



30 Novembre 2022 & 1er Décembre 2022

**Recueil des résumés
scientifiques des participants**

Sommaire

[Sommaire](#)

[Approche matricielle multispectrale pour la microscopie](#)

[La microscopie holographique digitale: des premiers pas aux applications commerciales](#)

[Reconstruction d'image régularisée non supervisée en microscopie tomographique diffractive](#)

[Imagerie acousto-optique par transformée de Fourier](#)

[Présentation de Quantel Medical et sa gamme de produits \(poster\)](#)

[Interférométrie à 4 ondes en microscopie Applications en biologie et nanophotonique](#)

[Microscopie holographique à 3 illuminations pour la reconstruction 3D de globules rouges mouvement](#)

[Détection cohérente en milieux multidiffusants par mélange d'ondes dans une valve optique à cristaux liquides \(poster\)](#)

[Estimation et prise en compte des aberrations optiques par problème inverse en microscopie holographique en ligne](#)

[Holographie in-line appliquée à l'analyse de l'étirement d'un filament viscoélastique. Restitution optimale par analyse de la phase.](#)

[Décorrélation et anti-corrélation par la défocalisation en interférométrie holographique numérique](#)

[Étude statistique de l'évaporation de gouttelettes dans un écoulement turbulent](#)

[Suivi de bactéries par holographie numérique](#)

[Off axis digital holography with low spatially and temporally coherent illumination as an alternative for single shot FFOCT](#)

[Passive elastography using noise correlation and off-axis digital holography](#)

[Auto-étalonnage des aberrations chromatiques pour la reconstruction multispectrale d'échantillons biologiques](#)

[Imagerie du champ acoustique à vues multiples par holographie trichromatique](#)

[Reconstruction d'images multimodales à partir des données de microscopie tomographique diffractive](#)

[Microscopie à Contraste de Phase Différentiel par Microscopie Tomographique Diffractive Polarisée](#)

[Suivi par holographie en ligne d'une bulle soumise à un champ ultrasonore](#)

[Contributions des effets de bord et de surface, des processus de réfraction et des résonances internes à la formation des hologrammes de Gabor de particules à symétrie sphérique.](#)

[Étude du sillage d'un culot cylindrique en régime hypersonique par holographie interférométrique numérique.](#)

[Imagerie holographique pour l'ophtalmologie](#)

[Logiciels d'imagerie holographique à haut débit : holovibes et holowaves](#)

[Analyse détaillée de plaquettes sanguines en microscopie par holographie numérique : vers un outil diagnostique](#)

[Interférométrie holographique multi-vues pour la reconstruction tridimensionnelle des instabilités d'un jet supersonique sous-détendu](#)

[Imagerie de phase quantitative avec un diffuseur fin : principe et applications.](#)



6ème rencontre francophone d'holographie numérique
30 novembre – 1er décembre 2022. Paris, France

[Nouveautés en microscopie interférométrique : spectroscopie locale, microsphères et chambres environnementales](#)

[Imagerie holographique en régime non linéaire pour l'étude de nanostructures résonantes](#)

[Contrôle en ligne du procédé de fusion de lit de poudre par holographie numérique à deux longueurs d'onde](#)

[Mesure de viscosité par analyse de la rotation de nanobâtonnets par holographie hétérodyne](#)

[Mesure simultanée d'un champ acoustique et d'un écoulement aérodynamique dans un conduit par holographie numérique](#)

Approche matricielle multispectrale pour la microscopie

Paul Balondrade

Institut Langevin, UMR 7587, 1 rue Jussieu, 75005 Paris France

paul.balondrade.pro@gmail.com

V. Barolle, N. Guigui, C. Boccara, M. Fink, A. Aubry

Institut Langevin, UMR 7587, 1 rue Jussieu, 75005 Paris France

Le microscope matriciel constitue un changement de paradigme radical en imagerie optique. Issu des travaux menés à l'Institut Langevin, ce microscope non-invasif est capable de fournir une image de réflectivité 3D in-vivo ou in-vitro d'une grande variété de tissus avec des performances inégalées en termes de résolution, champ de vision et profondeur de pénétration. L'originalité réside dans la mesure et le traitement numérique intelligent d'une grande quantité de données (matrice de réflexion multi-spectrale) fournissant une tomographie d'un ensemble de nouveaux bio-marqueurs quantitatifs (e.g indice optique / dynamique) inédits pour les spécialistes.

Le microscope est basé sur une illumination de l'échantillon par une multitude d'ondes planes d'incidence différente sur toute une gamme de longueurs d'onde. L'ensemble de ces illuminations, stockées dans la matrice de réflexion multi-spectrale, permet par un premier traitement de refocalisation numérique par optimisation, d'obtenir une image confocale 3D de l'échantillon. A la suite de ce premier traitement, une quantification locale des aberrations résiduelles est possible par la méthode présentée dans l'article d'A. Badon [1]. Cette seconde étape permet de corriger les aberrations sur l'ensemble du champ de vision, c'est-à-dire pour différentes aires d'isoplanétisme, contrairement à l'optique adaptative standard. Finalement, un ensemble de « biomarqueurs » quantitatifs peuvent être extrait de la matrice de réflexion, comme l'indice optique local.

Références

[1] A. Badon et al. "Distortion matrix concept for deep optical imaging in scattering media" Sci. Adv. (2020)

La microscopie holographique digitale: des premiers pas aux applications commerciales

Yves Emery, Etienne Cuche, Tristan Colomb
Innovation Park of EPFL, Lausanne, Switzerland
yves.emery@lynceetec.com, etienne.cuche@lynceetec.com,
tristan.colomb@lynceetec.com

Depuis les premiers articles démontrant la mesure simultanée d'amplitude et de phase à partir de l'acquisition d'un seul hologramme, en configuration hors axe [1,2], les applications de la microscopie holographique digitale utilisant des systèmes commerciaux se sont multipliées ces vingt dernières années [3].

Cette présentation décrira les plus marquantes et représentatives d'entre elles à la fois dans le domaine des micro et nanotechnologies et des sciences de la vie.

Dans le domaine des micro et nanotechnologies, les spécifications atteintes en termes de précision, de vitesse, de champ de vue, de gamme de hauteur seront illustrées par des exemples concrets dans le domaine des microsystèmes, des surface intelligentes, du contrôle qualité, de la micro optique, et du contrôle en temps réel de la fabrication de micro composants.

Dans le domaine des sciences de la vie, le développement des mesures de phase quantitative non-invasive et leur interprétation en termes de phénomène physiopathologique sera présenté. L'importance des mesures rapides, à long terme, en corrélation avec de la fluorescence, ou des mesures électrophysiologiques, sur site unique ou multiple (high content screening) sera présentée.

Références

- [1] Cuche E et al 1999 Opt. Lett. 24 291–3
- [2] Cuche E et al 1999 Appl. Opt. 38 6994
- [3] Yves Emery et al 2021 J. Phys. Photonics 3 034016

Reconstruction d'image régularisée non supervisée en microscopie tomographique diffractive

Laurence Denneulin¹, **Fabien Momey**¹, Dylan Brault¹, Matthieu Debailleul², Asemare Mengistie Taddese², Nicolas Verrier², Olivier Haeberlé²

¹Université de Lyon, UJM-Saint-Étienne, CNRS, Institut d'Optique Graduate School, Laboratoire Hubert Curien UMR 5516, F-42023, Saint-Étienne, France

²Institut de Recherche en Informatique, Automatique, Automatique et Signal IRIMAS – EA7499, Université de Haute-Alsace (UHA), 61 rue Albert Camus F-68093 Mulhouse Cedex, France

fabien.momey@univ-st-etienne.fr

Ce travail présente une approche inverse régularisée non supervisée pour la reconstruction de la carte 3D d'indice de réfraction d'un échantillon en microscopie tomographique diffractive (MTD), récemment publiée dans le Journal of the Optical Society of America A (JOSAA) [1]. La technique MTD permet l'imagerie d'échantillons transparents en 3D sans requérir de marquage. La MTD apporte une information morphologique complémentaire aux phénomènes métaboliques observés via les techniques de nanoscopie fluorescente (STED, PALM/STORM). Bien que moins résolue et moins spécifique que ces dernières, la MTD permet tout de même d'imager un champ de vue plus étendu à haute résolution (2 fois la limite de diffraction). Notre méthode de reconstruction se base sur la minimisation de l'estimateur généralisé non biaisé du risque de Stein – GSURE pour Generalized Stein's Unbiased Risk Estimator – afin d'estimer automatiquement des valeurs optimales des hyperparamètres de régularisation (parcimonie, préservation de bords, Variation Totale). Nous avons évalué cette méthode sur des reconstructions 3D à partir de données simulées et expérimentales, en utilisant différents modèles de formation d'image (approximation de Rytov à l'ordre 1, modèle de propagation de proche en proche – Beam Propagation Method), et en les comparant avec des méthodes de reconstruction usuelles (inversion de Rytov, algorithme de Gerchberg-Papoulis). Nos résultats montrent qu'un réglage approprié du poids des régularisations dans la résolution du problème de reconstruction permet d'exploiter au mieux l'information disponible dans les données, ce qui peut s'avérer particulièrement critique si cette dernière est limitée (nombre d'angles de vues, couverture angulaire limitée). Disposer d'une méthode de réglage non supervisée de ces hyperparamètres constitue alors un avantage certain, et dans ce contexte nous montrons que le critère GSURE est un bon candidat.

Références

[1] L. Denneulin, F. Momey, D. Brault, M. Debailleul, A. M. Taddese, N. Verrier, and O. Haeberlé, "GSURE criterion for unsupervised regularized reconstruction in tomographic diffractive microscopy," J. Opt. Soc. Am. A 39, A52-A61 (2022)

Imagerie acousto-optique par transformée de Fourier

François Figliolia
francois.figliolia@espci.fr

Maïmouna Bocoum, François Ramaz
maimouna.bocoum@espci.fr, francois.ramaz@espci.fr

L'imagerie acousto-optique (AO) tend à produire des images de contraste optique, en profondeur, dans des milieux diffusants [1]. Cette technique de couplage d'ondes ultrasonores (US) à de la lumière infrarouge (IR) permet de recouvrir une résolution spatiale millimétrique intrinsèque aux ultrasons, en dépit des événements de diffusion multiple de la lumière dans le milieu.

Le principe de la technique est simple : un photon dont la trajectoire traverse une zone insonifiée subit un décalage spectral par effet acousto-optique [2], lequel peut être sélectivement détecté par holographie numérique [3].

Le profil spatio-temporel des ondes US employées détermine nombre de performances du système d'imagerie AO. Différentes approches ont ainsi été envisagées et développées : l'imagerie directe par ondes focalisées, par impulsions longues à dérive de fréquence ou sauts de phases aléatoires ; l'imagerie indirecte par ondes planes [4].

Récemment, la pertinence d'une technique d'imagerie indirecte, l'imagerie AO par transformée de Fourier, a été mise en exergue [5, 6]. Nous présentons ainsi cette méthode, qui exploite une structuration spatio-temporelle d'impulsions US de longues durées, afin d'aboutir au marquage acoustique des composantes de Fourier de l'image AO à déterminer. Les photons marqués spectralement sont alors détectés par holographie numérique [7] et l'image AO reconstruite à partir de ses projections dans l'espace réciproque, le tout en un temps compatible avec une imagerie temps réel ($\sim s$).

Si le montage que nous présentons est certes pleinement compatible avec les contraintes inhérentes à l'imagerie in-vivo, il subsiste néanmoins certaines complications, pour partie liées aux effets de diffraction des ondes acoustiques ; nous les détaillons et proposons des perspectives d'amélioration de la résolution de l'imagerie.

Références

- [1] S. G. Resink, et al., Journal of biomedical optics, vol. 17 (2012).
- [2] P. Debye and P. W. Sear, PNAS 18(6):409–414 (1932).
- [3] S. Farahi, et al., Opt. Lett, 37(13) :2754–2756, (2012).
- [4] J. B. Laudereau et al., J. Biophotonics, 8, 429 (2015).
- [5] M. Bocoum et al., Optics Letters, 45(17) 4855–4858, (2020).
- [6] L. Dutheil et al., Applied Optics, 60(24) 7107–7112, (2021).
- [7] K. Barjean et al., Opt. Lett, 40, 705 (2015).

Présentation de Quantel Medical et sa gamme de produits (poster)

Yohan Blazy, Caroline Venet

Quantel Medical 1 rue du bois joli – CS 40015, 63808 Cournon-d'Auvergne
yblazy@quantelmedical.fr, cvenet@quantelmedical.fr

Lumibird Medical est la division médicale du groupe LUMIBIRD créé en octobre 2017 par la fusion du groupe KEOPSYs spécialisé dans les technologies de lasers à fibre et le groupe QUANTEL, spécialisé dans les technologies de lasers à solide, diodes laser et équipements médicaux. Lumibird Medical dispose de 3 marques spécialisées dans les équipements de diagnostic et de traitement pour l'ophtalmologie et autres domaines médicaux : Quantel Medical, Ellex et Optotek Medical.

Créée en 1993, Quantel Medical est une filiale du groupe français Lumibird. Ses activités sont le développement, la fabrication et la commercialisation de solutions innovantes en lasers et échographes médicaux. Présent et reconnu depuis plus de 15 ans dans le domaine de l'ophtalmologie, Quantel Medical s'ouvre en 2018 à de nouveaux marchés en proposant une gamme d'imagerie interventionnelle répondant idéalement, entre autres, aux besoins d'imagerie en médecine générale, musculo-squelettique, médecine d'urgence et anesthésie/réanimation. En juillet 2020, Quantel Medical fait l'acquisition d'Ellex, société Australienne implantée au Japon et aux Etats-Unis, bénéficiant également d'une renommée et forte expérience sur le marché ophtalmique international.

Quantel Medical et Ellex deviennent ensemble le leader mondial en ophtalmologie, présents dans plus de 110 pays en direct ou via un réseau de distributeurs.

Leur gamme de lasers et échographes permettent de diagnostiquer et de traiter les 4 principales causes de cécité : la cataracte, le glaucome, la rétinopathie diabétique et la dégénérescence maculaire. Les deux entités proposent également une gamme d'appareils pour le diagnostic et le traitement de la sécheresse oculaire.

Interférométrie à 4 ondes en microscopie Applications en biologie et nanophotonique

Guillaume Baffou

Institut Fresnel, CNRS, Aix-Marseille Université, Centrale Marseille, Marseille
guillaume.baffou@fresnel.fr

L'interférométrie à décalage quadrilatéral (QLSI) est une technique d'imagerie de front d'onde particulièrement simple et puissante. Elle est basée sur l'association d'un réseau de diffraction 2D et d'une caméra séparés par une distance millimétrique [1,2]. Adaptée sur un microscope optique, la QLSI permet d'imager et de caractériser des nano- et micro-objets à haute résolution spatiale (limitée par la diffraction) et haute sensibilité (0.1 nm en différence de marche).

Dans cette contribution, nous présenterons les résultats récents obtenus à l'institut Fresnel en microscopie QLSI concernant la mesure de masse sèche de cellules en culture (neurones [3] et bactéries [4]) et la caractérisation d'objets nanophotoniques, tels que des nanoparticules [5], matériaux 2D [6] et métasurfaces [7].

Références

- [1] Primot, J. & Guérineau, N. (2000). Extended Hartmann test based on the pseudoguiding property of a Hartmann mask completed by a phase chessboard. *Appl. Opt.*, 39, 5715.
- [2] Baffou G. (2021). Quantitative phase microscopy using quadriwave lateral shearing interferometry (QLSI): principle, terminology, algorithm and grating shadow description. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 54, 294002.
- [3] Durdevic, L., Resano Gines, A., Roueff, A., Blivet, G., Baffou, G. (2022). Biomass measurements of single neurites in vitro using optical wavefront microscopy, *Biomed. Opt. Exp.*, accepted.
- [4] Molinaro, C., Bénéfice, M., Gorlas, A., Da Cunha, V., Robert, H. M. L., Catchpole, R., Gallais, L., Forterre, P., Baffou, G. (2022). Life at high temperature observed in vitro upon laser heating of gold nanoparticles. *Nature Communications* 13, 5342 (2022)
- [5] Khadir, S., Andrén, D., Chaumet, P. C., Monneret, S., Bonod, N., Käll, M., Sentenac, A., Baffou, G. (2020). Full optical characterization of single nanoparticles using quantitative phase imaging. *Optica* 7, 243
- [6] Khadir, S., Bon, P., Vignaud, D., Galopin, E., McEvoy, N., McCloskey, D., Monneret, S., Baffou, G. (2017) Optical imaging and characterization of graphene and other 2D materials using quantitative phase microscopy. *ACS Photonics* 4, 3130
- [7] Khadir, S., Andrén, D., Verre, R., Song, Q., Monneret, S., Genevet, P., Käll, M. Baffou, G. (2021) Metasurface optical characterization using quadriwave lateral shearing interferometry. *ACS Photonics* 8, 603

Microscopie holographique à 3 illuminations pour la reconstruction 3D de globules rouges mouvement

Alexey Brodoline, Daniel Alexandre, Michel Gross
Laboratoire Charles Coulomb (L2C) UMR 5221 CNRS-Université Montpellier Place
Eugène Bataillon 34000 Montpellier
alexey.brodoline@gmail.com, daniel.Alexandre@umontpellier.fr,
gross.lkb1@gmail.com

La microscopie holographique permet de reconstruire en 3D le champ diffusé un objet en faisant l'hypothèse que la propagation se fait dans un milieu d'indice optique homogène. Si l'objet est ponctuel, le champ est un cône dont l'apex coïncide avec la position de l'objet et dont l'ouverture angulaire correspond à l'ouverture numérique de l'objectif qui collecte le champ.

Nous cherchons à étudier la manière dont se construit le réseau sanguin embryonnaire, en prenant le poisson zèbre (*danio rerio*) comme embryon-modèle. Nous cherchons donc à reconstruire le mouvement de globules circulant in vivo dans un embryon de poisson zèbre. Deux problèmes se posent ici à nous : 1) la chair du poisson dont l'indice optique varie diffuse et distord le champ, 2) de par leur dimension (8-10 micromètres) et leur indice optique (de 5 à 10 % supérieur à l'indice du milieu) les globules rouges (GRs) diffusent la lumière vers l'avant suivant un cône très fermé, ce qui rend difficile la localisation des apex et des GRs.

Pour localiser les GRs et analyser leur mouvement en 3D, nous avons enregistré des séquences d'hologrammes, et nous les avons combinés avec des coefficients à somme nulle. Nous avons pu ainsi séparer le champ diffusé par la chair du poisson, qui ne change pas ou peu, du champ diffusé par les GRs, qui varie rapidement. Pour localiser les GRs, nous avons utilisé une microscopie holographique hors axe à 3 illuminations de manière à obtenir 3 hologrammes distincts (1 hologramme par illumination). La reconstruction conduit alors pour chaque GR à 3 cônes de lumière diffusé ayant des directions différentes mais des apex qui coïncident puisqu'ils correspondent à la position du GR.

Nous décrivons la procédure expérimentale et ses développements récents qui nous ont permis d'obtenir de manière fiable et avec de bons contrastes les 3 hologrammes nécessaires. Nous décrivons également la méthode de reconstruction par compressive sensing et orthogonal matching pursuit. Nous présenterons enfin quelques résultats.

Références

- [1] Brodoline, Alexey, et al. "4D compressive sensing holographic microscopy imaging of small moving objects." *Optics Letters* 44.11 (2019): 2827-2830
- [2] Brodoline, Alexey, et al. "4D compressive sensing holographic imaging of small moving objects with multiple illuminations." *Applied optics* 58.34 (2019): G127-G134.

Détection cohérente en milieux multidiffusants par mélange d'ondes dans une valve optique à cristaux liquides (poster)

Stefania Residori, Umberto Bortolozzo
HOASYS, 120 route des Macarons, 06560 Valbonne, France
stefania.residori@hoasys.fr, umberto.bortolozzo@hoasys.fr

François Ramaz, Jean-Pierre Huignard
Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, 1 rue Jussieu 75005 Paris, France
francois.ramaz@espci.fr, jean-pierre.huignard@espci.fr

La détection cohérente de la phase optique requiert l'utilisation d'un système de type interféromètre, ce qui implique la nécessité de superposer les fronts d'ondes du signal avec la référence. Quand, à cause de leur passage dans des milieux multidiffusants, les faisceaux qui interfèrent ne sont pas spatialement uniformes, la tâche peut s'avérer très difficile à réaliser à cause du caractère granulaire (« speckles ») des fronts d'ondes complexes et de l'évolution spatio-temporelle du motif d'interférence dans les applications liées aux communications ou à l'imagerie biophotonique. Une possible solution à ce problème est d'utiliser, à la place de la lame séparatrice, un milieu non-linéaire pour combiner les faisceaux. Les valves optiques à cristaux liquides (LCLV, de l'anglais « liquid crystal light valves ») sont des modulateurs spatiaux de lumière qui associent un substrat photo-réfractif à un cristal liquide [1]. Ces dispositifs peuvent être utilisés pour réaliser des expériences de mélange à deux ondes, avec une référence continue (intensité typique de quelques mW/cm² dans le vert) et un signal de speckles d'intensité très faible. Grâce à ces propriétés non-linéaires intrinsèques, la valve optique ajuste sa réponse de manière à suivre dynamiquement les changements spatio-temporels à basse fréquence des faisceaux qui interfèrent, tant en phase qu'en intensité.

Dans des nouvelles conditions de fonctionnement nous avons récemment montré que notre LCLV à la longueur d'onde de 532 nm montre un temps de réponse inférieur au ms [2]. Cette réponse devient compatible avec le temps de décorrélation du speckle, qui est aussi dans le range de ms. Basé sur ces propriétés, nous avons réalisé un système de détection cohérente pour un signal qui se propage à travers des milieux diffusants. Dans le dispositif expérimental, le signal est modulé par un miroir piézoélectrique et transmis à travers des échantillons de mousse de différente épaisseur. Ensuite, le signal interfère avec la référence, onde plane, dans la LCLV. Quand une modulation de phase est imposée sur le signal, celle-ci est transformée en modulation d'intensité après l'interaction avec la référence dans la valve optique et est facilement détectée en mesurant l'intensité sur l'onde plane auto-diffractée avec un simple détecteur (photodiode, par exemple). Les résultats montrent un bon rapport signal à bruit pour des épaisseurs de mousse typiques de 1 à 3 centimètres [3].

Références

- [1] Residori, S ; Bortolozzo, U ; Huignard, J. P. (2018). Optically addressed liquid crystal spatial light modulators, *Liquid Crystals Review*, 6, 1-16
- [2] Bortolozzo, U ; Residori, S ; Huignard, J. P. (2021). kHz-speed optically induced phase gratings with liquid crystal light valves in transient dynamic mode, *Opt. Lett.*, 46, 4731
- [3] Residori, S ; Bortolozzo, U ; Ramaz, F ; Huignard, J. P. (2022). Optical coherent detection through scattering media by two-wave mixing in liquid crystal light valves, *PR'22, Photorefractive Photonics and Beyond, conference*.

Estimation et prise en compte des aberrations optiques par problème inverse en microscopie holographique en ligne

Thomas Olivier (1,*), Dylan Brault (1), Ferréol Soulez (2),
Sachin Joshi (1), Nicolas Faure (3), Corinne Fournier (1)

(1) Univ. Lyon, Université Jean Monnet-Saint-Etienne, CNRS, Institut of Optics Graduate School, Laboratoire Hubert Curien UMR 5516, F-42023, Saint-Etienne, France

(2) Univ. de Lyon, Université Lyon1, ENS de Lyon, CNRS, Centre de Recherche Astrophysique de Lyon, UMR 5574, F-69230 Saint-Genis-Laval, France

(3) bioMérieux, Centre Christophe Mérieux, F-38024 Grenoble, France

(*) thomas.olivier@univ-st-etienne.fr

L'holographie numérique en configuration « en ligne » présente l'avantage d'un montage simple sans faisceau de référence. Toutefois, des reconstructions ou « refocalisations » numériques sont alors nécessaires, utilisant un modèle de diffraction adapté. Grâce à l'utilisation d'un objectif de fort grossissement, il est alors possible de caractériser précisément la position 3D, la taille et le déphasage induit par des objets micrométriques, comme des suspensions colloïdales, des agrégats [1] ou des bactéries [2]. À notre connaissance, en holographie en ligne, le système d'imagerie était toujours supposé parfait, jusqu'à ce que, très récemment, les aberrations sphériques induites par l'objectif de microscope aient été estimées avec un modèle simplifié pour réduire les biais importants dus à la présence des aberrations [3]. Dans ce contexte et avec une approche problèmes inverses paramétrique [4], nous proposons une méthodologie d'estimation plus complète des aberrations géométriques variables dans le champ en utilisant un modèle de Lorenz-Mie qui intègre des aberrations décrites par les polynômes de Zernike. Cette méthodologie ne nécessite a minima qu'un seul hologramme de billes de calibration et permet alors de débiaiser les reconstructions. Enfin, cette calibration permet de corriger un modèle plus général (Rayleigh-Sommerfeld) pour améliorer les reconstructions problème inverse régularisées (non limitées aux objets sphériques) pour gagner en quantitatativité.

Références

- [1] Wang, C., Zhong, X., Ruffner, D., Stutt, A., Philips, L., Ward, M., and Grier, D. (2016). Holographic characterization of protein aggregates. *J. of pharmaceutical sciences* 105(3), 1074-1085.
- [2] Wang, A., Garmann, R. F., Manoharan, V. N. (2016). Tracking E. coli runs and tumbles with scattering solutions and digital holographic microscopy. *Opt. Express*, 24(21), 3719-23725.
- [3] Martin, C., Leahy, B., Manoharan V. N., (2021). Improving holographic particle characterization by modeling spherical aberration. *Opt. Express*, 29(12), 18212-18223.
- [4] Brault, D., Olivier, T., Soulez, F., Joshi, S., Faure, N., Corinne Fournier, C. (2022). Accurate unsupervised estimation of aberrations in digital holographic microscopy for improved quantitative reconstruction, *Opt. Express*, 30, 38383-38404.

Holographie in-line appliquée à l'analyse de l'étirement d'un filament viscoélastique. Restitution optimale par analyse de la phase.

Robin Noury, Marie-Charlotte Renoult, Gilles Godard, Denis Lebrun
UMR 6614 CORIA, Université et INSA de Rouen, 76821 Saint-Etienne du Rouvray, France
robin.noury@coria.fr, denis.lebrun@coria.fr

De nombreux fluides, comme ceux de l'industrie agro-alimentaire ou pharmaceutique, sont viscoélastiques. La viscoélasticité est due à la présence de polymères dont la masse molaire est élevée en solution dans ces fluides. Pour certaines concentrations en polymères, lorsque l'on étire ces fluides, on observe l'apparition de gouttelettes en mouvement sur le filament [1]. L'holographie numérique in-line est appliquée ici pour étudier la dynamique du filament et des gouttelettes en 3-D. Il faut préciser que le milieu dans lequel évoluent ces objets est faiblement perturbé (pas de gradients d'indice). L'onde de référence peut donc ici être considérée comme sphérique. Dans ces conditions, il est possible d'extraire des informations quantitatives sur la phase restituée permettant ainsi de réaliser une mise au point précise sur les images de gouttelettes ou du filament. [2] Nous présentons le dispositif expérimental et montrons quelques exemples d'images restituées par la signature de phase.

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le fluide viscoélastique est placé dans un dispositif mécanique d'étirement fabriqué au laboratoire. C'est un système constitué d'un support mobile qui étire le fluide et dont les paramètres d'étirage sont parfaitement contrôlés. Afin de pouvoir accéder à des informations sur la vitesse [3], nous éclairons le fluide en étirement par une séquence de deux impulsions lasers (aux longueurs d'onde et . Les hologrammes sont enregistrés par un capteur CCD d'une résolution de de taille .

TRAITEMENT DES HOLOGRAMMES

Les hologrammes sont exploités par convolution avec le noyau de Fresnel et les images sont localisées par analyse de l'amplitude complexe restituée . Lorsque l'on s'approche du plan de mise au point d'un élément du fluide de coordonnées transversales , les variations de phase déroulée selon l'axe optique présentent une allure asymptotique en qui permet d'extraire avec précision la coordonnée axiale. La méthode ainsi que les résultats issus d'hologrammes simulés et expérimentaux sont présentés et montrent les avantages de cette technique pour une localisation 3-D précise de particules de fluides micrométriques.

Références

- [1] – Bhat, P., Appathurai, S., Harris, M. et al. (2010). Formation of beads-on-a-string structures during break-up of viscoelastic filaments. *Nature Phys*, 6, 625–631
- [2] – Weidong Yang, Alexander B. Kostinski, and Raymond A. Shaw. (2006). Phase signature for particle detection with digital in-line holography. *Opt. Lett.*, 31, 1399–1401.
- [3] – S. Grare, D. Allano, S. Coëtmellec, G. Perret, F. Corbin, M. Brunel, G. Gréhan, D. Lebrun. (2016). Dual wavelength digital holography for 3D Particle Image Velocimetry: experimental validation. *Appl Opt.*, 55, A49–A53.

Décorrélation et anti-corrélation par la défocalisation en interférométrie holographique numérique

Erwan METEYER, Charles PEZERAT, Pascal PICART

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans, CNRS 6613, Institut d'Acoustique – Graduate School (IA-GS), Le Mans Université, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France
erwan.meteyer@univ-lemans.fr, charles.pezerat@univ-lemans.fr, pascal.picart@univ-lemans.fr

L'interférométrie holographique numérique est une méthode de mesure sans contact et non-intrusive pouvant être appliquée à l'étude d'une large diversité de phénomènes physiques. La méthode est basée sur l'enregistrement et la reconstruction holographique qui est capable d'encoder et de restaurer le front d'onde complexe diffracté de n'importe quelle scène à 3 dimensions. L'interférométrie holographique repose sur la comparaison des phases optiques extraites de deux hologrammes reconstruits à différents instants. La donnée importante est la phase Doppler calculée par la soustraction des deux phases. Un large éventail d'applications est fourni dans la littérature comme par exemple des mesures à échelle microscopique, des mesures de rugosité de surface, des mesures de topographie, des études de déformation de structures ou encore l'analyse de phénomènes transitoires à haute résolution spatiale et temporelle.

Le champ objet est encodé par un champ de speckle dans l'hologramme. Ce champ de speckle va changer au moment où la surface va subir des changements provoquant ce qu'on appelle une décorrélation du champ de speckle. Cependant, cette décorrélation va briser la phase Doppler et nécessiter des moyens avancés de filtrage afin d'être exploitée correctement. Ce bruit de décorrélation dépend de la refocalisation réalisée lors de la reconstruction numérique de l'image. Ainsi, une erreur sur la focalisation numérique va augmenter le niveau de bruit dans les mesures. Cet effet avait été démontré [1] et le bruit de décorrélation avait été utilisé comme critère de refocalisation. L'article [1] a également proposé une relation simplifiée entre l'écart type de la densité spectrale du bruit et le facteur de cohérence complexe entre les deux champs de speckle aux deux instants donnés ; cependant [1] ne fournit pas d'éléments fondamentaux sur la relation entre l'erreur sur la refocalisation et l'écart type du bruit de décorrélation de speckle. Deux publications [2,3] ont récemment proposé une approche théorique afin de prédire la valeur de en fonction des paramètres du montage expérimental de la mesure holographique. Dans [3], la théorie a fourni de nouveaux résultats en imagerie holographique montrant que le bruit possède des propriétés bien spécifiques et différentes d'un bruit classique retrouvé dans d'autres mesures optiques. Ce dernier est non-Gaussien, non-stationnaire, dépendant de l'amplitude de la déformation, mais aussi anisotropique (c'est-à-dire qu'il dépend de l'orientation des franges numériques liées à la déformation).

Cette présentation propose une formulation analytique de la décorrélation du speckle due à une erreur de focalisation numérique. La théorie est confrontée à des simulations numériques et des expérimentations qui montrent un excellent accord et valident la théorie proposée. En particulier, on démontre un effet d'anti corrélation qui est prédit par la théorie et vérifié par l'expérience.

Références

- [1] P. Picart, S. Montresor, O. Sakharuk, and L. Muravsky, "Refocus criterion based on maximization of the coherence factor in digital three-wavelength holographic interferometry," *Opt. Lett.* 42, 275–278 (2017).
- [2] M. Piniard, B. Sorrente, G. Hug, and P. Picart, "Theoretical analysis of surface-shape-induced decorrelation noise in multi-wavelength digital holography," *Opt. Express* 29, 14720–14735 (2021).
- [3] E. Meteyer, F. Foucart, C. Pezerat, and P. Picart, "Modeling of speckle decorrelation in digital Fresnel holographic interferometry," *Opt. Express* 29, 36180–36200 (2021).

Étude statistique de l'évaporation de gouttelettes dans un écoulement turbulent

Loïc Méès(1), Nathalie Grosjean(1), Corinne Fournier(2), Jean-louis Marié(1)

(1) Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, INSA Lyon, CNRS UMR 5509,
École Centrale de Lyon, Université Claude Bernard, France

(2) Laboratoire Hubert Curien, Université Jean Monnet – Saint-Etienne, CNRS UMR 5516,
Institut d'Optique Graduate School, France

loic.mees@ec-lyon.fr

L'influence de la turbulence sur l'évaporation de gouttelettes de taille intermédiaire reste une question ouverte en mécanique de Fluides. Cette étude expérimentale repose sur le suivi lagrangien de gouttelettes d'ether de quelques dizaines de microns, en évaporation dans une turbulence contrôlée, quasi homogène et isotrope, d'intensité variable. Le suivi des gouttelettes et la mesure précise leur diamètre le long de leur trajectoire 3D sont réalisés à l'aide d'un montage d'holographie en ligne et d'une méthode de reconstruction de type «problèmes inverses». Les résultats statistiques de cette étude sont issus de l'analyse automatique de 3 millions d'hogrammes dont ont été extraites plus de 4000 trajectoires de gouttes. Différentes conditions turbulentes, pour des fluctuations allant de 0.2 à 1 m/s ont été expérimentées. Ces résultats prennent la forme de densités de probabilités pour les 3 composantes de vitesses et d'accélération et pour les taux d'évaporation. Ces taux obtenus par l'expérience sont comparés aux prédictions d'un modèle simple d'évaporation[1], où les effets convectifs sont modélisés à travers un nombre de Sherwood basé sur la vitesse relative (en norme) entre l'écoulement et la goutte. Cette vitesse relative est elle aussi déduite des mesures par holographie, à partir du comportement dynamique des gouttes et d'un bilan de force.

Le modèle d'évaporation repose sur des hypothèses fortes, de quasi-stationnarité et d'écoulement 1D notamment. Il reproduit très bien les résultats expérimentaux obtenus pour des gouttes en chute libre, en revanche, en présence de turbulence, il sous-estime de manière significative les taux d'évaporation observés [2]. Ces écarts sont discutés et le modèle est corrigé par l'ajout d'un terme traduisant un effet convectif additionnel lié aux fluctuations de vitesses. La corrélation ainsi obtenue reproduit très bien l'ensemble des résultats expérimentaux bien que la question de l'interprétation physique du terme additionnel reste ouverte.

Références

- [1] J. L. Marié, N. Grosjean, L. Méès, M. Seifi, C. Fournier, B. Barbier, M. Lance, Lagrangian measurements of the fast evaporation of falling Diethyl Ether droplets using in-line digital holography and a high-speed camera, *Exp Fluids* 55 : 1708–1720, 2014
- [2] L. Méès, N. Grosjean, J.L. Marié and C. Fournier, Statistical Lagrangian evaporation rate of droplets released in a homogeneous quasi-isotropic turbulence. *Phys. Rev. Fluids* 5, 113602, 2020.

Suivi de bactéries par holographie numérique

Simon Becker¹, Nicolas Louvet¹, Michel Gross²

¹ LEMTA UMR 7563 Université de Lorraine CNRS

² Laboratoire Charles Coulomb UMR 5221 Université Montpellier CNRS

Corresponding authors : simon.becker@univ-lorraine.fr,
nicolas.louvet@univ-lorraine.fr, michel.gross@umontpellier.fr

Nous nous intéressons aux tous premiers événements de colonisation d'une surface par des bactéries. En effet, cette étape est la phase initiale du développement d'un biofilm durant laquelle les bactéries planctoniques migrent vers la surface. Nous focalisons notre étude particulièrement sur les effets couplés d'un écoulement, de confinement et de la motilité bactérienne sur la dynamique de colonisation.

Nous avons mis au point une cellule microfluidique de type Hele-Shaw constituée d'un capillaire en verre dont la dimension caractéristique de confinement peut être ajustée entre 30 μm et 200 μm , nous assurant un écoulement parfaitement laminaire. L'écoulement est contrôlé par un pousse seringue permettant d'imposer des vitesses de liquide de l'ordre de grandeur de la vitesse de nage des bactéries (environ de 10 à 30 $\mu\text{m/s}$). Nous avons déjà réalisé plusieurs études à l'aide de techniques de PIV et PTV mais celles-ci restreignent le domaine de mesure à des plans et des vitesses en 2D. Par conséquent, les trajectoires de bactéries obtenues sont très limitées dans le temps et ne permettent pas une compréhension fine des mécanismes de colonisation

Pour analyser la mobilité des bactéries en 3D dans l'écoulement, nous développons une méthode de suivi par holographie numérique de type inline, plus précisément de Gabor. Le dispositif microfluidique est placé sur un microscope inversé (Zeiss axio-observer, objectif x40, ON = 0.95) équipé d'une diode laser 660 nm fibrée monomode collimatée. L'hologramme est enregistré par une caméra FlowSense (Dantec Dynamics : capteur 2320x1700, taille pixels : 7x7 μm^2). Le suivi des bactéries est effectué en 3 étapes :

- Acquisition d'une succession d'hologrammes à une fréquence d'acquisition d'environ 50 Hz,
- Analyse des hologrammes et localisations des bactéries dans chaque hologramme par recherche de zone d'intérêt et segmentation,
- Détermination des trajectoires.

Pour analyser les hologrammes nous avons développé une DLL en C++/Cuda interfacée avec un logiciel développé sous Labview. La reconstruction des trajectoires utilise la librairie python « trackpy » elle aussi interfacée avec Labview. L'hologramme est propagé par la méthode du spectre angulaire sur tout le volume du canal (pas de 1 μm). Après seuillage par une fonction de focus, les voxels dignes d'intérêt sont reliés par une fonction de « connected component labelling » 3D. Le code est exécuté sur un ordinateur muni d'une carte Nvidia Quadro RTX3000, et d'un CPU Intel Core i5. Le temps de traitement d'un hologramme est inférieur à 2s.

Actuellement, nos premiers résultats sont encourageants mais nécessitent des améliorations (perte de trajectoire par exemple). La présentation par poster nous permettrait d'échanger avec la communauté Holophi et d'engager potentiellement des collaborations.

Off axis digital holography with low spatially and temporally coherent illumination as an alternative for single shot FFOCT

Emmanuel Martins Seromenho¹, Nina Dufour¹, Agathe Marmin¹, Ludovic Foucault¹,
Amir Nahas^{1*}

¹Laboratoire ICube, 1 place de l'hôpital, Strasbourg, France

*amir.nahas@unistra.fr

La tomographie de cohérence optique plein champ (FF-OCT) est une technique d'imagerie optique qui permet d'obtenir des images en profondeur de milieux diffusants avec une haute résolution. Dans ce travail, nous proposons une approche alternative, basée sur l'holographie numérique hors-axe faiblement cohérente (spatialement et temporellement), pour réaliser des images d'OCT plein champ à partir d'un unique interférogramme.

En effet, en OCT plein champ, afin de reconstruire une image 2D à une certaine profondeur, il faut extraire l'amplitude des interférogrammes. Pour se faire, la méthode de décalage de phase est habituellement utilisée en réalisant au minimum trois acquisitions d'interférences [1]. Cette méthode limite par conséquent l'observation de tissus biologiques in-vivo. Nous présentons ici une approche relativement simple afin de résoudre ce problème combinant la FF-OCT avec le principe de l'holographie hors-axe.

Grâce à cette méthode, il est possible d'extraire l'amplitude et la phase à partir d'un unique interférogramme, ce qui est particulièrement adapté à de nouvelles modalités de contraste telles que l'élastographie par ondes de cisaillement, l'imagerie Doppler et l'imagerie in vivo. Une description plus détaillée de la méthode est donnée en [2].

Références

- [1] Dubois, A., Grieve, K., Moneron, G., Lecaque, R., Vabre, L., & Boccara, C. (2004). Ultrahigh-resolution full-field optical coherence tomography. *Applied optics*, 43(14), 2874-2883.
- [2] Seromenho, E. M., Marmin, A., Facca, S., Bahlouli, N., Perrin, S., & Nahas, A. (2022). Single-shot off-axis full-field optical coherence tomography. *Applied Physics Letters*, 121(11), 113702.

Passive elastography using noise correlation and off-axis digital holography

Agathe Marmin¹, Nina Dufour¹, Emmanuel Martins Seromenho¹, Ludovic Foucault¹,
Amir Nahas^{1*}

¹Laboratoire ICube, 1 place de l'hôpital, Strasbourg, France

* amir.nahas@unistra.fr

L'holographie numérique hors-axe permet de capturer la phase et l'amplitude à partir d'une seule image de caméra avec une grande sensibilité. Les déplacements induits par un champ diffus d'ondes de cisaillement sont acquis à la surface d'un échantillon diffusant. À partir de ces acquisitions, la rigidité de l'échantillon peut être cartographiée à l'aide d'un algorithme de corrélation de bruit / retournement temporel. Le couplage de l'holographie numérique avec une méthode de retournement temporel permet d'obtenir une élastographie quantitative plein champ sans avoir besoin d'une source contrôlée ou synchronisée d'ondes mécaniques. Nous présentons ici nos derniers résultats sur des échantillons biologiques ex-vivo et in-vivo. Une description plus détaillée de la méthode est donnée en [1,2].

Références

- [1] Marmin, A., Catheline, S., & Nahas, A. (2020). Full-field passive elastography using digital holography. *Optics Letters*, 45(11), 2965–2968.
- [2] Marmin, A., Laloy-Borgna, G., Facca, S., Gioux, S., Catheline, S., & Nahas, A. (2021). Time-of-flight and noise-correlation-inspired algorithms for full-field shear-wave elastography using digital holography. *Journal of Biomedical Optics*, 26(8), 086006.

Auto-étalonnage des aberrations chromatiques pour la reconstruction multispectrale d'échantillons biologiques

Dylan Brault¹, Thomas Olivier¹, Ferréol Soulez², Sophie Dixneuf³, Nicolas Faure⁴, Corinne Fournier¹

¹Univ. Lyon, UJM-Saint-Etienne, CNRS, Institut of Optics Graduate School, Laboratoire Hubert Curien UMR 5516, F-42023, Saint-Etienne, France

²Univ. de Lyon, Université Lyon1, ENS de Lyon, CNRS, Centre de Recherche Astrophysique de Lyon, UMR 5574, 69230 Saint-Genis-Laval, France

³Bioassays, Microsystems & Optical Engineering Unit, BIOASTER, 69007 Lyon, France

⁴bioMerieux, Centre Christophe Mérieux, 38024 Grenoble, France

dylan.brault@univ-st-etienne.fr, corinne.fournier@univ-st-etienne.fr

Dans le contexte de l'analyse d'échantillons sanguins, le marquage de Gram est une procédure classique visant à augmenter le contraste d'objets transparents et à discriminer les bactéries en fonction de leur couleur. L'analyse de ces échantillons peut être automatisée en utilisant un système d'holographie en ligne. Ainsi, en plus d'une information sur l'absorption des objets, le déphasage introduit par ces derniers peut être exploité. Afin de caractériser aux mieux ces objets, la reconstruction d'une information spectrale (d'absorption et de déphasage) peut être réalisée au moyen d'algorithmes dédiés.

De plus, l'exploitation d'un a priori sur la colocalisation des objets sur les plans de transmittance reconstruits (un par longueur d'onde) permet de supprimer l'image jumelle inhérente aux reconstructions d'hologrammes en ligne. La présence d'aberrations chromatiques dans le système imageur peut compromettre la validité de cet a priori de colocalisation, et donc compromettre la quantitativité des reconstructions. Ces aberrations doivent donc être prises en compte dans les reconstructions.

L'insertion de billes d'étalonnage dans l'échantillon biologique et leur reconstruction par approche problèmes inverses paramétriques a déjà permis l'estimation d'aberrations géométriques sur des hologrammes acquis pour une seule longueur d'onde [1,2]. Nous proposons d'étendre cette méthodologie afin d'estimer les paramètres des aberrations chromatiques du système imageur et de les prendre en compte dans les reconstructions multispectrales d'échantillons biologiques par approches problèmes inverses régularisées [3].

Références

- [1] Martin, C. *et al.* (2021). Improving holographic particle characterization by modeling spherical aberration. *Optics Express*
- [2] Brault, D. *et al.* (2022). Accurate unsupervised estimation of aberrations in digital holographic microscopy for improved quantitative reconstruction. *Optics Express*
- [3] Jolivet, F. *et al.* (2018). Regularized reconstruction of absorbing and phase objects from a single in-line hologram, application to fluid mechanics and micro-biology. *Optics express*

Ce travail a été financé par le projet région Auvergne-Rhône-Alpes DIAGHOLO (Diagnostic microbiologique par microscopie holographique)

Imagerie du champ acoustique à vues multiples par holographie trichromatique

Saoucene Hassad, Pascal Picart

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM), UMR 6613, Institut d'Acoustique – Graduate
School (IA-GS), CNRS, Le Mans Université, Avenue Olivier Messiaen, 72085 LE MANS, France
Saoucene.Hassad@univ.lemans.fr

Kouider Ferria, Larbi Bouamama

Laboratoire d'Optique Appliquée, IOMP, Université Ferhat Abbas, Sétif 1, Avenue Saïd Boukhraïssa,
Maabouda 19000 SETIF, Algérie
Pascal.Picart@univ-lemans.fr

Ce résumé présente le concept d'un enregistrement simultané de plusieurs vues pour l'imagerie de champs acoustiques. Le principe est basé sur l'holographie numérique hors axe et le multiplexage spatial d'hologrammes à trois longueurs d'onde qui sont utilisés pour éclairer sous différentes incidences le volume dans lequel se propage une onde acoustique. Les faisceaux de référence sont combinés en un seul faisceau tricolore et les fréquences spatiales des ondes de référence sont ajustées de manière à permettre le multiplexage spatial des hologrammes numériques avec un seul capteur monochromatique. L'acquisition simultanée de l'ensemble des données nécessaires est ainsi réalisée "single shot" et le processus numérique produit ensuite des images de l'amplitude et de la phase du champ acoustique dans trois directions d'observation différentes. Ceci a pour avantage de permettre une acquisition synchrone et rapide des données.

Les premiers résultats expérimentaux avec un émetteur à ultrasons émettant une fréquence à 40 kHz établissent la preuve de concept de l'imagerie multi-vues proposée pour les champs acoustiques en champ libre [1]. Comme le transducteur émet une onde sphérique, l'amplitude intégrée le long du faisceau laser s'écarte de l'amplitude réelle. Ainsi, la manière d'obtenir une mesure quantitative de la pression acoustique est discutée en fonction de simulations acoustiques réalistes et ouvre la voie à de futures recherches pour la tomographie holographique quantitative de champs acoustiques.

Références

[1] Hassad, S., Ferria, K., Bouamama, L., et Picart. P. (2022). Multi-view acoustic field imaging with digital color holography. *Front. Photonics* 3:929031.

Reconstruction d'images multimodales à partir des données de microscopie tomographique diffractive

Riadh Abbessi, Nicolas Verrier, Asemare Mengistie Taddese, Steve Laroche, Matthieu Debailleul, Mohamed Lo, Jean-Baptiste Courbot, Olivier Haeberlé
Institut Recherche en Informatique, Mathématiques, Automatique et Signal (IRIMAS UR UHA 7499), Université de Haute-Alsace, Mulhouse Cedex, France
riadh.abbessi@uha.fr

La microscopie de fluorescence est l'outil de choix en recherche biologique, grâce à l'immense variété de marqueurs, et au développement de la nanoscopie, reconnue par l'attribution du prix Nobel de chimie 2014 pour le développement de la microscopie super-résolue [1].

Cependant, la fluorescence peut également présenter des limites comme le photoblanchiment des fluorophores, qui handicape les mesures à long terme et peut induire une phototoxicité [2].

Les techniques d'imagerie interférométrique peuvent être considérées comme une alternative. En effet ces méthodes permettent d'accéder à une information quantitative sur la phase optique du champ issu de l'objet. L'étape de marquage de l'échantillon devient alors facultative.

Parmi les méthodes existantes, la microscopie par tomographie diffractive (MTD) permet une imagerie quantitative en 3D.

Basée sur une généralisation de la microscopie holographique numérique avec un contrôle de l'illumination de l'échantillon, la TDM mesure, à partir de multiples angles d'illumination [3], l'amplitude et la phase des champs diffractés. Les informations enregistrées permettent de reconstruire la distribution de l'indice de réfraction complexe (réfraction et absorption) en 3D, sans marquage et dans certains cas avec une résolution isotrope [4]. Dans cette contribution, nous montrons une autre utilisation de ces informations. Un tutoriel pour la reconstruction d'images multimodales est proposé. Comment à partir d'acquisitions MTD, et en utilisant les modèles de formation d'image des microscopes optiques classiques, est-il possible de simuler le comportement des microscopes "de routine" ? Des modèles de formation d'image à la reconstruction finale avec un rendu 2D et 3D, nous montrons comment transformer la MTD en un microscope numérique universel [5].

Références

- [1] Betzig, E., Hell, S.W. and Moerner W. E. (2014). The Nobel prize in chemistry 2014, for the development of super-resolved fluorescence microscopy. The Royal Swedish Academy of Sciences.
- [2] Icha, J., Weber, M., Waters, J. C., & Norden, C. (2017). Phototoxicity in live fluorescence microscopy, and how to avoid it. *BioEssays*, 39(8), 1700003.
- [3] Simon, B., Debailleul, M., Beghin, A., Tourneur, Y., and Haeberlé, O. (2010). High-resolution tomographic diffractive microscopy of biological samples. *Journal of Biophotonics*, 3(7), 462–467.
- [4] Simon, B., Debailleul, M., Houkal, M., Ecoffet, C., Bailleul, J., Lambert, J., Spangenberg, A., Liu, H., Soppera, O., and Haeberlé, O. (2017). Tomographic diffractive microscopy with isotropic resolution. *Optica*, 4(4), 460–463.
- [5] Abbessi, R., Verrier, N., Taddese, A. M., Laroche, S., Debailleul, M., Lo, M., Courbot, J. B., and Haeberlé, O. (2022). Multimodal image reconstruction from tomographic diffraction microscopy data, *Journal of Microscopy*. <https://doi.org/10.1111/jmi.13131>

Microscopie à Contraste de Phase Différentiel par Microscopie Tomographique Diffractive Polarisée

Nicolas Verrier, Asemare Mengistie Taddese, Riadh Abbessi, Matthieu Debailleul, Olivier Haeberlé

Institut Recherche en Informatique, Mathématiques, Automatique et Signal (IRIMAS UR UHA 7499),
Université de Haute-Alsace, IUT Mulhouse, 61 rue Albert Camus, 68093 Mulhouse Cedex, France

nicolas.verrier@uha.fr

La microscopie tomographique diffractive (Tomographic Diffractive Microscopy ou TDM) est une généralisation de la microscopie holographique numérique (Digital Holographic Microscopy ou DHM), dans laquelle l'angle d'incidence de l'illumination sur l'échantillon est contrôlé [1–3].

Le TDM permet d'obtenir le champ optique à la fois en amplitude et en phase pour chaque angle d'éclairage. Une réaffectation appropriée des informations permet alors une reconstruction 3D de la carte complexe de l'indice de réfraction, à l'aide d'un modèle d'inversion des données adapté à l'échantillon observé.

Cette méthode est devenue un outil de choix pour l'imagerie 3D haute résolution d'échantillons non marqués, et est même maintenant commercialement disponible [4–8].

Récemment, la méthode a été étendue à l'étude des spécimens biréfringents [9–11]. Nous avons construit un système de TDM en polarisation [12], par modification de notre système actuel [13], en remplaçant la caméra CMOS actuelle par une caméra équipée d'un capteur à matrice de polarisation (Polarisation Array Sensor ou PAS) de type Lucid Vision Labs PhoenixTM PHX050S1-PC. Ces capteurs PAS ouvrent une nouvelle voie pour la TDM, en tant qu'évaluation des informations vectorielles sur l'échantillon étudié. Dans cette contribution, nous montrons une utilisation alternative de ces informations de polarisation basée sur la nature sensible à la phase du TDM. Nous avons en particulier démontré que le TDM couplé au PAS peut conduire à un microscope 3D à contraste interférentiel différentiel (Differential Interference Contrast ou DIC) sans presque aucune modification de la configuration expérimentale [13].

Références

- [1] Haeberlé, O., Belkebir, K., Giovaninni, H., and Santenac, A. (2010). Tomographic Diffractive Microscopy: Basics, Techniques and Perspectives. *J. Mod. Opt.* 57, 686–699
- [2] Soto, J.M., Rodrigo, J.A., and Alieva, T. (2018). Optical diffraction tomography with fully and partially coherent illumination in high numerical aperture label-free microscopy [Invited]. *Appl. Opt.* 57, A205–A214
- [3] Zhang, T., Li, K., Godavarthi, C., and Ruan, Y. (2019). Tomographic Diffractive Microscopy: A Review of Methods and Recent Developments. *Appl. Sci.* 9, 3834
- [4] Lee, K., et al. (2013). Quantitative Phase Imaging Techniques for the Study of Cell Pathophysiology: From Principles to Applications. *Sensors* 13, 4170–4191
- [5] Jin, D., Zhou, R.J., Yaqoob, Z., and So, P.T.C. (2017). Tomographic phase microscopy: principles and applications in bioimaging [Invited]. *J. Opt. Soc. Am. B.* 34, B64–B77
- [6] Park, Y., Depeursinge, C., and Popescu, G. (2018). Quantitative phase imaging in biomedicine. *Nature Phot.* 12, 578–589
- [7] Kus, A., et al. (2019). Holographic tomography: hardware and software solutions for 3D quantitative biomedical imaging. *ETRI J.* 41, 61–72
- [8] Balasubramani, V. et al. (2021). Holographic tomography: techniques and biomedical applications [Invited]. *Appl. Opt.* 60, B65–B80
- [9] van Rooij, J., and Kalkman, J. (2020). Polarization contrast optical diffraction tomography. *Biomed. Optics Express* 11, 2109–2121
- [10] Saba, A., et al. (2021). Polarization-sensitive optics diffraction tomography. *Optica* 8, 402–408
- [11] Sin, S., et al. (2022). Tomographic measurement of dielectric tensors at optical frequency. *Nature Materials* 21, 317–324
- [12] Taddese, A. M., et al. (en préparation)
- [13] Verrier, N., et al. 3D Differential Interference Contrast microscopy using polarisation sensitive Tomographic Diffraction Microscopy. *J. Microscopy* (soumis)

Suivi par holographie en ligne d'une bulle soumise à un champ ultrasonore

Cyril Mauger⁽¹⁾, Estelle Meziani⁽¹⁾, Nathalie Grojean⁽¹⁾, Philippe Blanc-Benon⁽¹⁾, Claude Inserra⁽²⁾, Loïc Méès⁽¹⁾

(1) Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, École Centrale de Lyon, Univ Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA), UMR5509, France

(2) Univ Lyon, Univ Claude Bernard Lyon 1, Centre Léon Bérard, INSERM, Laboratoire des applications Thérapeutiques des Ultrasons (LabTAU), UMR1032, sFrance

cyril.mauger@insa-lyon.fr

Des ultrasons (US) en association avec des micro-bulles (MB) sont utilisés pour améliorer certains traitements thérapeutiques. Ils permettent notamment la délivrance ciblée de médicaments pour des traitements oncologiques et des maladies neuro-dégénératives comme la maladie d'Alzheimer [1], en réduisant localement, de manière contrôlée et réversible, l'efficacité des barrières biologiques (BB). La mise au point et l'amélioration de ces thérapies novatrices nécessite une meilleure compréhension des interactions US/MB, MB/MB et MB/BB et la mise en place de moyens expérimentaux dédiés dont une première étape est présentée ici.

Une bulle en mouvement dans un liquide est soumise à différentes forces comme la flottabilité ou la traînée. Lorsque le milieu est insonifié, une force additionnelle de radiation acoustique, appelée force de Bjerknes primaire [2–4] apparaît et pousse la bulle vers des nœuds ou des ventres de pression. La compétition entre les différentes forces en présence conduit à un déplacement tridimensionnel qui précède son immobilisation (piégeage) dans certaines conditions. Une chambre à lévitation acoustique a spécialement été conçue pour étudier la trajectoire d'une telle bulle [5]. Elle a été dimensionnée en tenant compte de la fréquence du transducteur pour obtenir une onde stationnaire. La bulle, produite en focalisant un laser pulsé, se déplace sous l'effet combiné de la flottabilité, de la traînée et de la force de radiation avant de trouver une zone de piégeage. Sa trajectoire est suivie grâce à un montage d'holographie en ligne. Les hologrammes sont reconstruits par une approche de type « problème inverse » [6]. Le premier objectif de ces mesures est de comparer ces trajectoires à un modèle de dynamique de la bulle (en cours de développement) intégrant les différentes forces à laquelle elle est soumise.

Références

- [1] Carpentier, A., Canney, M., Vignot, A., Reina, V., Beccaria, K., Horodyckid, C., et al. (2016). Clinical trial of blood-brain barrier disruption by pulsed ultrasound. *Science translational medicine*, 8(343), 343re2–343re2.
- [2] Bjerknes, C.-A. (1881). Phénomènes dits hydro-électriques et hydromagnétiques. *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 10(1):509–513.
- [3] Bjerknes, V. (1905). Fields of force: supplementary lectures, applications to meteorology; a course of lectures in mathematical physics delivered December 1 to 23, 1905.
- [4] Crum, L. A. (1975). Bjerknes forces on bubbles in a stationary sound field. *The Journal Of the Acoustical Society of America*, 57(6), 1363–1370.
- [5] Cleve, S., Guédra, M., Mauger, C., Inserra, C., & Blanc-Benon, P. (2019). Microstreaming induced by acoustically trapped, non-spherically oscillating microbubbles. *Journal of Fluid Mechanics*, 875, 597–621.
- [6] Soulez, F., Denis, L., Fournier, C., Thiébaud, E., Goepfert, C. (2007) Inverse-problem approach for particle digital holography: accurate location based on local optimization. *J Opt Soc Am A* 24(4), 1164–1171.

Contributions des effets de bord et de surface, des processus de réfraction et des résonances internes à la formation des hologrammes de Gabor de particules à symétrie sphérique.

Fabrice Onofri, Chantal Pelcé, Diogo Camello-Barros
Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI, UMR 7343, 13453 Marseille Cedex 13, France
fabrice.onofri@univ-amu.fr, chantal.pelce@univ-amu.fr, diogo.camello.barros@univ-amu.fr
Fabrice Lamadie
CEA, DEN, DMRC, Univ Montpellier, Marcoule, France
Fabrice.lamadie@cea.fr

De manière contre-intuitive, la caractérisation précise par holographie des particules sphériques (mais aussi cylindriques et ellipsoïdales) est rendue délicate du fait même de leur haute symétrie. En effet, cette dernière induit des résonances morphologiquement dépendantes, des ondes rasantes, des ondes de surface et des effets tunnels intenses qui ne sont pas pris en compte par les modèles de formation des hologrammes basés sur la théorie scalaire de la diffraction.

Dans cette communication, nous étudions l'influence de ces mécanismes de diffusion non diffractifs, des ondes réfractées et de la réflexion spéculaire, sur la formation et l'analyse des hologrammes de Gabor sur support numérique de particules exclusivement sphériques (gouttes, bulles). Les calculs électromagnétiques sont réalisés dans le cadre de théorie de Lorenz-Mie généralisée en utilisant le principe de l'approximation localisée et la décomposition détaillée, en séries de Debye, des coefficients de diffusion externes et internes. De manière très générale, les simulations numériques réalisées démontrent l'importance de la prise en compte des phénomènes de diffraction pure et de réfraction classiques et, dans une moindre mesure, des processus de diffusion semi-classiques. Elles révèlent également que la condition de champ lointain utilisée pour accélérer le calcul des fonctions de Hankel est à reconsidérer en fonction de la taille et de l'indice des particules mais aussi des dimensions du champ observé. Sans cela, la théorie de Lorenz-Mie ne peut pas être utilisée comme référence et nombre d'évaluations des performances des modèles de formation des hologrammes sont biaisées. Ce travail ouvre des perspectives pour le développement et la validation de modèles asymptotiques qui devraient permettre l'amélioration de la précision et des temps de calcul des méthodes de reconstruction par approches directes ou inverses.

Étude du sillage d'un culot cylindrique en régime hypersonique par holographie interférométrie numérique.

François NICOLAS

DAAA, ONERA, Paris Saclay University, 92190 Meudon, France
francois.nicolas@onera.fr

Dans le cadre du projet CHYP (Culots HYPersoniques) financé par l'ANR, l'Onera a conduit une étude expérimentale et numérique de l'écoulement de sillage sur un culot cylindrique à Mach 4.0, à haut nombre de Reynolds. Lors de la campagne d'essai qui a eu lieu dans la soufflerie à rafales R2 de Meudon des mesures par interférométrie holographique numérique ont été employées afin de caractériser les variations d'indice optique de l'écoulement.

L'holographie interférométrie numérique est une technique intégrale sensible à la masse volumique du milieu traversé. Un montage classique d'interféromètre de Mach-Zender a été utilisé [1][2] : un premier faisceau de mesure traverse la veine d'essai et l'écoulement à caractériser tandis qu'un faisceau de référence contourne la soufflerie. Des franges porteuses sont introduites par rotation d'un des miroirs du faisceau de référence. Par la suite, des interférogrammes sont enregistrés en l'absence puis en présence de l'écoulement. Le post-traitement [3] de ces interférogrammes permet d'obtenir une carte de phase dépliée.

Malgré l'environnement complexe d'une soufflerie à rafale, des premiers résultats encourageants ont été obtenus pour différentes géométries de culots et différentes conditions génératrices. La topologie globale de l'écoulement est bien mesurée telle que la zone de détente, le choc de recompression qui se forme en aval dans le sillage ainsi que la taille de la zone de recirculation. Ces premiers résultats ouvrent la porte à de futures analyses sur la dynamique instationnaire de l'écoulement en exploitant les acquisitions haute cadence (3, 21 et 50 kHz) et en les confrontant aux mesures des capteurs Kulite ainsi qu'aux simulations numériques haute-fidélité.

Références

- [1] J. Desse and F. Olchewsky. Digital holographic interferometry for analyzing high-density gradients in fluid mechanics. In I. Naydenova, D. Nazarova, and T. Babeva, editors, Holographic Materials and Optical Systems, chapter 13. InTech, Rijeka, 2017.
- [2] OLCHEWSKY, François. Caractérisation des écoulements instationnaires 3D par tomographie holographique numérique multidirectionnelle. 2017. Thèse de doctorat. Université Lille 1.
- [3] ESSAÏDI, Zacaria, OLCHEWSKY, François, DESSE, Jean-Michel, et al. Algorithme de dépliement de phase guidé par un facteur de qualité en holographie numérique pour l'étude des écoulements complexes. In : Congrès français de mécanique. AFM, 2017.

Imagerie holographique pour l'ophtalmologie

Zofia Bratasz¹, Michael Atlan¹, Olivier Martinache², Yohan Blazy³, Julia Sverdlin⁴, Claire Ducloux², Manon Ortolì², Marvin Tordjman², Régis Lecoge², Tristan Aubert², Sarah Tick², Sarah Mrejen², José-Alain Sahel², Michel Paques², Sophie Bonnin⁵, Patricia Koskas⁵, Damien Gatinel⁵, Catherine Vignal⁵, Amélie Yavchitz⁵, Vivien Vasseur⁵, Ramin Tadayoni⁵

¹Institut Langevin, ²Hôpital des Quinze-Vingts, ³Lumibird Quantel Medical, ⁴Essilor Instruments, ⁵Hôpital Fondation Adolphe de Rothschild

micatlan@gmail.com

L'imagerie holographique proche infrarouge est aujourd'hui une technologie utilisée en centres de soins pour permettre la recherche de biomarqueurs d'intérêt en ophtalmologie, dans le cadre d'études cliniques. Son développement fédère et s'appuie sur les compétences d'acteurs de la recherche médicale, industrielle et académique autour de disciplines incluant médecine, biologie, physique et informatique.

Les conditions pratiques d'imagerie de l'œil humain nécessitent en premier lieu le respect des limites d'exposition du patient au rayonnement laser proche infrarouge, selon les normes européenne ISO 15004-2-2007 et américaine ANSI Z136.1-2014. Nous montrons qu'une illumination laser diffuse innovante permet d'exploiter au mieux l'exposition maximale permise pour une imagerie en champ large ou étroit des segments antérieur et postérieur de l'œil.

Par ailleurs, une détection cohérente via une acquisition d'image ultra rapide de l'ordre de plusieurs dizaines de kHz rend possibles les applications d'imagerie Doppler et de tomographie par cohérence optique en figeant la différence de phase entre la lumière rétrodiffusée et le faisceau de référence, mesurée sur chaque interférogramme. Cette contrainte technique importante empêche pour le moment d'avoir recours à l'holographie hors-axe par manque de bande passante spatiale des caméras ultrarapides actuelles, en particulier pour l'imagerie en temps réel.

Nous montrons qu'un montage d'holographie dans l'axe basé sur un interféromètre de Mach-Zehnder, associé à une analyse en composantes principales du signal numérique par décomposition en valeurs singulières permet d'extraire un signal d'onde optique rétrodiffusée exploitable pour l'imagerie. Le rephasage numérique de cette onde permet de compenser le mouvement et les aberrations oculaires et révèle des candidats de biomarqueurs fonctionnels quantitatifs mesurables de manière non-invasive dans la rétine, tels que la vitesse de perfusion sanguine, les ondes de pouls et l'indice de résistivité artérielle.

Logiciels d'imagerie holographique à haut débit : holovibes et holowaves

Philippe Bernet, Eliott Bouhana, Fabien Colmagro, Marius Dubosc, Guillaume Poisson,
Anthony Strazzella, Ilan Guenet, Nicolas Blin, Quentin Kaci, Théo Lepage, Léo Puyo, Loïc
Bellonnet-Mottet, Antoine Martin, Thomas Jarrossay, Cyril Cêtre, Pierre Pagnoux,
Antoine Dillée, Michael Atlan, Armand Touminet, Zosia Bratasz, Lucas Guillerot

Digital Holography [1]. 4 rue des Arènes. 75005 Paris. France

contact@digitalholography.org

La disponibilité croissante des caméras ultra rapides et de la puissance de calcul parallèle des unités de traitement graphique (GPU) alimente le développement des applications biomédicales et industrielles de l'holographie numérique à haut débit. Nous accompagnons ces développements en proposant deux logiciels d'imagerie optique holographique ultra rapide : holovibes (code C++/CUDA) [2] et holowaves (ensemble de scripts Matlab) [3]. Ces deux logiciels sont conçus de manière à répondre à un cahier des charges simple : effectuer des calculs de démodulation spatiale et temporelle par transformée de Fourier rapide ou décomposition en valeurs singulières [4] à partir d'interférogrammes en provenance d'une caméra ou d'un fichier de données, en temps réel et différé, respectivement.

Un format de fichier documenté, le .holo [5], permet d'associer les paramètres de calcul d'hologramme aux données brutes afin d'assurer le rendu d'image à l'ouverture du fichier, dans les conditions de reconstruction choisies à la sauvegarde des interférogrammes.

Un flux continu de 10,000 interférogrammes par seconde (trames 8-bit de 512 x 512 pixels, ~2.5 GB/s, caméra Ametek Phantom S710, interface CoaXPress Bitflow) peut être traité continûment par propagation du spectre angulaire et analyse temporelle de blocs de 512 trames.

Les dernières améliorations d'holovibes comprennent la mise en œuvre d'une interface de programmation d'application (API) C++. Un système d'état global du programme n'accepte que les requêtes de l'API, afin de faciliter l'intégration du moteur de rendu d'image.

Des niveaux élevés de factorisation de code, d'abstraction de classe (cacher les données sur les objets pour réduire la complexité), d'encapsulation (fermer l'accès aux données privées d'une classe à l'autre) et d'héritage (transfert d'attributs et méthodes aux sous-classes) sont observés afin de faciliter la vérification des logiciels holovibes et holowaves et de faciliter leur développement collaboratif, leurs référentiels de code étant destinés à devenir open source.

Références

- [1] <http://www.digitalholography.org>
- [2] <https://www.holovibes.com>
- [3] <http://www.holowaves.org>
- [4] <https://arxiv.org/abs/2004.00923>
- [5] <https://github.com/DigitalHolography/Holo>

Analyse détaillée de plaquettes sanguines en microscopie par holographie numérique : vers un outil diagnostique

Jérôme Dohet-Eraly, Karim Zouaoui Boudjeltia, Catherine Yourassowsky, Frank Dubois
Université libre de Bruxelles, 50 Avenue Franklin Roosevelt, 1050 Bruxelles, Belgique
Jerome.Dohet-Eraly@ulb.ac.be, Karim.Zouaoui.Boudjeltia@ulb.ac.be,
Catherine.Yourassowsky@ulb.ac.be, Frank.Dubois@ulb.ac.be

Selon l'Organisation mondiale de la Santé [1], les maladies cardio-vasculaires représentent la première cause de mortalité dans le monde. Ces maladies sont le plus souvent liées à une altération de la circulation sanguine due à un comportement dysfonctionnel des éléments figurés du sang, en particulier des thrombocytes, ou plaquettes sanguines. L'étude de la morphologie de ces cellules, y compris les plaquettes qui ont adhéré à une paroi ou se sont agrégées, en fonction de différentes pathologies, est donc primordiale tant du point de vue fondamental que dans les analyses de sang en routine. La microscopie par holographie numérique, grâce à l'imagerie quantitative de la phase optique — donc de l'épaisseur optique des échantillons — et à la capacité de reconstruction holographique en profondeur, constitue une technologie particulièrement bien adaptée à l'analyse détaillée et automatisée de ces éléments figurés du sang.

Dans l'étude ici présentée, décrite de manière approfondie dans [2] et [3], l'analyse de plaquettes étalées, obtenues *in vitro* après un protocole spécifiquement conçu, est opérée en microscopie par holographie numérique avec un éclairage spatialement partiellement cohérent. Un algorithme basé sur le produit de corrélation normalisé est développé pour la détection, la segmentation et la caractérisation de la forme tridimensionnelle de chaque plaquette présente sur les images. Celui-ci permet le traitement automatisé d'un grand nombre de plaquettes par échantillon. La comparaison des résultats obtenus pour des volontaires sains et des patients dialysés a montré une différence significative entre les deux groupes. La méthode proposée présente donc un intérêt potentiel important dans les maladies cardio-vasculaires, pour l'analyse de l'étalement des plaquettes sanguines, tant en recherche fondamentale que comme outil de diagnostic en laboratoire de routine.

Références

- [1] « Maladies cardiovasculaires » in www.who.int, dernière consultation le 10 nov. 2022.
- [2] Dohet-Eraly, J., Zouaoui Boudjeltia, K., Rousseau, A., Queeckers, P., Lelubre, C., Desmet, J.-M., Chopard, B., Yourassowsky, C., & Dubois, F. (2022). Three-dimensional analysis of blood platelet spreading using digital holographic microscopy: a statistical study of the differential effect of coatings in healthy volunteers and dialyzed patients. *Biomed. Opt. Express*, 13, 502–513.
- [3] (en cours de publication) Dubois, F., Yourassowsky, C., Zouaoui Boudjeltia, K., & Dohet-Eraly, J. Digital Holographic Microscopy in Partially Coherent Illumination and Applications. In *Holography – Recent Advances and Applications*, éditeur Rosen, J., IntechOpen, Londres, 2022. doi: 10.5772/intechopen.105925.

Interférométrie holographique multi-vues pour la reconstruction tridimensionnelle des instabilités d'un jet supersonique sous-détendu

Olivier Léon, David Donjat

ONERA/DMPE, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 TOULOUSE
olivier.leon@onera.fr, david.donjat@onera.fr

Jean-Michel Desse, François Olchewski

ONERA/DAAA, Laboratoire de Mécanique des Fluides de Lille, Kampé de Fériet, 59000 Lille

François Nicolas

ONERA/DAAA, Université Paris Saclay, 92190 Meudon

Frédéric Champagnat

ONERA/DTIS, Université Paris Saclay, 91123 Palaiseau

Les jets supersoniques non-adaptés, rencontrés dans diverses applications aéronautiques et spatiales, peuvent présenter des dynamiques instationnaires complexes. Particulièrement, en condition sous-détendue, des instabilités de grande échelle peuvent se développer dans la couche de mélange externe du jet. Par interaction avec les cellules de chocs présentent dans celui-ci, une boucle de rétro-action se forme, rendant le système globalement instable au point de produire un sifflement intense, appelé *screech noise*. Ce contexte rend l'étude expérimentale de ces instabilités généralement difficile. Ces travaux mettent en évidence le potentiel de l'interférométrie holographique à plusieurs points de vues (ou TDHI pour *Tomographic Digital Holographic Interferometry*) pour l'analyse de la dynamique de tels écoulements compressible.

Un dispositif expérimental unique est ainsi proposé, combinant six interféromètres de Mach-Zehnder utilisant une source laser impulsienne. Un tel choix est motivé d'une part par l'expérience acquise précédemment dans l'étude d'écoulements supersoniques [1] et d'autre part par la nécessité de disposer de plusieurs observations instantanées (ou snapshots) de l'écoulement d'intérêt. Le traitement des champs moyens de variations de phase optique ainsi obtenus a permis d'estimer la structure moyenne axisymétrique du champ de masse volumique du jet de manière extrêmement résolue, en s'appuyant notamment sur des approches tomographiques régularisées. Plus encore, l'application de techniques de traitement adaptées à l'identification de modes cohérents dans ces acquisitions ont rendu possible l'étude des principaux modes de Fourier azimutaux présents dans l'écoulement instationnaire [2]. Le système optique mis en œuvre offrant une mesure d'une excellente résolution spatiale, il permet de quantifier précisément les gradients de masse volumique induits par la présence de chocs et autres structures cohérentes du jet, apportant un éclairage bien plus précis qu'auparavant [3] sur les mécanismes turbulents en jeu.

Références

- [1] Desse, J. M., Picart, P., & Olchewsky, F. (2015). Quantitative phase imaging in flows with high resolution holographic diffraction grating. *Optics express*, 23(18), 23726–23737.
- [2] Léon, O., Donjat, D., Olchewsky, F., Desse, J., Nicolas, F., & Champagnat, F. (2022). Three-dimensional density field of a screeching under-expanded jet in helical mode using multi-view digital holographic interferometry. *Journal of Fluid Mechanics*, 947, A36. doi:10.1017/jfm.2022.659
- [3] Nicolas, F., Donjat, D., Léon, O., Le Besnerais, G., Champagnat, F., & Micheli, F. (2017). 3D reconstruction of a compressible flow by synchronized multi-camera BOS. *Experiments in fluids*, 58(5), 1–15.

Imagerie de phase quantitative avec un diffuseur fin : principe et applications.

Benoit ROGEZ¹, Clémence GENTNER¹, Tengfei WU^{1,2}, Anis AGGOUN¹, Gilles TESSIER¹,
Marc GUILLON², Pascal BERTO^{1,2}

¹ Institut de la Vision, Sorbonne Université, 75012 Paris

² SPPIN, Université Paris Cité, 75006 Paris

benoit.rogez@inserm.fr

1. Introduction

La microscopie de phase quantitative regroupe des techniques d'imagerie sensibles au contraste d'indice optique d'un échantillon. Elle permettent ainsi l'imagerie de cellules, essentiellement transparentes, et de certaines structures cellulaires (organites, cytosquelette,...) sans marquage. Ces dernières années ont vu l'émergence de nouvelles techniques de microscopies de phase quantitatives dites « auto-référencées » [1,2], qui s'affranchissent des contraintes de stabilité inhérentes à l'interférométrie. Certaines de ces techniques présentent de plus l'avantage d'être compatibles avec une illumination incohérente, comme l'illumination Köhler native d'un microscope en transmission. Elles sont donc facilement implémentables sur un microscope conventionnel, rendant plus facile leur diffusion dans les communautés d'utilisateurs biologistes ou médecins.

2. Principe

Parmi ces techniques « autoréférencées », la technique DiPSI [2] (pour « Diffuser Phase Sensing and Imaging ») repose sur l'effet mémoire d'un diffuseur fin, et permet de s'affranchir de l'emploi de masques optiques lithographiés. Pour un diffuseur mince ou surfacique, cet effet mémoire est valable sur une gamme angulaire infinie, et le speckle reste corrélé quel que soit l'angle d'inclinaison. La technique DiPSI consiste alors à (i) mesurer un speckle de référence, obtenu typiquement par illumination avec une onde plane, puis à (ii) estimer les pentes locales du front d'onde distordu (ou gradient de phase) via la mesure de la translation *locale* des grains de speckle. Une intégration bidimensionnelle permet finalement de remonter à la phase. En pratique, une procédure itérative est nécessaire afin de découpler les informations de phase et d'intensité dans le cas d'illuminations non uniformes en intensité.

3. Application en Imagerie de phase quantitative

Nous présenterons quelques développements récents de la microscopie de phase quantitative. En particulier, nous montrerons que les aspects dynamiques de ce signal de phase traduisent des flux de matière, et permettent de révéler de nouveaux contrastes, étroitement liés au métabolisme cellulaire [3]. Ensuite, nous présenterons une nouvelle technique d'amplification du signal de phase par filtrage dans l'espace de Fourier qui permet d'améliorer d'un ordre de grandeur le rapport signal sur bruit des images de phase sans perte de quantitativité.

Références

1. Bon et al, *Quadriwave lateral shearing interferometry for quantitative phase microscopy of living cells*, Optics Express, 2009
2. Berto et al, *Wavefront sensing with a thin diffuser*, Optics Letters, 2017
3. Apelian et al, *Dynamic full field optical coherence tomography: subcellular metabolic contrast revealed...*, Biomed. Opt. Express, 2016

Nouveautés en microscopie interférométrique : spectroscopie locale, microsphères et chambres environnementales

P.C. Montgomery, F. Anstötz, S. Marbach, H. Mukhtar, S. Lecler et M. Flury
ICube, UMR 7357, Univ. de Strasbourg-CNRS-INSA, 300 Blvd. Sébastien Brant, 67412 Illkirch, France.

paul.montgomery@unistra.fr

A. Rubin et A. Shpiruk

Institut Charles Sadron (ICS), UPR22, CNRS, 23 rue du Loess, 67037 Strasbourg, France.

M. Del Nero et R. Barillon

IPHC, UMR7178, CNRS-Université de Strasbourg, 23 rue du Loess, 67037 Strasbourg, France.

La microscopie interférométrique, ou l'interférométrie en lumière blanche, est plutôt connue pour la mesure de topographie des matériaux [1]. Dans ce papier, nous proposons nos dernières contributions afin d'étendre la technique à plusieurs nouveaux modes de mesure. La spectroscopie locale permet la mesure des propriétés locales à la surface et enterrées dans les couches transparentes [2]. Des résultats sur une couche d'or sur un substrat d'aluminium, donnent un cube spectral qui peut être utilisée pour extraire les différentes réponses spectrales à des longueurs d'ondes spécifiques sur une surface ou en fonction de la longueur d'onde à des points spécifiques de l'image. La technique peut être utilisée à la surface ou sur des structures enterrées dans une couche transparente, et aussi pour mesurer localement l'indice de réfraction et l'épaisseur de la couche. L'utilisation de microsphères en verre permet d'améliorer la résolution latérale : des résultats sur des microstructures ont montré une amélioration d'au moins deux fois de la résolution [3]. Néanmoins, le champ de vue pour une mesure est réduit à 1/5 du diamètre de la microsphère (typiquement entre 20-150 μm). Nous avons également développé des nouvelles solutions pour faciliter leurs utilisations.

Enfin, l'emploi de chambres environnementales permet la mesure de paramètres spécifiques, le premier exemple étant le contrôle de la pression, la température et l'humidité pour la mesure des propriétés mécaniques de films polymères ultra-minces, comme les phénomènes de déformation sur des nano-bulles [4]. Un des résultats montre une corrélation forte entre l'humidité et la complaisance de fluage avec la preuve que l'humidité agit comme un plastifiant. Un autre système permet de contrôler automatiquement le dépôt de microgouttes sur un substrat pour mesurer les propriétés de séchage des polymères. Le troisième système consiste en un microscope à immersion pour l'étude de changements dans une couche de colloïdes immergé dans l'eau en présence de polluants. Les résultats démontrent que la microscopie interférométrique en lumière blanche peut être utilisée pour la caractérisation plus complète de petites structures et de matériaux inhomogènes.

Références

- [1] de Groot, P. (2015). Interference Microscopy for Surface Structure Analysis. In Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications, Yoshizawa T., Ed., CRC Press: Boca Raton USA, 31, 791-828
- [2] Marbach S., Claveau R., Fangting W., Schiffler J., Montgomery P. C. & Flury M. (2021). Wide-field parallel mapping of local spectral and topographic information with white light interference microscopy. *Opt. Letts.*, 46, 4, 809-812.
- [3] Perrin S., Montgomery P. & Lecler S. (2022). Microsphere-assisted interference microscopy. In Roadmap on Label-Free Super-Resolution Imaging, Ed V. Astratov V. Ed. *Laser & Photonics Reviews*, Wiley-VCH GmbH, Weinheim, Germany.
- [4] Chapuis P., Montgomery P. C., Anstötz F., Leong-Hoi A., Gauthier C., Baschnagel J., Reiter G., McKenna G. B., Rubin A. (2017). A novel interferometric method for the study of the viscoelastic properties of ultra-thin polymer films determined from nanobubble inflation. *Rev. Sci. Inst.*, 88, 9, 093901.

Imagerie holographique en régime non linéaire pour l'étude de nanostructures résonantes

Serena Goldmann, Yannick De Wilde

Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, 75005 Paris France

serena.goldmann@espci.fr, yannick.dewilde@espci.fr

Gilles Tessier

Sorbonne Université, INSERM, CNRS, Institut de la Vision, 17 rue Moreau, 75012, Paris

gilles.tessier@sorbonne-universite.fr

L'holographie numérique est une technique d'imagerie permettant la reconstruction en 3 dimensions d'un champ électromagnétique diffracté par un objet, en amplitude et en phase. Nous avons démontré son utilisation en microscopie pour la cartographie complète en 3D du champ diffracté par des nanostructures uniques telles que des nano-antennes [1] et des pointes de champ proche [2]. L'holographie est un procédé interférentiel, qui peut être obtenu à la longueur d'onde d'illumination du laser, mais aussi à l'aide de Génération de Seconde Harmonique (SHG) puisque cette dernière est produite par un processus cohérent [3,4].

Nous décrivons ici le développement d'un microscope numérique holographique harmonique pour la cartographie du diagramme de rayonnement à la seconde harmonique en 3D au voisinage de l'échantillon à partir d'une unique image. Connaître le champ diffracté, en amplitude et en phase, dans un plan donné (celui de la caméra), permet de le reconstruire dans tout autre plan, en utilisant par exemple la représentation du spectre angulaire des champs optiques [5] et en supposant que la propagation se fait dans un milieu homogène, un procédé nommé rétro-propagation 3D numérique [6].

En plus de fournir une reconstruction 3D, et ainsi de repousser les possibilités d'imagerie au-delà de celle de l'imagerie en plan focal arrière, le microscope holographique harmonique bénéficie également des effets d'amplification [7] puisque le signal de l'échantillon est multiplié par une référence intense dans le terme d'interférence, en faisant une méthode particulièrement adaptée à la mesure de faibles signaux SHG produits par des nanostructures métalliques [8].

Suite à une première validation sur des échantillons diélectriques faits de micro-cristaux non linéaires et sur du collagène de cornée [9], nous implémentons actuellement cette méthode pour étudier le champ SHG rayonné par des nano-antennes plasmoniques.

Ce travail est également réalisé en collaboration avec S. Grésillon et I. Izeddin (Institut Langevin) et Dangyuan Lei (City University of Hong Kong).

Références

- [1] Suck, S. Y.; Collin, S.; Bardou, N.; De Wilde, Y.; Tessier, G. 2011. Optics Letters, 36, 849–851
- [2] Rahbany, N., Izeddin, I., Krachmalnicoff, V., Carminati, R., Tessier, G., De Wilde, Y. 2018. ACS Photonics, 5, 1539–1545.
- [3] Pu Y., Centurion M., Psaltis D. 2008. Applied Optics, 47, A103–A110.
- [4] Shaffer E., Pavillon N., Kühn J., Depeursinge C. 2009. Optics Letters, 34, 2450–2452
- [5] Novotny, L., and Hecht, B. Principles of Nano-optics. 2006. Cambridge University Press.
- [6] Hu, C., Field, J.J., Kelkar, V. et al. Harmonic optical tomography of nonlinear structures. Nat. Photonics 14, 564–569
- [7] Gross, M., Atlan, M. 2007. Optics Letters, 32, 909–911
- [8] Slablab, A., Le Xuan, L., Zielinski, M., De Wilde, Y., Jacques, V., Chauvat, D., Roch, J.-F., 2012. Optics Express 20, 220–227
- [9] S. Goldmann, G. Tessier, Y. De Wilde, et al., in preparation.

Contrôle en ligne du procédé de fusion de lit de poudre par holographie numérique à deux longueurs d'onde

Béatrice Sorrente

DOTA, ONERA, Université Paris Saclay, 91123 Palaiseau, France

beatrice.sorrente@onera.fr

Matthieu Piniard

Naval Group, Nantes, France

matthieu.piniard@naval-group.fr

Pascal Picart

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans, CNRS 6613, Institut d'Acoustique – Graduate School (IAGS), Le Mans Université, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France

pascal.picart@univ-lemans.fr

La fabrication additive, communément appelée Impression 3D, est une technologie clé pour la fabrication de pièces aux géométries complexes qui ne peuvent être réalisées avec des procédés d'usinage conventionnels. Le procédé de fusion du lit de poudre par faisceau laser (LPBF) est le procédé le plus considéré dans l'industrie. Cependant, l'un des principaux obstacles au déploiement de cette technique est le manque de fiabilité et de qualification dû principalement aux instabilités du bain de fusion qui vont générer des défauts lors de l'interaction laser-poudre. Il apparaît donc crucial de contrôler en ligne au niveau de chaque couche le processus de fusion. Dans cet article, les auteurs présentent un instrument d'holographie numérique à deux longueurs d'onde dédié à la mesure in-situ et temps-réel de la topographie du bain de fusion de poudres métalliques. Ce dispositif optique à haute résolution spatiale a été implanté sur un banc de fabrication additive de laboratoire de type LPBF. Le bain de fusion présente une hétérogénéité d'états avec des zones en phase liquide et d'autres en phase de solidification, ce qui conduit à une grande hétérogénéité de rugosité. Par ailleurs sa topographie est caractérisée par une grande dynamique de pentes locales. Un modèle analytique décrivant l'évolution du module du facteur de cohérence en fonction de la rugosité et de la pente a été établi [1]. Cette expression permet d'évaluer la qualité de reconstruction de la phase et d'estimer le bruit de phase de speckle qui conditionne la résolution des surfaces reconstruites. Les mesures préliminaires valident la faisabilité de la mesure. A partir d'une acquisition et de la reconstruction d'hologrammes, la morphologie de cordons d'aluminium solidifiés et de bain de fusion obtenus sur une plaque de 316L en régime quasi-spéculaire est observée en plein-champ [2]. Des perspectives sont données afin d'améliorer le dispositif de contrôle.

Références

- [1] M Piniard, B Sorrente, G Hug, P Picart (2021). Theoretical analysis of surface-shape-induced decorrelation noise in multi-wavelength digital holography. *Optics Express* 29(10), 14720–14735.
- [2] M. Piniard, B. Sorrente, G. Hug, P. Picart (2022), Melt pool monitoring in laser beam melting with two-wavelength holographic imaging. *Light: Advanced Manufacturing* 3(1), 1–12.

Mesure de viscosité par analyse de la rotation de nanobâtonnets par holographie hétérodyne

Clémence Gentner, Robert Kuszelewicz, Pascal Berto, and Gilles Tessier

Institut de la Vision, UMR 7210 CNRS, INSERM, Sorbonne Université, 17 Rue Moreau,
F-75012 Paris, France. gilles.tessier@sorbonne-universite.fr

Jean-François Berret,

Matière et Systèmes Complexes, UMR 7057 CNRS, Université Denis Diderot Paris-VII,
Bâtiment Condorcet, 10 rue Alice Domon et Léonie Duquet, 75205 Paris

En biologie comme en microfluidique, de nombreux processus dépendent de la viscosité locale. Pour sonder les propriétés viscoélastiques de cellules, les méthodes de microrhéologie [1] sont nombreuses (AFM, ondes acoustiques de surface, aspiration par micropipettes ou encore Diffusion Dynamique de la Lumière - DLS). A l'intérieur des cellules, des transducteurs magnétiques permettent aujourd'hui des mesures, même si leur taille (typ. 10 μm) est proche de celle de la cellule [2].

Pour diminuer de près d'un ordre de grandeur la taille des sondes, nous proposons ici d'utiliser des nanobâtonnets (100 à 200 nm) dont la rotation se traduit par une variation de l'intensité optique diffusée, un clignotement. L'holographie numérique hétérodyne permet de mesurer ce clignotement jusqu'à plusieurs kHz, mais aussi de (super)localiser leur position avec une précision nanométrique [3].

Nous présenterons des mesures effectuées à l'aide de bâtonnets d'or en mouvement Brownien [4]. La viscosité du milieu est alors révélée par le spectre de rotation aléatoire de ces objets : lent dans les milieux visqueux et rapide dans des liquides fluides.

Avec des bâtonnets magnétiques mis en rotation par un champ magnétique tournant, des mesures plus rapides sont possibles : la viscosité est alors révélée par la fréquence de coupure à partir de laquelle les bâtonnets cessent de suivre la rotation du champ magnétique.

Nous présenterons des mesures de viscosité effectuées à l'aide de ces deux méthodes, Brownienne ou magnétique, dans différents milieux, avant de discuter de la résolution spatiale 3D permise par la super localisation de particules uniques.

Références

1. F. Ortega, H. Ritacco, R. G. Rubio, Current Opinion in Colloid and Interface Science 15, 237–245 (2010).
2. J. F. Berret, Nature Communications 7 (2016).
3. S. Y. Suck, S. Collin, N. Bardou, Y. De Wilde, G. Tessier, Optics Letters 36, 849 (2011).
4. C. Gentner, R. Kuszelewicz, P. Berto, H. Khelifa, G. Tessier, Optics Express 29, 527 (2021).
7. M. Atlan et al., Optics Letters 33, 500 (2008).

Mesure simultanée d'un champ acoustique et d'un écoulement aérodynamique dans un conduit par holographie numérique

Torea BLANCHARD, Thomas HUMBERT, Pascal PICART, Gwénaél GABARD
Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans, CNRS 6613, Institut d'Acoustique – Graduate School (IA-GS), Le Mans Université, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France

torea.blanchard@univ-lemans.fr, pascal.picart@univ-lemans.fr,
thomas.humbert@univ-lemans.fr, gwenael.gabard@univ-lemans.fr

Le développement de nouveaux absorbants acoustiques adaptés aux futures générations de moteurs fait l'objet d'un enjeu majeur pour la filière aéronautique. Pour cela, il est nécessaire, à un moment du processus, d'être en mesure de pouvoir caractériser expérimentalement ces matériaux dans des conditions contrôlées et réalistes. Dans ce contexte, des méthodes optiques comme la PIV (*Particle Image Velocimetry*) ou la LDV (*Laser Doppler Velocimetry*) ont été utilisées dans un cadre aéro-acoustique, par exemple, pour l'éduction d'impédance de matériaux positionnés en parois de conduit, ou bien encore pour retrouver les propriétés de couche limite dans un écoulement. Une des contraintes de ces méthodes est l'utilisation d'encensement (fumée, huile, bulles de savon) qui détériore au fil du temps les installations expérimentales et dégradent leurs performances. Le choix de l'interférométrie holographique numérique a donc rapidement porté un grand intérêt en raison de sa capacité à mesurer une large diversité de phénomènes physiques sans contact et sans intrusion, et en particulier celui de mesurer les fluctuations de densité de fluide qui sont étroitement liées aux variations de l'indice de réfraction du milieu traversé par le faisceau optique de mesure.

Le montage expérimental retenu est basé sur la configuration d'interféromètre de Mach-Zehnder pour lequel un des faisceaux optiques traverse un guide d'ondes (transparent). Bien que ce dispositif peut présenter une forte sensibilité aux vibrations mécaniques générées par une source extérieure (type haut-parleur), il a néanmoins démontré son efficacité pour la mesure des fluctuations de densité de fluide dans des guides d'ondes [1]. De plus, le traitement numérique de séquences temporelles d'hologrammes peut conduire à la fois à l'amplitude et à la phase du champ acoustique [2]. Couplée avec des méthodes de traitement d'images comme la DIC (*Digital Image Correlation*), cette étude expérimentale vise à montrer la possibilité d'utiliser l'holographie numérique comme outil de mesure simultanée du champ acoustique et de la vitesse de l'écoulement aérodynamique d'un fluide dans un guide d'ondes.

Le système holographique est implanté sur une veine test avec un guide d'onde excité par une source acoustique et soumis à un écoulement aérodynamique. A partir d'une séquence temporelle d'hologrammes enregistrée à grande cadence de caméra, le traitement numérique des hologrammes permet d'accéder aux deux quantités recherchées : fluctuation de pression acoustique et vitesse d'écoulement. Nous présenterons le principe et la preuve de concept avec les premiers résultats expérimentaux.

Références

- [1] L. Gong, "Développement et Application de l'Interférométrie Holographique Numérique pour l'Acoustique et la Thermoacoustique," Thèse, Le Mans Université, (2018).
- [2] S. Hassad, K. Ferria, L. Bouamama, and P. Picart, "Multi-View Acoustic Field Imaging With Digital Holography," *Frontiers in Photonics* (2022).