

VISUALISATION DE DEFORMEES DE STRUCTURES IMMERGEES
PAR INTERFEROMETRIE HOLOGRAPHIQUE

MM. BONAZZI, GOSSELIN & LAGARRIGUE

Ingénieurs à la Société acb CERG
Voie Privée Rhône Poulenc
38800 LE PONT DE CLAIX

RESUME

Cet article expose les travaux effectués au CERG, pour le compte de la Direction des Recherches & Etudes techniques, dans le cadre de l'utilisation des techniques holographiques à l'étude des vibrations de structures vibrantes dans l'eau. On présente des résultats des différentes étapes de ces études pour aboutir au cas particulier des vibrations d'hélices.

SUMMARY

This article reports the works realized by acb-CERG on behalf of Direction des Recherches & Etudes Techniques, in the frame of the use of holographic technics to the study of vibrating structures in water. Different stages of these studies are presented to lead to the particular case of propeller vibrations.

1. INTRODUCTION

Depuis quelques années, le CERG, laboratoire de mécanique des fluides de la Société acb, a mis au point une technique d'analyse vibratoire des structures utilisant l'interférométrie holographique associée à un logiciel de traitement d'images. Cette technique permet une vision globale des déformées propres de la structure ou d'un état de vibration quelconque, aussi bien pour des structures en air qu'en eau, en présence ou non d'écoulement.

On présente ici le principe de la méthode utilisée ainsi que quelques résultats obtenus lors de contrats réalisés pour le compte de la DGA, Direction des Recherches, Etudes & Techniques.

On donne enfin les orientations qui sont en cours de développement au laboratoire.

2. TECHNIQUE UTILISEE

Les techniques classiques d'holographie, holographie en temps réel ou holographie en temps moyenné, utilisent un laser continu et nécessitent des conditions de montage extrêmement draconiennes du point de vue de l'isolation antivibratile, ce qui est incompatible avec l'environnement d'un local industriel. La technique qui a donc été développée est celle de l'holographie à double exposition sur la structure en vibration. A l'aide d'un laser pulsé, on réalise alors un hologramme constitué de deux images de la structure figée en deux positions successives par deux illuminations séparées par un temps court devant la période du mode étudié. Lors de ces deux opérations, l'onde de référence doit être identique et les deux demi-expositions doivent être de durées très voisines.

Lors de la reconstruction, l'hologramme restitue les deux ondes initiales qui, en interférant, reconstituent l'objet et un système de franges d'interférence caractéristique du déplacement de l'objet.

Si nous désignons par $U_1(y,z)$ l'onde objet correspondant à la première position et par U_2 la seconde, l'onde reconstituant l'éclairage utilisé pour faire les deux expositions à une amplitude complexe dans le plan de l'hologramme donnée par :

$$U_T = U_1 + U_2$$

L'irradiance de l'onde totale réémise est :

$$|U_1 + U_2|^2$$

En fait, l'holographie permet l'analyse de très faibles déplacements de l'ordre de quelques longueurs d'onde de la lumière monochromatique utilisée. Dans ces conditions, l'objet s'étant déplacé d'une très faible quantité, l'onde émise dans la deuxième position est surtout modifiée en phase et, par conséquent :

$$U_1(y,z) = a(y,z) \exp [- j \phi(y,z)]$$

$$U_2(y,z) = a(y,z) \exp [- j \{ \phi(y,z) + \Delta \phi(y,z) \}]$$

Dans ces conditions, l'intensité lumineuse de l'onde reconstituée est :

$$I_T = 2 a^2(y,z) [1 + \cos \Delta \varphi(y,z)]$$

Ainsi, on retrouve l'irradiance de l'objet $a^2(y,z)$ modulée par un système de franges caractérisé par le terme :

$$2[1 + \cos \Delta \varphi(y,z)]$$

Dans beaucoup d'applications, les grandeurs physiques telles que déplacement, rotation, contrainte, moment fléchissant, amplitude de vibration, température, pression, concentration massique, densité électronique, peuvent être reliées au glissement de phase $\Delta \varphi$.

On obtient ainsi une image comportant un réseau de franges d'interférences caractéristiques de la déformation de la structure.

Cette technique de double exposition permet de s'affranchir des vibrations parasites de toute nature et donc de travailler en milieu industriel et également d'étudier des amplitudes de vibration importantes.

Le laser pulsé utilisé est un laser à rubis HLS 3 de JK Laser -durée d'un pulse : 20 à 30 nanosecondes- intervalle entre deux pulses réglable de 1 à 800 microsecondes.

Les hologrammes sont interprétés à l'aide d'un logiciel de traitement d'images développé sur PC. L'image est digitalisée, son contenu est binarisé puis squelettisé ; on a alors accès aux courbes de niveaux permettant de définir la déformée correspondante.

3. QUELQUES RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1 Essais en cuve

Des essais ont été réalisés sur des éléments simples (plaque circulaire encastrée sur sa périphérie, plaque rectangulaire encastrée sur un bord) à l'aide d'un montage permettant d'effectuer des mesures successivement dans l'air et dans l'eau (Figure 1). L'objectif était de démontrer la possibilité de déterminer les déformées modales de chacun de ces éléments jusqu'au huitième mode ; cela correspond à des fréquences s'étendant jusqu'à 250 Hz dans l'air et 100 Hz dans l'eau pour la plaque rectangulaire et jusqu'à 1000 Hz dans l'air et 500 Hz dans l'eau pour la plaque circulaire. L'objectif visé a été totalement atteint.

Après avoir déterminé par une méthode accélérométrique classique les différentes fréquences de résonance de la structure, on excite en présence d'écoulement (vitesses de l'ordre de 1 m/s), à l'aide d'un pot vibrant, la structure sur le mode dont on veut déterminer la déformée.

La planche 1 présente quelques hologrammes obtenus à l'occasion de notre recherche. La figure 2 montre des dépouillements réalisés à l'aide du logiciel de traitement d'images.

3.2 Essais sur tunnel hydrodynamique

L'objectif est d'appliquer la méthode holographique en double exposition à l'analyse des vibrations d'une plaque placée dans un tunnel hydrodynamique dans les conditions d'un essai classique.

a. Description du phénomène physique étudié

Les essais réalisés s'inscrivent dans le cadre des études menées sur le thème "chant d'hélice". Le chant d'hélice est une émission acoustique intense observée sur certaines hélices et pour certaines conditions de fonctionnement. Cette émission résulte d'un couplage hydroélastique entre les pales et l'écoulement dont l'origine est la formation et le lâcher de tourbillons au bord de fuite lors du décollement de la couche limite. Des tourbillons alternés se forment périodiquement au bord de fuite des profils de pales et se propagent dans l'écoulement.

La fréquence de ce phénomène est gouvernée par le nombre de Strouhal (nombre adimensionnel) :

$$S = \frac{(f \cdot d)}{V}$$

f : fréquence du détachement des tourbillons (fréquence de Strouhal)

V : vitesse de l'écoulement

d : dimension caractéristique de l'obstacle

Ce nombre est approximativement constant quelle que soit la vitesse de l'écoulement et dépend de la forme du profil et de son bord de fuite. Par les vibrations qu'il engendre, le détachement tourbillonnaire peut être source de dégradations mécaniques ou de bruit notamment lorsque, pour certaines vitesses d'écoulement, la fréquence de Strouhal coïncide avec une fréquence de résonance du profil (zone de coïncidence).

Dans le but de trouver des solutions à ce problème (interaction hydroélastique entre la plaque et l'écoulement lorsque la fréquence de Strouhal est proche de la fréquence de résonance), nous avons entrepris de tester des plaques planes réalisées à partir de matériaux composites amortis ou non.

b. Description du dispositif expérimental

Nous utilisons la méthode holographique pour visualiser le comportement de deux plaques : l'une en matériau composite et l'autre en matériau composite amorti à l'aide d'un matériau visco-élastique, au voisinage d'une ou de plusieurs zones de coïncidence (fréquence de Strouhal)/(fréquence de résonance).

Le montage holographique est représenté figure 3. La planche 2 montre le tunnel et la veine d'essai.

Les conditions d'essais sont relativement défavorables :

- . sol composé de planches de 1 m² juste posées : ce sol est donc une source de vibrations parasites importantes,
- . lumière ambiante nécessitant le travail de nuit,
- . veine d'essai (planche 2) en plexiglas de qualité optique très moyenne.

c. Analyse des résultats

Les évolutions des déformées sont observées et corrélées avec des spectres de vibration.

Les résultats de cette étude permettent d'acquérir des connaissances supplémentaires sur le phénomène vibratoire étudié (interaction hydroélastique entre une plaque plane et un écoulement).

La connaissance préalable des déformées modales théoriques permet de repérer les passages successifs par différents modes. On observe, dans ce cas, des déformées souvent très nettes, notamment sur les hologrammes de la plaque dépourvue de matériau amortissant (Planche 3). L'évolution en fonction de la vitesse des modes les plus bas vers des modes plus hauts permet d'identifier une excitation "pure" qui varie avec la vitesse d'écoulement.

On constate que l'émergence de certaines résonances se fait sur une gamme de vitesse étendue ce qui permet de supposer que l'excitation possède un spectre large bande centré sur une fréquence évoluant avec la vitesse. Dans ce cas, le niveau de vibration sur le pic de résonance le plus proche en fréquence prédomine largement sur le reste du spectre ce qui explique que les hologrammes présentent une déformée très proche de celle d'un mode (figure 4). On peut observer sur certains spectres que deux pics de résonance ressortent de manière équivalente : il en résulte une superposition des deux déformées modales correspondantes et, sur les hologrammes, des figures d'interférence très nettes mais mélangées de ces déformées (Planche 3 et figure 5).

3.3 Essais d'hélice en rotation dans l'eau

a. Description du dispositif expérimental

Afin de visualiser le comportement vibratoire d'une hélice en rotation, il est nécessaire de disposer d'une image fixe de cette hélice : pour cela, on utilise un appareil appelé "dérotateur".

Le dérotateur est constitué d'un prisme monté sur un moteur synchronisé à la moitié de la vitesse de rotation de l'hélice. Le jeu des réflexions au sein du prisme permet de figer optiquement et en continu la rotation de l'objet. Divers types de prismes permettent de travailler en transmission ou en réflexion.

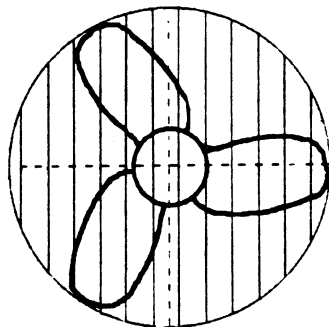
L'utilisation d'un tel procédé est appelée Image Derotated Holographic Interferometry (I.D.H.I., Interférométrie holographique d'images immobilisées en rotation). Le schéma de principe du dérotateur travaillant par réflexion dont dispose le CERG se trouve sur la figure 6. En pratique, les mouvements parasites générés par l'optique tournante du dérotateur doivent être d'amplitude inférieure à celle des mouvements que l'on désire visualiser. De plus, le dérotateur doit posséder une synchronisation précise, une bonne stabilité mécanique, et l'axe de rotation du prisme doit être parfaitement confondu avec celui de rotation de l'objet pour ne pas générer optiquement des mouvements parasites.

Le montage global de l'installation d'essais est donné sur la figure 7. La correspondance des axes de l'hélice et du dérotateur est contrôlée à l'aide de deux lasers d'alignement : le réglage est réalisé à l'aide de platines micrométriques support des éléments optiques du montage.

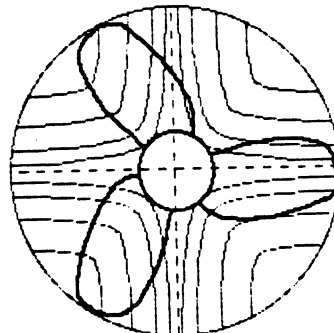
b. Résultats obtenus

Tout hologramme obtenu résulte d'un mélange de franges dues au mésalignement des axes de rotation de l'hélice et du dérotateur et de franges dues à la vibration propre de l'hélice. Une formule théorique permet de connaître l'angle de mésalignement observé (les franges de mésalignement sont pratiquement rectilignes et équidistantes entre elles) : on peut alors, par un réglage optique plus fin, optimiser le montage.

Par ailleurs, les vibrations propres de l'objet peuvent avoir des formes complexes. Dans notre cas, chacune des pales de l'hélice peut avoir des mouvements différents de ses voisines. Sur ces structures de géométrie périodique, certaines déformées modales peuvent être similaires à celles d'un disque. Les schémas ci-dessous illustrent tous ces résultats :



Franges de mésalignement



Franges de vibration

c. Développements futurs

Deux axes de développement supplémentaires sont envisageables :

- . mesures de spectres de vibration,
- . application de la méthode holographique de double référence.

Le dérotateur fournit une image fixe de l'hélice en rotation : il est alors possible de procéder à des mesures ponctuelles de vitesse de déformation à l'aide d'un vibromètre laser. Cette mesure peut, de plus, fournir une référence de phase le cas échéant.

La méthode holographique de double référence permet de déterminer les pertes locales, en particulier leurs signes (positif ou négatif) : il est alors possible de discriminer les parties "en bosse" des parties "en creux".

4. CONCLUSIONS-PERSPECTIVES

4.1 Estimation des possibilités des méthodes holographiques

Cette analyse découle des propriétés intrinsèques des mesures holographiques, à savoir :

- . on dispose d'une information spatiale globale,
- . on dispose d'une information instantanée.

Deux domaines se distinguent alors : le domaine *spatial* qui autorise donc l'étude de déformées de structures complexes et le domaine *temporel* qui autorise l'étude de phénomènes transitoires et propagatifs.

Etude spatiale

On a vu au ci-dessus les informations que l'on peut tirer d'un hologramme. Dans le cas d'une excitation à fréquence pure, pour obtenir la donnée d'amplitude de déformation, il faudrait associer au laser pulsé un système de déclenchement donnant une référence temporelle en relation avec le mouvement de la structure : un accéléromètre pourrait remplir cet office. A l'aide de cette référence et sachant que l'interfrange est égale à la demi-longueur d'onde du laser, on peut connaître l'amplitude de déplacement de chaque point dans son mouvement sinusoïdal.

Dans le cas d'une excitation large bande, le problème se complique fortement. On peut envisager une approche par décomposition des hologrammes sur une base modale préalablement établie. Plusieurs conditions doivent être alors rassemblées :

- . que les modes de la structure soient bien séparés et donc peu amortis,

- . que la réponse de la structure soit cohérente spatialement à l'échelle des déformées modales de façon à ce qu'instantanément les relations de phases entre les points de la structure et ce pour plusieurs hologrammes successifs ne soient pas erratiques.

Etude temporelle

Ce domaine n'a pas fait l'objet jusqu'à présent d'étude particulière de la part du CERG pour la DRET. Il est possible, à l'aide de l'analyse holographique associée à un déclenchement lié à la réponse de la structure, d'étudier les phénomènes transitoires et leur propagation (chocs). On peut ainsi obtenir des informations sur les amplitudes de déformation à un instant donné sur toute la surface de la structure et analyser les chemins de propagation privilégiés de l'onde de choc.

4.2 Exemples d'application

Ces méthodes sont très bien adaptées à l'étude et l'observation du comportement de structures de géométries complexes.

Domaine de la technique :

- . contrôle de structures : utilisation des hologrammes pour diagnostiquer les problèmes et aider à leur résolution en localisant les zones à raidir par exemple,
- . contrôle non-destructif : comparer par un traitement d'image un hologramme réel à un hologramme idéal et repérer en fonction de critères d'acceptation prédéfinis les pièces défectueuses.

Domaine de la recherche :

Mise au point et calage de codes de calcul : l'holographie permet avec une grande rapidité de mise en oeuvre et une grande souplesse de comparer des résultats de calcul à une situation réelle. Les applications possibles sont nombreuses : hélices en air et en eau, coques complexes ...

Son utilité est très grande dans la mise au point de codes de calcul de rayonnement acoustique dont les résultats dépendent fortement de la finesse de la représentation vibratoire des structures.

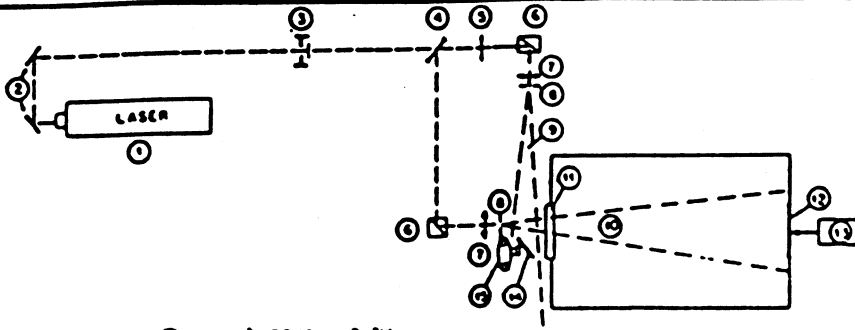


Figure n° 1
MONTAGE OPTIQUE

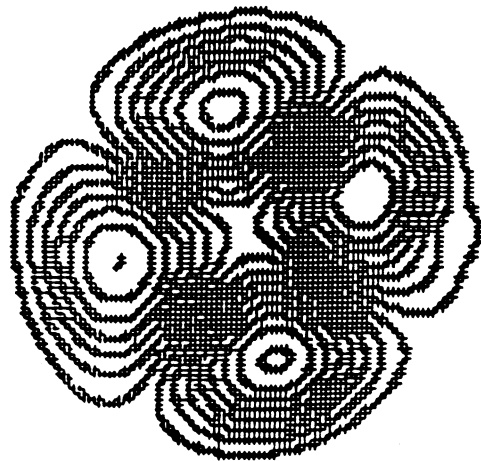
- | | |
|---|-----------------------------|
| ① Laser $\lambda = 0,5145 \mu m$ $P = 2W$ | ⑩ Faisceau de référence |
| ② Miroir | ⑪ Faisceau objet |
| ③ Obturateur | ⑫ Miroir |
| ④ Lame séparatrice 50/50 | ⑬ Plaque d'essai |
| ⑤ Objectif | ⑭ Excitateur |
| ⑥ Prisme | ⑮ Plaque holographique |
| ⑦ Objectif | ⑯ Appareil photo au négatif |
| ⑧ Trou de séchage | |



AIR
 $f = 136 \text{ Hz}$
Plaque rectangulaire



EAU
 $f = 55 \text{ Hz}$
mode 3,0



EAU
 $f = 211 \text{ Hz}$
Plaque circulaire mode 2,0

Figure n° 2 IMAGES HOLOGRAPHIQUES APRES TRAITEMENT NUMERIQUE

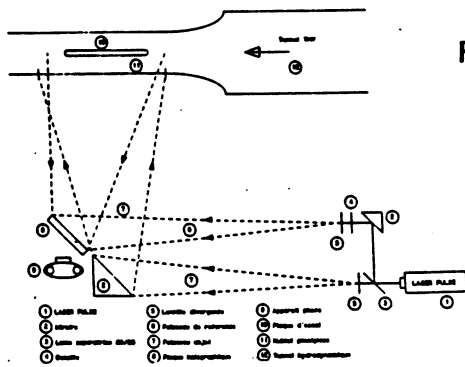
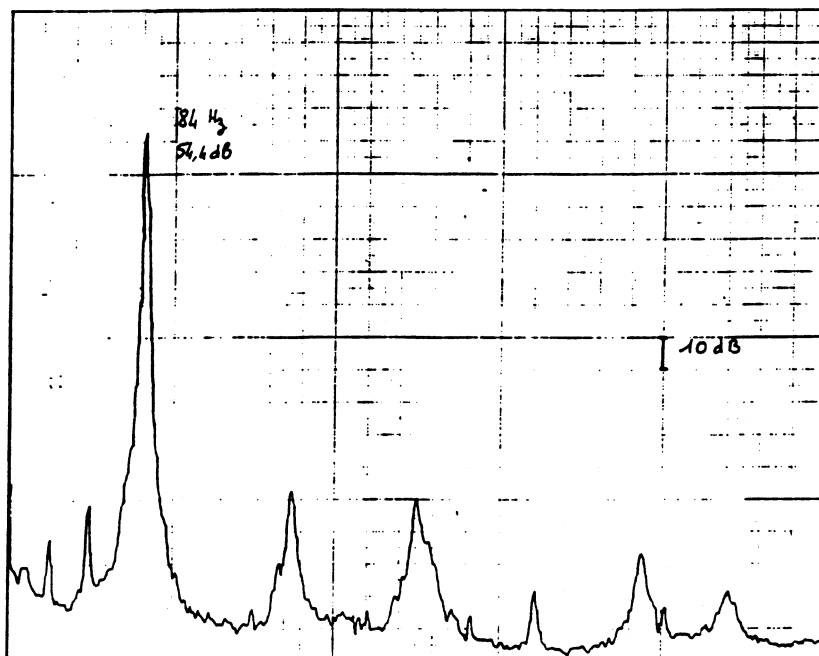


FIGURE 3 - Montage optique pour veine d'essais

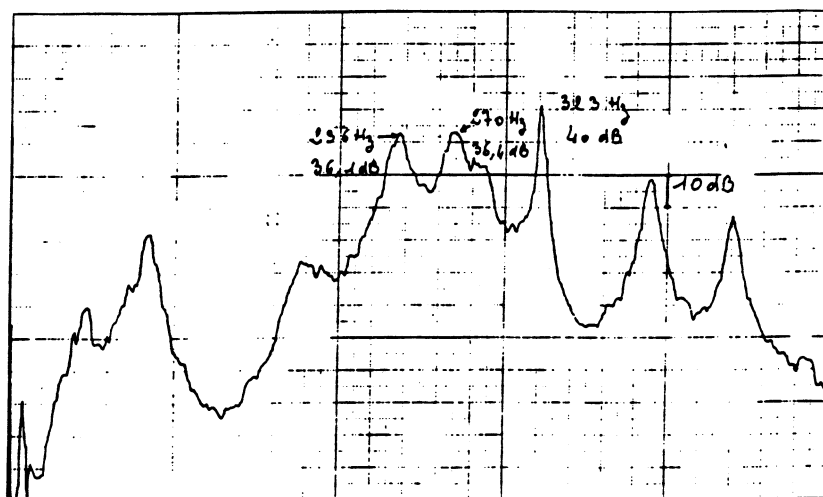
- | | | |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------|
| ① Laser plate | ⑥ Lame séparatrice | ⑩ Appareil photo |
| ② Miroir | ⑦ Faisceau de référence | ⑪ Faisceau objet |
| ③ Obturateur | ⑧ Miroir | ⑫ Plaque d'essai |
| ④ Lame séparatrice | ⑨ Plaque holographique | ⑬ Appareil photo au négatif |



dB référence $1 \text{ ms}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$

FIGURE 4

Densité spectrale d'accélération
Plaque composite non amortie
Vitesse d'écoulement : 2.4 m/s



dB référence $1 \text{ ms}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$

FIGURE 5

Densité spectrale d'accélération
Plaque composite non amortie
Vitesse d'écoulement : 7.25 m/s

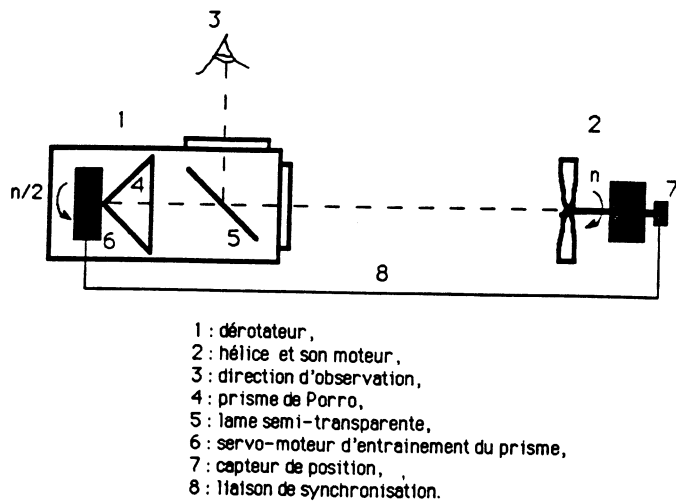


FIGURE 6 - Schéma de principe du dérotateur en réflexion

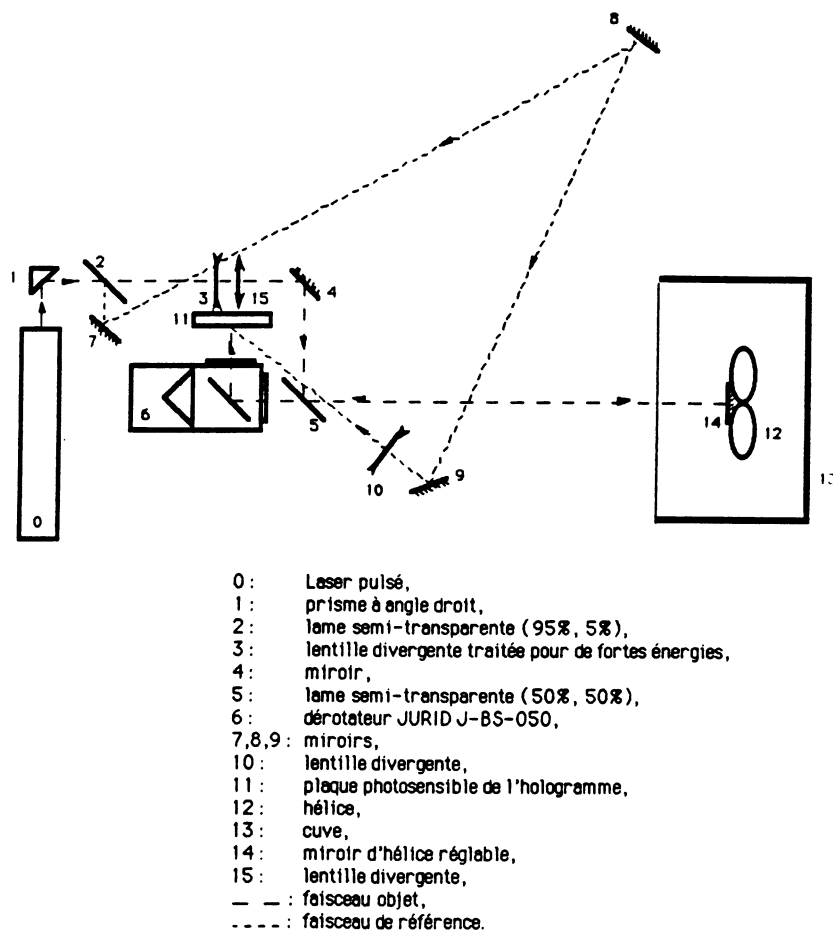
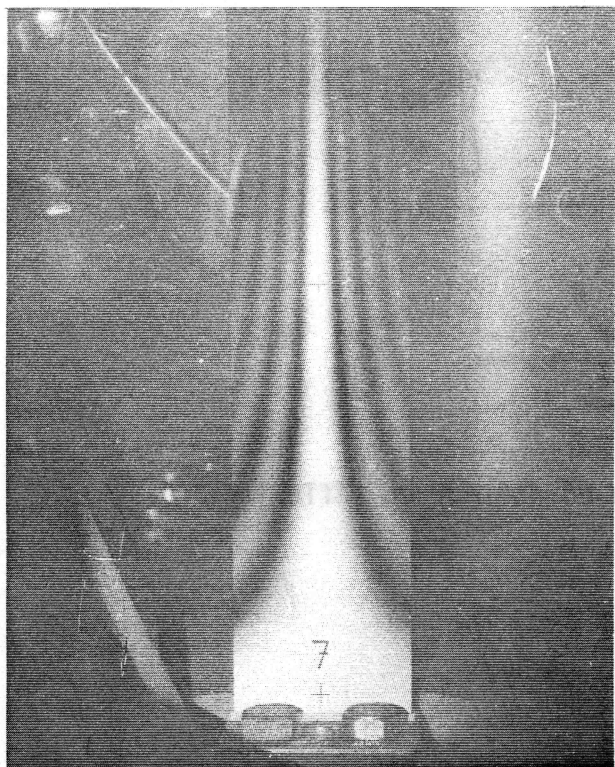
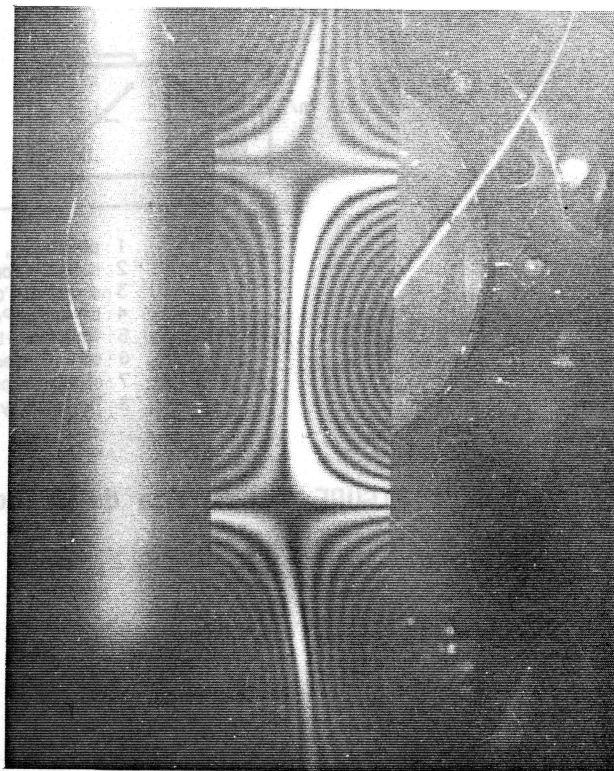


FIGURE 7 - Montage holographique avec dérotateur

PLAQUE RECTANGULAIRE

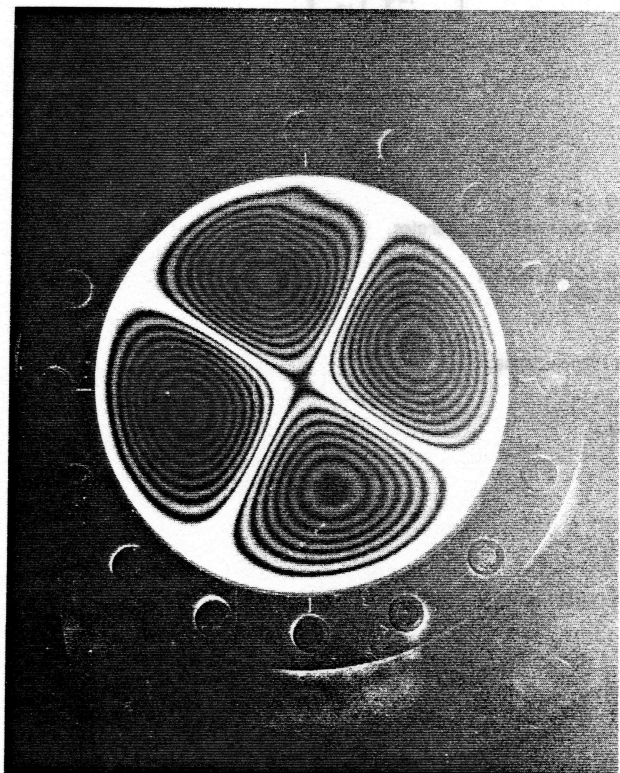


Mode 3

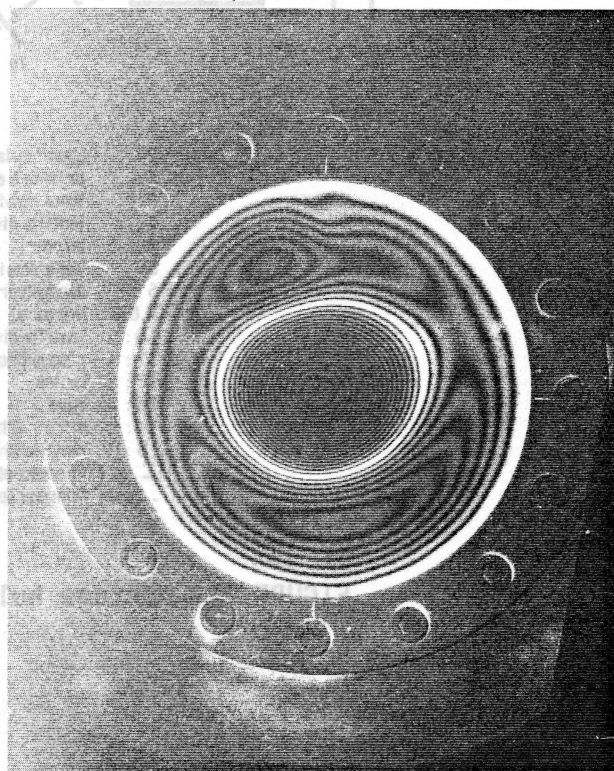


Mode 9

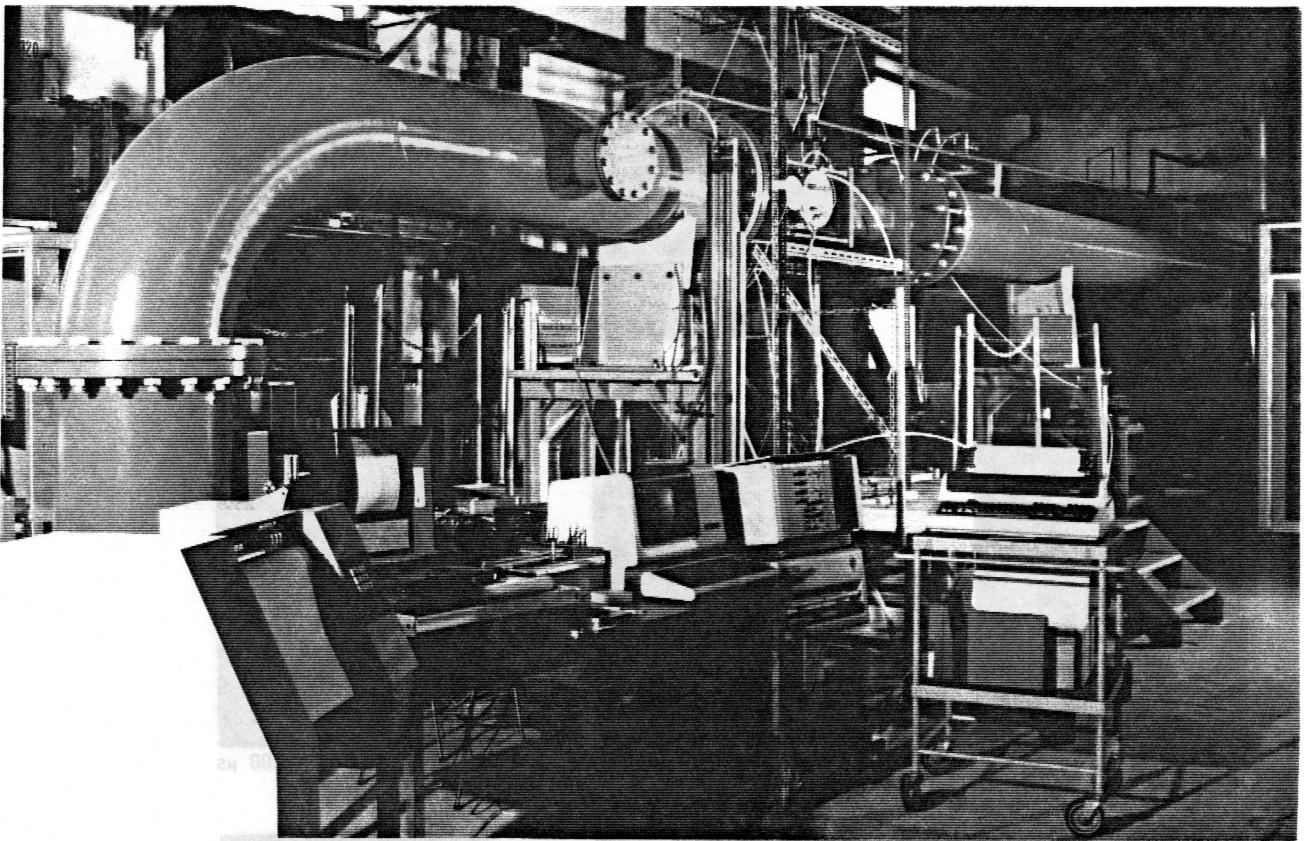
PLAQUE CIRCULAIRE



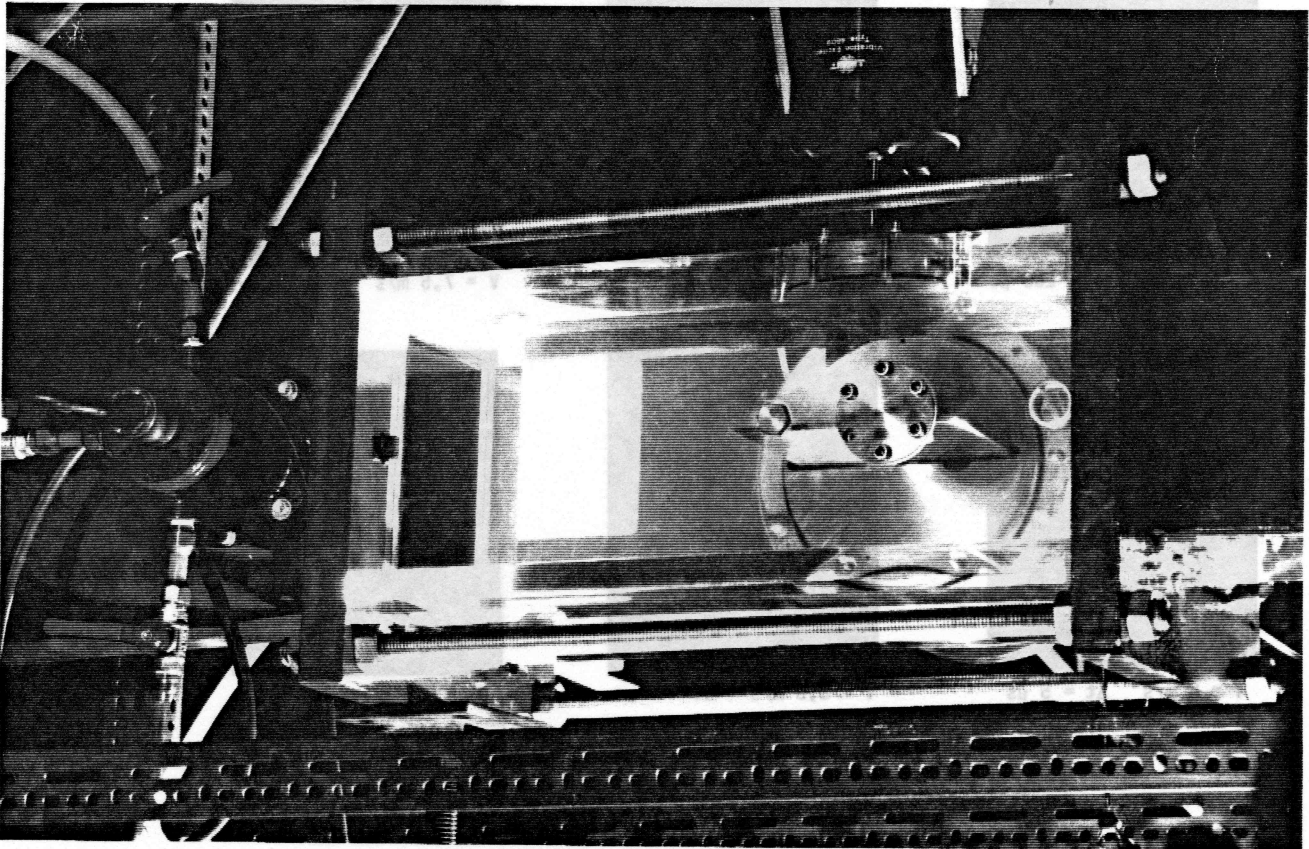
Mode 4



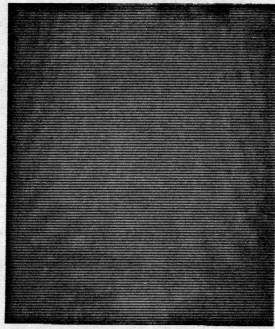
Mode 5



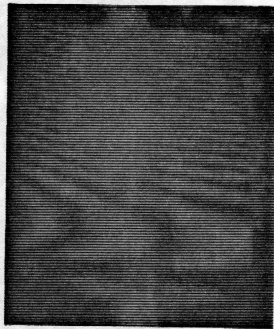
Vue générale du tunnel hydrodynamique



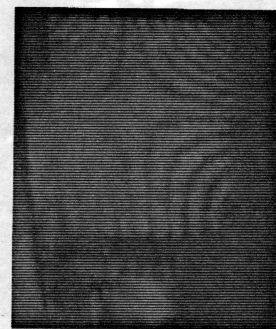
Veine d'essai avec plaque matériau composite



$V = 1,2 \text{ m/s} \quad \Delta t = 200 \mu\text{s}$



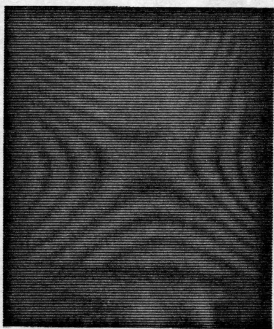
$V = 2,4 \text{ m/s} \quad \Delta t = 200 \mu\text{s}$



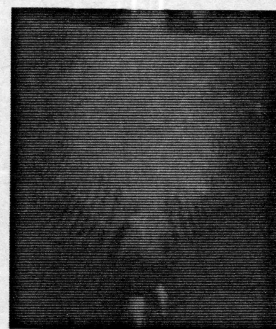
$V = 5 \text{ m/s} \quad \Delta t = 5 \mu\text{s}$



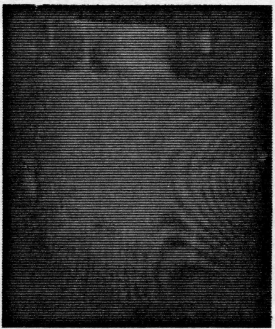
$V = 5,75 \text{ m/s} \quad \Delta t = 100 \mu\text{s}$



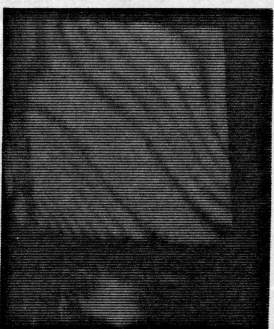
$V = 6,2 \text{ m/s} \quad \Delta t = 200 \mu\text{s}$



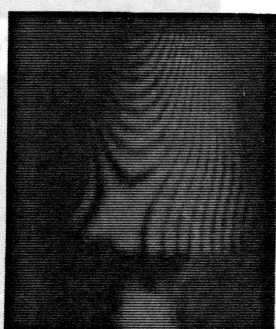
$V = 6,5 \text{ m/s} \quad \Delta t = 200 \mu\text{s}$



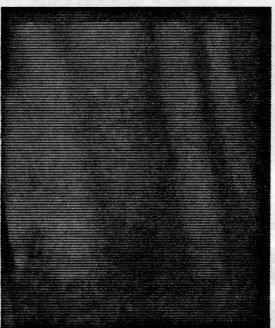
$V = 7,2 \text{ m/s} \quad \Delta t = 200 \mu\text{s}$



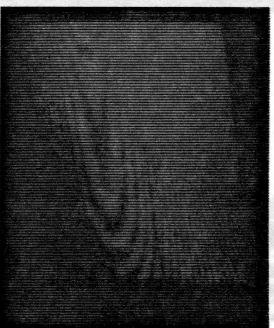
$V = 7,25 \text{ m/s} \quad \Delta t = 100 \mu\text{s}$



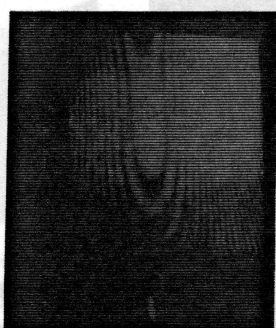
$V = 7,5 \text{ m/s} \quad \Delta t = 100 \mu\text{s}$



$V = 8 \text{ m/s} \quad \Delta t = 5 \mu\text{s}$



$V = 8,5 \text{ m/s} \quad \Delta t = 5 \mu\text{s}$



$V = 9 \text{ m/s} \quad \Delta t = 5 \mu\text{s}$

Plaque matériau composite