

Interférométrie holographie numérique pour les écoulements compressibles

J.M. DESSE^{a,b}, F. OLCHEWSKY^{a,b}

a. ONERA, The French Aerospace Lab et LMFL,

b. Laboratoire de Mécanique des Fluides de Lille, Kampé de Fériet, CNRS FRE 2017,
5, rue des Fortifications, CS 90013, 59045 LILLE Cedex

...

Résumé :

Les auteurs présentent le développement d'une méthode optique basée sur l'interférométrie holographique numérique pour l'analyse des écoulements compressibles instationnaires. Basé sur un montage de type Mach-Zehnder, l'auteur présente les difficultés rencontrées pour déplier la phase optique lorsque les gradients d'indice de réfraction sont très élevés. Il propose d'insérer un prisme de Wollaston dans le bras de référence pour résoudre les problèmes de discontinuités rencontrés à la traversée des ondes de choc.

Abstract :

The authors present the development of optical method based on digital holographic interferometry for analyzing unsteady compressible flows. Based on Mach-Zehnder interferometer, the author presents difficulties encountered to unwrap the optical phase when the refractive index gradients are very strong. It is proposed to add a Wollaston prism in the reference arm to solve the problems of discontinuities encountered at the crossing of shock waves.

Mots clefs : Holographie numérique ; Prisme de Wollaston ; Ecoulement instationnaire compressible

1 Introduction

Depuis plus d'une décennie, le département DAAA/ELV développe l'holographie numérique pour étudier les écoulements compressibles instationnaires. En effet, l'holographie ou l'interférométrie holographique a l'avantage d'être une méthode optique quantitative à l'inverse des méthodes optiques basées sur l'ombroscopie ou la strioscopie [1] qui sont plutôt des méthodes qualitatives. Toutes ces méthodes présentent aussi l'avantage des méthodes optiques globales, c'est-à-dire des techniques qui visualisent le champ complet de l'écoulement.

Au travers des différents écoulements étudiés qui vont du régime subsonique au régime transsonique, la méthode optique qui était basée à l'origine sur un interféromètre de type Michelson [2,3] a évolué vers un interféromètre de type Mach-Zehnder car les problèmes liés à l'augmentation de la

compressibilité de l'écoulement ne permettait plus d'utiliser un interféromètre de type Michelson et des solutions ont été apportées au traitement numérique pour résoudre les problèmes de sauts de phase liées aux ondes de choc présentes dans l'écoulement. Enfin, si des problèmes de discontinuités subsistent, il est proposé d'insérer dans le bras de référence un prisme de Wollaston pour générer simultanément deux réseaux de franges d'interférence.

Le cas test choisi traite de l'écoulement instationnaire en aval et autour d'un cylindre placé transversalement dans la veine d'expérience pour un nombre de Mach voisin de 0.75.

2 Interféromètre de type Mach-Zehnder

Le montage optique, basé sur un interféromètre de type Michelson, permet facilement d'introduire des fréquences porteuses spatiales qui sont analysées avec et sans écoulement. Les spectres de Fourier obtenus sur chacune des voies peuvent être filtrés aisément car les fréquences spatiales sont bien identifiées et non parasitées lorsque qu'un capteur 3CCD est utilisé. La reconstruction des cartes de différence de phase permet d'obtenir des cartes d'indice de réfraction de très bonne qualité. Enfin, la relation de Gladstone-Dale donne accès à l'évolution dans le temps du champ de la masse volumique. Les avantages d'un système de type Michelson résident dans le fait que le banc est très facile à mettre en œuvre et à régler. Il est à double traversée de la veine d'expériences, ce qui augmente d'un facteur 2 la sensibilité de la mesure. Par contre, lorsqu'on veut étudier des écoulements variant très rapidement et à forts gradients d'indice, trois problèmes importants apparaissent, tous trois liés à la nature des phénomènes à résoudre :

- le premier est lié à la résolution spatiale du capteur,
- le second est lié à résolution temporelle de la source lumineuse,
- le troisième est provoqué par l'effet d'ombroscopie généré par les forts gradients d'indice

Un exemple est montré sur la figure 1 lors de l'analyse de l'écoulement instationnaire autour du cylindre en régime transsonique.

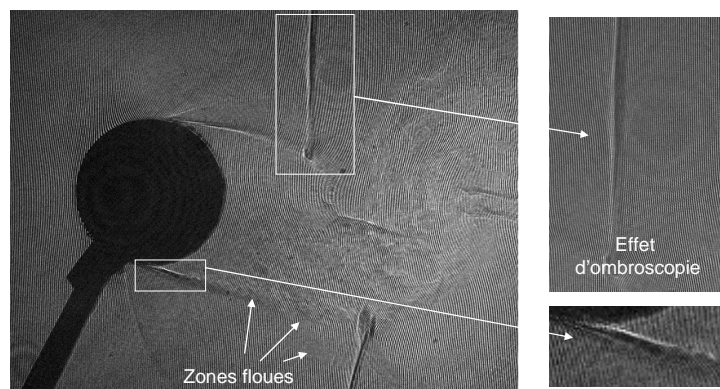


Figure 1 : Mise en évidence des zones floues et de l'effet d'ombroscopie - Mach 0,67

Les solutions adoptées sont les suivantes :

- enregistrement de l'information par un capteur à très haute résolution spatiale (1920x1440 pixels de 3,65 μm^2).
- résolution temporelle accrue en changeant de source lumineuse : mise en place d'un laser pulsé (9ns) ayant une longueur de cohérence adaptée (supérieure à 2m). Le temps de pose qui, auparavant, été fixé par la cellule acousto-optique (300ns), est réduit fortement, ce qui permet de figer le réseau de franges dans les structures tourbillonnaires.
- Réduction de la défocalisation pour diminuer l'effet d'ombroscopie.

Dans un montage de type Mach-Zehnder, le faisceau de mesure ne traverse qu'une seule fois la veine d'expériences et le faisceau de référence passe à l'extérieur de la veine. La sensibilité par rapport au montage Michelson est donc divisée par 2. Le montage optique est présenté sur la figure 2.

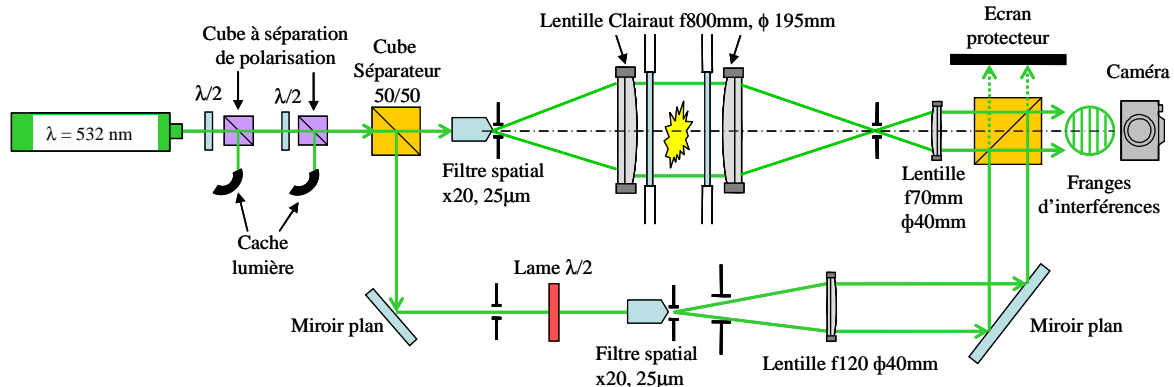


Figure 2 : Montage Mach-Zehnder d'interférométrie holographique numérique à laser pulsé

Un cube séparateur 50/50 est inséré juste en aval des deux cubes à séparation de polarisation pour former le faisceau de référence et le faisceau de mesure. Dans notre soufflerie, le faisceau de référence passe en dessous de la veine d'expériences comme on peut le voir sur les photographies de la figure 2. Cette fois, la veine d'expériences est encadrée par deux lentilles achromatiques de 800 mm de distance focale. C'est la distance focale de la seconde lentille qui fixe la sensibilité de la mesure. Ensuite, un second cube séparateur recombine l'onde de mesure et l'onde de référence sur le capteur de la caméra. La figure 3 la carte de phase modulo 2π et la carte de différence de phase déroulée de l'écoulement autour du cylindre à Mach 0,73. En particulier, on voit que les deux ondes de choc verticales émises à l'intrados et l'extrados sont correctement dépouillées.

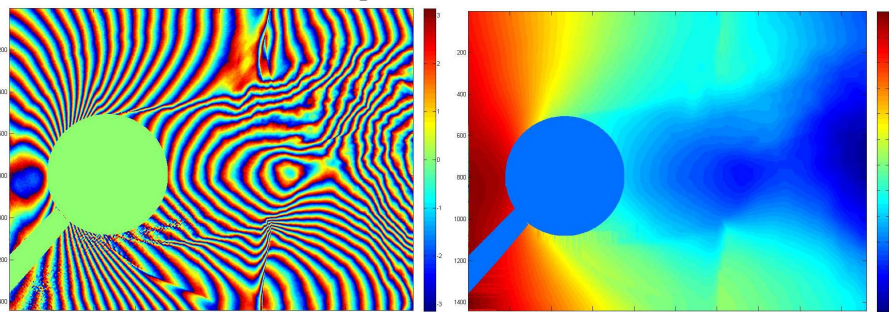


Figure 3 : Dépouillement d'un interférogramme - Mach 0,73

Lorsque les franges d'interférences sont parallèles à l'une onde de choc, le dépliement des cartes de phase devient compliqué et des discontinuités résiduelles subsistent. Pour éviter cela, nous avons conçu un système qui permet d'insérer un prisme de Wollaston dans le bras de référence et de générer simultanément deux réseaux de franges dans le champ de visualisation (voir la figure 4). Ce prisme a la particularité de générer simultanément deux ondes de référence polarisées orthogonalement. Les interférogrammes enregistrés contiennent simultanément deux diagrammes d'interférence croisés et perpendiculaires, ce qui donne 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 2 cartes de phase montrée sur la figure 5 donne une carte de phase unique dans laquelle les singularités de phase sont éliminées. Le sillage instationnaire autour du cylindre circulaire à Mach 0,75 est aussi comme cas test et il valide l'interféromètre développé.

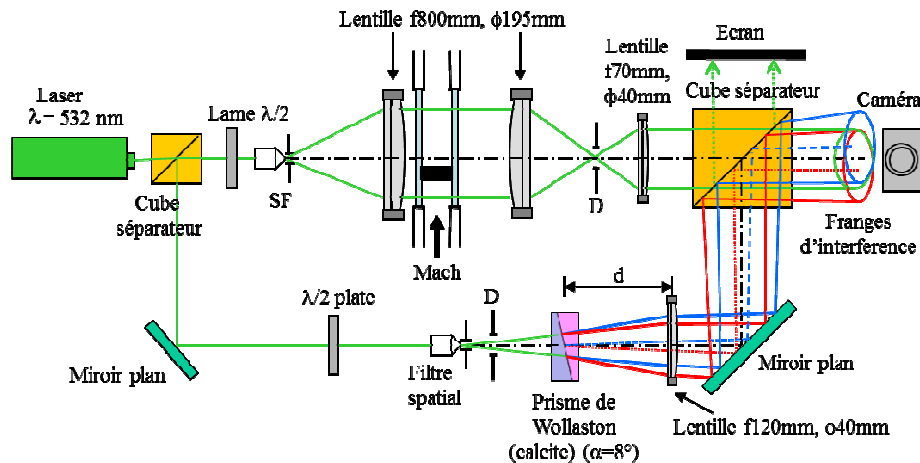


Figure 4 : Montage d'interférométrie holographique numérique à double référence

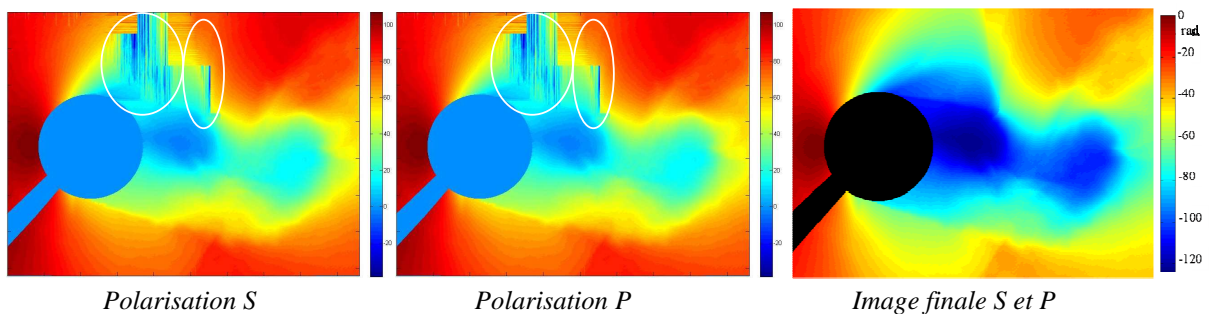


Figure 5 : Sauts de phase résiduels constatés sur les deux images dépouillées S et P et à image finale reconstituée à partir des polarisations S et P

3 Conclusion

On montre que les écoulements à fortes variations d'indice de réfraction peuvent être analysés à l'aide d'un interféromètre de type Mach-Zehnder et un laser pulsé comme source lumineuse. Si des discontinuités résiduelles subsistent, un interféromètre holographique numérique à double référence utilisant le prisme de Wollaston peut être mis en œuvre pour analyser les fortes variations d'indice de réfraction rencontrées dans les écoulements transsoniques et supersoniques. 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 fusion des deux cartes permet de s'affranchir d'éventuels sauts de phase rencontrés lors du dépliement de phase.

Références

- [1] J.M. Desse, R. Deron, Shadow, Schlieren and color interferometry, Aerospace Lab, Issue 1, (2009) AL01, 1-9.
- [2] J.M. Desse, P. Picart, Subsonic wake flow analysis by digital 3λ holographic interferometry, 26th congress ICAS, Brisbane, Australia, 2012.
- [3] J.M. Desse, Color holographic interferometry (from holographic plates to digital holography, 15th Inter. Symposium on Flow Visualization, Minsk, Belarus, 2012.