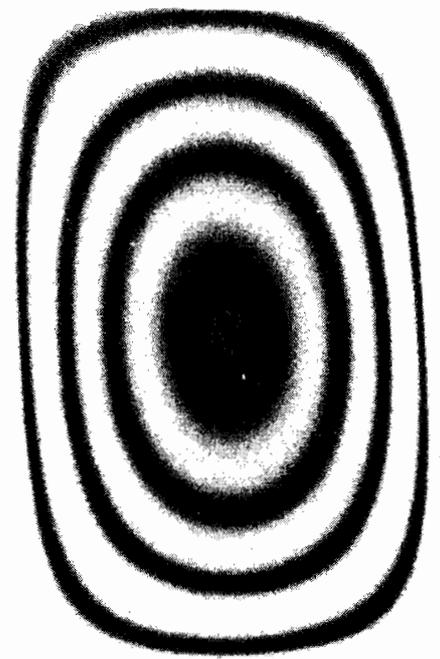


# LES LASERS



Marc FERRETTI

## HOLOGRAPHIE ET AERODYNAMIQUE

**C**ONSIDÉRONS un faisceau laser que l'on divise en deux sous-faisceaux à l'aide d'un miroir semi-réfléchissant (Fig. 1). L'un de ces sous-faisceaux sert à éclairer un objet et la lumière renvoyée par cet objet frappe une plaque photographique. L'autre sous-faisceau, dit faisceau de référence, est dirigé directement sur la même plaque photographique. Sur celle-ci, on enregistre donc les interférences de deux ondes : cet enregistrement est un hologramme.

Eclairons maintenant l'hologramme au moyen du faisceau de référence : une image de l'objet ayant été précédemment « holographié » apparaît à l'utilisateur.

De nombreux laboratoires d'aérodynamique ont adopté l'holographie comme outil d'investigation des écoulements de fluide.

A l'O.N.E.R.A., par exemple, un banc d'holographie a été étudié pour l'étude des milieux transparents, constitués principalement par des écoulements gazeux

en souffleries aérodynamiques ; ce même montage peut servir pour l'analyse mécanique d'éprouvettes transparentes soumises à des contraintes. Ce banc est fabriqué sous licence par la Division optique de la société des Engins Matra (Fig. 3). Les caractéristiques principales sont les suivantes :

- champ d'étude circulaire de 180 mm de diamètre,
- angle fermé par les faisceaux d'étude et de référence :  $16^\circ$ ,

- source lumineuse : laser à hélium-néon délivrant 2 milliwatts à la longueur d'onde de 0,6328 micron,

- durée d'exposition : environ un dixième de seconde.

Ce banc est employé dans des expériences d'interférométrie holographique : on réalise un hologramme sur une plaque photographique que l'on développe et que l'on remplace, après développement ; exactement à son emplacement initial, où l'hologramme a été réalisé. On reconstitue dès

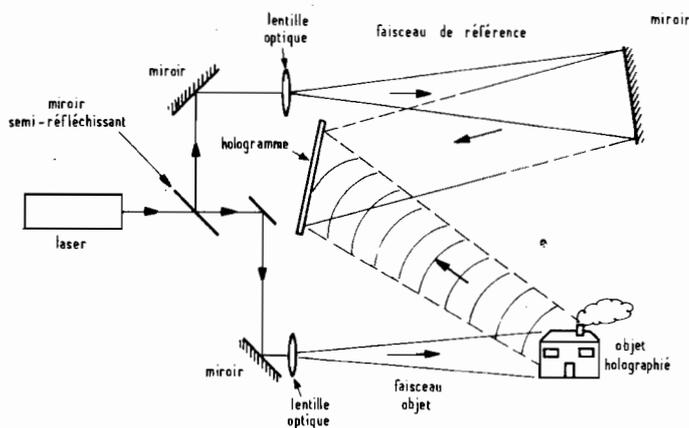


Fig. 1. — Enregistrement d'un hologramme.

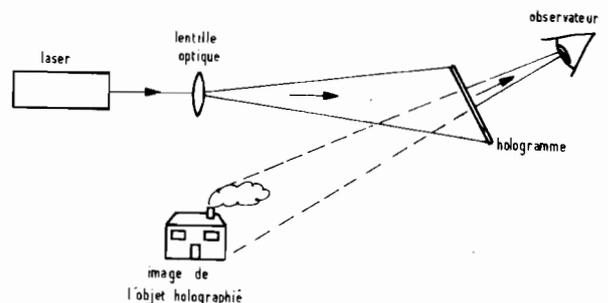


Fig. 2. — RECONSTITUTION : L'Hologramme est éclairé par le faisceau de référence de la figure 1. L'observateur perçoit l'image de l'objet qui a été holographié.

lors le même montage qui a servi à prendre l'hologramme : on refait donc l'hologramme et on compare ce nouvel hologramme à celui qui a été enregistré sur la plaque photographique.

Si le montage n'a absolument pas changé, on observe l'image reconstituée à travers l'hologramme, sans plus.

Mais s'il y a eu un très léger changement, par exemple, si la pression du gaz dans le milieu d'étude a varié légèrement, des franges d'interférences apparaissent à la reconstitution et la forme de ces franges ne dépend que du mode de changement de la constitution du milieu d'études. Ces franges apparaissent, et se déforment éventuellement en temps réel, c'est-à-dire en même temps que se produisent des modifications dans le milieu d'étude.

C'est là la technique dite d'interférométrie en simple exposition.

On peut bien sûr opérer différemment : on ne développe pas la plaque après la première exposition ; on réalise deux hologrammes sur la même émulsion holographique. Lorsqu'on effectue le développement, on observe des franges d'interférences si la nature du milieu transparent d'étude a été légèrement modifiée.

C'est la technique de double exposition qui permet l'observation, en différé, de la modification des caractéristiques optiques du milieu d'étude.

### UN BANC HOLOGRAPHIQUE POUR LES SOUFFLERIES AÉRODYNAMIQUES

La méthode holographique met en évidence, dans un milieu transparent d'indice de réfraction :  $n$ , et d'épaisseur :  $e$ , des variations du chemin optique  $L$  dont l'expression est :  $L = n.e$ .

Une variation  $dL$  du chemin optique peut résulter d'une variation d'épaisseurs ( $de$ ) du milieu optique, ou encore d'une variation ( $dn$ ) de son indice de réfraction. Pratiquement, ces diverses variations sont corrélées entre elles par l'expression :

$$dL = e.dn + n.de$$

Dans le cas d'une soufflerie aérodynamique à veine guidée, l'épaisseur  $e$  est constante et donc

le terme variationnel ( $de$ ) est toujours nul, la présence de franges d'interférences dans un hologramme (qui dénote une variation de chemin optique) résulte, par conséquent d'une variation de l'indice de réfraction en un point de mesure. Or il existe une loi linéaire (la loi de Gladstone-Dale) qui lie l'indice de réfraction  $n$  à la masse volumique (c'est-à-dire la masse du gaz rapportée à son volume) du gaz : le dépouillement de l'interférogramme permet donc de déterminer localement la valeur de l'indice de réfraction, d'après la valeur de la masse volumique locale dans l'écoulement.

Comment opère-t-on ?

La soufflerie étant à l'arrêt, un hologramme de référence est réalisé en procédant à une seule exposition de la plaque photographique : après développement, l'hologramme de référence est replacé sur le montage et illuminé simultanément par les deux faisceaux d'étude et de référence.

L'on établit le soufflage dans la veine aérodynamique. Dans ces conditions, il est possible d'observer au travers de l'hologramme de référence, l'aspect contemporain du champ de mesure et celui qu'il présentait au moment de l'exposition, lorsque la soufflerie était arrêtée. Les deux images interfèrent et les franges fournissent des informations sur la variation locale de masse volumique du gaz.

Il est ainsi possible de contrôler le bon amorçage d'une tuyère ; mais la technique précédente se prête mal à des études quantitatives : les limitations peuvent être dues, par exemple, à un défaut, si minime soit-il de positionnement de l'hologramme de référence, après la première exposition et développement. Pour une étude quantitative précise, on préfère procéder par double exposition : deux expositions de la plaque photographique sont effectuées respectivement en l'absence et en

présence du phénomène étudié. Par exemple, on effectuera les expositions en l'absence et en présence du soufflage d'air dans la veine aérodynamique : cette méthode peut être perturbée par une source d'erreurs, constituée par les glaces de veine permettant l'observation ; en effet, il faut que leur qualité demeure identique entre les deux poses ; or l'établissement du soufflage implique que les pressions et températures, dans la veine d'essais, se modifient, et peuvent induire des variations d'épaisseurs des glaces ; la variation de chemin optique due à l'établissement du soufflage va donc être perturbée par cette variation d'épaisseurs des glaces de veine, et cette perturbation peut, vite, devenir importante.

Pour s'affranchir des modifications des glaces de veine dues au soufflage, on peut faire fonctionner la soufflerie pendant une durée suffisamment importante

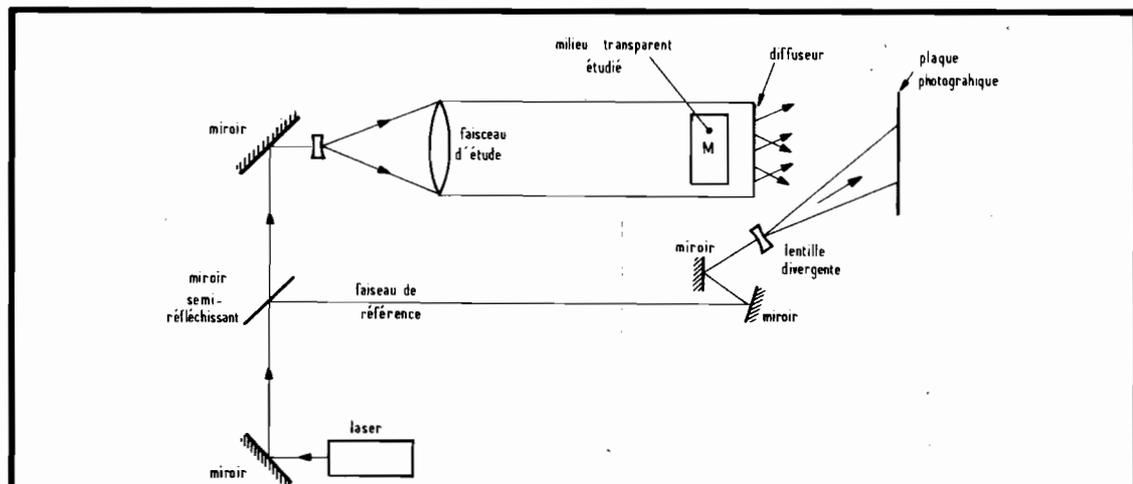


Fig. 3. - Le banc d'interférométrie holographique étudié à l'ONERA. Le faisceau laser est réparti entre les deux faisceaux d'étude et de référence ; le faisceau d'étude est composé de rayons parallèles attaquant sous la même incidence le milieu transparent M étudié ; l'ombre portée de M est reçue sur un diffuseur et la lumière qui est transmise par ce diffuseur va impressionner la plaque photographique (l'hologramme).

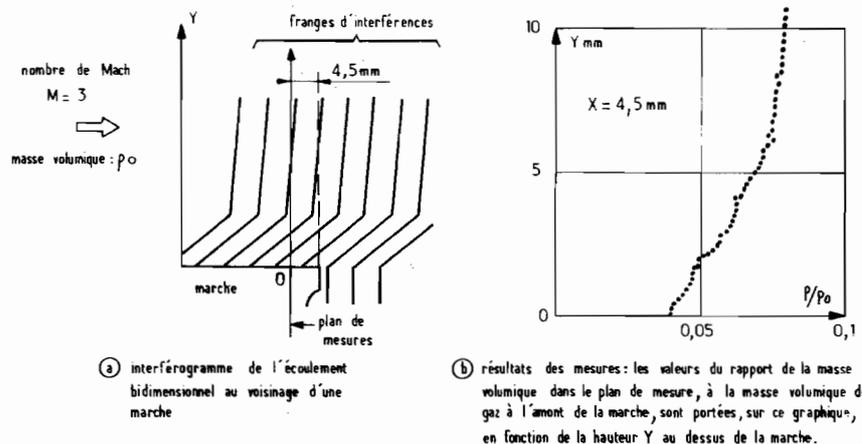


Fig. 4. - Les premiers essais d'interférométrie holographique, à l'ONERA, ont permis d'analyser la couche limite légèrement à l'amont d'une marche bidimensionnelle.

pour qu'un équilibre thermique et mécanique s'établisse dans les glaces. Les poses sont alors effectuées en cours de soufflage, en présence et en l'absence de maquette : il faut alors disposer d'un mécanisme d'escamotage de la maquette.

L'expérimentation a été menée, à l'O.N.E.R.A., dans un écoulement « turbulent »\*, à un nombre de Mach égal à 3 ; une maquette est disposée dans l'écoulement. Dans une première série d'essais, cette maquette représentait une marche (Fig. 4).

Plusieurs conséquences s'imposent à la suite de cette expérience : en premier lieu, l'interférométrie holographique ne fournit des résultats quantitatifs que dans l'étude de phénomènes bidimensionnels ou présentant une symétrie de révolution ; il en est d'ailleurs de même pour l'interféromètre classique et la

majorité des méthodes optiques. Compte tenu de cette réserve, il paraît que la validité de l'interférométrie holographique ne puisse faire de doute, en raison de la précision des mesures obtenues ; l'expérience montre que l'interférométrie holographique constitue un procédé d'investigation bon marché, d'emploi relativement aisé et offrant une précision de mesure convenable lorsqu'il est mis en œuvre avec toutes les précautions nécessaires.

### L'HOLOGRAPHIE À DEUX SOURCES DE RÉFÉRENCE

Dans une amélioration proposée à l'O.N.E.R.A., une seconde source de référence est ajoutée au montage. Cette source est mobile : elle peut être déplacée de quelques millimètres suivant

deux directions rectangulaires dans un plan normal à l'axe du faisceau lumineux incident ; sur son trajet est placée une lame prismatique qui permet d'agir sur la phase du second trajet de référence, par une translation de la lame (Fig. 5).

Avec ce montage, un seul enregistrement holographique de l'onde lumineuse traversant le milieu étudié devient susceptible de fournir autant d'interférogrammes variés de ce milieu qu'il peut être désiré. Cette possibilité est particulièrement intéressante pour l'étude de phénomènes brefs non reproductibles ; elle l'est aussi pour l'étude de phénomènes continus : il est en effet toujours souhaitable d'être en mesure d'enregistrer le maximum d'informations au cours d'une seule expérience et dans un minimum de temps.

Par ailleurs, il est possible de

réaliser des interférogrammes de milieux transparents, par holographie en lumière diffuse, même lorsque n'est pas remplie la condition normalement indispensable de constance de la position du diffuseur pour les deux poses.

On peut en effet compenser le déplacement du diffuseur. On peut dès lors envisager l'examen des écoulements gazeux dans les turbomachines : le diffuseur est alors constitué par un organe mécanique de l'appareillage étudié et ses déplacements sont, habituellement, considérés comme compromettant l'emploi de l'interférométrie holographique, l'interférométrie classique étant, par ailleurs, inapplicable.

### L'INTERFÉROMÉTRIE HOLOGRAPHIQUE POUR LES TURBOMACHINES

L'emploi de l'interférométrie holographique a été préconisé au Lewis Research Center de la N.A.S.A., pour l'analyse de l'écoulement dans des rotors de turbomachines. Ces rotors sont transoniques : l'écoulement y atteint la vitesse du son et des ondes de choc se forment au sein du canal. Avec de tels rotors, on peut atteindre des taux de compression élevés, mais la présence d'ondes de choc est génératrice de pertes internes élevées. L'interférométrie holographique permet de visualiser et de localiser ces chocs.

Les premiers essais ont été menés avec un rotor contenant 38 aubes ; le diamètre maximal du rotor (c'est-à-dire au sommet des aubes) est de 0,84 m et la vitesse de rotation maximale (c'est-à-dire la vitesse de rotation de la tête des aubes) atteint 548,6 m/s. Le débit qui traverse le rotor est de 78,8 kg/s ; le rapport de pression dans le rotor atteint 2,28. Enfin, une dernière donnée géométrique est fournie par le rapport entre le diamètre de la tête de l'aube et le diamètre au pied de l'aube : il est de 0,5. Ce rotor a servi dans un programme d'holographie en lumière réfléchie (fig. 6) : Un faisceau laser diffus est réfléchi en amont de l'aube, sur un moyeu central. Le laser émet 2 impulsions optiques en 10 microsecondes ; deux hologrammes sont donc enregistrés en 10 microsecondes.

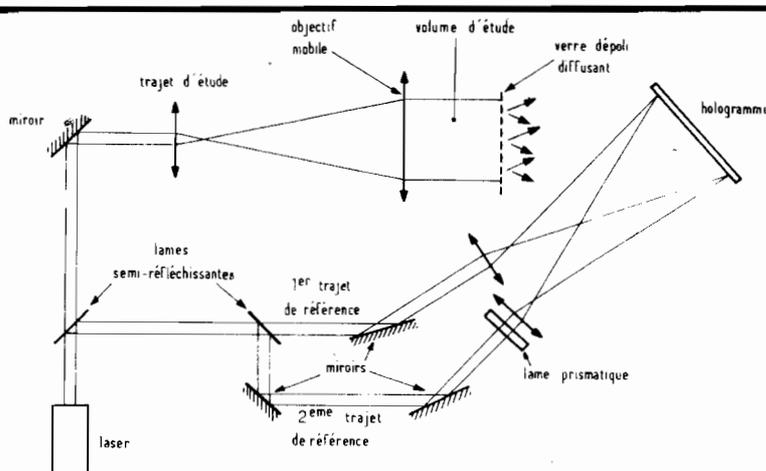


Fig. 5. - Le banc d'holographie ONERA à double source de référence.

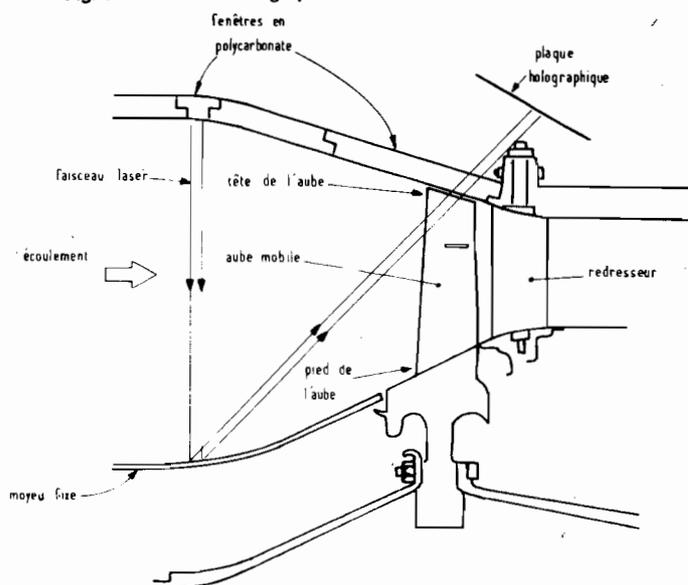


Fig. 6. - Un montage de la NASA (holographie en lumière réfléchie). On utilise un laser à impulsion, pour réaliser un interférogramme holographique, deux impulsions laser sont injectées dans le montage, en 10 microsecondes. On parvient ainsi à visualiser l'onde de choc créée par chaque aube.

# AFFAIRES SPECIALES

## ILLEL HIFI CENTER

106 AV. FELIX FAURE PARIS 15<sup>e</sup>

**APPAREILS DE DÉMONSTRATION  
SOLDES ET OCCASIONS PROVENANT  
DE REPRISES A NOS CLIENTS  
● MATÉRIEL RÉVISÉ ET GARANTI ●**

**LISTE DU MATÉRIEL D'OCCASION  
A LA DATE DU 25 MAI 75**

### PLATINES

THORENS TD 125 MK II. Cellule ADC XLM avec bras Rabco (occasion)	2 500 F
THORENS TD 125 avec bras SME (occasion)	1 700 F
DUAL 1015 avec cellule Shure 55 (occasion)	450 F
LENCO L 75 avec cellule Shure (occasion)	650 F
B et D 610 LV (occasion)	450 F
B et O 1200 (démonstration)	850 F

### AMPLI ET PRÉ-AMPLIS

SONY 1010 (occasion)	850 F
TRIO TK 400 (occasion)	900 F
SCIENTELEC MACK A 30 (démonst.)	1 300 F
SCOTT 255S (démonstration)	1 450 F
PIONEER SA 500 (démonstration)	1 000 F
PHILIPS 22 RH 520 (occasion)	750 F
Boîte ambiance BST AE 4C (démonst.)	150 F

### AMPLIS-TUNERS

BRAUN RÉGIE 500 (occasion)	2 400 F
PIONEER SX 440 (occasion)	1 600 F
KENWOOD TK 88 (occasion)	1 400 F
KENWOOD TK 140X (occasion)	1 750 F
GRUNDIG RTV 900 (démonstration)	1 650 F
KORTING Stéréo 400 (occasion)	650 F

### TUNERS

ERA TS2 (neuf)	1 790 F
ESART S 25C (démonstration)	1 500 F
TELEWATT FM 200 A (occasion)	1 000 F
SANSUI QS 500. Décodeur Quadri Synthétiseur avec ampli 2 x 30 W (démonstration)	1 500 F

### LECTEUR ENREGISTREUR DE CARTOUCHE

PIONEER HR 82 (occasion)	1 100 F
--------------------------	---------

### DIVERS

FIDELITY Radio AM/FM 2 x 10 W	
Baffles (occasion)	850 F
HIFIVOX	250 F

### MAGNÉTOPHONES

SANSUI SD 7000 (démonstration)	4 500 F
UHER royal de luxe (occasion)	2 000 F
REVOX A 77 1104 (neuf)	3 500 F
REVOX A 77 1102 (occasion)	2 850 F
LDEWE OPTACORD 408 (à réparer)	300 F
CROWN CORDER CTW 5950	700 F
RADIOLA RA 9886/00 (à réparer)	150 F
PHILIPS EL 3514 (à réparer)	150 F

### ÉLECTROPHONES

EUROPHON primavera	250 F
Claude PAZ	350 F
ERVAS	200 F

### TRANSISTOR

GRUNDIG Satellit 1000	950 F
-----------------------	-------

### TABLE DE MIXAGE UHER

(démonstration)	450 F
-----------------	-------

### ENCEINTES

30/3 MONITOR (démonstration)	
La paire	1 850 F
RANK ARENAL 720CP (démonstration)	
La paire	800 F
ELIPSON Projecteur de son (démonstration). La paire	450 F
JBL Prima L 25 (démonstration)	
La paire	3 300 F
PLANSONOR (occasion)	
La paire	900 F
FILSDN Studio 1 (démonstration)	
La paire	1 850 F
GRUNDIG 30 (occasion)	
La paire	1 000 F
EVENMOND (occasion)	
La paire	400 F
SCIENTELEC mach 503S (démonstration). La paire	2 700 F
BIFRON HOX22 (démonstration)	
La paire	1 600 F
B et O 1001 (occasion)	
La paire	900 F
ISDPHON 3504 (occasion)	
La paire	650 F
KEF Concerto (démonstration)	
La paire	2 600 F

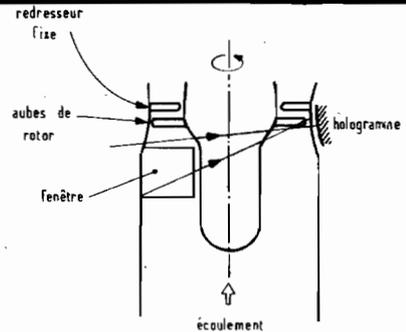


Fig. 7. - L'holographie interférométrique en « lumière transmise » permet aussi de visualiser les ondes de choc dans une turbomachine. Le faisceau laser pénètre dans la veine d'essai par une grande fenêtre, traverse le moyeu du rotor et se trouve focalisé au voisinage de la tête d'aubes mobiles de rotor, avant d'éclairer un hologramme.

D'autres essais holographiques ont été menés avec un faisceau lumineux transmis directement (Fig. 7) à travers la veine d'essais sans subir de réflexion sur le moyeu intérieur. Deux techniques de réalisation de l'interférogramme holographique ont été mises à l'essai. Dans la première, une première impulsion éclairait l'hologramme avec le rotor tournant à 60 % de sa vitesse nominale ; on accélère ensuite le rotor pour l'amener à sa vitesse nominale, et une seconde impulsion laser est envoyée dans la veine d'essai. Dans la seconde technique, qui s'est avérée être plus intéressante, deux impulsions laser, décalées de 5 microsecondes, sont injectées dans la veine où le rotor tourne à sa vitesse nominale, et réalisent l'interférogramme holographique. La mise au point de cette méthode holographique a nécessité la réalisation d'un rotor différent du premier : ce second rotor contient 40 aubes, avec pour diamètre en tête d'aube : 0,73 m (ce qui correspond à une vitesse, en tête d'aube, de 488,6 m/s) ; le débit d'air entrant dans le rotor est de 67,09 kg/s et le rapport de pression atteint 1,512.

Un troisième type d'essais a été réalisé à la N.A.S.A., en ensemençant l'écoulement de microsphères en verre, de 30 microns de diamètre, et en utilisant la technique d'interférométrie holographique par deux impulsions laser peu espacées dans le temps. La lumière laser diffusée par les microsphères est enregistrée, permettant de déterminer la vitesse de l'écoulement à partir de la connaissance du déplacement d'une microsphère et du temps séparant les deux impulsions laser successives. La durée d'une impulsion laser est de l'ordre de 50 nanosecondes environ ; il en résulte qu'il est possible d'effec-

tuer des mesures précises dans le seul cas de faibles vitesses d'écoulement. On peut par exemple, déterminer la vitesse individuelle des microsphères lorsque la vitesse du rotor est égale à 8 % seulement de la vitesse nominale, et que la durée séparant deux impulsions laser successives est de 40 microsecondes. Pour mettre à profit la méthode, avec des vitesses de rotation plus proches de la vitesse nominale, il faut réduire considérablement la durée d'une impulsion laser.

Marc FERRETTI

**À LIRE,  
POUR EN SAVOIR  
DAVANTAGE...**

Etude quantitative d'un écoulement aérodynamique par interférométrie holographique - par J. Surget - La Recherche Aérospatiale, N° 1973-3 (mai-juin)

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.

Schéma d'holographie à deux sources de référence - par J. Surget - Communication présentée au colloque Euromech 55 sur l'interféromètre optique en dynamique des gaz expérimentale (Bochum, 25-26 mars 1974)

Turbulent Boundary-Layer Flow Separation Measurements Using Holographic Interferometry - par A.-G. Havener et R.-J. Radley, Jr. - A.I.A.A. Journal, août 1974. Holographic Studies of Shock Waves within Transonic Fan Rotors par W.A. Benser, E.E. Bailey et T.F. Gelder - ASME publication N° 74-GT-46.

\* Voir les précédents articles dans les derniers numéros du Haut-Parleur pour la définition des caractéristiques des écoulements.

**ET POUR TOUT VOS ACHATS  
DE MATÉRIEL NEUF LES  
GARANTIES, AVANTAGES ET  
COMPLÉMENTAIRES  
HABITUELS AVEC NOTRE  
CARTE GARANTIES ET  
SERVICES.**

### HI-FI CENTER

garanties et services

N° 2523 — date 12/10/72

NOM DUVAL JACQUES

ILLEL HI-FI CENTER



## ILLEL HIFI-CENTER

106, AV. FÉLIX-FAURE - PARIS-15<sup>e</sup>

TÉL : VAU. 09-20