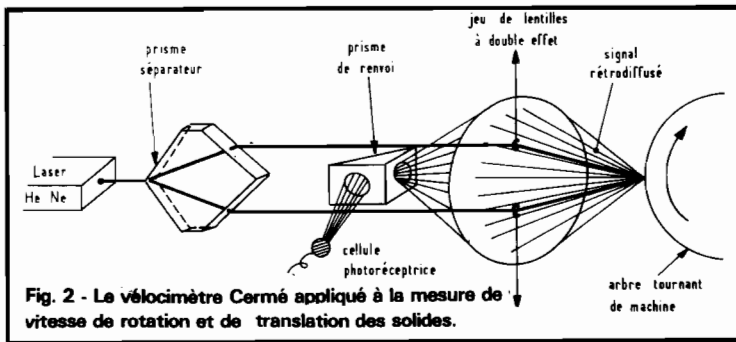


Fig. 2 - Le vélocimètre Cerné appliqué à la mesure de vitesse de rotation et de translation des solides.

mesurer aussi la vitesse instantanée de défilement de la surface d'un solide dans le plan perpendiculaire au faisceau de l'émetteur : il sert alors pour les mesures de transitoires dans les machines tournantes (démarrage, arrêt, fluctuation de vitesse), les mesures d'accélération, ou encore pour la commande et le contrôle de vitesse de translation (commandes numériques, automatismes). Le matériel comporte un émetteur, une cellule réceptrice et un système électronique de traitement (figure 2) ; il permet d'effectuer des mesures dans une large gamme de vitesses (de 1 mm/s à 100 m/s) avec un temps de réponse inférieur à la milliseconde.

LA MÉTHODE DU DOUBLE FAISCEAU

Les turbomachines fournissent un champ d'expérimentation nouveau pour les vélocimètres à laser. Certains chercheurs en ont utilisé ceux-ci pour l'investigation de l'écoulement au sein de rotors de compresseurs, tournant, néanmoins à faible vitesse. Si l'on désire employer la méthode aux grandes vitesses de rotation, le problème du bruit de fond, qui devient intense, se pose alors sérieusement. L'une des solutions consiste à améliorer le pouvoir discriminatoire de l'électronique associée au vélocimètre ; en Allemagne, R. Schodl a trouvé une autre technique qu'il a baptisée du nom de « technique à double faisceau » ; elle présente des points communs avec le montage à effet Doppler. Ici, le faisceau produit par la source est divisé en deux parties, et ce sont deux faisceaux séparés par une distance variant entre 0,3 et 0,5 mm qui traversent le canal où l'on effectue la mesure de vitesse. La lumière rétrodiffusée par les particules entraînées dans l'écoulement, au cours de leur traversée des deux petits faisceaux laser, est captée par un photomultiplicateur unique.

Une particule qui traverse les deux faisceaux laser, produira deux impulsions optiques discrètes, dont l'intervalle dans le temps va, bien sûr, dépendre de la distance des deux faisceaux : cet intervalle vaut 2 microsecondes pour une vitesse de 300 m/s. Ainsi, la mesure de l'intervalle fournit une indication de la vitesse de l'écoulement.

Ce même type de vélocimètre à double faisceau peut aussi servir à mesurer une vitesse moyenne dans un écoulement turbulent. Dans le montage adopté, chacun des signaux optiques rétrodiffusés est capté par un photomultiplicateur : on utilise ainsi deux photomultiplicateurs, un par faisceau laser. On peut alors mesurer des grandes vitesses (plusieurs kilomètres par seconde, avec une

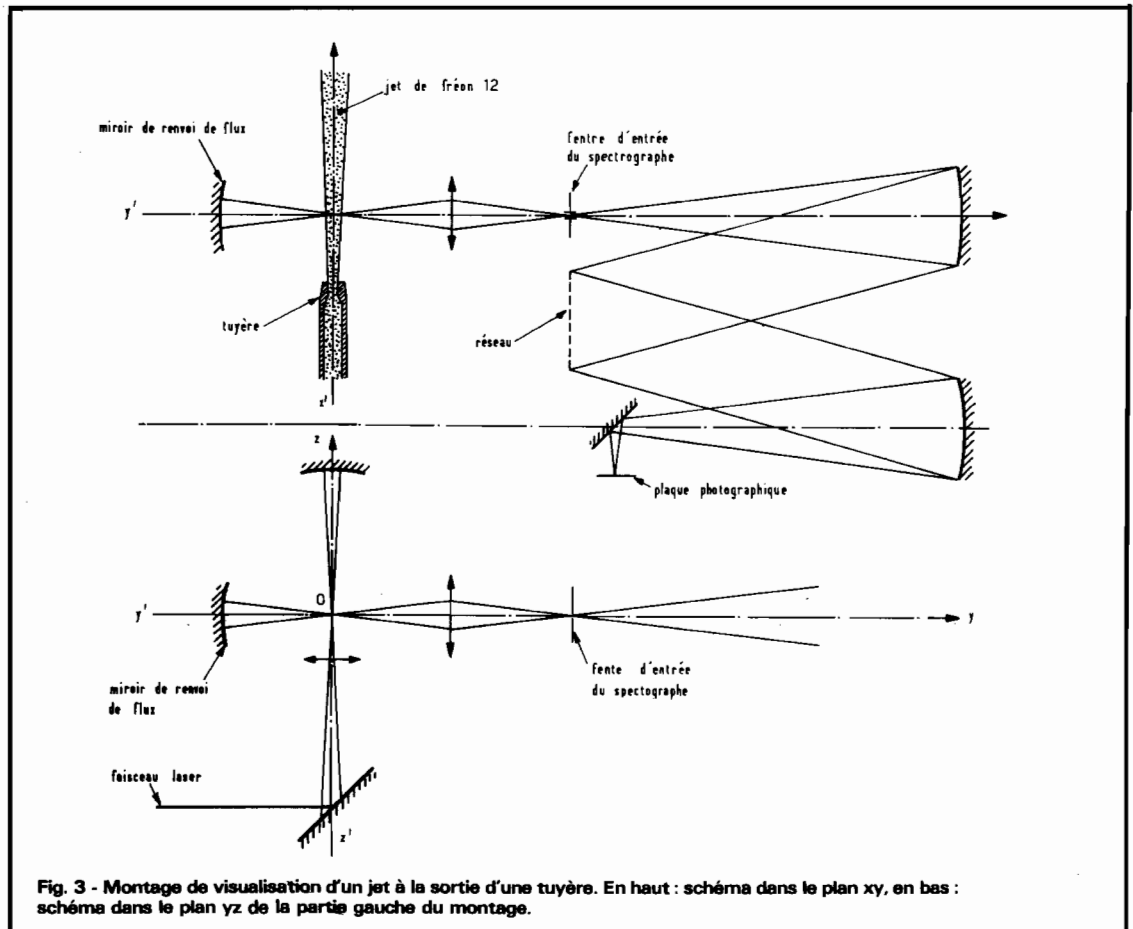


Fig. 3 - Montage de visualisation d'un jet à la sortie d'une tuyère. En haut : schéma dans le plan xy, en bas : schéma dans le plan yz de la partie gauche du montage.

analyser et visualiser un écoulement gazeux en sortie de tuyère. Le gaz employé est du fréon 12 ; il a un indice optique n élevé ($n - 1 = 1,06 \cdot 10^{-3}$ à 0,5145 micron), et il est caractérisé par une faible vitesse du son (environ 130 m/s). Etant donné que le nombre de Mach est défini comme le rapport d'une vitesse à la vitesse du son, il est relativement aisé d'atteindre des nombres de Mach élevés avec ce gaz.

Le montage est placé à proximité de la sortie d'une buse ou d'une tuyère, d'où sort un écoulement supersonique (ou transsonique) de gaz.

Diverses mesures ont pu ainsi être faites en promenant un laser sur un même jet, ou sur des jets différents. La retranscription des résultats est faite sous forme de « carte » où sont tracées les courbes d'égale densité gazeuse (fig. 4).

Au dernier Salon de la Physique, l'ONERA présentait ce type d'appareil, dont l'application peut être étendue à des mesures diverses de concentration dans des flammes, des écoulements aérodynamiques, etc. Suivant les gaz, la sensibilité de l'appareil est de 10 à 1 000 parts par million (fig. 5).

Cette technique a été appliquée dans d'autres laboratoires et trouve des débouchés scientifi-

ques les plus variés : par exemple, aux Sandia Laboratories (Livermore, Californie) Danny L. Hartley s'est servi de l'effet Raman pour l'analyse du mélange de jets gazeux. Le laser utilisé est un laser pulsé à azote, de 100 kW, dont le faisceau est focalisé en un spot de 1 mm environ, au sein de la chambre d'expérience.

L'INTERFÉROMÉTRIE EN AÉRODYNAMIQUE

Les interféromètres sont, depuis longtemps, fort utilisés en aérodynamique. Il existe plusieurs types d'interféromètres.

Dans le cas de l'interféromètre de Jamin (fig. 6), un faisceau lumineux tombe sur une épaisse lame de verre à faces parallèles et est séparé en deux faisceaux lumineux qui sont rassemblés, ultérieurement, par une autre lame à faces parallèles d'égale épaisseur. Si les deux chemins optiques ne sont pas identiques, on observera un système de franges sur un écran interceptant les rayons issus de la seconde lame à faces parallèles. Deux chemins optiques peuvent être différents si les deux faisceaux traversent des milieux optiques d'indices de réfraction différents. Il en résulte

une différence de phase ; le nombre de franges dépend de cette différence de phase, donc de la différence d'indice de réfraction ; si ces milieux sont formés de gaz à des pressions différentes, la mesure du nombre de franges fournit une indication sur la différence de pression des deux gaz.

L'interféromètre de Rayleigh permet aussi de mesurer une telle différence de pression. Il est constitué par deux fentes jouant le rôle de deux sources cohérentes (fig. 7). Une lentille focalise au même point les parties des faisceaux parallèles deux à deux, et on obtient des interférences.

Un troisième type d'interféromètre est l'interféromètre de Michelson (fig. 8) dont le principe est similaire aux précédents.

Ces divers appareils peuvent tous être utilisés en aérodynamique expérimentale. L'interféromètre de Michelson, bien que de conception très simple présente un inconvénient, celui de faire traverser deux fois la veine d'expérience par le faisceau lumineux. On fait davantage appel à l'interféromètre de Mach-Zehnder (fig. 9) qui est une variante de l'interféromètre de Jamin. Dans ce montage, le faisceau est divisé d'abord en deux rayons et chacun d'eux parcourt deux côtés adjacents d'un parallélogramme ; l'un

de ces rayons traverse les veines d'essais.

La plupart des interféromètres employés en aérodynamique sont pourvus d'une lampe à halogène (mercure par exemple) ; il faut dès lors prendre soin de compenser les différences de chemins optiques des deux rayons. Malgré ce type de difficultés, les méthodes optiques d'analyse des écoulements sont bien au point, puisqu'elles sont applicables depuis plus de 20 ans ! L'interférométrie en mécanique des fluides fut même développée avant la mise au point des lasers.

Le laser présente des caractéristiques qui permettent de mettre davantage en valeur les résultats obtenus par interférométrie. Le laser permet par exemple de « geler » un phénomène très rapide (telles que les ondes de détonation) ; il faut réaliser des expositions de courte durée : quelques manosecondes sont possibles grâce à des obturateurs électro-optiques (cellules de Kerr).

Un interféromètre à laser est extrêmement facile à ajuster ; c'est essentiellement là son intérêt majeur. Sa nature cohérente rend bien moins aigus les problèmes de différences des chemins optiques.

Fig. 4 - Sur cette carte sont tracées les courbes d'égale densité de fréon 12, dans un jet, en sortie de tuyère. L'analyse, effectuée à l'ONERA, a été réalisée dans un plan contenant l'axe de révolution du jet. La pression amont vaut 3,6 atmosphères ; le col de la tuyère est de 3,65 mm et le diamètre de sortie est de 9 mm.

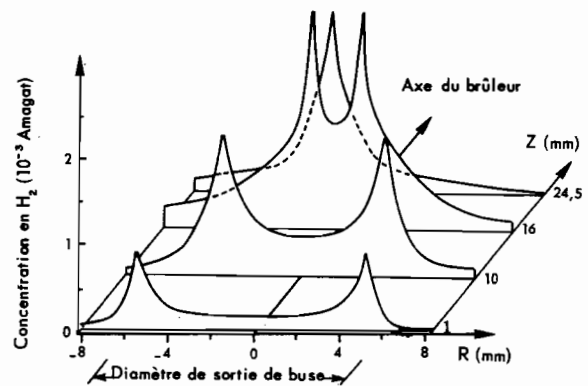
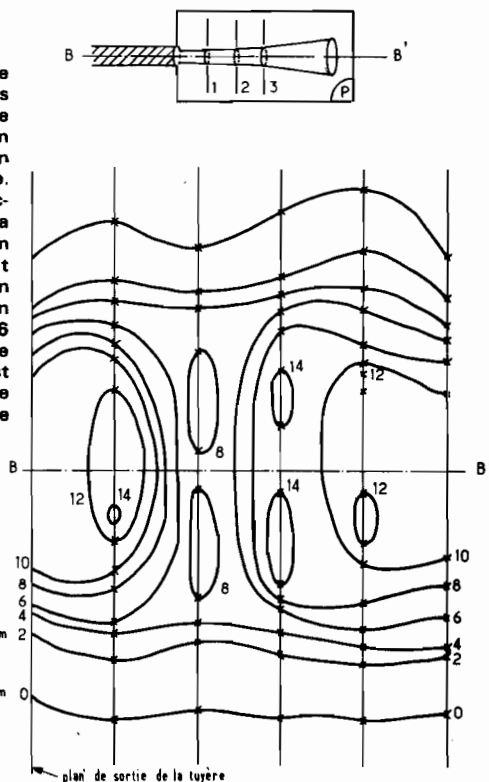


Fig. 5 - Répartition d'hydrogène dans la flamme d'un bec Bunsen monté horizontalement ; elle a été déterminée par l'analyseur de type 20U24 de l'ONERA, basé sur le phénomène de diffusion « Raman ».

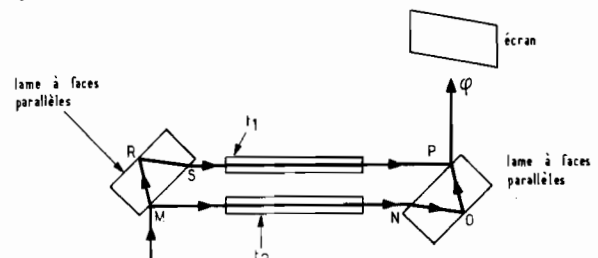


Fig. 6 - L'interféromètre de Jamin. Si les deux chemins optiques LMNOPQ et LMRSPQ ne sont pas égaux, on observe des franges d'interférences sur l'écran. Cela se produit lorsque, par exemple, les tubes t_1 et t_2 sont remplis du même gaz, mais sous des pressions différentes : leurs indices de réfraction sont alors différents.

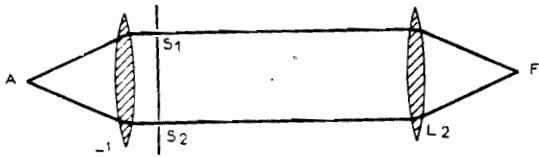


Fig. 7 - L'interféromètre de Rayleigh. Une fente source, étroite, est placée au foyer d'une lentille L1 derrière laquelle est placé un écran percé de deux fentes S1 et S2. Une seconde lentille L2 focalise les deux faisceaux émis par les deux « pseudo-sources » S1 et S2.

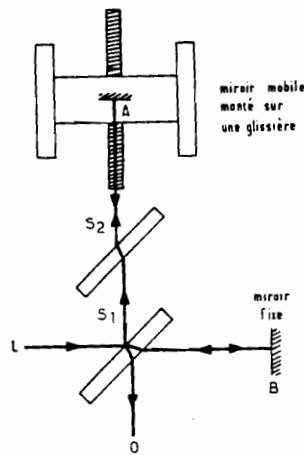


Fig. 8 - L'interféromètre de Michelson. Le faisceau de lumière L est divisé en deux parties par un verre semi-argenté S1. L'un des deux faisceaux suit le trajet S1AS1O et l'autre, le trajet S1BS1O. La lame S2 sert à compenser la différence de chemin optique entre les deux faisceaux. En déplaçant le miroir A, un système de franges prend naissance.

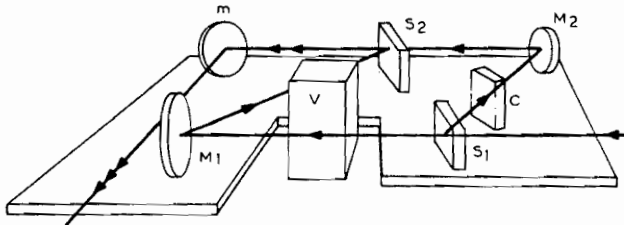


Fig. 9 - L'interféromètre de Mach-Zehnder. Les éléments constitutifs de cet interféromètre sont disposés aux quatre sommets d'un parallélogramme : miroirs M1 et M2, lames séparatrices S1 et S2. Le faisceau S1M1 traverse une veine aérodynamique. La variation de chemin optique correspondant à la traversée des glaces de la veine V est compensée, sur le trajet S1M2, par les lames transparentes C.

L'interféromètre à laser sert à visualiser des écoulements; il permet d'effectuer des mesures locales de densité, et même de vitesses: un vélocimètre interférentiel à laser a été conçu aux Sandia Laboratories, et sert à la mesure de vitesse d'ondes de détonation, comme des projecti-

les les plus divers. C'est le « Visar » (pour « Velocity Interferometer System for Any Reflector »), réalisé autour d'un laser à argon et d'un interféromètre de Michelson; le faisceau laser éclaire le corps en mouvement et subit un décalage de fréquence par effet Doppler. Le fais-

ceau ainsi traité est analysé par un interféromètre: les franges obtenues fournissent une mesure de l'accélération ou de la décélération du corps en mouvement.

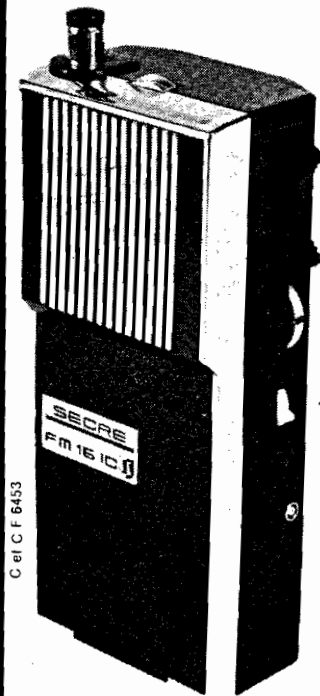
Marc FERRETT.

On lira avec intérêt...

- « A laser dual-beam method for flow measurements in turbomachines », par R. Schodl - publication de l'ASME 74GT157.
- « Transonic flow measurements - a comparison of static pressure measurements, laser-doppler velocimeter measurements and analysis », par R.D. Flack et H.D. Thomson - publication AIAA 74-15.
- « Application de l'effet Raman à la visualisation d'écoulements gazeux », par M. Merian - La Recherche Aéronautique, année 1972, numéro 2.
- « Application of Laser Raman Scattering to the Study of turbulence », par D.-L. Hartley - AIAA journal, Vol. 12, numéro 6 (Juin 1974).
- « Interferometer for Aerodynamic and heat transfer measurements », par R.-J. Goldstein - Review of Scientific Instruments, Vol. 36, numéro 10, oct. 1965.
- « Emploi de l'interférométrie dans l'étude des écoulements

- de révolution », par J.-L. Solignac - Communication présentée au colloque Euromech - 55 sur l'interférométrie optique en Dynamique des Gaz expérimentale (Bochum, 25-26 mars 1974).
- « On the use of laser light sources in schlieren - interferometer systems », par A.-K. Oppenheim, P.-A. Urtiew, F.-J. Weinberg - Proceedings of the Royal Society, A, vol. 291 (1966).
- « Étude quantitative d'un écoulement aérodynamique par interférométrie holographique », par J. Surget - La Recherche Aéronautique, année 1973, numéro 3.
- « Holography for aerodynamics », par J.-D. Trolinger - Astronautics et Aeronautics, août 1972.
- « Banc d'holographie pour l'étude interférométrique des milieux transparents » par J. Surget, J.-R. Nicolas, G. de Closmadeux - Communica-

- tion présentée au Congrès Mesucora, 12-18 avril 1973.
- « Schéma d'holographie à deux sources de référence », par J. Surget - Communication présentée au colloque Euromech 55 sur l'interférométrie optique en Dynamique des gaz Experimentale (Bochum, 25-26 mars 1974).
- « Holographic Studies of Shock waves within transonic fan rotors », par W.-A. Benser, E.-E. Bailey et T.-F. Gelder - Publication ASME Numéro 74GT46.
- « Turbulent boundary-layer flow separation measurements using holographic interferometry », par A.-G. Havener et R.-J. Radley Jr. - AIAA Journal, vol. 12, numéro 8 (août 1974).
- « Banc d'holographie pour l'étude interférométrique des milieux transparents », par J. Surget, J.-R. Nicolas et G. de Closmadeux - Matériaux et Techniques, août-septembre 1974.



C et C F 6453

MATERIEL PROFESSIONNEL

FM 16 IC

SÉCRÉ

214 Faubourg Saint-Martin
75010 PARIS

Tél. 203.00.11

Distributeurs pouvant assurer
GARANTIE et MAINTENANC
recherchés

Gamme complète
H.F. - V.H.F. - U.H.F.