

# Algorithme de dépliement de phase guidé par un facteur de qualité en holographie numérique pour l'étude des écoulements complexes

Z. Essaïdi<sup>a</sup>, F. Olchewsky<sup>a</sup>, F. Leopold<sup>b</sup>, F. Jagusinski<sup>b</sup>, D. Klatt<sup>b</sup>, P. Picart<sup>c</sup>  
et J-M Desse<sup>a</sup>

a ONERA, Département Aérodynamique-Aéroélasticité-Acoustique, Unité Expérimentation et Limite de Vol, 5 Boulevard Paul Painlevé, BP 21261, 59014 Lille Cedex – France

b ISL, French-German Research Institute of Saint-Louis, 5 rue du Général Cassagnou – BP 70034, 68301 Saint-Louis Cedex - France

c LAUM - Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine,  
Rue Aristote, 72085 Le Mans Cedex 9  
email: zacaria.essaidi@onera.fr

## Résumé :

*L'holographie numérique est une technique optique d'imagerie permettant d'enregistrer simultanément l'amplitude et la phase d'une onde diffractée par un objet. Ce procédé non intrusif est particulièrement attractif pour des applications de tomographie d'écoulements en mécanique des fluides. La phase mesurée peut être directement associée à la masse volumique du milieu via la relation de Gladstone-Dale. Toutefois, pour pouvoir être exploitée, une opération fondamentale et non triviale de dépliement de la phase est requise. Dans ce contexte, un banc d'holographie numérique basé sur un interféromètre de Mach - Zehnder hors axe, a été développé et exploité pour l'analyse d'un écoulement supersonique à Mach 2 autour d'une pointe (spike) axisymétrique en incidence de 6° par rapport à l'axe aérodynamique. Différentes lignes de visée sont réalisées en tournant le spike autour de l'axe aérodynamique à intervalle régulier et une série d'interférogrammes enregistrée pour chaque position. La phase déduite des interférogrammes est dépliée à l'aide d'un algorithme de dépliement local qui suit un chemin non continu défini par un facteur de qualité proposé par Herraez et al. [2] permettant de ce fait de contourner les zones problématiques. Les résultats obtenus dans le cas du spike sont prometteurs.*

## Abstract :

*Digital holography is an optical imaging technique enabling a simultaneous recording of the amplitude and the phase of a wave diffracted by an object. This non-intrusive process is particularly attractive for flow tomography applications in fluid mechanics. The measured phase can be directly related to the density of the medium through the Gladstone-Dale relation. However, in order to be exploited, a fundamental and non-trivial operation of phase unwrapping is required. In this context, a numerical holography bank based on an off-axis Mach-Zehnder interferometer has been developed*

and used for the analysis of Mach 2 supersonic flow around an axisymmetric spike with a  $6^\circ$  incidence with respect to the aerodynamic axis. Different viewpoints are achieved by rotating the spike around the aerodynamic axis with a regular interval angle and a set of interferograms recorded for each angle. The deduced phase from the interferograms is unwrapped by means of a local phase unwrapping algorithm which follows a non-continuous path defined by a quality factor proposed by Herraes et al. [2] thereby circumventing problematic areas. The results obtained in the case of the spike are promising.

**Mots clefs : Déplie ment de phase, Holographie numérique, Fort gradient d'indice.**

## 1 Introduction

L'holographie numérique est une technique d'imagerie adaptée à l'étude des milieux transparents et aux écoulements complexes. Elle permet d'enregistrer simultanément l'amplitude et la phase d'une onde diffractée par un objet sans perturber le milieu. Cette technique présente un caractère particulièrement pertinent pour la tomographie d'écoulements puisqu'elle permet de remonter à la distribution bidimensionnelle, voire tridimensionnelle de la masse volumique.

Comme pour d'autres techniques d'imagerie impliquant des mesures de phase (imagerie par résonance magnétique, imagerie radar à synthèse d'ouverture interférométrique...), les valeurs de la phase déduites sont contenues dans l'intervalle  $]-\pi, +\pi]$ . Le déplie ment de ces phases constitue un point fondamental auquel il faut faire face pour pouvoir être exploité. C'est une opération non triviale et le signal mesuré est souvent entaché de bruit ce qui peut être critique dans le cas de milieux à forts gradients d'indice. Le champ de recherche associé a donné lieu à divers travaux et au développement de plusieurs approches de déplie ment de phase plus ou moins efficaces.

Dans ce papier, un interféromètre de Mach Zehnder hors axe déployé autour de la soufflerie à rafale S20 de l'Institut Saint-Louis (ISL) pour analyser un écoulement supersonique à Mach 2 autour d'un spike axisymétrique en dérapage est présenté. Le spike est en incidence de  $6^\circ$  et effectue un mouvement de rotation autour de l'axe du vent à intervalle régulier pour constituer différentes lignes de visée. Pour chaque position, une série d'interférogrammes est enregistrée avant et pendant l'écoulement. La phase calculée est déplie e à l'aide de l'algorithme de déplie ment local proposé par Herraes et al. [2] qui suit un chemin non continu défini par un facteur de fiabilité, et qui permet d'isoler et de contourner les zones de choc, souvent problématiques. Cette méthode a été éprouvée et a montré son efficacité sur d'autres types d'écoulements compressibles, avec notamment l'exemple d'un jet d'air sous détendu à différents rapports de pression.

## 1 Matériel et Méthodes

### 1.1 Montage optique

Le montage expérimental est un interféromètre de Mach - Zehnder hors axe (figure 1). Un laser impulsif Nd:YAG doublé en fréquence émettant des impulsions de 5 ns, dans le vert, à la longueur d'onde de 532nm et à une cadence de 10Hz est utilisé comme de source. Les interférogrammes sont acquis à la même cadence au moyen d'une caméra CMOS (Hamamatsu Orca Flash 2.8), disposant d'une matrice de 1440x1920 pixels carrés de 3.65  $\mu\text{m}$  de côté.

Le faisceau généré par la source est atténué et divisé en deux, un faisceau de mesure qui traverse l'écoulement et un de référence qui le contourne l'écoulement. Ces faisceaux sont tout d'abord épurés à l'aide d'un filtre spatial constitué d'un objectif de microscope et d'un trou d'Young. Le faisceau de référence est élargi à l'aide d'une lentille de 120 mm de focale puis renvoyé vers la caméra à l'aide d'un cube séparateur. Pour le bras de mesure, deux lentilles de 800 mm de focale et de diamètre  $\varnothing = 195$  mm sont placées de part et d'autre de la veine d'expérience. La première lentille placée après l'épurateur permet de travailler en faisceau parallèle et d'étudier un champ large. La seconde lentille, dont le foyer objet coïncide avec l'emplacement du spike, formant un système afocal avec une troisième lentille de 120 mm de focale permet de recollimer le faisceau et de former l'image de l'objet sur la caméra. Celui-ci interfère alors avec le faisceau de référence.

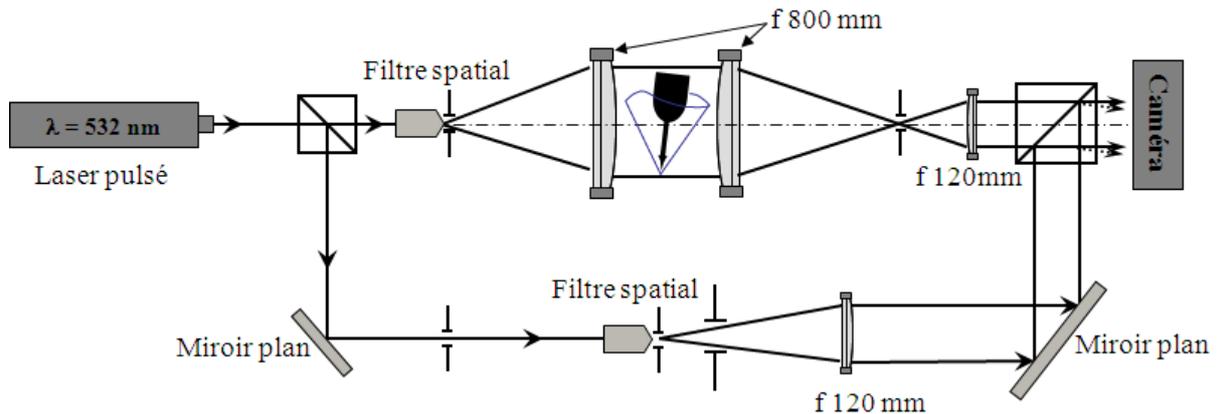


Figure 1 : Schéma expérimental du montage d'holographie numérique hors axe mis en œuvre

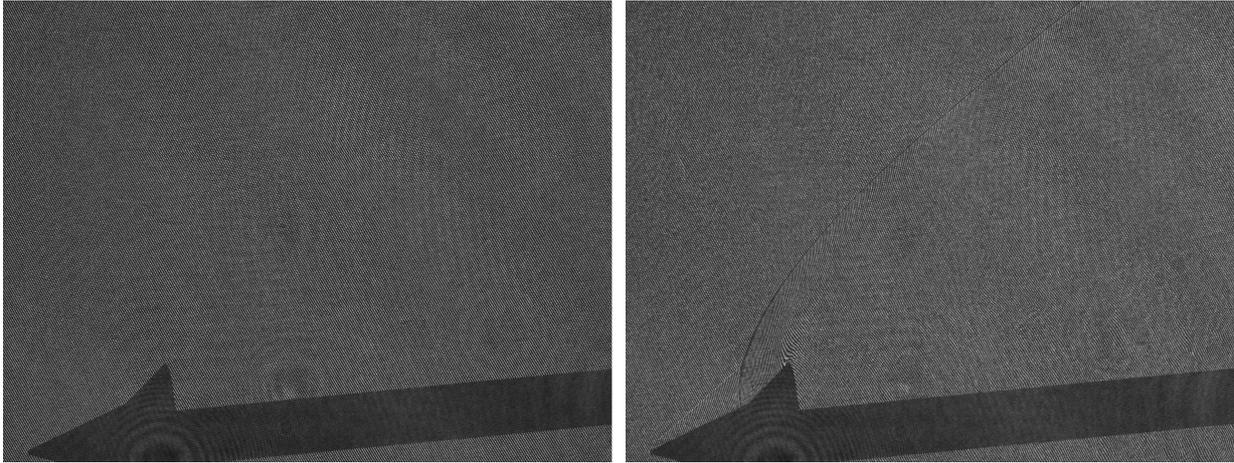
## 1.2 Écoulement et spike

Le spike étudié est présenté sur la figure 1. Il est de forme axisymétrique et placé dans une soufflerie à rafale en présence d'un écoulement supersonique à Mach 2. Le spike est incliné de  $6^\circ$  par rapport à l'axe aérodynamique et effectue une rotation de  $90^\circ$  par pas de  $5^\circ$ . Pour chaque position, une séquence d'une centaine d'images avec et sans écoulement est acquise à une cadence de 10 Hz.

## 2 Résultats et discussions

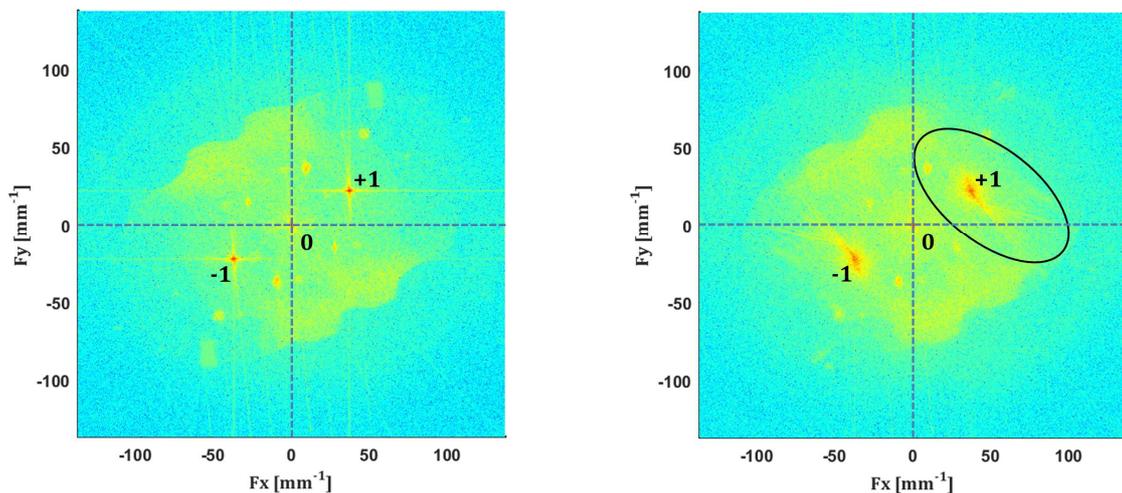
### 2.1 Acquisition et traitement des interférogrammes

Les interférogrammes sont acquis de manière continue sur 10 s - 11 s. L'enregistrement débute sans écoulement sur quelques images, pour constituer une mesure de référence, puis l'écoulement est lancé pour atteindre rapidement Mach 2. Les deux situations sont illustrées sur la figure 2 : Un interférogramme sans écoulement, avec des franges d'interférences bien rectilignes, et un interférogramme avec un écoulement supersonique où les franges d'interférences sont altérées par les variations de masse volumique au sein de l'écoulement.

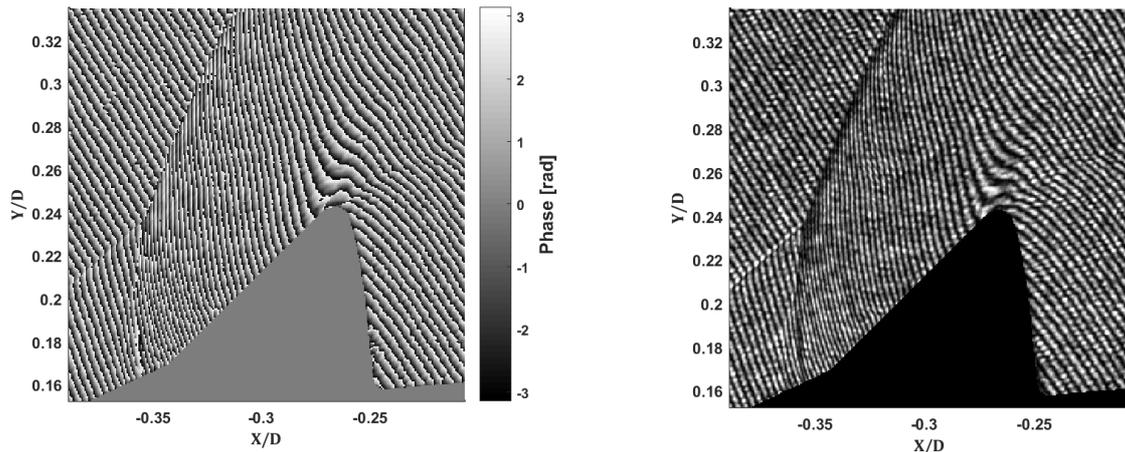


**Figure 2:** Spike axisymétrique en incidence de  $6^\circ$  par rapport à l'axe aérodynamique et en rotation de  $35^\circ$ . Interférogrammes du spike sans écoulement (à gauche) et avec écoulement supersonique (à droite).

Les spectres de Fourier bidimensionnels pour la référence et pour l'écoulement supersonique sont fournis sur la figure 3. On distingue les trois ordres de diffraction +1, 0 et -1. Ces derniers sont localisés en l'absence d'écoulement, mais s'étalent spectralement en sa présence. Une sélection adéquate des fréquences associées à l'ordre +1 permet de remonter par transformée de Fourier inverse à la cartographie des distributions de phase modulo  $2\pi$ . Les fréquences porteuses spatiales sont conservées pour comparer la distribution des phases obtenues à l'interférogramme correspondant et valider la sélection spectrale (figure 4). La différence de la phase avec écoulement et celle sans écoulement, permet de remonter à la contribution réelle de l'écoulement supersonique et de supprimer la porteuse sans approximation numérique.



**Figure 3:** Spectres de Fourier bidimensionnels en l'absence d'écoulement (à gauche) et en présence d'un écoulement supersonique (à droite).



**Figure 4:** Comparaison de la distribution de phase déduite de la sélection spectrale Fourier 2D (à gauche) pour un écoulement supersonique et de l'interférogramme associé (à droite).

## 2.2 Opération de dépliement

Une optimisation du banc expérimental assure la minimisation des effets d'ombroscopie et du bruit, et par conséquent la qualité des interférogrammes. Toutefois, le bruit subsistant sur les interférogrammes ainsi que les changements de contraste dus à la fluctuation d'intensité du laser peuvent rendre difficile le dépliement de phase. En présence d'un écoulement supersonique, la difficulté du dépliement s'accroît avec la présence de forts gradients d'indice de réfraction résultant de la présence d'ondes de choc qui sont localisées et de zones de flou. La littérature fournit un éventail d'algorithmes de dépliement [2] avec leurs avantages et inconvénients, mais aucune n'a été éprouvée pour le cas des écoulements complexes. Pour cette étude, l'algorithme de dépliement local proposé par Herraes et al. [3] est utilisé. Il présente l'avantage de suivre un chemin non continu lors du dépliement. Pour chaque pixel d'indices  $(i, j)$  et de valeur de phase  $\varphi(i, j)$ , un facteur de fiabilité  $R$  est défini relativement à ses voisins

$(i-1, j-1)$	$(i, j-1)$	$(i+1, j-1)$
$(i-1, j)$	$(i, j)$	$(i+1, j)$
$(i-1, j+1)$	$(i, j+1)$	$(i+1, j+1)$

$$R(i, j) = \frac{1}{D(i, j)}$$

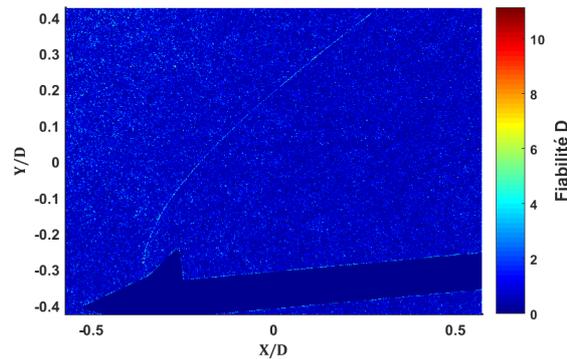
où  $D$  est une double différence (différence de différences) définie par :

$$D(i, j) = \left[ H^2(i, j) + V^2(i, j) + D_1^2(i, j) + D_2^2(i, j) \right]^{1/2},$$

où

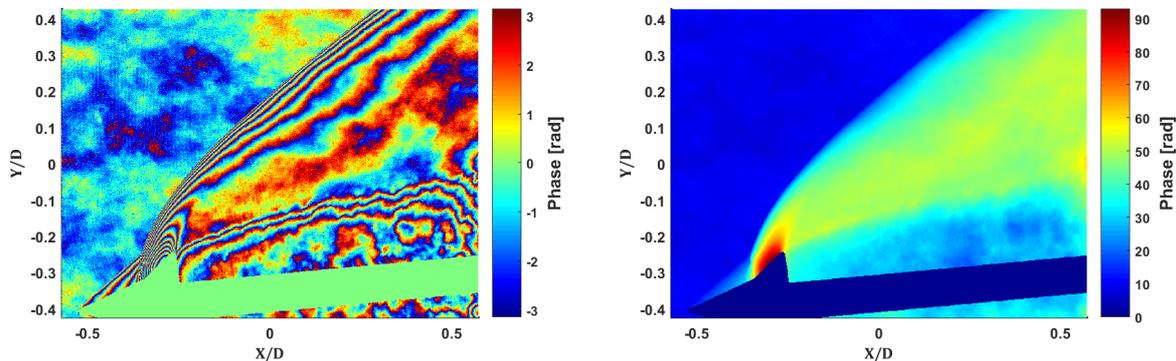
$$\begin{aligned}
 H(i, j) &= \gamma[\varphi(i-1, j) - \varphi(i, j)] - \gamma[\varphi(i, j) - \varphi(i+1, j)] \\
 V(i, j) &= \gamma[\varphi(i, j-1) - \varphi(i, j)] - \gamma[\varphi(i, j) - \varphi(i, j+1)] \\
 D_1(i, j) &= \gamma[\varphi(i-1, j-1) - \varphi(i, j)] - \gamma[\varphi(i, j) - \varphi(i+1, j+1)] \\
 D_2(i, j) &= \gamma[\varphi(i-1, j+1) - \varphi(i, j)] - \gamma[\varphi(i, j) - \varphi(i+1, j-1)]
 \end{aligned}$$

et où  $\gamma[\cdot]$  est un opérateur de dépliement qui enlève tous les sauts de  $2\pi$  entre 2 pixels consécutifs. Le facteur  $D$  pour le cas de l'écoulement supersonique est fourni sur la figure 5. Les pixels présentant de faibles valeurs de  $D$  (zones bleues) sont dépliés en priorité, et les pixels présentant des valeurs élevées de  $D$  (zones rouges) dépliés en dernier. On distingue l'onde de choc générée par l'obstacle où les sauts de phase induits aux forts gradients d'indice de réfraction se produisent.



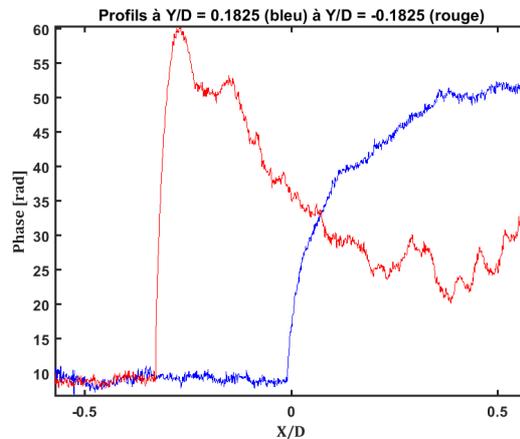
**Figure 5:** Cartographie des priorités de dépliement de phase pour le spike en incidence. En bleu les zones dépliées en premier et en rouge, les zones dépliées en dernier

La distribution de phase non dépliée et le résultat du dépliement obtenu par cette méthode sont présentés sur la figure 6. En suivant un chemin guidé par un facteur de qualité lors de l'opération de dépliement, il est possible de contourner et de confiner les zones difficiles. La phase dépliée peut ainsi directement être liée à la masse volumique du milieu via la relation de Gladstone-Dale. Les données acquises pour les différentes positions angulaires permettent la reconstruction tridimensionnelle du champ de masse volumique du milieu par résolution du problème inverse.



**Figure 6:** Distributions de phase pour un écoulement supersonique autour d'un spike incliné, non déplié (à gauche) et déplié (à droite).

Deux exemples de profils horizontaux de la phase dépliée pour l'écoulement supersonique à  $Y/D = 0,1825$  à  $Y/D = -0,1825$  sont présentés sur la figure 7. Les sauts de phase sont plus prononcés au niveau du spike et diminuent à mesure qu'on s'en éloigne.



**Figure 7:** Profils horizontaux de l'écoulement supersonique à  $Y/D = 0,1825$  (en bleu) à  $Y/D = -0,1825$  (en rouge)

### 3 Conclusion

Dans le cadre de l'holographie numérique appliquée à l'étude des écoulements complexes, le dépliement des phases représente une étape majeure. Les algorithmes de dépliement de phase guidés par un facteur de qualité et suivant des chemins non continus [2] constituent des outils prometteurs pour le dépliement des distributions de phases associées à ce type de milieux. Le dépouillement des cartographies de phases dans le cas d'un écoulement supersonique à Mach 2 autour d'un spike est démontré.

### Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale pour la Recherche qui a contribué au financement de cette étude par l'intermédiaire du contrat n° ANR-14-ASTR-005-01.

### Références

- [1] J.M. Desse, F. Olchewsky, Digital Mach-Zehnder holographic interferometer using pulsed laser for analyzing large flow fields, Digital Holography, Heidelberg, OSA congress, Germany, July 2016.
- [2] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms and Software. New York: Wiley-Interscience, 1998.
- [3] M. A. Herraéz, D. R. Burton, M. J. Lalor and M. A. Gdeisat, Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path, Applied Optics, Vol. 41, No. 35, (2002)