

**Titre de la thèse :** Nouvelles méthodes d'imagerie non-conventionnelle à base d'architecture à réseaux de neurones profonds non-supervisés en microscopie holographique numérique

**Laboratoire d'accueil :** Institut FEMTO-ST département Optique

**Spécialité du doctorat préparé :** milieux dilués et optique fondamentale

**Mots-clefs :** Holographie numérique pour la microscopie, réseaux de neurones non supervisés, *Physics-driven Learning*, microscopie automatisée temps réelle.

**Descriptif détaillé de la thèse :**

Introduction / contexte : Ces dernières années, de nouveaux enjeux pour explorer des approches inédites en imagerie computationnelle ont émergé. Ils visent à développer de nouvelles techniques d'imageries avancées capables de réaliser des tâches de plus en plus complexes (multi-échelles, superrésolution...) en temps réel. L'holographie numérique (HN) constitue la technique d'imagerie cohérente la plus efficace pour effectuer des mesures en microscopie automatisée pour des applications en biologie, en microrobotique ou pour la caractérisation de composants photoniques. Il est, en effet possible, par HN de réaliser de la microscopie à contraste de phase quantitative ou de l'autofocalisation sans déplacement mécanique. Ces dernières années, l'intelligence artificielle (IA) a permis d'augmenter significativement les performances des techniques d'imagerie computationnelle et de vision par ordinateur grâce aux architectures de réseaux neuronaux artificiels profonds. Les sous-classes les plus connues de ces architectures sont les réseaux neuronaux avancés tels que les réseaux neuronaux convolutifs (CNN), largement appliqués à la vision par ordinateur et au traitement d'images. Le récent regain d'intérêt pour l'apprentissage profond s'est étendu à diverses communautés scientifiques, allant des neurosciences et de l'informatique à la physique. De manière plus générale, l'IA est devenue un thème central au cœur de la recherche multidisciplinaire combinant les sciences des données, les sciences de l'ingénieur et la physique instrumentale.

Travaux envisagés : le travail consistera à développer des approches d'holographie numérique pour la microscopie intégrant sur la couche physique des réseaux de neurones selon des entraînements non supervisés, qualifiés approches "physics-driven learning". L'originalité de l'approche est très différente des entraînements supervisés, par « data-driven learning » qui nécessitent énormément de jeux de données entrée/sortie pour la phase d'entraînement [1]. Les nouvelles architectures de type autoencoder proposent une partie en deep neural network (codeur) et une couche physique (décodeur), qui dans le cas de l'holographie numérique repose sur la propagation par spectre angulaire d'ondes planes [2]. Ainsi le réseau peut s'auto-entraîner à partir de jeux de données uniquement ou partiellement simulées. C'est aussi un moyen efficace d'accéder au temps réel [3]. Un autre aspect original du sujet concerne la réalisation sur la couche physique à partir de modulateurs spatiaux de lumière pour l'étape de décodage afin de développer un premier dispositif expérimental capable d'intégrer un fonctionnement du type *machine learning* photonique réel, et non uniquement numérique.

**Références bibliographiques :**

[1] Stéphane Cuenat, Louis Andréoli, Antoine N. André, Patrick Sandoz, Guillaume J. Laurent, Raphaël Couturier, and Maxime Jacquot, "Fast autofocusing using tiny transformer networks for digital holographic microscopy," *Opt. Express* 30, 24730-24746 (2022)

[2] Zonghua Liu, Thangavel Thevar, Tomoko Takahashi, Nicholas Burns, Takaki Yamada, Mehul Sangekar, Dhugal Lindsay, John Watson, and Blair Thornton, "Unsupervised feature learning and clustering of particles imaged in raw holograms using an autoencoder," J. Opt. Soc. Am. A 38, 1570-1580 (2021)

[3] Zhenxing Dong, Chao Xu, Yuye Ling, Yan Li, and Yikai Su, "Fourier-inspired neural module for real-time and high-fidelity computer-generated holography," Opt. Lett. 48, 759-762 (2023)

**Profil demandé** : Titulaire Master en Physique/Optique & Photonique ou équivalent. Compétences en instrumentation optique avancée : microscopie optique, holographie, acquisition sur caméra CMOS/CCD et compétences en modélisation numérique : diffraction en théorie scalaire, traitement d'images.

**Financement** : MESRI établissement

Dossier à envoyer pour le 15 juin 2023

Début du contrat : 01/10/2023

**Direction** : Maxime Jacquot

**Courriel** : [maxime.jacquot@univ-fcomte.fr](mailto:maxime.jacquot@univ-fcomte.fr)

**PhD title:** New methods for unconventional imaging based on unsupervised deep neural network architecture in digital holographic microscopy

**Host laboratory:** FEMTO-ST Institute - Optics Department

**Speciality of PhD:** diluted media and fundamental optics

**Keywords:** Digital holographic microscopy, unsupervised neural networks, Physics-driven Learning, automated real-time microscopy

**Job description:** Introduction / background: In recent years, new challenges to explore novel approaches in computational imaging have emerged. They aim to develop new advanced imaging techniques capable of performing increasingly complex tasks (multi-scale, super-resolution...) in real time. Digital holography (DH) is the most efficient coherent imaging technique for automated microscopy measurements for applications in biology, microrobotics or for the characterisation of photonic components. It is, in fact, possible to perform quantitative phase contrast microscopy or autofocusing without mechanical displacement using HN. In recent years, artificial intelligence (AI) has significantly increased the performance of computational imaging and computer vision techniques through deep artificial neural network architectures. The best known subclasses of these architectures are advanced neural networks such as convolutional neural networks (CNNs), which are widely applied to computer vision and image processing. The recent revival of interest in deep learning has spread to various scientific communities, ranging from neuroscience and computer science to physics. More generally, AI has become a central theme at the heart of multidisciplinary research combining data sciences, engineering sciences and instrumental physics.

Planned work: The work will consist of developing digital holography approaches for microscopy integrating neural networks on the physical layer according to unsupervised learning, called "physics-driven learning" approaches. The originality of the approach is very different from supervised learning by "data-driven learning" which requires a lot of input/output data sets for the training phase [1]. The new autoencoder architectures offer a deep neural network part (encoder) and a physical layer (decoder), which in the case of digital holography is based on the angular spectrum method approach [2]. Therefore, the network can self-train from only or partially simulated data sets. It is also an efficient way to access real time [3]. Another original aspect of the subject concerns the realisation of the physical layer using spatial light modulators for the decoding step in order to develop a first experimental device capable of integrating a real photonic machine learning type of operation, and not only numerical.

**Bibliography:**

[1] Stéphane Cuenat, Louis Andréoli, Antoine N. André, Patrick Sandoz, Guillaume J. Laurent, Raphaël Couturier, and Maxime Jacquot, "Fast autofocusing using tiny transformer networks for digital holographic microscopy," *Opt. Express* 30, 24730-24746 (2022)

[2] Zonghua Liu, Thangavel Thevar, Tomoko Takahashi, Nicholas Burns, Takaki Yamada, Mehul Sangekar, Dhugal Lindsay, John Watson, and Blair Thornton, "Unsupervised feature learning and clustering of particles imaged in raw holograms using an autoencoder," *J. Opt. Soc. Am. A* 38, 1570-1580 (2021)

[3] Zhenxing Dong, Chao Xu, Yuye Ling, Yan Li, and Yikai Su, "Fourier-inspired neural module for real-time and high-fidelity computer-generated holography," *Opt. Lett.* 48, 759-762 (2023)

**Applicant profile:** Master degree in Physics/Optics & Photonics or equivalent. Skills in advanced optical instrumentation: optical microscopy, holography, CMOS/CCD camera acquisition and numerical modelling skills: diffraction in scalar theory, image processing.

**Financing Institution: MESRI**

**Application deadline:** June 15<sup>th</sup> 2023

**Start of contract:** October 1<sup>st</sup> 2023

**Thesis Supervisor: Maxime Jacquot**

**Email: [maxime.jacquot@univ-fcomte.fr](mailto:maxime.jacquot@univ-fcomte.fr)**