

Construire un système d'imagerie 3D de tomographie par cohérence optique (OCT)

Gaël LATOUR^{1,2}

¹ Université Paris-Saclay, Faculté des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette, France

² Laboratoire d'Optique et Biosciences, Ecole Polytechnique-IPParis, CNRS, Inserm, 91128 Palaiseau, France

*gael.latour@universite-paris-saclay.fr



© M. Reich, Univ. Paris-Saclay

Les étudiants ont la fierté de construire - de toute pièce - un microscope produisant des images tridimensionnelles (3D) d'objets transparents ou faiblement diffusants. Le projet laisse le temps aux étudiants de progresser en toute autonomie et de surmonter les difficultés théoriques et expérimentales rencontrées. Leur rigueur et leur ténacité sont récompensées par la beauté des films 3D qu'ils réalisent avec leur propre microscope.

<https://doi.org/10.1051/photon/202211421>

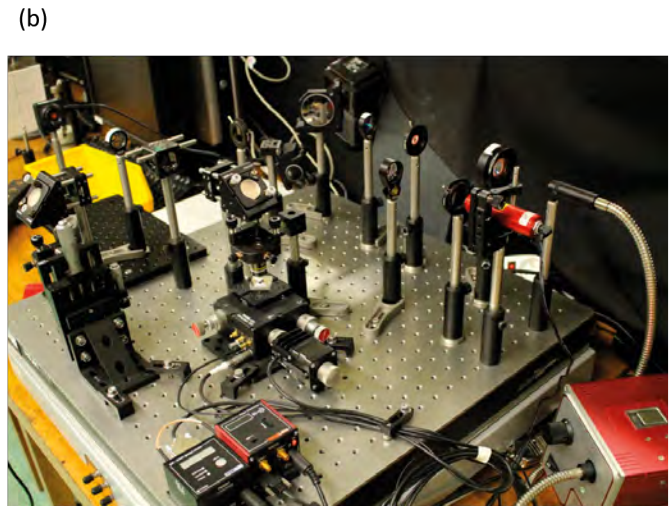
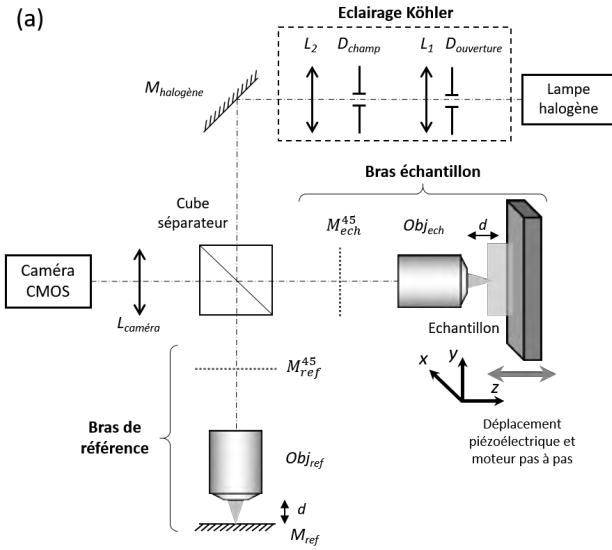
Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Les séances expérimentales comportent généralement des objectifs clairs pour l'équipe pédagogique, toutefois, les étudiantes et les étudiants ne les perçoivent pas toujours. Deux raisons peuvent être identifiées : des énoncés parfois très détaillés, avec de nombreuses questions et des protocoles complets, et la durée contrainte des séances expérimentales (généralement de quelques heures à une journée). Peu de place est alors laissée à la réflexion et au recul nécessaires à la pratique expérimentale, intrinsèquement constituée d'essais et erreurs successifs. Cet aspect peut être amplifié dans le cas où les étudiants doivent rendre un compte-rendu à l'issue de la séance. Par ailleurs, le matériel pédagogique

utilisé en enseignement présente diverses limitations (éléments de qualité moyenne ou obsolètes, quelques fois peu compatibles entre eux, hétéroclites). C'est alors parfois source de frustration chez les étudiants qui ne peuvent pas toujours pousser les capacités de leurs réalisations expérimentales dans leurs retranchements : les étudiants constatent que les limitations des résultats obtenus sont liées au matériel disponible et non à leur habileté expérimentale. Ces séances expérimentales peuvent alors échouer à transmettre le goût de la physique expérimentale. À travers la mise en place de ce projet expérimental d'optique consacré à la construction et à l'utilisation d'un système d'imagerie de tomographie par

cohérence optique (OCT), les objectifs pédagogiques sont les suivants :

- Transmettre la passion de la physique expérimentale, et plus particulièrement de l'optique, et faire éprouver par la pratique les qualités de rigueur et de ténacité nécessaires à ce travail.
- Montrer la diversité des concepts optiques nécessaires pour la compréhension, la réalisation, l'alignement et l'utilisation d'un montage optique.
- Développer l'implication, l'autonomie, le regard critique et la prise d'initiative des étudiants en leur laissant le temps nécessaire pour surmonter les difficultés théoriques et expérimentales rencontrées, permettant une appropriation complète du projet.



Une technique d'imagerie en plein essor : la tomographie par cohérence optique

Inventée il y a une trentaine d'années [1], la tomographie par cohérence optique (OCT) permet d'accéder à une imagerie tridimensionnelle (3D) non invasive, non-destructive et sans marquage. Il s'agit d'une imagerie morphologique avec une résolution de l'ordre du micromètre pour des objets transparents ou faiblement diffusants [2]. Son application la plus connue est l'imagerie biomédicale en ophtalmologie. Elle permet en effet de réaliser le diagnostic de nombreuses pathologies rétinienne et du segment antérieur de l'œil. Les applications s'étendent désormais à la dermatologie, la cardiologie ou l'oncologie ainsi qu'à

l'analyse non destructive des objets anciens et patrimoniaux [2-3].

La tomographie par cohérence optique est basée sur l'utilisation d'un interféromètre de Michelson avec une source de lumière blanche. La faible cohérence temporelle d'une telle source assure une forte localisation des franges d'interférences. Le faible étalement des franges

d'interférence permet d'atteindre pour ce système d'imagerie une résolution de l'ordre du micromètre selon l'axe dédié à la profondeur (voir encart sur le principe de la tomographie par cohérence optique). L'utilisation d'objectifs de microscope vise à améliorer la résolution latérale des images. L'objectif de ce projet en optique expérimentale pour les étudiants est

Figure 1. Montage expérimental réalisé par les étudiantes et les étudiants.

(a) Schéma optique du montage de tomographie par cohérence optique plein champ, tel que présenté dans l'énoncé du projet expérimental.

(b) Photo du montage final réalisé par les étudiants à l'issue du projet.

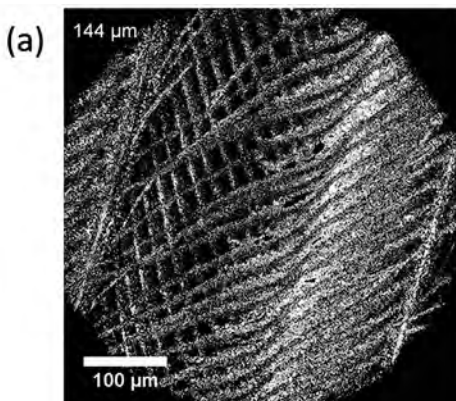
© M. Relid, Univ. Paris-Saclay.

Figure 2. Images OCT obtenues par les étudiantes et les étudiants dans le cadre du projet expérimental.

(a) Image plein champ, vue en face (plan x-y), d'une plume.

(b) Coupe transverse (x-z) d'une couche de vernis (interface lisse sur la partie supérieure) sur du bois (structures diffusantes sur la partie inférieure de l'image).

(c) Coupe transverse d'une feuille avec l'observation de différentes couches de cellules végétales.



Inventée il y a une trentaine d'années [1], la tomographie par cohérence optique (OCT) permet d'accéder à une imagerie tridimensionnelle (3D) non invasive, non-destructive et sans marquage. Il s'agit d'une imagerie morphologique avec une résolution de l'ordre du micromètre pour des objets transparents ou faiblement diffusants [2].

d'assembler, aligner, régler et caractériser ce système d'imagerie de pointe en partant d'une table optique quasiment vide et en utilisant du matériel optique et opto-mécanique identique à celui présent dans les laboratoires de recherche ou en recherche et développement en entreprise. L'ensemble du matériel a été acquis pour cet enseignement afin d'avoir le meilleur compromis entre performance et coût. Le budget par montage est de l'ordre de 10k€.

Le montage et l'alignement de ce dispositif d'imagerie permettent de mobiliser, d'évaluer et d'approfondir de nombreux aspects fondamentaux de l'optique enseignés à l'université[4] :

- L'optique géométrique : conception d'un microscope, réalisation et alignement d'un éclairage Köhler, imagerie par une caméra CMOS.
- L'optique ondulatoire : interféromètre de Michelson, cohérence temporelle, transformée de Fourier.
- L'imagerie numérique et la métrologie optique : champ de vue, temps d'exposition, échantillonnage, résolutions, sensibilité.

Construire son microscope tomographique

Le projet expérimental se déroule sur trois journées complètes, soit 24h pour les étudiants [5]. L'objectif de la première journée est de poser les bases liées à l'interférométrie et aux propriétés de cohérence temporelle avec une première approche classique des concepts liés à l'interférométrie en lumière blanche en utilisant un montage pédagogique de l'interféromètre de Michelson. Les étudiantes et les étudiants sont ainsi sensibilisés à la finesse des alignements et réglages attendus. Lors de la deuxième journée, les étudiants construisent eux même leur dispositif OCT en intégrant progressivement tous les éléments du montage sur une table optique. Les principales étapes de la réalisation de ce montage sont la réalisation et l'alignement d'un interféromètre de Michelson, la conception d'un éclairage de Köhler, la détermination du contact optique, l'intégration d'objectifs de microscope et la conjugaison du plan de l'objet étudié avec une caméra *via* une lentille de tube (figure 1a). Ces différentes étapes permettent d'identifier clairement le ●●●



La tomographie par cohérence optique en un coup d'œil

Angelica Compatangelo¹, Rebecca Charboneau²

¹ Technical Marketing Manager

² Solutions Engineer, Edmund Optics

Qu'est-ce que c'est l'OCT ?

La tomographie par cohérence optique (OCT) est une technologie d'imagerie optique en temps réel, sans contact et à haute résolution, utilisée pour obtenir des images 2D ou 3D des échantillons.

Dans une configuration typique de l'OCT, une source de lumière à faible cohérence est dirigée et focalisée simultanément vers un échantillon et un miroir optique de référence à l'aide d'un séparateur de faisceau et des lentilles optiques. La lumière dispersée par chaque cible est recombinaison par le séparateur de faisceau et elle produit une image d'interférence relayée vers un détecteur, produisant ainsi une image de l'échantillon.

Applications de l'OCT

Bien qu'elle soit également utile en métrologie dimensionnelle et en conservation des œuvres d'art, la principale application de l'OCT se situe dans le secteur médical. Le plus souvent, l'OCT est utilisée en ophtalmologie pour mieux diagnostiquer les maladies de l'œil, mais elle peut également être utilisée en cardiologie pour visualiser les plaques artérielles et ainsi prédire la probabilité d'une crise cardiaque.

Tendances en matière d'OCT

Ces dernières années, les efforts se sont concentrés sur l'amélioration de l'accessibilité de l'OCT, qui est généralement effectuée à l'aide de machines grandes et coûteuses, en mettant cette technologie à disposition sous forme de dispositifs de diagnostic sur le lieu de soins dans les pays en développement ainsi que dans les populations croissantes et vieillissantes des pays développés. Du coup, il convient de réfléchir au choix de l'optique : l'utilisation de composants standards, d'asphères ou de filtres en verre coloré peut être une stratégie efficace pour réduire les dimensions et le coût global du système.

Dans tous les cas, il est important de faire appel à un fabricant qui connaît bien la matière et qui est en mesure de conseiller et de soutenir à chaque étape du développement et de la production.

Edmund Optics est l'un des principaux fournisseurs et fabricants mondiaux de composants optiques standards et personnalisés, avec plus de 80 ans d'expérience dans le domaine de l'optique. ●

rôle de chacun des éléments dans ce montage complexe.

Une fois le montage finalisé (figure 1b), la troisième journée a pour vocation d'apprendre à régler les paramètres des éléments contrôlés informatiquement (déplacement *via* un moteur pas à pas et une platine piézo-électrique et prise d'images avec caméra). Il est alors possible de caractériser le système d'imagerie et de comparer ses performances à celles attendues théoriquement.

Les étudiantes et les étudiants profitent alors de leur système pour réaliser les images tomographiques d'objets de leur choix (voir figure 2) tout en se confrontant à la complexité des paramètres d'acquisition, en particulier dans le cas d'acquisition de données 3D.

Enseigner l'optique expérimentale dans l'enseignement supérieur

L'expérience de ce projet expérimental, les échanges au sein de l'équipe pédagogique et les retours des étudiants sur la base de questionnaires d'évaluation permettent d'identifier les forces de ce projet expérimental. Ce sont également des pistes de réflexion pour la conception de futurs enseignements en optique expérimentale. La construction d'un système d'imagerie de bout en bout permet aux étudiantes et étudiants de prendre conscience de leur capacité à construire un système d'imagerie complexe à partir de leurs connaissances et de leurs savoir-faire,

au-delà de la simple étude ou vérification de lois physiques. L'aspect ludique d'un montage sur une table optique, avec les nombreux réglages possibles, leur plaît, malgré les difficultés. Le plaisir est amplifié par la qualité du matériel qui permet une souplesse et une précision rarement atteintes dans les expériences pédagogiques. La limitation de leurs résultats est alors liée à leur habileté expérimentale et non au matériel disponible.

Enfin, la présence du numérique à travers l'acquisition et le traitement des images montre les différentes facettes des expériences optiques actuelles. Ce type de projet permet ainsi une autre approche de l'enseignement de l'optique avec la mobilisation de nombreux savoirs et les savoir-faire en optique expérimentale.

PRINCIPE DE LA TOMOGRAPHIE PAR COHÉRENCE OPTIQUE

Les systèmes de tomographie par cohérence optique (OCT) sont basés sur le principe de l'interférométrie en lumière blanche, c'est-à-dire en utilisant une source de lumière à faible cohérence temporelle [2]. Le montage optique est constitué d'un interféromètre de Michelson où l'extrémité de l'un des bras est mobile. En faisant varier la différence de marche, à proximité du contact optique, il est possible d'obtenir, en sortie de l'interféromètre une figure d'interférence. La largeur de l'interférogramme est liée aux propriétés de cohérence temporelle de la source. Moins la source est cohérente temporellement, c'est-à-dire qu'elle présente un large spectre, moins l'interférogramme sera étalé spatialement lors du déplacement de l'un des miroirs. Le principe de l'OCT est de tirer profit de ce faible étalement spatial. Ainsi, deux structures diffusantes ou deux interfaces successives dans la profondeur de l'échantillon vont donner lieu chacune à un interférogramme. S'il est possible de séparer ces deux interférogrammes, en recueillant l'enveloppe de ces deux interférogrammes, il est donc possible de résoudre la position spatiale de ces deux structures. La résolution axiale de l'OCT est donc directement liée à la cohérence temporelle de la source. En fonction des montages, les sources utilisées pour garantir cette faible cohérence temporelle peuvent être une lampe halogène, une diode électroluminescente (LED) ou un laser super-continuum blanc.

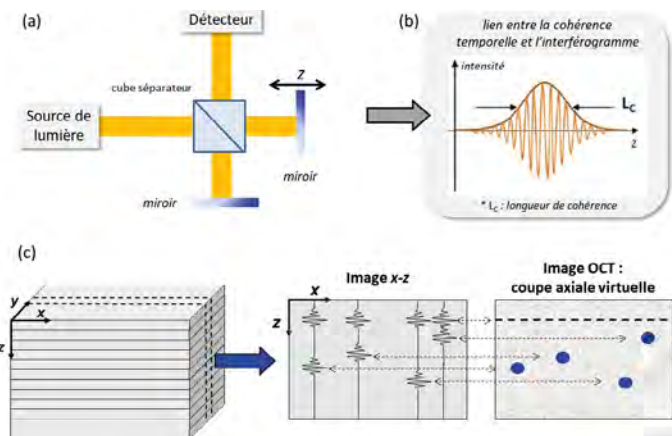


Figure. Principe de la tomographie par cohérence optique (OCT).

(a) Schéma de l'interféromètre de Michelson, avec un élément mobile à l'extrémité de l'un des bras pour varier la différence de marche entre les deux bras.

(b) Le déplacement de l'un des miroirs permet l'enregistrement de la figure d'interférences, également appelée interférogramme. La largeur de cet interférogramme est liée aux propriétés de cohérence temporelle de la source lumineuse.

(c) L'OCT dans le domaine temporel consiste à enregistrer un volume de données où chaque interférogramme est la signature d'une interface entre deux milieux ou d'une structure diffusante. En recueillant l'enveloppe de ces interférogrammes, il est possible de reconstruire l'image morphologique de l'échantillon étudié.

Le montage d'un système d'imagerie OCT permet de travailler sur de nombreux concepts et connaissances en optique qui sont étudiés tout au long d'un cursus universitaire. Du fait de leur part active dans ce projet, les étudiants acquièrent complètement les connaissances de base liées à cette technique d'imagerie. C'est également l'occasion d'illustrer que l'optique est un tout, malgré les découpages et les progressions conçues dans l'enseignement supérieur.

Conclusion

Le montage d'un système d'imagerie OCT permet de travailler sur de nombreux concepts et connaissances en optique qui sont étudiés tout au long d'un cursus universitaire. Du fait de leur part active dans ce projet, les étudiants acquièrent complètement les connaissances de base liées à cette technique d'imagerie. C'est également l'occasion d'illustrer que l'optique est un tout, malgré les découpages et les progressions conçues dans l'enseignement supérieur. De plus, ce projet s'inscrit sur une durée qui permet de faire entrevoir aux étudiants ce que peut être le travail expérimental en optique, que ce soit au sein d'un laboratoire académique ou dans l'industrie. Le retour des étudiants, documenté *via* des questionnaires d'évaluation, montre leur satisfaction à travers la fierté de construire entièrement un système d'imagerie

malgré les difficultés rencontrées, le plaisir d'utiliser du matériel de qualité, robuste et précis et la satisfaction d'obtenir des images de qualité. Ils se sentent ainsi réellement acteur de ce projet expérimental.

Remerciements

Ce projet expérimental a été conçu par Gaël Latour (*Université Paris-Saclay*), la conception des supports pédagogiques et l'évolution de ce projet ont été réalisés au sein d'une équipe d'enseignants-chercheurs de l'*Université Paris-Saclay* (Marie Godard, Vincent Guillet, Marion Jacquy, Gaël Latour). Cet enseignement est proposé depuis 2016 aux étudiants de M1 Physique Fondamentale et du M2 Ingénierie Optique de l'Université Paris-Saclay.

Cet enseignement a été financé par l'Université Paris-Saclay, le Labex PALM et l'entreprise Thorlabs. ●

RÉFÉRENCES

[1] D. Huang *et al.*, *Science* **254**, 1178 (1991)

[2] Dossier spécial OCT, *Photoniques* **95** (2019)

[3] G. Latour, L. Robinet, « La microscopie optique tridimensionnelle, de l'imagerie biomédicale à la caractérisation des objets du patrimoine, Instrumentation portable. Quels enjeux pour l'archéométrie ? », ed. Archives contemporaines (2019), <https://eac.ac/articles/2469>

[4] K. Pieper *et al.*, *Am. J. Phys.* **88**, 1132 (2020)

[5] Film de présentation du projet expérimental, réalisation M. Relid, <https://www.canal-u.tv/chaines/faculte-orsay/lumiere-sur-un-enseignement-innovant-construire-son-microscope-tomographique>

OPTIQUE ADAPTATIVE POUR L'IMAGERIE RÉTINIENNE IN VIVO OU HAUTE RÉOLUTION



la plus grande gamme de
produits d'optique adaptative
du marché



S'inscrire à une démo gratuite
contact@alpa0.com

ALPAO