1ere rencontre d'Interférométrie à Décalage MultiLatéral

11 et 12 mai 2023
DIGITEO Saclay
CEA Saclay, Bâtiment 565, 91191 Gif-sur-Yvette

Programme

Jeudi 11 Mai

Ouverture

09h30 – 10h15 – *Accueil des participants*

10h15 – 10h30 – *Mot introductif*
Comité Organisationnel

Session 1: Les fondamentaux

10h30 – 11h00 – *L'Interférométrie à Décalage MultiLatéral (IDML), les principes.*
Jean-Christophe Chanteloup
LULI

L'objet de cette première présentation est d'introduire l'interférométrie à décalage multilatéral en insistant sur les principes fondamentaux. Les principales applications seront aussi résumées, avec quelques réalisations emblématiques, en particulier dans le domaine originel, à savoir le contrôle et la mise en forme des faisceaux lasers intenses.

11h00 – 11h30 – *De l'intérêt de mesurer le front d'onde dans le plan d'imagerie d'un microscope*
Serge Monneret
Institut Fresnel

La mise au point d'analyseurs de front d'onde suffisamment résolus (nombre de points de mesure suffisant pour produire une image) nous a incité, en 2008, à placer un tel capteur dans le plan d'imagerie d'un microscope, de façon à extraire des cartes d'épaisseur optique des échantillons observés. Il s'agissait initialement de produire du contraste sur des échantillons biologiques, sans apporter les artefacts observés sur les techniques alors globalement utilisées (D.I.C., Zernike). Mais les propriétés remarquables de l'interférométrie à décalage quadrilatéral (achromatisme, quantification, stabilité) nous ont conduit à des résultats nettement plus valorisants, aboutissant à de nombreux domaines d'application qui seront traités par ailleurs dans ce colloque (mesure de masse sèche, accès à la température, aux propriétés optiques de nanoparticules, ...). Je propose ici de reprendre l'historique et les principaux concepts qui ont amené l'interférométrie à décalage quadrilatéral à devenir une technique de référence pour l'imagerie et plus spécifiquement la microscopie de phase quantitative. J'aborderai aussi l'extension de la méthode à l'utilisation de lumière polarisée, pour produire cette fois des cartes où le contraste est produit par la retardance optique de l'échantillon.

11h30 – 12h00 – *PISTIL*

Cindy Bellanger
ONERA

L'application de l'interférométrie à décalage quadri-latéral sur la surface d'onde segmentée régulière qu'est la pupille de sortie d'un laser à combinaison cohérente a fait apparaître une nouvelle famille d'analyseurs à décalage nommée PISTIL, pour PIStон et TILt interférométrie. Dédiée surface segmentée, l'idée est de comparer en une seule mesure, la surface d'onde de chaque segment, supposée plane, avec celle du segment voisin. Pour cela, on utilise un masque de trous assorti au réseau de diffraction bi-dimensionnel. La figure d'interférence obtenue après propagation est alors constituée d'un ensemble de petits réseaux de franges à deux ondes indépendants, représentatifs chacun de la différence de phase entre deux segments de surface d'onde adjacents. L'analyse de cette figure permet une métrologie simple et rapide de la surface d'onde segmentée.

12h00 – 12h30 – *Mesure de phase par IDML en imagerie par rayons X*

Adrien Stolidi
CEA

Dans le domaine de l'imagerie par rayons X, la mesure de phase apporte un contraste complémentaire à celui qu'on retrouve classiquement en radiographie, induit par des objets atténuants comme des tissus osseux dans le domaine médical ou des alliages métalliques dans le domaine industriel. Ainsi, la mesure de phase permet d'apporter un contraste nouveau sur des matériaux peu atténuants comme les tissus mous, des composites carbonés ou des explosifs. Cependant, il existe plusieurs stratégies de mesure ainsi que plusieurs approches algorithmiques pour extraire l'information de phase. Ces méthodes peuvent imposer des conditions particulières sur la source à rayons X comme sur la détection. Au-delà de l'amélioration qualitative de la qualité de l'image l'enjeu est d'aller vers de la quantification précise de défauts. Dans ce contexte, des développements en interférométrie à décalage multilatéral (IDML) sont portés depuis plus de dix ans dans le domaine des rayons X. Dans cet exposé, nous verrons brièvement le positionnement de l'IDML et les conditions induites sur la source et la détection pour ensuite présenter l'intérêt de cette technique pour des applications de caractérisation de pièces industrielles. Un focus sera notamment donné sur un développement récent : la carte de confiance, outil de visualisation s'appuyant sur un retour direct de la qualité de la mesure par IDML.

Pause Déjeuner

Session 2: Métrologie

14h00 – 14h30 – *L'interféromètre 4 ondes comme étalon secondaire pour une mesure exacte des caractéristiques spatiales et radiométriques des détecteurs infrarouge*

Edouard Huard
ONERA

La tendance technologique actuelle est de réaliser des pixels infrarouge de dimensions de plus en plus proches de la longueur d'onde, voire inférieures. La mesure de leur réponse spatiale devient donc un vrai challenge car on ne peut plus envisager de les éclairer facilement avec une tache focale de taille négligeable devant leur extension. Il est alors nécessaire de déconvoluer la mesure à partir d'une connaissance la plus exacte possible de la réponse de l'optique. L'objet de cette conférence est de montrer comment raccorder ce type de mesure à un étalon primaire, le principe de Huyghens-Fresnel, via l'interféromètre. Celui-ci prend donc le rôle d'étalon secondaire, en offrant une facilité d'emploi et une implantation à demeure dans le banc de référence MIRCOS développé par l'Onera. On détaillera de plus comment les relations de clôtures inhérentes à cet interféromètre permettent une évaluation de l'erreur simultanément avec l'acquisition de la mesure.

14h30 – 15h00 – *Mesure de champs électromagnétiques en haute définition*

Benoit Wattellier
Phasics

L'interférométrie à décalage multilatéral et en particulier l'interférométrie 4 ondes permet de mesurer en une seule acquisition l'amplitude complexe (phase et intensité) d'une onde électromagnétique. Cette information est codée en modulation de fréquence d'une figure périodique. La démodulation entraîne de facto une perte de définition, envisagée comme le rapport entre le nombre de points de mesure du champ et le nombre de pixels nécessaires. Celle-ci se situe le plus communément entre 1/3 et 1/4. Cependant, cette définition peut être ramenée à 1 pixel de phase par pixel de caméra en accumulant plusieurs acquisitions synchronisées avec des translations latérales du réseau. Ces translations créent un phénomène de phase-shifting spatial : chaque fréquence spatiale harmonique de l'interférogramme va subir un déphasage propre, dont l'exploitation permet de recouvrer le signal encodé pour chaque pixel individuellement. Au final, on obtient des images de champ électromagnétique de la même taille que les images de la caméra. Après avoir expliqué plus en détail le fonctionnement du SID4-HD, je montrerai des exemples de son implémentation avec une caméra sCMOS de 5.5 Mpixels, permettant de générer des images de phase de 5.5 Mpixels. Je présenterai les résultats de qualification en termes de bruit et de fonction de transfert des modulations spatiales. Enfin, je montrerai quelques applications de cette caméra de phase à l'imagerie biologique microscopique et mettrai en valeur les apports d'une imagerie haute définition pour l'acquisition d'images de champs millimétriques avec une résolution cellulaire. Je montrerai enfin comment cette technique permet d'améliorer la résolution de localisation de particules sub-longueur d'onde telles que les vésicules intracellulaires.

15h00 – 15h30 – *Le diagnostic des systèmes de combinaison cohérente de sources laser avec pupille segmentée par interférométrie PISTIL*

Bastien Rouzé
ONERA

Les systèmes de combinaison cohérente de sources laser (CBC) avec pupille segmentée permettent de créer des faisceaux agiles en faisant interférer de manière constructive plusieurs canaux amplifiés issus d'un oscillateur maître. La gestion de la très forte puissance d'une seule source laser équivalente est remplacée par la gestion des phases de chacune des sources, auxquelles des relations sont appliquées pour contrôler le profil spatial du champ lointain. Les interféromètres à décalage multilatéral (IDML) de classe PISTIL (Piston & Tilt) spécialisés dans l'analyse des surfaces d'ondes segmentées permettent de réaliser un diagnostic du système CBC, constitué de multiples sous-pupilles distinctes les unes des autres, présentant des variations de phases telles que du piston, du tip/tilt, de la défocalisation ou encore des délais pour les faisceaux à spectre large. Dans cette présentation, nous expliquerons tout d'abord le fonctionnement global d'un système de combinaison cohérente avec pupille segmentée, puis les caractérisations rendues possibles par l'interférométrie PISTIL.

15h30 – 16h00 – *Témoignage de la création de Phasics*

Marie-Begoña Lebrun
Phasics

L'objet de cette présentation est d'évoquer la création de Phasics, en insistant sur les différentes étapes à franchir pour passer d'une activité scientifique de recherche à la fondation d'une activité économique. En particulier seront abordés les liens étroits entre démarche d'innovation et soutien à l'activité de recherche par des collaborations scientifiques avec des grands centres de recherche.

Session Poster et Apéritif

16h30 – 19h00

Diner

20h

Vendredi 12 Mai

Session 3: Biologie 1

09h00 – 09h30 – *Interférométrie à décalage et cohérence en imagerie optique*

Pierre Bon
XLIM

La cohérence de la lumière joue un rôle crucial pour la formation des images. En effet, la profondeur de champ, la résolution ou encore le contraste sont autant de paramètres totalement liés à cette notion de cohérence. Il s'agit donc d'un paramètre clef qui –lorsqu'il n'est pas fixé par l'échantillon- permet un degré de liberté supplémentaire pour la compréhension des objets d'étude. Je montrerai que, à l'opposé de la plupart des systèmes interférométriques (ex. holographie), l'utilisation d'une source spatio-temporellement incohérente est possible directement en combinaison d'une détection par interférométrie à décalage. Je discuterai d'un certain nombre de cas d'école permettant de voir l'intérêt de jouer avec la cohérence de l'éclairage adjoint à une mesure de front d'onde et d'intensité lumineuse.

09h30 – 10h00 – *Mesure de masse sèche de cellules par QWLSI. Principe, métrologie et applications*

Julien Savatier
Institut Fresnel

La mesure de la masse sèche (tout sauf l'eau) de cellules est une application majeure des techniques d'imagerie de phase quantitative (QPI) en biologie. En effet ce paramètre est notamment lié au métabolisme et au cycle cellulaire, peut être associé à des pathologies, et n'est pas simple à obtenir par d'autres techniques. Je discuterai du principe derrière cette mesure, de métrologie en comparant différentes méthodes de QPI et de plusieurs applications. Elles concerneront l'étude de populations de différentes levures, de cellules souches et du cycle de lignées cellulaires en culture. On peut utiliser observer les modifications de masse sèche et de dynamique de croissance en faisant varier les conditions de culture afin d'en voir les effets.

10h00 – 10h30 – *L'ID4L comme microscopie thermique*

Guillaume Baffou
Institut Fresnel

L'interférométrie à décalage quadrilatéral (ID4L) adaptée sur un microscope optique permet de cartographier des distorsions de front d'onde créées par des objets micrométriques, typiquement des cellules vivantes en culture. Mais une autre origine du contraste en microscopie optique peut être un champ de température micrométrique. Dans cet exposé, nous détaillerons comment l'ID4L peut être utilisée comme une technique de microscopie thermique quantitative. Nous expliquerons le principe de reconstruction du champ de température à partir de la carte de front d'onde, et comment contrôler le profil spatial de température par le chauffage de nanoparticules d'or. Ensuite, nous présenterons deux applications de cette approche en biologie cellulaire : l'étude de stress thermique à l'échelle de cellules eucaryotes uniques, et l'activation de microorganismes thermophiles à 80 °C.

Pause Café

Session 4: Biologie 2

11h00 – 11h30 – *Déchiffrer comment les cellules maintiennent une densité constante en utilisant des mesures simultanées de la masse sèche et du volume.*

Mathieu Piel
Institut Curie

La plupart des cellules vivantes sont capables de maintenir une distribution constante de leur taille alors qu'elles subissent des cycles de croissance et de division - un phénomène appelé homéostasie de la taille des cellules. Les deux valeurs les plus fondamentales définissant la taille des cellules sont la masse et le volume cellulaires. Les cellules sont principalement constituées d'eau (généralement environ 80 % de leur masse) et leur paroi est constituée d'au moins une bicouche lipidique. Leur volume dépend donc principalement de l'équilibre entre les pressions osmotique et hydrostatique. Comme les cellules pompent activement des ions à travers leur membrane, elles maintiennent une composition interne différente de celle de l'extérieur. La façon dont les flux d'ions définissent le volume cellulaire est comprise depuis des décennies, grâce au modèle de Pump and Leak. Le contenu de la cellule est également bien connu, et les principaux osmolytes de la cellule sont des ions et un petit nombre d'acides aminés très abondants. D'autre part, la masse sèche de la cellule est largement dominée par les protéines (>60%). La façon dont les cellules parviennent à coupler leur croissance en masse et en volume est donc restée jusqu'à présent un mystère. En effectuant simultanément des mesures de la masse sèche par imagerie quantitative de phase et des mesures du volume cellulaire par exclusion de fluorescence, combinées à une modélisation physique, nous avons compris certains des principes de base qui permettent aux cellules de maintenir une densité de masse sèche constante, l'un des composants importants de l'homéostasie de la taille cellulaire.

11h30 – 12h00 – *IDML aléatoire avec un diffuseur mince : application en microscopie.*

Pascal Berto
Institut de la Vision

Nous explorons la possibilité d'utiliser un simple diffuseur, c'est à dire, un masque de phase aléatoire, pour analyser le front d'onde. On peut voir cette implémentation comme un interféromètre à décalage multilatéral, non périodique, générant une figure d'interférence de type speckle. En tirant profit de « l'effet mémoire » des diffuseurs minces, nous travaillons dans un régime où le gradient local du front d'onde peut être déterminé par la translation locale du patron de speckle. Cette stratégie donne accès à une microscopie de phase quantitative à bas coût, facilement disséminable et présentant des performances intermédiaires entre celles du Shack-Hartmann et de l'ID4L. Nous discuterons le potentiel de cette approche pour la superlocalisation 3D de nanobjets, le suivi local de réaction chimique de surface et la classification de cellules rétiniennes. Finalement, un intérêt majeur de cette approche réside dans sa capacité à multiplexer plusieurs fronts d'onde. En exploitant la signature unique des grains de speckle, nous avons démontré qu'il était possible d'analyser, en une seule mesure, plusieurs fronts d'onde parvenant sur le système depuis des directions différentes, ce qui se révèle intéressant pour l'optique adaptative grand champ.

12h00 – 12h30 – Apprentissage profond sur les valeurs complexes du champ électromagnétique appliqué à l'imagerie quantitative de phase.

Guillaume Maucort
Institut d'optique

L'imagerie par interférométrie à décalage quadrilatéral mesure les perturbations du champ électromagnétique induites par l'échantillon observé. Elle est particulièrement utile pour l'imagerie non invasive d'éléments biologiques fins et semi-transparents tels que les cellules. Je présenterai ici un moyen d'utiliser un algorithme d'apprentissage profond capable de prédire la fluorescence d'éléments biologiques spécifiques (mitochondries, réticulum endoplasmique) avec une efficacité améliorée en utilisant le champ électromagnétique complet (composantes de phase et d'intensité liées comme un nombre complexe). Je décrirai également le passage aux prédictions 3D en utilisant l'acquisition de phase 3D ou la combinaison d'une acquisition 2D et de la propagation numérique pour recréer un volume.

Pause Déjeuner

Session 5: Contrôle Non Destructif & Caractérisation

14h00 – 14h30 – *Artefacts et stratégies correctives en imagerie de phase par rayons X*

Georges Giakoumakis
ONERA, CEA

Complémentaire à l'imagerie par atténuation, l'imagerie par rayons X en contraste de phase apporte des informations supplémentaires à la radiographie. Cependant, l'extraction de cette quantité demande des stratégies expérimentales et algorithmiques ainsi que des conditions de cohérence et de résolution du système imageur pouvant induire des dégradations de la qualité de l'image ou l'apparition de fausses informations sur l'image, aussi appelés artefacts. Dans cet exposé, nous présenterons la source de ces artefacts dans le cadre d'une utilisation de l'IDML en imagerie par rayons X ainsi que des stratégies correctives récemment développées. Une première méthode corrective sera notamment présentée, dénommée MARIO (pour Method of Artifacts Reduction from the Intensity of the Object), ciblée pour minimiser les artéfacts issus de l'intensité de l'objet dans l'image de phase, ceux-ci étant prédominants en rayons X. Une deuxième méthode corrective sera par la suite détaillée, dénommée MMCP (pour Méthode des Moindres Carrés Pondérés), exploitant la redondance de la mesure par l'IDML pour réduire le bruit de l'image de phase en rayons X. Des pistes d'optimisation du système imageur découlant de ces méthodes seront enfin présentées, notamment à travers la génération de nouvelles géométries de l'IMDL.

14h30 – 15h00 – *Imagerie de phase par IDML sur source de rayons X laser-Plasma*

Amélie Ferré
LP3

L'IDML est une technique d'imagerie par contraste de phase à la pointe qui aujourd'hui connait un essor important. Notamment, elle a été développée sur des grandes installations telles que des sources de rayonnement X synchrotrons puis élargie pour l'utilisation sur des tubes à rayons X. Aujourd'hui, une des perspectives et enjeu est de développer de l'imagerie par rayons X en contraste de phase résolue en temps. Dans ce cadre-là, pour palier l'accessibilité restreinte des sources de grandes installations, nous verrons, dans cet exposé, les premiers travaux réalisés sur des sources rayons X dans un environnement de laboratoire. Il s'agit d'une source rayons X, pulsée à haut taux de répétition (100Hz) et ultracourte temporellement (dizaine de picosecondes), dite K-alpha, produite par l'interaction laser plasma. La revisite de la technique d'IDML sera alors discutée et des études paramétriques seront présentées. Elles prendront en compte notamment les spécificités liées à la source tel que le spectre, la distribution spatiale ou le flux de photons.

15h00 – 15h30 – *Apports de l'interférométrie à décalage multilatéral à l'étude de l'interaction laser – matière*

Laurent Gallais
Institut Fresnel

De nombreuses applications scientifiques ou industrielles utilisent des lasers pour structurer ou modifier les propriétés locales de la matière. Pour développer ces procédés il est essentiel de pouvoir mesurer finement les modifications induites dans le matériau qui peuvent être de différentes natures : variations d'indice ou modification de la topologie de surface (cratère d'ablation par exemple). Dans ce contexte nous présenterons quelques exemples d'applications où l'interférométrie à décalage multilatéral, grâce à simplicité de mise en œuvre, permet d'apporter des données quantitatives extrêmement précieuses pour comprendre la réponse du matériau et les mécanismes de transformation de la matière sous flux laser intense : mesures de propriétés optiques non-linéaires, mesures de biréfringence, mesures de forme de cratères d'ablation. Nous montrerons comment les données acquises grâce à ces mesures de phase quantitatives nous permettent d'améliorer les modèles d'interaction laser / matière et affiner la mise au point de procédés lasers appliqués à des matériaux optiques.

15h30 – 16h00 – *Caractérisation des filaments laser femtoseconde dans l'air par interférométrie*

Aurélien Houard
LOA

La filamentation laser femtoseconde est un phénomène nonlinéaire qui apparait lorsqu'on propage une impulsion laser ultracourte intense (Pc > GW) dans l'air ou dans un milieu transparent. Elle donne lieu à la formation de longs canaux de lumière ionisants appelés filaments. Ces filaments ont de nombreuses applications, notamment parce que le canal de plasma qu'ils laissent dans leur sillage évolue pour former un canal chaud de basse densité capable de guider des décharges électriques, de réduire la trainée d'un engin supersonique ou de guider un faisceau laser de longue durée. Pour caractériser la création du plasma à l'échelle sub-picoseconde, la formation du canal de gaz sous-dense à l'échelle microseconde ou l'évolution d'une décharge guidée sur plusieurs millisecondes nous mesurons la variation de phase induite par le filament sur un faisceau sonde à l'aide d'un mesureur de front d'onde Phasics SID4 HR. Je présenterai un résumé des différentes mesures que nous réalisons à l'aide d'interférométrie à décalage multilatéral.

Conclusion:

16h00 – 16h30 – *L'interférométrie à décalage multi-latéral : les origines*

Jérôme Primot,
ONERA

L'objet de cet exposé est de restituer les éléments à l'origine de la création et de l'essor de l'IDML, en la restituant dans le contexte scientifique de l'époque.

Liste des posters

La QLSI comme outil d'étude de la vie à haute température: mesure de masse sèche et gradient de température

Maëlle Bénéfice
Institut Fresnel

Les micro-organismes thermophiles sont des organismes qui peuvent prospérer à des températures supérieures à 100°C. Comprendre les mécanismes permettant à ces organismes de vivre dans de telles conditions est d'un intérêt majeur pour la compréhension de la façon dont la nature peut faire face à des températures si élevées. Cependant il reste difficile d'observer des organismes thermophiles vivant in vitro car cela nécessiterait de chauffer une platine de microscope à 100°C ou plus. Pour lever cette limitation, nous avons développé une technique de chauffage laser de nanoparticule d'or pour activer les thermophiles sous un microscope à analyseur de front d'onde. Les bactéries thermophiles sont cultivées sur des nanoparticules d'or, qui sont chauffées avec un laser pour créer un champ de température. Le champ de température à l'échelle microscopique et les bactéries sont imagés à l'aide d'un microscope à analyseur de front d'onde (QLSI). Cette technique permet de cartographier le champ de température en détectant la variation l'indice de réfraction dû à l'élévation de température. On peut aussi calculer la masse sèche des micro-organismes de manière précise. Nous avons ainsi établi une étude complète sur la précision de mesure de masse sèche sur de très petits objets comme les bactéries et comparer nos résultats expérimentaux à des simulations utilisant un algorithme Insilex.

Applications de la QLSI en nanophotonique

Baptiste Marthy
Institut Fresnel

L'interférométrie à décalage quadrilatéral (QLSI) peut être utilisée pour imager et caractériser des nano-objets présents dans le champ de vue d'un microscope. Ce poster détaillera les moyens d'optimiser la microscopie QLSI pour réduire le bruit des images, sans affecter la justesse des mesures. Ensuite, les applications de la QLSI en nanophotonique seront listées, à savoir l'imagerie de nanoparticules et la mesure de leur polarisabilité optique, l'imagerie de matériaux 2D et de leur indice de réfraction complexe, ainsi que la caractérisation de réseaux de nanoparticules (métasurfaces).

Banc MIRCOS : Utilisation d'un IDML comme étalon secondaire pour l'évaluation des profils radiométriques des pixels infrarouges

Joris Gorée
ONERA

La mesure de la réponse spatiale des pixels dans le domaine infrarouge est un vrai challenge car les pixels atteignent des tailles de l'ordre de la longueur d'onde. Un objectif de spot scan cryogénique, avec un nombre d'ouverture de 1.2, a été intégré dans le banc cryogénique MIRCOS de l'ONERA dans l'optique de caractériser des pixels de taille de 15 µm voire moins pour une longueur d'onde de 5 µm. La mesure nécessite une connaissance parfaite de la réponse optique de l'objectif car la tache focale étant de même dimension que le pixel, ceci nécessite une opération de déconvolution. Pour cela, on utilise un IDML comme étalon secondaire pour évaluer de manière exacte cette réponse, par comparaison à la diffraction par un point source (principe de Huygens-Fresnel).

Suivi des variations de pression dans des canaux microfluidiques par imagerie quantitative de phase

Kiran Acharya
Institut Fresnel

Nous utilisons la variation d'indice de réfraction liée au changement de pression de l'eau pour suivre en temps réel les évolutions de pression au sein de canaux microfluidiques, et ainsi contrôler la correspondance avec différents modèles mis en place.

Métrologie systématique de nano-antennes pour la conception de méta-surfaces

Cécile Le Gall
ONERA

PISTIL (PISton et TILt) est un interféromètre à décalage latéral permettant de mesurer simultanément le déphasage d'un ensemble d'éléments déphasant placés côte à côte. C'est donc un outil privilégié pour faire de la métrologie de phase pour des métasurfaces optiques. En effet, les métasurfaces optiques sont composées de nano-antennes métalliques ou diélectriques permettant de contrôler le front d'onde réfléchi ou réfracté par la métasurface (amplitude, phase, polarisation). L'assemblage de ces nano-antennes permet donc de concevoir des fonctions optiques complexes. On peut ainsi citer quelques exemples : lentilles, doublets optiques, lame quart d'onde, filtre de couleur, hologrammes, masque de phase,... Cependant, ces méta-optiques deviennent de plus en plus complexes et de moins en moins périodiques rendant leurs simulations de plus en plus complexes par les méthodes de calcul usuelles. Leur caractérisation se fait donc le plus souvent de manière fonctionnelle (à travers la fonction d'étalement du point). Pour répondre à cette problématique, nous proposons d'utiliser l'interféromètre PISTIL pour caractériser ces nano-antennes en phase et en amplitude et ainsi pouvoir élaborer une bibliothèque d'éléments pouvant ensuite être incorporés au sein d'une fonction plus large.

HIBISCUS : Simulateur pour la mise au point de stratégies de contrôle-commande des lasers à combinaison cohérente

Thomas Rousseaux
Onera

L'interféromètre PISTIL, moyen de métrologie haute performance pour la combinaison cohérente de faisceaux laser, est intégré dans une boucle de contrôle-commande comportant un miroir déformable sur lequel sont envoyées des lois de commande issues de mesures de dérives de phase du laser XCAN. Ainsi des stratégies de contrôle-commande peuvent être développées dans ce simulateur de lasers CBC, sans avoir recours à l'utilisation du véritable laser.

L'IDML au service des rayons X pour l'étude de CFRP foudroyés

Laureen Guitard
CEA, ONERA

De nos jours, les matériaux composites à fibre de carbone (CFRP- Carbon Fiber Reinforced Polymer) sont de plus en plus utilisés dans l'industrie aéronautique. Lorsqu'ils sont foudroyés, des défauts complexes peuvent se former dans leurs structures créant de lourdes répercussions sur leur durée de vie. L'imagerie par rayons X est un moyen de caractériser ces défauts avec une résolution spatiale fine (de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres). Cependant, les matériaux carbonés, de faible numéro atomique, atténuent peu le flux de rayons X. Le contraste de l'image obtenue est donc faible. Pour l'améliorer on peut utiliser, en plus de l'atténuation, le signal de phase du front d'onde X modifié par l'échantillon. L'interférométrie à décalage multilatéral (IDML) permet cette double mesure d'atténuation et de phase. Ce travail présente un banc d'imagerie de phase utilisant la méthode IDML avec une application de contrôle sur des CFRP foudroyés. Ce système a l'avantage d'être compact, utilisant un tube à rayons X micro-foyer, un détecteur haute résolution et une grille d'interférence régulière 2D. Nous verrons que cette méthode est aussi sensible à l'orientation des fibres et des défauts présents dans le CFRP.

Exploration de l'imagerie de phase au-delà de 100keV : apports et contraintes

Maxime Bouvier
CEA

L'imagerie de phase est classiquement utilisée afin d'obtenir un contraste supplémentaire pour des matériaux peu atténuants comme les tissus mous dans le domaine du médical ou les polymères dans le domaine du contrôle non-destructif. Or, de nombreuses applications impliquent des matériaux denses comme des pièces métalliques par exemple. Cela nécessite l'utilisation d'un rayonnement suffisamment énergétique (typiquement > 100 keV) capable de pénétrer l'échantillon. Le déphasage induit par un matériau sur une onde électromagnétique diminue avec l'énergie de celle-ci et ses effets sur l'intensité mesurée (dus à la réfraction, diffraction, interférences…) deviennent difficilement détectables. Ce sont pourtant ces phénomènes que l'on cherche à déceler en imagerie de phase. L'objectif de cette étude est donc d'évaluer la faisabilité de l'application de l'imagerie de phase par interférométrie à grilles pour des matériaux denses et de quantifier les apports et les contraintes de cette technique par rapport à l'imagerie classique par contraste d'atténuation.

Caractérisation de fronts d'ondes complexes avec la QLSI : Applications aux métasurfaces

Yanel Tahmi
CRHEA, Phasics

Les avancées récentes dans le domaine des métasurfaces ont ouvert une nouvelle dimension dans la modulation de fronts d'ondes, en permettant notamment de manipuler l'amplitude, la phase et la polarisation localement sur une échelle de centaines de nanomètres dans le spectre du visible. Ces avancés permettent de créer une large gamme de fronts d'ondes, y compris des formes moins courantes telles que des modes de Laguerre-Gauss et des discontinuités de phase, ce qui rend l'analyse des fronts d'ondes plus complexe. PHASICS développe et commercialise des analyseurs de fronts d'ondes depuis plusieurs années et investit actuellement dans le développement d'outils adaptés pour la caractérisation et la métrologie de ces fronts d'ondes complexes. Nous présentons ici des méthodes qui ont été développées lors de ma thèse pour caractériser ces fronts d'ondes à l'aide de données obtenues à partir de métasurfaces fabriquées au CRHEA et mesurées à l'aide d'une caméra PHASICS utilisant l'interférométrie à décalage quadrilatérale (QLSI).

Label-free analysis and automatized recognition of nanoparticles and infectious viruses using quantitative phase and intensity imaging

Minh-Chau Nguyen
XLIM

Quantitative phase and intensity images permit to collect additional information of light-sample interaction when compared to intensity imaging only. It enables the access to different physical properties of sample, such as polarizability or cell's dry mass. In this paper, we present the applications of our quantitative phase microscopy based on quadri-wave lateral shearing interferometer in holographic imaging conditions. The system is robust, compact and sensitive enough to by applied on infectious emergent virus, including HIV-1 and SARS-CoV-2, within the biosafety cabinet of a level-3 confined laboratory for the safety requirement. It unlocks an access notably to the size and the dry mass of individual virus. The results demonstrate our capability to differenciate between viral samples, for example HIV and SARS-COV-2 and to perform biophysical interpretations at the nanoscale. Moreover, the system is able to extract the complex refractive index of individual nanoparticle from its phase and intensity images. While associating with Machine Learning, we achieved the identification of nanoparticles with high accuracy (up to 95% for metal nanoparticles).

From Quantitative phase to fluorescence: how to predict fluorescence of unlabelled biological sample

Peter Bonnaud
XLIM

Quantitative phase microscopy using wavefront sensing is growingly used for biological and nanomaterial sciences. The images acquired characterize the intensity and local wavefront's delay of a light source after interaction with a sample. The additional information provided by the wavefront delay can be exploited in several different ways. In this poster, we present a new approach, inspired by transfer learning in the biomedical world and motivated by recent promising domain adaptation results to grant molecular specificity from phase and intensity measurements. Our application consists in deducing from our input domain, quantitative phase imaging, a target domain, in our case fluorescence imaging. This domain adaptation provided by a deep learning model has the advantage of achieving faithful fluorescence imaging without labelling. Our application offers results with a high accuracy (more than 95% for the deduction of fluorescence images of mitochondria as well as nanoparticle and virus automatized recognition).

Intérêt de l'imagerie de phase pour l'imagerie sans marquage de coupes histologiques

Cassandra Borgane
Institut Fresnel – Phasics - Centre de recherche en Cancérologie de Marseille

L'*imagerie de phase quantitative, mise en place autour de l'IDML, permet d'identifier clairement un ensemble de structures au sein de coupes tissulaires utilisées en histologie, et ceci sans marquage préalable nécessaire. Nous montrerons l'intérêt de cette génération de contraste, et de la possibilité de mesures qu'offre l'IDML, pour certaines applications en imagerie médicale liées à la cancérologie.*

Technique d'amélioration de la sensibilité des analyseurs de front d'onde

Benoit Rogez
Institut de la vision

La microscopie de phase quantitative est une méthode puissante pour caractériser et classifier des nano-objets sans marquage. La sensibilité de phase des analyseurs de front d'onde par ID4L est limitée par le bruit de photons. La méthode classique pour améliorer cette sensibilité consiste à moyenner un grand nombre d'images, mais cette approche sacrifie la résolution temporelle et n'est donc pas adaptée au suivi d'objets dynamiques. Nous présentons ici une technique d'amplification du signal de phase basée sur l'utilisation, dans l'espace de Fourier, d'un filtre spatial dont la transmission est complexe. Nous avons démontré la possibilité d'améliorer de plus d'un ordre de grandeur la sensibilité des analyseurs ID4L tout en conservant le caractère quantitatif des images de phase et d'intensité.

Digital optical phase conjugation through thick scattering tissues with a wavefront sensor

Marc Guillon
SPPIN

Wavefront sensors are non-interferometric instruments providing the complex amplitude of a light-beam (phase and intensity). The wavefront is rebuilt by integrating the measured wavevector map. Being compatible with broadband light sources, they have been broadly used for adaptive optics in astronomy and biological microscopy. Although providing high spatial resolution, their use for measuring random scattered wavefields such as encountered in these applications has been hindered by the numerous intrinsic optical vortices. The latter are associated with non-conservative vector fields, making the integration step especially delicate. Here we demonstrate digital optical phase conjugation through biological tissues by single-shot complex wavefield measurement.

Hard X-Ray Phase Imaging and Metrology with a Single Phase Grating Interferometer

Pascal Mercère
Synchrotron SOLEIL

Les deux posters présentent les différents modes et capacités d'imagerie de phase quantitative en rayons X développés en collaboration entre Soleil et l'Onera. Profitant de ces retours d'expérience, un banc de mesure de référence permanent sur la ligne métrologie a été réalisé et est en finalisation d'intégration.

Imagerie rayon X en contraste de phase et en champ sombre sur des équipements de laboratoire en utilisant une modulation aléatoire

Clara Magnin
INSERM

L'imagerie en contraste de phase et l'imagerie en champ sombre (drak-field imaging) sont des modalités d'imagerie rayons X récentes et prometteuses. Ces modalités ont l'intérêt de fournir des contrastes différents et complémentaires à ceux obtenus en imagerie X conventionnelle basée sur l'absorption (radiographie). Si ces nouvelles modalités d'images sont des outils prometteurs pour la compréhension de la structure et la composition d'échantillons, l'accès à ces nouveaux types d'images reste particulièrement restreint aux sources de forte cohérence type synchrotrons. Cette étude vise au transfert des méthodes d'acquisition d'images de phase et de champ sombre sur des équipements de laboratoire à faible cohérence. Dans ce contexte la méthode appelée "Modulation Based Imaging" (MoBI) a été adaptée et mise en œuvre sur les dispositifs de laboratoire commercialisés par la société Xenocs (Grenoble, France). Cette méthode de reconstruction de phase et dark-field a la particularité de reposer sur l'utilisation d'une modulation d'intensité aléatoire en oppositions aux méthodes de singles gratings ou d'interféromètres à décalage multilatéral (IDML) qui ont recours à des modulateurs d'intensité de géométrie régulière.

Organisation

- Adrien Stolidi – CEA
- Jérôme Primot – ONERA
- Serge Monneret – Institut Fresnel
- Cindy Bellanger - ONERA

Organismes participants

CEA – Onera - Institut Fesnel – PHASICS - Institut de la vision – LULI – CRCM - LP3 - Institut Curie – ENSTA – CHREA - Institut d'optique – SOLEIL – XLIM – SPPIN

https://my.weezevent.com/idml