

# Holographie dynamique : vers l'Interferométrie Holographique

Gatel C.<sup>1\*</sup>, Masseboeuf A.<sup>1</sup>, Houdellier F.<sup>1</sup> et Snoeck E.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>CEMES – CNRS & Université Paul Sabatier, Toulouse

\* gatel@cemes.fr;

## 1. INTRODUCTION

L'holographie électronique est une méthode reconnue pour sa capacité à reconstruire l'intégralité de l'onde électronique issue d'un objet. La phase de celle-ci est notamment l'intérêt principal de cette technique car elle contient une information relative au champ électromagnétique traversé par l'onde à travers l'effet Aharonov-Bohm [1] mais également une information purement géométrique qui peut être utilisée pour remonter au champ de contrainte [2]. Dans sa configuration *off-axis* (par opposition à la configuration *in-line*) l'holographie électronique requiert de nombreuses conditions expérimentales favorables (champ de vue limité, zone de référence à proximité, connaissance des distorsions du système optique) pour obtenir une information quantitative. De plus, le traitement numérique des hologrammes induit une latence temporelle difficilement compatible avec les méthodes *in-situ* (application d'un champ magnétique, électrique, d'un courant, d'une déformation...).

Cette contribution propose de remettre au goût du jour les premières expériences de l'holographie électronique où il était nécessaire de pouvoir obtenir une information d'amplitude suffisante lors de la reconstruction de l'hologramme sur un banc optique. Cette technique, dénommée *double-exposition* pour la microscopie électronique, fut d'abord développée pour la microscopie photonique dans les années 60 [3] comme l'interférométrie holographique (voir Fig 1). La principale différence entre les 2 techniques est que l'information de phase est ici directement affichée dans l'image d'amplitude par production de Moirés, sans besoin de traitement supplémentaire. Ces Moirés sont le fruit d'une superposition de deux hologrammes de fréquence identique mais dont l'information qui y est codée (donc la phase) diffère. Cette holographie par double exposition n'est qu'une première étape dans l'interférométrie holographique (l'image obtenue n'est donc plus un hologramme mais un interférogramme) et tend naturellement vers l'étude des processus dynamiques (notamment pour les méthode de caractérisation non destructive dans l'industrie). Les deux principales techniques employées actuellement avec les lasers sont l'interférométrie holographique *en temps réel* et l'interférométrie holographique *moyennée dans le temps*. C'est cette dernière technique que nous avons développé dans un microscope électronique et que nous proposons d'expliquer dans cette contribution.

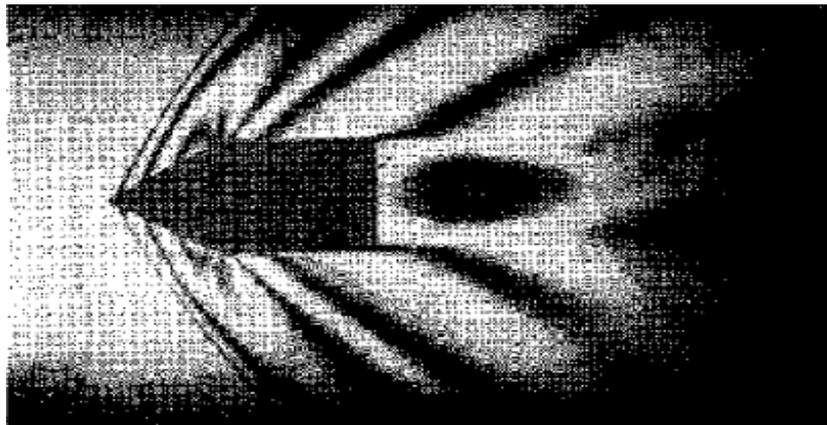


Figure 1. Interférogramme d'une balle calibre 22 se déplaçant à Mach 1,7 dans un environnement d'Argon. Les bandes noires montrent la différence d'indice optique du gaz déformé par le mouvement de la balle. Image tirée de [3]

## 2. RESULTATS

### Expérience

L'expérience présentée dans cette contribution se base sur un système modèle correspondant à une tête d'écriture de disque de dur. Nous avons récemment pu connecter un tel dispositif à l'intérieur d'un microscope et ainsi caractériser le champ magnétique produit (flux, élargissement, portée, dispersion angulaire) par holographie électronique en réponse à l'excitation par divers courants continus [4]. Néanmoins un tel système est encore dans ce cas loin d'être dans des conditions réelles de fonctionnement notamment par sa fréquence de travail qui se situe au niveau du GHz. C'est en essayant de se rapprocher de ce régime que nous avons pu mettre en évidence l'intérêt de l'interférométrie holographique pour l'étude d'un tel système [5].

### Résultats

La Fig 2 présente une image (gauche) de phase traditionnelle qui donne à voir les lignes de flux de l'induction magnétique. Cette image est issue d'un processus de traitement d'image impliquant le traitement de 2 hologrammes et leur ré-alignement pour soustraction de ceux-ci. L'autre image est une image obtenue « directement » sur la caméra CCD (un traitement de Fourier simple permet de mieux observer les Moirés obtenus sur l'interférogramme. Chaque ligne noire de l'interférogramme est une quantification directe du flux magnétique en nombre de quantum ( $\Phi_0 = 2 h/e$ )

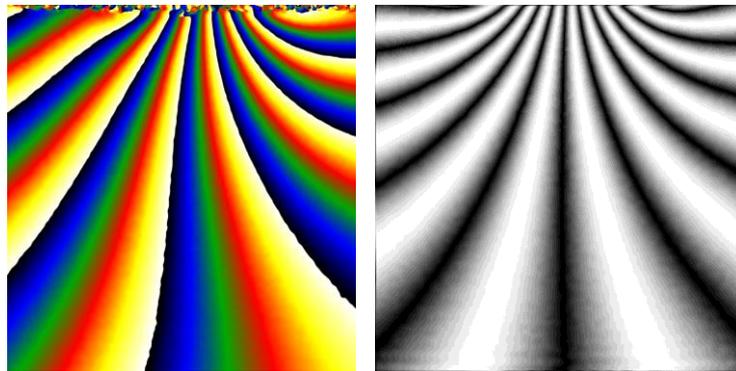


Figure 2. Image de gauche : image de phase obtenue par traitement d'un hologramme pris à proximité d'une tête d'écriture de disque dur dans laquelle est injectée 60 mA. Les sauts (de  $2\pi$ ) sont dus à la reconstruction mathématique de la phase. Image de droite : interférogramme obtenu sur le même système en faisant varier l'intensité dans la tête d'écriture entre + et - 60 mA à une fréquence de 1KHz

## 3. CONCLUSION

Le couplage de l'holographie électronique et des méthodes in situ a rendu possible une nouvelle forme d'interférométrie dans un microscope électronique. L'apport dynamique associé à la suppression des distorsions du système optique de l'holographie électronique traditionnelle font de l'interférométrie holographique un outil de choix pour le futur de la microscopie in-situ quantifiée en termes d'épaisseur, de champ électrique ou magnétique, voire de déformation.1.

## REFERENCES

- [1] Tonomura A. *Rev. Mod. Phys.* **59**, 639–669 (1987)
- [2] Hytch, M. et al. *Nature* **453**, 1086–1089 (2008)
- [3] Heflinger, L. O. et al. *Journal of Applied Physics* **37**, 642–649 (1966)
- [4] Einsle, J. F. et al. *Nano Res.* 1–9 (2014)
- [4] Gatel, C. et al. *In Preparation*