

# CARACTERISATION DES HOLOGRAMMES COULEURS EN REFLEXION POUR L'ANALYSE DES ECOULEMENTS TRIDIMENSIONNELS

**Jean-Michel Desse\***

\*ONERA, Centre de Lille, 5, Boulevard Paul Painlevé, 50045 LILLE Cedex,  
tél : 03 20 49 69 40, fax : 03 20 49 69 53, [Jean-Michel.Desse@onera.fr](mailto:Jean-Michel.Desse@onera.fr)

**Résumé :** La faisabilité de l'interférométrie holographique en vraies couleurs et en temps réel a été montrée depuis quelques années par l'ONERA et l'ISL. Une application concrète a été réalisée pour étudier l'écoulement bidimensionnel en aval d'un cylindre circulaire à Mach 0,4. Des interférogrammes ultra rapides de l'écoulement ont été obtenus à une cadence de 35 000 images par seconde avec un temps de pose de 750 nanosecondes. L'auteur propose d'étendre cette méthode à l'analyse des écoulements tridimensionnels en proposant un montage spécifique, défini dans un premier temps dans une direction de visée, le but étant de reproduire le montage optique dans plusieurs directions de visées, décalées angulairement. Contrairement au montage optique développé pour l'analyse des écoulements bidimensionnels et qui utilise des hologrammes par transmission, le montage d'analyse pour les écoulements 3D utilisent des hologrammes par réflexion. Dans le cas des hologrammes par réflexion, l'efficacité de diffraction des plaques est fortement influencée par les variations de l'épaisseur de la gélatine des plaques provoquées par le développement des hologrammes. Des solutions sont proposées pour maîtriser correctement la contraction de la gélatine et les résultats sont présentés pour deux types d'hologrammes russe et français (Slavich et Gentet). Enfin, on présente des interférogrammes ultra rapides obtenus avec le montage qui a été défini dans une direction de visée.

**Mots clés :** Interférométrie, Holographie Couleur, Ecoulement Instationnaire.

## 1. INTRODUCTION

L'ONERA et l'ISL ont montré depuis quelques années la faisabilité de l'interférométrie holographique en vraies couleurs et en temps réel [1]. Cette technique utilise comme source lumineuse trois longueurs d'onde, rouge, verte et bleue, provenant d'un laser à gaz argon et krypton mélangés, et des hologrammes panchromatiques, très haute définition, enregistrés par transmission. La méthode a été appliquée avec succès dans une soufflerie de l'ONERA pour analyser l'écoulement bidimensionnel autour d'un cylindre à Mach 0,4 [2]. Des interférogrammes ultra rapides de l'écoulement ont été obtenus à une cadence de 35 000 images par seconde avec un temps de pose de 750 nanosecondes. L'auteur propose d'étendre

cette méthode à l'analyse des écoulements tridimensionnels. Pour ce faire, un montage spécifique type «Denisyuk » a été défini dans une direction de visée, le but étant d'analyser un écoulement 3D en reproduisant le montage optique dans plusieurs directions de visées, décalées angulairement. Contrairement au montage optique développé pour l'analyse des écoulements bidimensionnels et qui utilise des hologrammes par transmission, le montage d'analyse pour les écoulements 3D utilise des hologrammes par réflexion. Dans le cas des hologrammes par réflexion, l'efficacité de diffraction des plaques est fortement influencée par les variations de l'épaisseur de la gélatine des plaques provoquées par le développement des hologrammes. Des solutions sont proposées pour maîtriser correctement la contraction de la gélatine et les résultats obtenus sont présentés pour deux types d'hologrammes russe et français (Slavich et Gentet). Les plaques holographiques sont restituées en étudiant le spectre d'une lumière blanche xénon diffractée par les deux types d'hologrammes avec et sans correction de l'épaisseur de la gélatine. Enfin, un montage de type «Denisyuk » couleur a été réalisé avec des hologrammes où l'épaisseur de la gélatine était parfaitement contrôlée, ce qui a permis d'obtenir, dans une direction de visée, des interférogrammes ultra rapides couleurs très contrastés.

## 2. DEFINITION DU MONTAGE OPTIQUE

De notre point de vue, l'analyse des écoulements tridimensionnels passe par un montage optique dans lequel plusieurs faisceaux lumineux traversent l'écoulement avec des angles de visée décalés d'un angle connu. De plus, comme les différences de marche optique à mesurer dans les écoulements 3D sont plus faibles que celles qui sont mesurées dans les écoulements 2D, il serait préférable que les rayons traversent deux fois le phénomène étudié pour doubler la sensibilité de la mesure. D'un autre côté, il apparaît souhaitable que la majeure partie des éléments optiques soit située d'un seul côté de la veine d'écoulement si on veut reproduire le montage optique suivant plusieurs directions de visée. Etant donné ces considérations, un montage optique a pu être défini.

### 2.1. Montage optique type «Denisyuk»

Le montage présenté sur la planche 1 est apparenté à un montage classique type «Denisyuk» dans lequel une lame séparatrice (11) est insérée entre le filtre spatial (6) et l'hologramme (12). La source lumineuse utilisée est constituée par le laser argon et krypton mélangés qui produit une dizaine de raies dans le domaine du visible et spécialement la raie rouge du krypton à 647 nm et la raie verte de l'argon à 514 nm. Le laser solide pompé par diode fournit

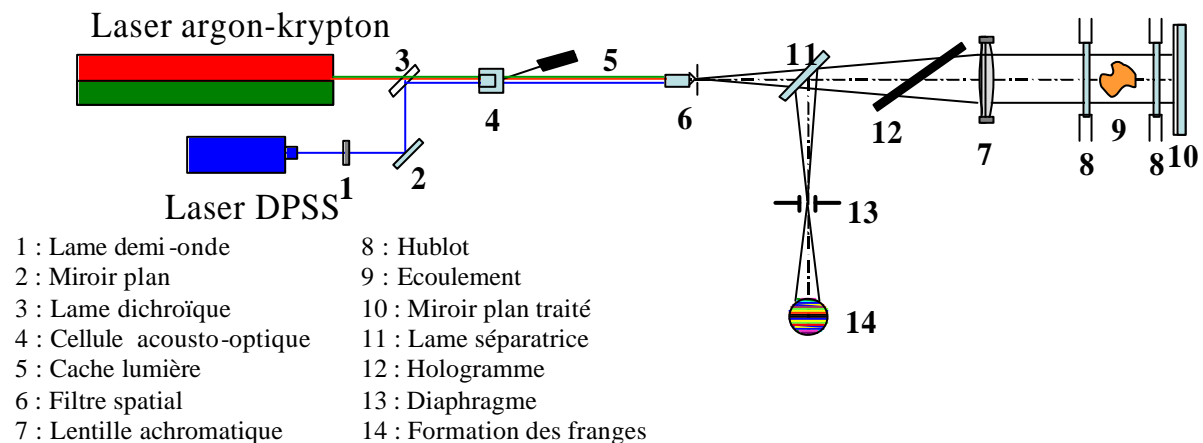


Figure 1 : Montage d'interférométrie holographique en couleur et en temps réel type « Denisyuk »

la raie bleue à 457 nm. Une lame demi-onde est utilisée pour tourner de  $90^\circ$  la polarisation de la raie bleue (de S à P) et le miroir de renvoi à  $90^\circ$  (2) et la lame dichroïque (3) permettent de superposer les trois longueurs d'ondes. La cellule acousto-optique (4) dévie les longueurs parasites dans un cache lumière (5) et diffracte les trois longueurs d'ondes rouge, verte et bleue, à l'aide de trois fréquences caractéristiques qui sont injectées dans le cristal. Ces fréquences sont de l'ordre de quelques mégahertz et leur amplitude est ajustable indépendamment grâce à une électronique de commande réalisée à l'ONERA, ce qui permet de régler les intensités rouge, verte et bleue séparément. Le temps d'exposition de l'hologramme est donné par un obturateur électronique qui pilote la cellule acousto-optique.

Le filtre spatial (6), constitué d'un objectif de microscope (x20), focalise la lumière dans un trou de  $25\mu\text{m}$  et la lentille achromatique (7) est utilisée pour éclairer l'hologramme avec un faisceau de lumière parallèle de diamètre 120 mm. Dans ce montage, les trois faisceaux issus des deux lasers divergent sur l'hologramme pour constituer les trois faisceaux de référence. Ces trois faisceaux traversent la plaque holographique et la veine d'expériences. Le miroir plan (10), placé juste derrière la veine d'expériences (8), renvoie une seconde fois les faisceaux dans la veine et ils illuminent l'hologramme en constituant les ondes de mesure. L'hologramme (12) est alors éclairé des deux côtés par les trois faisceaux de référence divergents et par les trois faisceaux de mesure parallèles. La lame séparatrice (11) est insérée dans le trajet optique pour visualiser le phénomène hors de l'axe optique du montage. Un diaphragme (13) est placé dans le plan de focalisation juste devant la caméra pour filtrer les interférences parasites.

Ceci étant, l'hologramme est une première fois éclairé en absence d'écoulement dans la veine d'expériences, développé et replacé exactement à la position qu'il occupait lors du premier enregistrement. Si des variations de l'indice de réfraction sont générées dans la veine d'expériences, des franges d'interférences peuvent être alors observées sur l'écran (14). Ce montage optique est très simple mais il présente des avantages et des inconvénients.

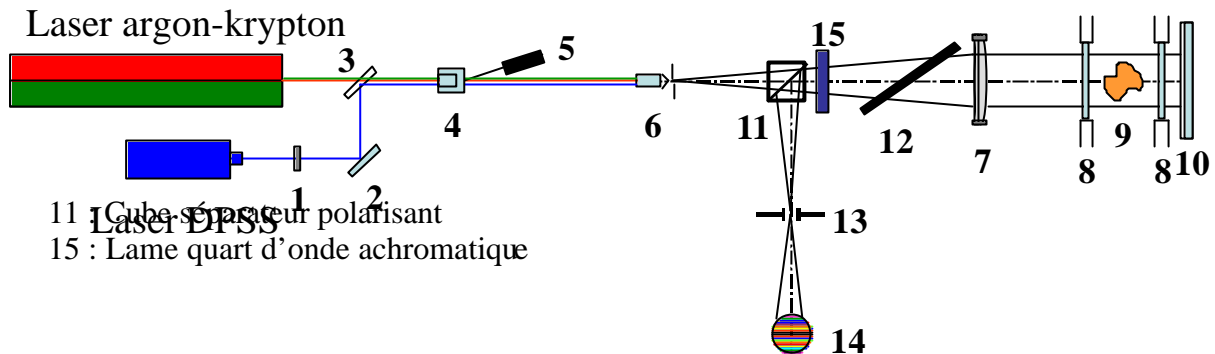
Les avantages sont d'abord le fait qu'on utilise un faible nombre d'éléments optiques, qu'ensuite, les faisceaux de référence et les faisceaux de mesure sont colinéaires et qu'il y a juste un miroir plan derrière la veine d'expériences. Enfin, l'hologramme peut être placé devant la lentille achromatique (faisceaux convergents) ou derrière la lentille achromatique (faisceaux parallèles). Le principal inconvénient réside dans le fait qu'il n'est pas possible d'équilibrer l'intensité lumineuse des faisceaux de référence et de mesure. La solution unique pour résoudre ce problème consiste à effectuer un traitement de la surface du miroir plan situé derrière la soufflerie mais cette opération implique de connaître avec précision l'efficacité de diffraction de l'hologramme. Le dernier point négatif concerne la quantité de lumière reçue dans le plan d'observation (écran), car 50% de l'intensité lumineuse est transmise par la lame séparatrice à chaque traversée de sorte qu'il ne reste que 25% de la lumière incidente sur l'écran. Une solution a été trouvée pour récupérer 100% de la lumière incidente.

## **2.2 Utilisation de la polarisation des faisceaux**

Les propriétés de polarisation des faisceaux ont été utilisées pour changer la polarisation entre les faisceaux incidents et les faisceaux renvoyés par le miroir plan. Sur la figure 2, un cube séparateur polarisant (11) remplace la lame séparatrice. Ce cube laisse passer les faisceaux polarisés P et renvoie à  $90^\circ$  les faisceaux polarisés S. Une lame quart d'onde achromatique (15) est placée juste derrière le cube séparateur de sorte qu'à l'aller, la

polarisation des faisceaux tourne de  $45^\circ$ . Le miroir plan renvoie les faisceaux une seconde fois dans la lame quart d'onde qui modifie une nouvelle fois la polarisation des faisceaux de  $45^\circ$ . Cette double traversée modifie donc de  $90^\circ$  la polarisation des faisceaux entre l'aller et le retour de sorte que le cube séparateur renvoie à  $90^\circ$  de l'axe optique les faisceaux. Cet arrangement permet de conserver 100% de la lumière incidente.

Figure 2 Montage optique avec cube séparateur polarisant et lame  $\frac{1}{4}$  d'onde achromatique



### 3. HOLOGRAMMES PAR TRANSMISSION ET HOLOGRAMMES PAR REFLEXION

Au regard du montage optique de la figure 2, les hologrammes doivent travailler en réflexion. La figure 3 montre comment sont inscrites les franges d'interférences dans l'épaisseur de la gélatine de l'hologramme lorsque l'image holographique est enregistrée en transmission ou en réflexion. En transmission, les franges sont inscrites perpendiculairement à la plaque et une petite variation de l'épaisseur de la gélatine provoquée par le développement des plaques ne modifie que très légèrement les trois interfranges. En outre, en réflexion, les franges d'interférences sont enregistrées parallèlement à l'épaisseur de la gélatine et les interfranges deviennent très sensibles à une petite variation de l'épaisseur de la gélatine.

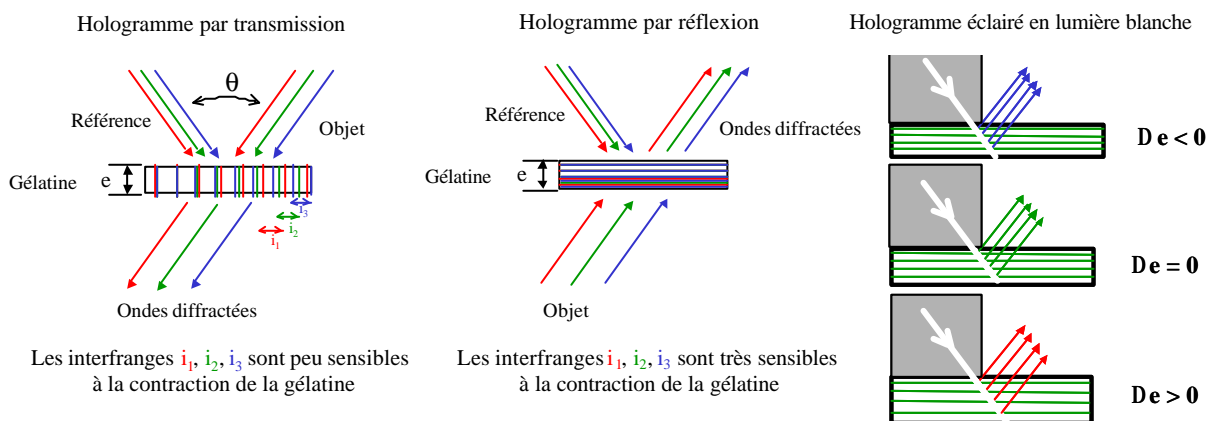


Figure 4 Effet de la contraction de l'épaisseur de la gélatine sur les interfranges

Les effets de la contraction de la gélatine sont présentés sur la droite de la planche 4 lorsqu'on enregistre un hologramme en réflexion avec une longueur d'onde verte. A la restitution, on montre trois hologrammes différents restitués avec une source de lumière blanche (xénon) à la même incidence que celle de l'onde de référence utilisée à l'enregistrement. On peut voir que si l'épaisseur de la gélatine n'a pas bougé ( $\Delta e = 0$ ), l'hologramme diffracte uniquement la longueur de l'enregistrement, i.e. pour l'hologramme vert, la longueur d'onde verte contenue

dans le spectre du xénon. Si l'épaisseur de la gélatine a diminué de 5% ( $\Delta e < 0$ ), l'interfrange sera réduit proportionnellement et la longueur d'onde restituée par l'hologramme sera une raie bleue du spectre du xénon et non pas la raie verte. De même, si l'épaisseur de la gélatine a augmenté de 20% ( $\Delta e > 0$ ), l'hologramme restitué en lumière blanche diffractera une raie proche du rouge. Pour qu'une variation de couleur ne soit pas perçue par l'œil, l'épaisseur de la gélatine doit être contrôlée avec une précision de 0,2%. Comme l'épaisseur des gélatines utilisées est de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ , la variation de l'épaisseur provoquée par le développement des plaques doit être inférieure à 20 nm.

La technique optique étant basée sur la connaissance des vraies couleurs diffractées par l'hologramme, une variation de l'épaisseur de la gélatine supérieure à 20 nm faussera le dépouillement des interférogrammes. Le problème de la contraction de la gélatine est un problème crucial qui doit être parfaitement maîtrisé.

### 3. CONTROLE DE L'ÉPAISSEUR DE LA GÉLATINE ET RESULTATS

Un montage spécifique a été conçu pour enregistrer les hologrammes par réflexion et les restituer en lumière blanche. Une mesure en temps réel des variations de l'épaisseur de la gélatine peut alors être obtenue. A l'enregistrement, l'hologramme (8) enregistre les interférences entre trois ondes de mesure et trois ondes de référence comme le montre la figure 5. Après avoir développé et replacé l'hologramme, les interférences lumineuses peuvent être visualisées sur les deux bras de l'interféromètre.

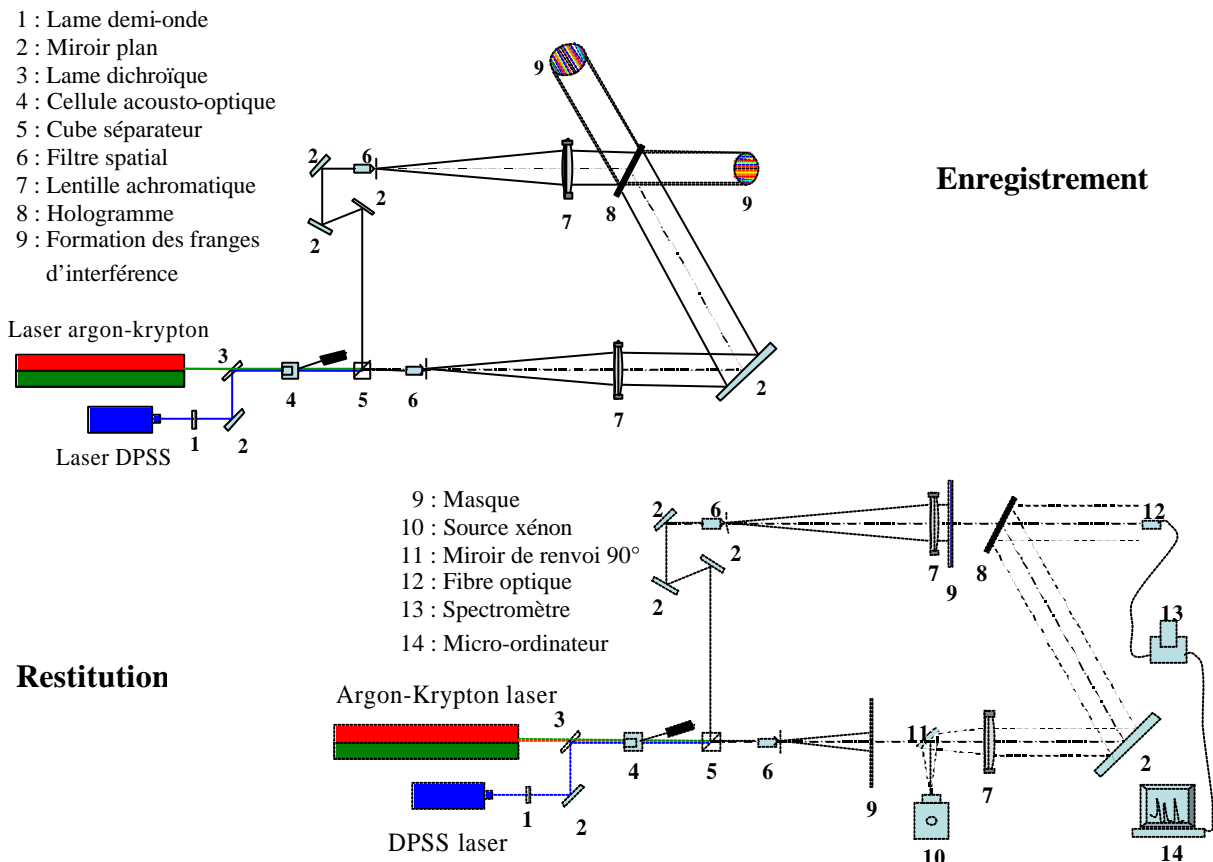


Figure 5 Montage optique défini pour la caractérisation des plaques holographiques

A la restitution, la source blanche xénon éclaire l'hologramme à l'aide d'un petit miroir plan (11). Le faisceau de lumière blanche est aligné sur le trajet optique des raies lasers pour que les trois réseaux enregistrés dans l'hologramme diffractent les longueurs d'onde de la lumière xénon. Cette diffraction lumineuse est captée par une fibre optique (12) relié à un spectromètre (13) piloté par un micro-ordinateur (14). Il est donc possible de visualiser en temps réel les trois décalages en longueur d'onde entre la lumière blanche diffractée par l'hologramme et les longueurs utilisées à l'enregistrement.

## 5. RESULTATS

Deux types d'hologrammes panchromatiques à gélatine argentique simple couche ont été testés : plaques russes de Slavich et plaques françaises de Gentet. Si les plaques sont développées suivant les instructions de chaque fabricant, l'épaisseur de la gélatine diminue pendant la procédure de blanchiment pour les deux types de plaque. La figure 6 montre en trait pointillé une contraction d'environ 10 nm pour les plaques Gentet et 8 nm pour les plaques Slavich. Un grand nombre de tests a été réalisé pour stabiliser l'épaisseur de la gélatine et éviter cette contraction. Des résultats satisfaisants ont été obtenus : ils sont différents pour les deux types de plaque. Pour les plaques Gentet, elles doivent être séchées au four à 50°C deux heures avant d'être utilisées. Pour les plaques Slavich, la seule solution trouvée consiste à ajouter 2 ml de glycérol dans le dernier de séchage à 100% d'éthanol. Le détail des traitements des plaques peut être trouvé dans les références [3] et [4]. La figure 6 montre les résultats obtenus pour les deux plaques avec et sans les solutions pour éviter la contraction de la gélatine.

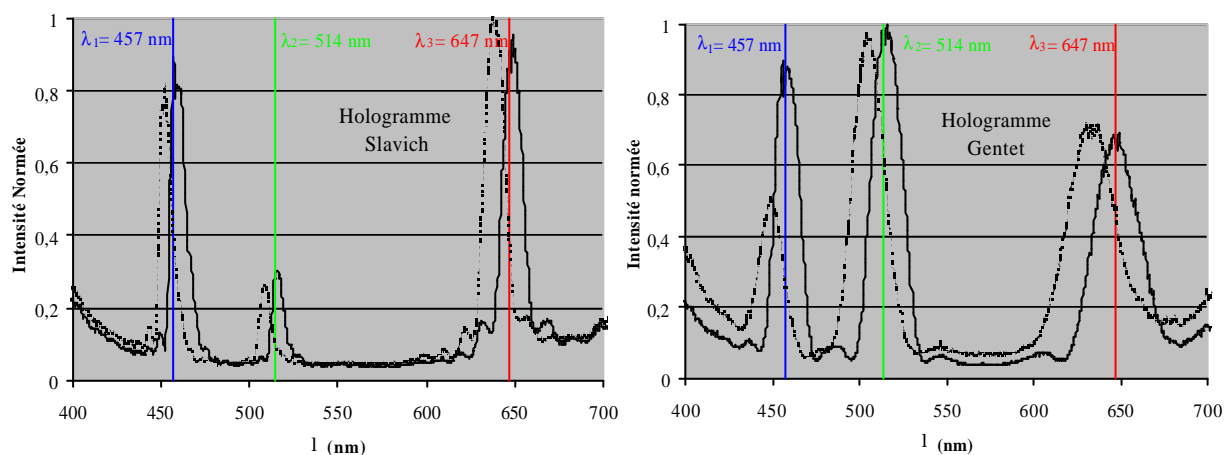
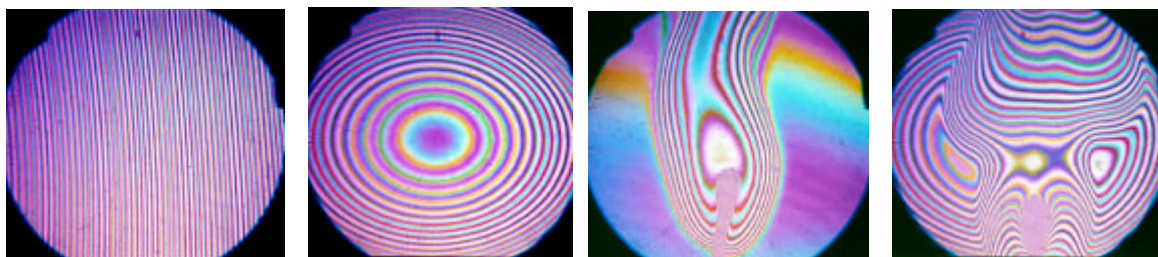


Figure 6 Mesure de la contraction de la gélatine – Plaques russes et françaises



a) franges resserrées      b) franges circulaires      c) et d) déformées par la flamme d'une allumette

Figure 7: Interférogrammes en couleur et en temps réel obtenus avec le montage optique

La figure 7 montre quelques interférogrammes obtenus avec les traitements spécifiques appliqués aux deux types de plaques. Les deux premiers sont obtenus sans aucune variation de l'indice de réfraction dans la veine d'expériences et pour les deux derniers, les franges ont été déformées par les gradients thermiques d'une flamme d'allumette. Ici, comme l'efficacité de diffraction obtenue avec les trois réseaux est de l'ordre de 35% à 40%, une densité variable a été insérée sur l'un des deux bras de l'interféromètre pour augmenter le contraste des franges d'interférences.

Ensuite, le montage «Denisyuk » de la figure 1 a été testé avec des plaques correctement recalées. Des images comparables à celles de la figure 7 ont été obtenues avec un très fort contraste et une luminosité suffisante pour enregistrer les interférogramme à la cadence la plus rapide (35 000i/s).

## 6. CONCLUSION

Partant des résultats obtenus en interférométrie holographique en couleur et en temps réel développée pour l'analyse des écoulements bidimensionnels, un montage optique a été défini et testé pour l'analyse des écoulements tridimensionnels. Il est basé sur le principe du montage type «Denisyuk » et il utilise des hologrammes par réflexion.

Les problèmes soulevés par les hologrammes réflexion sont décrits et on montre que la contraction de la gélatine de l'hologramme est un problème crucial car les interfranges sont enregistrées pratiquement perpendiculairement à la surface de la plaque. Une petite variation dans l'épaisseur de la gélatine modifie rapidement l'efficacité de diffraction de l'hologramme, ce qui atténue fortement le contraste des franges.

Des solutions ont été apportées pour éviter cette contraction : un préchauffage des plaques est nécessaire pour les plaques Gentet et pour les plaques Slavich, il suffit d'ajouter 2 ml de glycérol dans le dernier bain de rinçage à 100% d'éthanol. Les mesures faites au spectromètre montrent que la réponse des plaques est centrée sur les trois longueurs d'onde de la source lumineuse placée derrière l'interféromètre et que le coefficient de diffraction des plaques est de l'ordre de 40% lorsqu'elles sont exposées simultanément aux trois longueurs d'onde, rouge, verte et bleue.

Cette particularité permet d'utiliser le montage «Denisyuk » comme un montage d'interférométrie holographique en vraies couleurs et en temps réel. Des interférogrammes ultra rapides en couleur ont été obtenus avec une très forte luminosité et un très bon contraste dans une direction de visée, ce qui permet d'envisager de multiplier le nombre de visée sans aucune modification de la source lumineuse.

### Remerciement :

L'auteur tient à remercier tout particulièrement le Ministère de la Défense qui a soutenu financièrement l'ensemble de ces travaux par l'intermédiaire de la Délégation Générale à l'Armement et la Mission pour la Recherche et l'Innovation Scientifique.

**Bibliographie :**

1. J.M. Desse, F. Albe and J.C. Tribillon, Real-time color holographic interferometry, *Applied Optics*, vol. 41, n° 25, pp. 5326-5333, 2002.
2. J.M. Desse, F. Albe and J.C. Tribillon, Real-time color holographic interferometry devoted to 2D unsteady wake flows, *Journal of Visualization of Japan*, vol. 7, n° 3, pp. 217-224, 2004.
3. H.J. Bjelkhagen, T.H. Jeong, D. Vukicevic, Color reflection holograms recorded in a panchromatic ultrahigh-resolution single-layer silver halide emulsion. *J. Imaging Sci. Tech.*, vol. 20, n° 2, pp. 134-146, 1996.
4. H.J. Bjelkhagen, Silver-halide recording materials for holography and their processing, *Springer Series in Opt. Sci.*, Springer-Verlag, vol. 66, Berlin, 1993.