



**HAL**  
open science

## Interférométrie holographie numérique à double référence

Jean-Michel Desse, François Olchewsky

► **To cite this version:**

Jean-Michel Desse, François Olchewsky. Interférométrie holographie numérique à double référence. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, Centrale-Supélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097810

**HAL Id: hal-02097810**

**<https://hal.science/hal-02097810v1>**

Submitted on 12 Apr 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Interférométrie holographique numérique à double référence

Jean-Michel DESSE, François OLCHEWSKY

ONERA, The French Aerospace Lab et LMFL, Laboratoire de Mécanique des Fluides de Lille, Kampé de Fériet,  
CNRS FRE 2017, 5, Rue des Fortifications, 59045 LILLE Cedex

Email auteur correspondant : Jean-Michel.Desse@onera.fr

Cet article propose un interféromètre holographique numérique à double référence pour l'analyse des fortes variations d'indice de réfraction rencontrées dans les écoulements transsoniques et supersoniques. Pour cela, un prisme de Wollaston est inséré dans le bras de référence afin de générer simultanément deux ondes de référence polarisées orthogonalement. En conséquence, les interférogrammes enregistrés contiennent deux réseaux de franges d'interférence croisés et perpendiculaires qui donnent deux ordres complètement séparés dans le spectre de Fourier. Il est alors possible d'analyser un objet transparent quelle que soit l'orientation du gradient d'indice de réfraction en utilisant les deux cartes de phases reconstruites avec chacun des deux premiers ordres d'interférences. La fusion des cartes de phase donne une carte de phase unique dans laquelle les singularités de phase sont éliminées. Les résultats expérimentaux démontrent la pertinence de l'approche proposée pour l'analyse des ondes de choc émises dans le sillage instationnaire autour d'un cylindre circulaire à Mach 0,75.

## 1 Introduction

Dans le domaine de la mécanique des fluides, les écoulements complexes et instationnaires doivent être caractérisés par des méthodes optiques fines et adaptées. Cette exigence répond à deux impératifs: approfondir la phénoménologie des phénomènes aérodynamiques et construire des bases de données pour la qualification de codes instationnaires pour lesquels il n'existe actuellement aucune référence expérimentale de densité décrivant l'instantanéité et le caractère évolutif du champ complet. Les deux principales techniques alternatives actuellement utilisées sont les mesures de vitesse qui permettent soit des mesures ponctuelles à des vitesses très élevées (mesure du vecteur vitesse par LDV), soit des mesures plein champ avec deux ou trois composantes (PIV, [1]). Il est donc essentiel de définir des outils pour mesurer des quantités de plus en plus petites dans l'espace et le temps. Ainsi l'interféromètre holographique numérique développé et testé à l'ONERA-DAAA est un outil métrologique non intrusif à haute résolution spatiale et temporelle. L'appareil fournit des mesures absolues et instantanées du champ complet de densité et de l'évolution du champ dans le temps, contrairement aux méthodes différentielles qui ne donnent accès qu'à la dérivée locale de la grandeur mesurée (interférométrie différentielle, technique schlieren, Background Oriented Schlieren). C'est une technique innovante qui répond au problème posé, à savoir la constitution de bases de données fines pour la validation des codes CFD.

La méthode a été testée avec succès pour l'analyse des écoulements subsoniques instables [2, 3], mais lorsque le nombre de Mach augmente et se rapproche du régime transsonique, des ondes de choc apparaissent dans l'écoulement et provoquent des déphasages lors du processus de dépliement de la phase de l'interférogramme. Deux causes principales sont la raison: le temps d'exposition de chaque interférogramme (de l'ordre de 300 ns) est trop long devant la vitesse de déplacement des ondes de choc dans l'écoulement, ce qui provoque des zones floues et également, lorsque les ondes de choc sont parallèles au réseau de franges d'interférence généré dans l'écoulement, des dislocations d'indice de réfraction se produisent dans le réseau, ce qui provoque des sauts de phase lors du dépliement.

Le premier point a été résolu en utilisant comme source lumineuse un laser pulsé ayant une longueur de cohérence appropriée et un temps de pose de quelques nanosecondes. Cet article concerne le deuxième composant: la méthode d'interférométrie holographique numérique est basée sur la création d'un motif de franges d'interférence généré entre une onde de référence et une onde de mesure. Sans écoulement, ce motif est visualisé par des lignes droites et parallèles orientables à la demande. En présence d'écoulement, les lignes sont déformées par les variations d'indice de réfraction provoquées par l'écoulement. Lorsque l'écoulement comporte des ondes de choc quasiment parallèles aux franges d'interférence, le dépliement de phase n'est plus possible car des dislocations de franges apparaissent et il est impossible de suivre les franges au passage des ondes de choc. Pour contourner ce problème crucial, le montage optique génère simultanément deux motifs de référence dont l'orientation des franges et la polarisation sont perpendiculaires entre elles et cela, à partir d'une onde de référence unique et d'une onde de mesure. Pour obtenir cet effet, un prisme de Wollaston est utilisé pour séparer

l'onde de référence en deux ondes polarisées orthogonalement entre elles de sorte qu'elles ne puissent pas interférer l'une avec l'autre. Elles ne peuvent interférer qu'avec la composante de l'onde de mesure qui a la même polarisation. Ensuite, les deux réseaux de franges sont enregistrés sur le même capteur en même temps et le traitement par transformée de Fourier rapide révèle deux fréquences spatiales générées par chaque motif de frange et complètement séparées dans le plan de Fourier. Le filtrage et la reconstruction dans le plan de Fourier permettent d'obtenir au même instant deux cartes de phase du même écoulement, l'une obtenue par avec des franges horizontales par exemple, l'autre obtenue avec des franges verticales. Une onde de choc qui serait parallèle aux franges d'interférence du premier motif est donc perpendiculaire aux franges du deuxième réseau. Les cartes de phase qui montrent les sauts de phase dans le premier dépliement de phase de l'interférogramme peuvent être résolues en dépliant le second interférogramme.

## 2 Description du montage expérimental

La configuration optique représentée sur la Figure 1 représente un interféromètre de type Mach-Zehnder. Il peut être étendu à l'interféromètre de type Michelson, mais cette configuration n'a pas encore été testée. La source de lumière de cet interféromètre est un laser pulsé (5 à 6 nanosecondes) d'environ 3 mètres dans la longueur de cohérence. Un premier cube séparateur de polarisation ajuste l'énergie d'entrée dans l'interféromètre. Le deuxième cube séparateur forme le faisceau de mesure qui traverse la veine d'expériences et le faisceau de référence qui passe en dessous de la veine d'essai. Côté onde de mesure, un filtre spatial, associé à la lentille f800mm permet d'éclairer la veine d'expériences en un faisceau de lumière parallèle. Une deuxième lentille f800mm associée à l'objectif f70mm forme une combinaison achromatique qui permet de fixer le grandissement du champ observé sur le capteur de la caméra. Côté référence, un deuxième filtre spatial et une lentille f120mm permettent d'obtenir un faisceau parallèle sur le miroir plan. Un dernier cube séparateur de faisceau recombine les faisceaux parallèles (référence et mesure) sur le capteur. Sur le bras de référence, un biprisme de Wollaston est

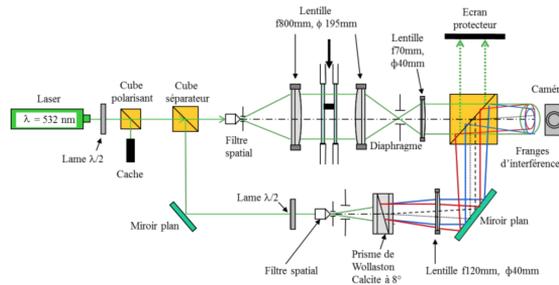


Figure 1: Montage d'interférométrie holographique numérique à double référence.

inséré entre le filtre spatial et l'objectif de 120 mm. Ce prisme va séparer l'onde de référence en deux ondes polarisées orthogonalement S et P (rouge et bleu sur les figures 1, 3 et 4). Ces deux ondes sont séparées par un angle de biréfringence qui dépend de l'angle de collage des prismes et du matériau du prisme (quartz ou calcite). Compte tenu de la distance focale de la lentille (120mm), l'angle de biréfringence du prisme peut être calculé pour obtenir sur le capteur une interfrange de l'ordre de dix pixels. Cela nécessite l'utilisation d'un prisme de Wollaston en calcite avec un angle de collage de 8°. Le prisme étant disponible, nous avons pu tester la configuration optique. La Figure 2 montre deux vues des côtés émission et réception.

## 3 Génération des franges d'interférences

La Figure 3 montre comment sont produites les franges d'interférence inclinées à gauche et à droite. Tout d'abord, l'onde de mesure (en vert sur les Figures 3 et 4) est polarisée verticalement. Il a donc deux composantes à 45° qui ont des polarisations S et P comme indiqué sur la Figure 3. Du côté de la référence, les deux ondes bleues et rouges sont séparées par une distance dx qui dépend de l'angle de



Figure 2: Photographies de la partie émission et le partie réception.

biréfringence du prisme de Wollaston. Le faisceau bleu a une polarisation  $P$  et le faisceau rouge une polarisation  $S$ . Sur l'axe horizontal, nous disposons de placer l'onde de mesure entre les deux ondes de référence à la distance  $dx/2$  et sur l'axe vertical, le faisceau de référence est placé à une distance égale à  $dx/2$ . Ainsi, on obtient pour les faisceaux polarisés  $P$  (bleu et vert), des franges d'interférence à  $+45^\circ$  et pour des faisceaux polarisés  $S$ , des franges d'interférence à  $-45^\circ$ . Ces deux motifs sont superposés sur le capteur et la fenêtre d'enregistrement est placée dans la partie commune des deux interférences. La Fig-

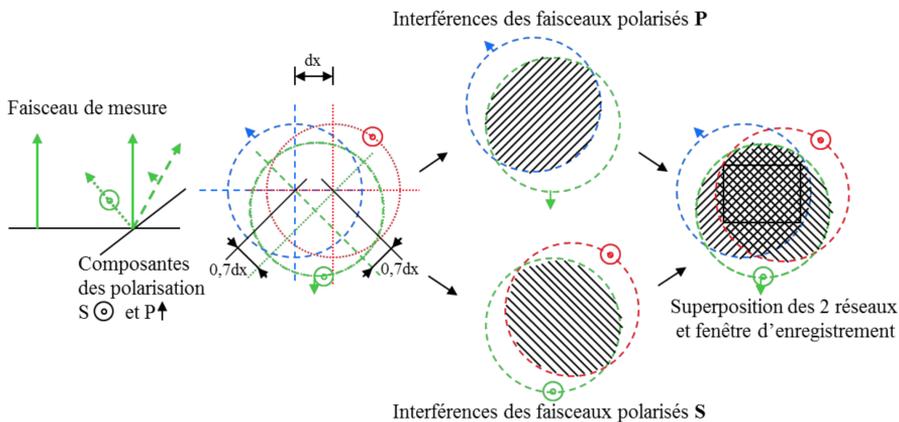


Figure 3: Génération des franges obliques et orthogonales.

ure 4 montre comment superposer des franges d'interférence verticales et horizontales. Premièrement, la polarisation de l'onde de mesure doit être tournée de  $45^\circ$  afin de générer les composantes horizontales et verticales  $S$  et  $P$  polarisées comme le montre le diagramme de la Fig. 4. Ceci est facilement réalisable avec une lame  $\lambda/2$  tournée à  $22,5^\circ$ . Ensuite, le biprisme de Wollaston doit être tourné de  $45^\circ$  de sorte que la polarisation des deux ondes de référence  $S$  et  $P$  soit décalée d'une distance  $dx$  le long d'une ligne diagonale (cercles bleus et rouges sur la Figure 4). Ainsi, on obtient un décalage vertical des ondes polarisées  $P$  (vert et bleu) qui va créer des franges d'interférence horizontales et un décalage horizontal des ondes polarisées  $S$  (vert et rouge) qui vont créer des franges d'interférences verticales. La superposition de ces deux motifs de franges va donc générer un damier sur le capteur d'enregistrement et l'objet à analyser sera placé au centre de ce damier. La Figure 4 montre également la fenêtre d'enregistrement.

## 4 Application de la technique à un cas concret d'écoulement

Un cas test a été choisi pour valider la technique d'interférométrie holographique numérique à double référence. La maquette testée est un cylindre circulaire placé transversalement dans la veine d'expériences de la soufflerie transsonique de Lille. Le nombre de Mach infini amont a été fixé à 0,73. La procédure d'enregistrement est la suivante:

- Réglage de l'interféromètre en teinte plate. Pour cela, faire coïncider les taches de focalisation des ondes de référence et de mesure dans le diaphragme de sortie (sans biprisme de Wollaston).
- Insérer le prisme de Wollaston dans le faisceau de référence entre la lentille (f120mm) et le filtre spatial. Ici, le test est réalisé en générant des franges inclinées à droite et à gauche.

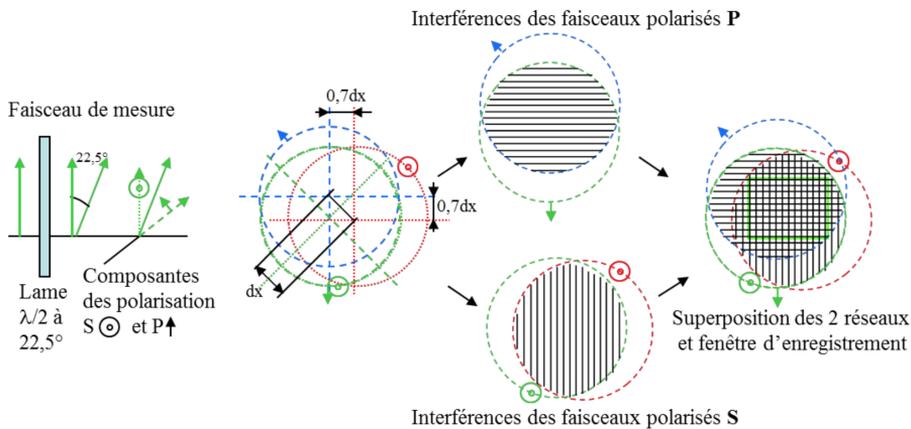


Figure 4: Génération des franges horizontales et verticales.

- Enregistrer sur le capteur CMOS les interférences de l'hologramme de référence en absence du phénomène à étudier (sans écoulement, figure 5a).
- Enregistrer sur le CCD les interférences de l'hologramme de mesure en présence du phénomène à étudier (Mach 0,73, figure 5b).

Sur la figure 5, on distingue très bien la superposition des deux réseaux de franges inclinées (sorte de damier) et la déformation du damier provoquée par la couche de cisaillement issue de l'intrados du cylindre. La procédure de traitement des interférogrammes de référence et de mesure est décrite

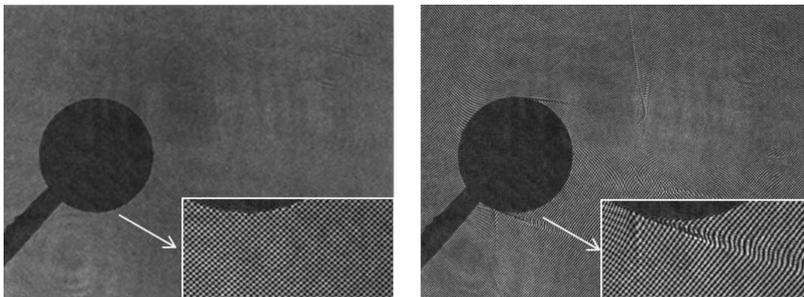


Figure 5: Interférogrammes de référence et de mesure enregistrés.

ci-dessous :

- Création d'un masque pour ne pas traiter la partie de l'image de la maquette.
- Calcul des spectres de Fourier des images de référence et mesure pour les deux états de polarisation.
- Filtrage spectral pour ne conserver que l'information intéressante (ordre +1).
- Calcul des cartes de phase et de différence de phase entre référence et mesure pour les deux états de polarisation.
- Calcul des cartes d'indice de réfraction et détermination des cartes de masse volumique.

La Figure 6 montre les spectres de Fourier de l'interférogramme de référence et de mesure de la Figure 5 ainsi que les fenêtres de filtrage qui ont été utilisées (bleue pour les images polarisées *S* et rouge pour celles polarisées *P*). Ensuite, on reconstruit les 2 cartes de phase de la référence et les 2 cartes de phase de la mesure pour en calculer les cartes de différences de phase non déroulées présentées sur la Figure 7a (polarisations *S* et *P*). On peut voir qu'il y a déjà des dislocations de phase qui ne pourront pas être résolues (entourées par des ellipses blanches). Ces dislocations n'apparaissent que dans la partie supérieure de l'image polarisée *S* et que dans la partie inférieure de l'image polarisée *P*.

La Figure 7b montre les cartes de différence de phase déroulées. Les endroits identifiés sur les

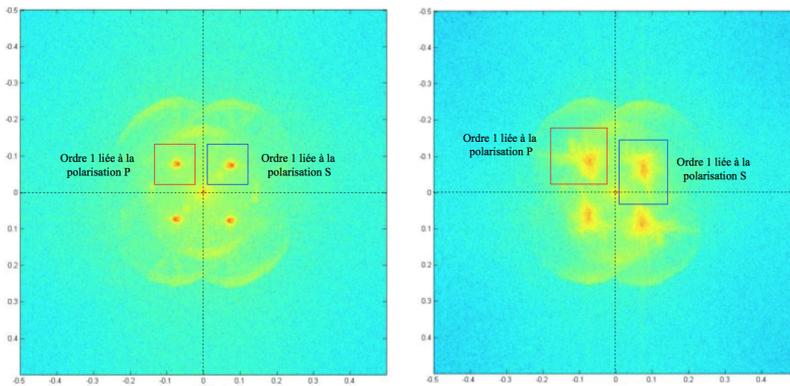


Figure 6: Spectres des interférogrammes de référence et de mesure.

cartes de différence de phase non déroulées provoquent des sauts de phase jusqu'aux parois haute et basse, mais ceux ne sont pas les mêmes sur les deux images. On va donc pouvoir dépouiller la partie haute en prenant l'interférogramme issu de la polarisant  $P$  et dépouiller la partie basse en prenant l'interférogramme fourni par la polarisation  $S$ .

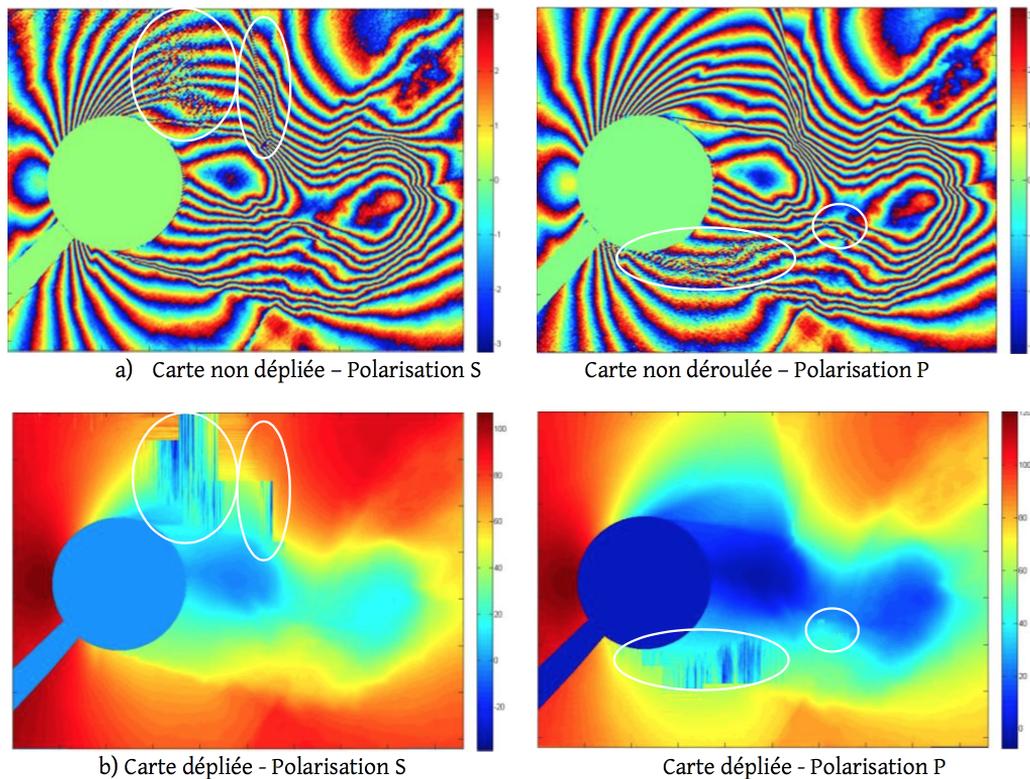


Figure 7: Mise en évidence des sauts de phase résiduels sur les deux dépouillements.

La fusion de ces cartes de phases donne une carte de phase sans erreur. La différence de phase traitée et représentée sur la Figure 8 est obtenue en prenant la partie inférieure de la carte de phase calculée avec l'image de polarisation  $S$  et la partie supérieure de la carte de phase calculée avec l'image de polarisation  $P$ . Entre les deux cartes de phase, dans les zones sans déphasage où la phase varie continuellement (par exemple au niveau du nez du cylindre), une différence de phase équivalente à une phase piston peut être déterminée en comparant, à un pixel donné, la phase de la carte de polarisation  $S$  et celle donnée par la carte de polarisation  $P$ . Ensuite, la correction de la phase du piston est appliquée

numériquement pour la zone sélectionnée ou pour la moitié de la carte. En conséquence, les ondes de choc, les zones de décollement et les couches de cisaillement sont très bien restaurées et la carte de phase ne montre plus de singularités de phase résiduelle. La Figure 8 montre le résultat probant de ce dépouillement mixte.

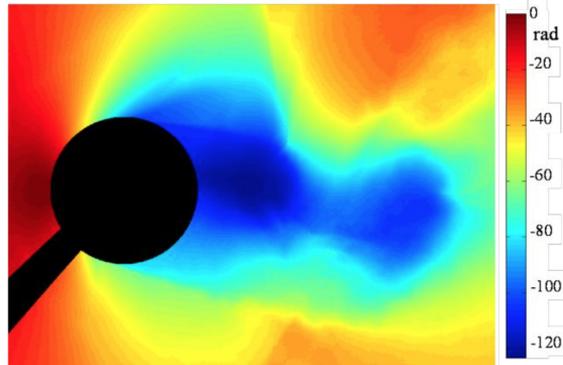


Figure 8: Dépouillement reconstitué à partir des polarisations  $S$  et  $P$ .

Du point de vue de la mécanique des fluides, une variation de phase  $\Delta\Phi$  d'environ 120 radians entre le point de stagnation (juste au niveau du nez du cylindre) et le centre du premier vortex en aval du cylindre peut être mesurée à partir des résultats expérimentaux. La densité de gaz sans dimension peut être calculée à partir de la différence de phase  $\Delta\Phi$  selon la relation suivante:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 - \left( \frac{\rho_s}{\rho_0} \frac{\lambda \Delta\Phi}{2\pi e K} \right) \quad (1)$$

où  $\rho_s$  est la densité de gaz standard calculée à 1 atmosphère et 0°C,  $\rho_0$  la densité du gaz de stagnation,  $\lambda$  la longueur d'onde de l'interféromètre,  $e$  la largeur de la section d'essai et  $K$  la constante de Gladstone-Dale ( $K = 296 \times 10^{-6}$ ). Il s'ensuit que la masse volumique de gaz dans le premier tourbillon présente une forte diminution jusqu'à 90% de  $\rho_0$ . Dans le second tourbillon, la masse volumique de gaz mesurée est proche de 80% de  $\rho_0$ . Un grand nombre d'interférogrammes a été analysé afin d'évaluer l'évolution axiale de la masse volumique du gaz au centre des tourbillons. Deux phases ont été identifiées derrière le cylindre de diamètre  $D$ . Pour  $0,5 < x/D < 1$ , les tourbillons sont en phase de formation ou d'agglomération car la masse volumique du gaz diminue au centre. Ensuite, lorsque  $x/D > 1$ , les tourbillons entrent dans une phase de dissipation car la masse volumique du gaz ré-augmente au centre. Il reste à comparer les résultats expérimentaux avec les résultats obtenus par les codes CFD (Computational Fluid Dynamic).

## 5 Conclusion

L'interférométrie holographique numérique à double référence utilisant le prisme de Wollaston est idéale pour analyser les fortes variations d'indice de réfraction rencontrées dans les écoulements transsoniques et supersoniques. La solution proposée est simple car il suffit simplement d'insérer dans le bras de référence un biprisme de Wollaston dont l'angle de collage et le matériau sont judicieusement choisis. L'orientation du prisme autour de son axe permet de générer deux réseaux de franges orthogonales et de faire tourner l'ensemble selon le type d'écoulement étudié. La transformation de Fourier du signal montre que les deux fréquences spatiales sont complètement séparées, ce qui permet de reconstruire deux cartes de phase indépendantes. La fusion des deux cartes permet de s'affranchir d'éventuels sauts de phase rencontrés lors du dépliement de phase.

## 6 Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour leur financement au travers de l'ANR : ANR-14- ASTR-0005.

## References

- [1] R.J. Adrian and J. Westerweel, Particle image velocimetry (Cambridge University Press, 2011).
- [2] J.M. Desse, Real-time colour holographic interferometry (from holographic plate to digital hologram) in *Advanced Holography-Metrology and Imaging*, ed. I. Naydenova, InTech, pp. 3-28 2011.
- [3] J.M. Desse, P. Picart and P. Tankam, Digital color holography applied to fluid and structural mechanics, *Opt. Lasers Eng.*, 50, 18-28 2012.