



MOI oTOP 2020

Métrologie Optique et Instrumentation

Ecole Technologique du réseau Optique et Photonique

4-6 nov. 2020 à Carry-le-Rouet (13) France

Programme

Mercredi 4 Novembre		
14h – 14h30	Introduction	Kacem El Hadi, C. Le Blanc, A-A. Serra
Thème 1 : Qu'est ce que la métrologie optique et quelles grandeurs nécessitent d'être mesurées ?		
14h30 – 15h15	1.1 La lumière et ses propriétés, de l'infra-rouge aux rayons X.	Sylvain Ravy
15h15 – 16h00	1.2 photométrie (Puissance, intensité, flux, éclairement, luminance....)	Julien Moreau
Thème 2 : Outils et technologies métrologiques existants		
16h00 – 16h45	2.1. "Spécification des erreurs de surfaces en termes de la Densité Spectrale de Puissance, DSP"	Kjetil Dohlen
Pause		
17h15 – 17h45	2.2. Spectroscopie quantitative: la technique Cavity Ring Down.	Samir Kassi
17h45 - 18h15	2.3. Les techniques optiques au service de la compréhension de la chimie atmosphérique	Coralie Schoemaeker
19h30 – 21h	Dîner	

Jeudi 5 Novembre

Thème 2 : Outils et technologies métrologiques existants		
8h - 8h40	2.4. Etalons de fréquence optique à base de fibres microstructurées à cœur creux.	Benoit Debord et Thomas Billotte
8h40 - 9h20	2.5. Techniques optiques pour la mesure atmosphérique	Frederique Auriol
9h20 - 10h	2.6. Analyse Front d'Onde	Jean-François Sauvage
Pause		
Thème 3 : Méthodologie de la métrologie optique		
10h30 - 11h10	3.1 Méthodes de mesures interférométriques et Groupe de travail sur l'Intercomparaison.	Muriel Thomasset/Johan Floriot/Marc Rouillay
11h10 - 11h50	3.2. Métrologie de la Tenue au Flux Laser	Laurent Gallais
11h50 - 12h30	3.3. Introduction aux calculs d'erreur en métrologie	Jean-Paul Berthet
Déjeuner		
Thème 4 : les défis de la métrologie		
14h00 - 14h40	4.1. Techniques de microscopie à super-résolution	Maia Brunstein
14h40 - 15h10	4.2. Comment et qu'est-ce qu'on mesure avec le THz ?	Jean Christophe Delagnes
15h10 - 15h40	4.3. Enregistrement de signaux terahertz en "monocoup" à l'aide de lasers femtoseconde.	Serge Bielawski
15h40 - 16h10	Présentation APP	Porteurs / Resp. COPIL
Pause		
17h10 - 17h50	4.4. Métrologie pour le spatial-Contraintes liées à l'environnement.	Pierre Etcheto
17h50 - 18h30	4.5. IASI NG un spectro-radiomètre infrarouge pour la prévision météo et le suivi de l'atmosphère.	Elisa Baldit
19h30 - 21h00	Dîner	

Vendredi 6 Novembre

8h - 8h10	Détails de la journée	Kacem El Hadi
Thème 4 : les défis de la métrologie		
8h10 - 8h50	4.6. L'optique pour la Métrologie Marine	Olivier Fauvarque
Thème 5 : Méthodologie de la métrologie optique		
8h50 - 9h30	5.1. ELT, son optique et ses instruments	Benoit Neichel
Pause		
10h - 10h45	5.2. Microscopie à spin unique	Vincent Jacques
10h45 - 11h30	5.3. Mesures métrologiques mises en œuvre pour les instruments EUI et SPICE de Solar Orbiter.	Anne Philippon
11h30 - 12h00	Conclusion	
Déjeuner		
13h30 - 14h	Départ bus vers la gare de Marseille St Charles	Kacem El Hadi

Résumés

1/ Qu'est ce que la métrologie optique et quelles grandeurs nécessitent d'être mesurées ?

1.1. La lumière et ses propriétés, de l'infra-rouge aux rayons X:

Sylvain Ravy - Laboratoire de Physique des Solides (Saclay)

Dans cet exposé, nous présenterons succinctement et avec l'aide de l'histoire des sciences, les propriétés de base de la lumière : propagation, réflexion, réfraction, diffraction, pour les rayonnements allant de l'infra-rouge aux rayons X. Les aspects communs et spécifiques de ces rayonnements seront soulignés à partir d'exemples simples.

1.2. Photométrie

Julien Moreau - Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School (Palaiseau)

La photométrie est une branche de l'optique géométrique qui vise à quantifier la lumière, depuis une source vers un détecteur, à travers un système optique. Utilisant quelques lois de conservation simples, elle permet de prédire le flux reçu avec un minimum d'informations sur le système optique utilisé. La principale difficulté rencontrée en pratique est de savoir quelles grandeurs utiliser lorsque l'on cherche à appliquer ces lois photométriques. Dans cette présentation, je reviendrai sur ces différentes grandeurs et en particulier les concepts peu intuitifs de luminance et d'étendue géométrique qui jouent un rôle central et sont spécifiques à la photométrie.

2/ Outils et technologies métrologiques existants

2.1. Spécification des erreurs de surfaces en termes de Densité Spectrale de Puissance, DSP.

Kjetil Dohlen - Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (Marseille)

Nous sommes aujourd'hui capables de générer quasiment n'importe quelle surface optique. Cela permet des gains considérables en performance et/ou coût et/ou dimensions de nos instruments, notamment pour l'astronomie. Le concepteur opticien s'en réjouit... jusqu'au moment de la spécification ou, oh horreur, de la livraison. Avec la technologie de polissage robotisé arrive la problématique des moyennes fréquences spatiales. De quoi s'agit-il et comment y faire face? Je tenterai d'y répondre.

2.2. Spectroscopie quantitative: la technique Cavity Ring Down.

Samir Kassi- Laboratoire Interdisciplinaire de PHYsique (Grenoble)

La spectroscopie en phase gazeuse est une technique qui permet de doser la quantité d'une espèce dans un échantillon. Elle s'appuie sur l'interaction entre la lumière - par exemple un laser - et le gaz qui absorbe plus ou moins fortement les photons à des longueurs d'onde caractéristiques. Cela constitue sa signature spectrale. Cette signature est une fonction de la concentration mais aussi de la température et de la pression du gaz. Elles doivent donc être mesurées pour déterminer convenablement la concentration mais peuvent aussi être déduite, par exemple des spectres des planètes du système solaire. La sensibilité de la mesure dépend assez directement de la longueur du trajet de la lumière dans le gaz. Nous allons montrer ici comment la technique "Cavity Ring Down" permet d'enregistrer des spectres d'absorption avec une précision exceptionnelle et une exactitude remarquable.

2.3. Les techniques optiques au service de la compréhension de la chimie atmosphérique

Coralie Schoemaeker- laboratoire de Physico-Chimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère (Lille)

Les transformations chimiques dans l'atmosphère sont gouvernées par des oxydants gazeux très réactifs comme les radicaux hydroxyle OH et hydroperoxyde HO₂, présents à l'état de trace (concentration dans la gamme du ppt, part per trillion, ou inférieure).

L'intervention portera sur l'utilisation des techniques optiques telles que la cw-CRDS (continuous wave Cavity Ring Down Spectroscopy) ou la FIL (fluorescence induite par laser, dont une technique dérivée : FAGE, fluorescence assay by gas expansion).

Des exemples d'utilisation de ces techniques pour des mesures de laboratoire (cinétiques de réactions d'intérêt atmosphérique) et des mesures de terrain de suivi des radicaux seront présentés et discutés en terme de mise en œuvre, d'avantages, d'inconvénients et limites d'utilisation.

2.4. Etalons de fréquence optique à base de fibres microstructurées à cœur creux.

Benoît Debord et Thomas Billotte - GPPMM, Institut de recherche XLIM (Limoges)

De nombreux domaines et applications appellent au développement de références de fréquences optiques compactes et portables. Nous verrons que les fibres optiques à cœur creux se révèlent être une plateforme idéale pour l'avènement de tels étalons de fréquences en remplissant leur cœur par divers gaz atomiques et moléculaires. Nous aborderons dans un premier temps, les principales caractéristiques des familles de fibres microstructurées à cœur creux (mécanismes et performances de guidage, dispersion, contenu modal). Nous détaillerons, dans une seconde partie, la fonctionnalisation pour la métrologie de ces fibres remplies de gaz sous forme de « Photonic microcells » (PMC) à des fins par exemple de stabilisation en fréquence de faisceaux lasers. Les méthodes de fabrication des PMC et leurs caractérisations par l'utilisation de spectroscopies sous-Doppler seront abordées.

2.5. Techniques optiques pour la mesure atmosphérique

Frédérique Auriol – Laboratoire d'Optique Atmosphérique (Villeneuve d'Ascq)

Dans cette présentation nous ferons le point sur les différentes technologies qui sont utilisées dans les instruments de mesures atmosphériques. Nous présenterons des instruments qui sont utilisés sur différents vecteurs : depuis le sol, sur avions ou embarqués sur des satellites.

Nous décrirons les instruments qui équipent la Station d'Observation de l'Atmosphère qui est située sur le toit du LOA. Nous donnerons des exemples illustrant la grande variété d'instruments de mesure de télédétection (active ou passive), qui travaillent sur une large gamme spectrale (de l'ultraviolet aux micro-ondes) mais aussi d'instruments de mesures in-situ. Pour chaque type d'instruments, nous présenterons le principe de mesure, les différentes techniques utilisées pour leur étalonnage (sources lumineuses variées), des exemples de mesures et leurs applications. Enfin, nous décrirons un instrument aéroporté développé au laboratoire, l'instrument Osiris, qui est le prototype du futur instrument spatial 3MI, qui va être lancé à l'horizon 2022 sur la plateforme Métop-SG.

2.6. Analyse Front d'Onde.

Jean-François Sauvage – ONERA (Palaiseau)

(...résumé non disponible...)

3/ Méthodologie de la métrologie optique

3.1. Méthodes de mesures interférométriques et Groupe de travail sur l'Intercomparaison.

Muriel Thomasset - Synchrotron SOLEIL (Gif sur Yvette) / **Johan Floriot**- Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (Marseille) / **Marc Rouillay**- Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique (Palaiseau)

Dans cette présentation, nous présenterons la caractérisation de surfaces et composants optiques par technique interférométrique.

Après un rappel des notions de base de l'interférométrie, nous expliciterons les différents paramètres critiques permettant de caractériser et spécifier une surface optique, principalement de type miroir. Ces différents paramètres sont les rayons de courbure et les conicités des surfaces, la rugosité, l'erreur de forme selon de le domaine des fréquences spatiales considérées.

Dans un dernier chapitre, nous présenterons les différentes techniques permettant de caractériser un miroir : interférométrie de Fizeau, analyse de front, déflectométrie pour la mesure de l'erreur de forme ; AFM et microscopie interférentielle pour la mesure de rugosité

3.2. Métrologie de la Tenue au Flux Laser

Laurent Gallais – Institut Fresnel (Marseille)

Connaitre la résistance au flux laser d'un composant optique est essentiel pour la conception de systèmes lasers ou pour des applications impliquant des lasers de puissance. La dégradation sous flux laser des composants optiques est cependant un phénomène complexe impliquant de nombreux paramètres liés au procédé de fabrication du composant, à l'environnement, aux caractéristiques du faisceau laser et aux conditions d'exposition, ce qui a des implications importantes sur la métrologie de la tenue au flux laser. La tenue au flux laser ne se réduit généralement pas à une valeur seuil et se décrit généralement en terme de probabilités d'endommagement, évaluées par différentes procédures décrites par des normes. Nous discuterons dans cet exposé de ces méthodes de tests, de leur domaines d'applications et de leurs limitations à travers différents exemples issus des recherches à l'Institut Fresnel sur ces thématiques.

3.3. Introduction aux calculs d'erreur en métrologie

Jean-Paul Berthet – Institut de Chimie Physique (Orsay)

La présentation est réalisée dans le but de présenter une synthèse des différentes approches d'évaluation de l'incertitude la mesure ainsi que leur mise en œuvre, afin de permettre aux auditeurs de comprendre et sélectionner la méthode la plus adaptée à son besoin.

Dans une première partie, il présente différentes approches et méthodes d'évaluation des incertitudes, le GUM et les méthodes complémentaires.

La seconde partie, propose des outils d'évaluation de composantes d'incertitude transverses à plusieurs domaines (dérive, résolution, répétabilité...), laissant aux fascicules spécialisés le soin de détailler l'évaluation des composantes spécifique à leur grandeur.

La troisième partie, quant à elle, traite de l'utilisation de l'incertitude de mesure.

L'auditeur connaît la notion de processus de mesure et de sources d'incertitudes.

4/ Les défis de la métrologie

4.1. Techniques de microscopie à super-résolution

Maïa Brunstein – Institut Pasteur (Paris)

La microscopie à fluorescence est un outil essentiel pour l'étude des systèmes biologiques et biomédicaux car il permet d'observer des structures subcellulaires avec une grande spécificité. Cependant, elle présente un gros inconvénient, la résolution spatiale est limitée par la diffraction (typiquement la résolution latérale est de ~ 250 nm et la résolution axiale est de plusieurs μm). Plusieurs techniques ont été récemment développées afin de surmonter cette limitation. Dans cette présentation, je présenterai certains des techniques les plus utilisées pour l'imagerie super-résolue (STED, PALM/STORM, SIM, entre autres).

4.2. Comment et qu'est-ce qu'on mesure avec le THz ?

Jean Christophe Delagnes – Centre Lasers Intenses et Applications (Bordeaux)

De part leur nature, les rayonnements terahertz (THz) et surtout les technologies THz se situent à la frontière entre l'électronique et l'optique. Les principes d'émission et de détection des ondes THz que nous discuterons nous permettront de faire le lien entre ces deux disciplines, et de préciser les ordres de grandeurs ainsi que décrire l'état de l'art. Parmi les exemples d'applications que l'on peut faire des systèmes THz, la spectroscopie et l'imagerie, permettront d'illustrer les principales propriétés de ces rayonnements. Nous aborderons les méthodes les plus conventionnelles ainsi que quelques méthodes avancées montrant l'originalité et la complémentarité qu'apporte les THz par rapport à l'optique. Enfin, nous verrons comment les méthodes optiques les plus récentes peuvent permettre de relever les enjeux technologiques actuels notamment sur l'accordabilité, la puissance ou la brièveté des sources THz.

4.3. Enregistrement de signaux terahertz en "monocoup" à l'aide de lasers femtoseconde.

Serge Bielawski – Physique des Lasers Atomes et Molécules (Villeneuve d'Ascq)

Depuis de nombreuses années, les techniques d'enregistrement de signaux électriques terahertz jouent un rôle important dans l'analyse de matériaux denses et dilués (Time-Domain Spectroscopy, ou TDS), l'inspection sans

contact de processus industriels, et la physique des accélérateurs. Cependant, les techniques traditionnelles (comme les systèmes commerciaux d'electro-optic sampling et de time-domain spectroscopy) ne permettent pas d'enregistrer des signaux en mono-coup, car elles nécessitent de "scanner" le champ électrique à étudier, au moyen d'un laser femtoseconde.

Nous présentons ici plusieurs techniques permettant l'enregistrement mono-coup. Le principe général consiste à "imprimer" le signal à étudier sur une impulsion laser étirée dans le temps, puis à analyser cette impulsion. Nous montrerons comment des développements récents ont permis d'obtenir de résoudre des défis importants en termes de vitesses d'acquisition (de l'ordre de plusieurs millions de traces TDS), de résolution temporelle et de résolution spectrale.

Nous présenterons des exemples de systèmes de "time-domain spectroscopy" mono-coup et des systèmes permettant l'étude de la forme (et du spectre) d'impulsions THz cohérente au synchrotron SOLEIL. Nous montrerons également comment ces techniques permettent d'étudier la forme de paquets d'électrons relativistes à SOLEIL, KARA (Karlsruhe Institute of Technology) et European XFEL. Ces techniques single-shot devraient potentiellement trouver des applications importantes pour les applications utilisant sources THz puissantes et donc à très faible fréquence de répétition, comme en spectroscopie THz non-linéaire.

4.4. Métrologie pour le spatial-Contraintes liées à l'environnement.

Pierre Etcheto – Centre National d'Etude Spatiale-Département Optique (Toulouse)

Les instruments optiques spatiaux doivent répondre à des spécifications exigeantes en imagerie, radiométrie et spectrométrie –parfois tous ensemble. D'autre part ils sont soumis en vol à un environnement extrême (vide, thermique, mécanique et radiation) qui peuvent causer instabilités et vieillissement.

En plus d'une conception rigoureuse et d'une sélection des matériaux compatibles, les optiques spatiales font l'objet de mesures à plusieurs niveaux, pour vérifier leurs performances, au sol et dans l'environnement spatial.

- Contrôle et qualification des matériaux.
- Contrôle des composants.
- Caractérisation optique des sous-ensembles optiques.
- Caractérisation de l'instrument complet et tests d'environnement.
- Contrôles et recalages en vol, et corrections associées.

Nous présenterons un panorama de ces mesures sur différents types d'instruments développés par le CNES. Certaines, par exemple sous vide ou en lumière parasite, ou sur les instruments de grande dimension, exigent des moyens sols complexes.

4.5. IASI NG un spectro-radiomètre infrarouge pour la prévision météo et le suivi de l'atmosphère.

Elisa Baldit – Centre National d'Etudes Spatiales (Toulouse)

Développé par Airbus Defence and Space sous la responsabilité globale du CNES en partenariat avec Eumetsat, le spectromètre infrarouge IASI-NG pour Infrared Atmospheric Sounding Interferometer New Generation est un élément clé de la charge utile des satellites météorologiques européens en orbite polaire METOP-SG. Avec IASI NG, l'objectif est de poursuivre et améliorer la mission de IASI au cours des prochaines décennies (2020-2040) dans le domaine de la météorologie opérationnelle, de la surveillance du climat et de la caractérisation de la composition atmosphérique liée au climat, à la chimie atmosphérique et à l'environnement. Le principal défi est l'amélioration des performances d'un facteur deux des performances spectrales et radiométriques par rapport à IASI, sur la gamme spectrale 3,5 μ m - 15,5 μ m.

La technique de mesure est basée sur un spectromètre à transformée de Fourier à grand champ mettant en œuvre avec un seul mécanisme un interféromètre de Mertz. Le mouvement de 2 paires de prismes limite fortement l'auto-apodisation et permet d'obtenir la résolution spectrale souhaitée un champ dans l'interféromètre de plus de 8°. L'instrument inclut dans sa conception différentes métrologies et systèmes d'étalonnages pour assurer ses performances tout au long de ces 7.5 années de vie en orbite.

Il est actuellement en phase d'intégration et de test de qualification et de performance, pour une livraison du premier des 3 modèles pour fin 2021.

La présentation détaillera le design de cet instrument, en mettant l'accent sur les nouveautés à la fois technologiques et conceptuelles par rapport à IASI. Nous présenterons également ses performances, telles qu'estimées à la Revue de Conception Détaillée et les résultats des premières mesures. Enfin, nous nous concentrerons sur l'état général de développement de l'instrument et les différentes étapes à venir jusqu'à la livraison.

4.6. L'optique pour la Métrologie Marine

Olivier Fauvarque – Ifremer (Brest)

A l'heure du changement climatique et d'une pression humaine toujours croissante sur le milieu marin, la nécessité d'une surveillance globale et permanente des mers et des océans se fait de plus en plus impérieuse. Depuis quelques années de nombreux réseaux d'instruments, issus d'initiatives nationales tendent à se structurer et à se fédérer au niveau européen. On peut citer le projet EMSO et ses observatoires de fond de mer ou la flotte de profileurs EURO-ARGO qui dérivent dans les océans pour en offrir une cartographie en temps réel. Un enjeu associé à ce nouvel afflux d'information tient à la qualité et à la structuration des données recueillies. Pour permettre en effet aux océanographes les meilleures analyses possibles, les capteurs embarqués doivent être précis, fiables et inter-comparables ; en d'autres termes, ils doivent répondre aux standards de la métrologie. Ce séminaire s'intéressera à certains de ces capteurs basés sur l'optique et développés pour suivre les grandeurs physiques, chimiques ou biologiques de l'océan. On se focalisera notamment sur les diverses solutions mises en œuvre à l'Ifremer pour les rendre compatibles avec les contraintes du milieu marin comme les fortes pressions ou les biosalissures. L'exposé s'achèvera sur un cas pratique d'évolution de capteurs pour cause de changement de normes métrologiques, à savoir la migration des salinomètres à conductimétrie vers ceux basés sur l'interférométrie

5/ Mise en œuvre d'outils métrologiques à travers différents projets.

5.1. ELT, son optique et ses instruments

Benoit Neichel - Laboratoire d'astrophysique de Marseille (Marseille)

(...résumé non disponible...)

5.2. Microscopie à spin unique

Vincent Jacques – Laboratoire Charles Coulomb (Montpellier)

La mécanique quantique nous dévoile le comportement des objets aux toutes petites échelles : les atomes, les ions, les électrons... Grâce aux progrès importants dans ce domaine depuis plusieurs dizaines d'années, on sait désormais isoler, manipuler et observer ces objets à l'échelle individuelle. On sait en particulier préparer et lire optiquement le spin individuel d'atomes artificiels uniques isolés dans le diamant, atomes artificiels formés par des défauts atomiques dans la matrice solide. Dans cet exposé, nous verrons quelles sont les techniques de microscopie optique mises en œuvre pour isoler un tel défaut, le sonder et le manipuler à l'échelle individuelle, et ce à des fins d'applications dans le domaine de la mesure notamment. Nous montrerons en particulier comment le spin électronique associé à ce défaut peut être employé pour réaliser des mesures ultra-sensibles et aux échelles nanométriques, d'un champ magnétique, d'un bruit magnétique ou de la température.

5.3. Mesures métrologiques mises en œuvre pour les instruments EUI et SPICE de Solar Orbiter.

Anne Philippon – Institut d'Astrophysique Spatiale (Orsay)

La sonde spatiale Solar Orbiter (ESA/NASA) a décollé de Cap Canaveral le 10 février 2020 emportant à son bord 11 instruments dédiés à l'étude du Soleil dont EUI et SPICE qui ont été en partie conçus réalisés et testés à l'institut d'astrophysique Spatiale. Je présenterai les mesures métrologiques mises en œuvre de façon standard dans le cadre du développement de télescopes spatiaux, les difficultés rencontrées dans le cadre particulier d'EUI, comment elles ont été surmontées et les leçons tirées de ces expériences.