

## Soutenance de thèse

**Florian GAUDFRIN** soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA OLIMPES et intitulée «*Lidar supercontinuum pour la caractérisation spectrale des milieux diffusants à haute résolution spatiale : Étude numérique et développement instrumental*»

**Le 17 février 2020 à 14h00, Salle des thèses ISAE-SUPAERO**

devant le jury composé de

M. Nicolas RIVIERE	Maître de recherche ONERA	Directeur de thèse
M. Olivier PUJOL	Maître de Conférences Université de Lille	Co-directeur de thèse
M. Jacques PELON	Directeur de Recherche LATMOS	
M. Hervé DELBARRE	Professeur Université du Littoral Côte d'Opale	Rapporteur
M. Romain CEOLATO	Ingénieur de Recherche ONERA	
M. Vincent COUDERC	Directeur de Recherche XLIM	
Mme Inka MANEK-HONNINGER	Professeure Université de Bordeaux	Rapporteur
M. Guillaume HUSS	Directeur général Société LEUKOS	

**Résumé :** Le lidar est un instrument de télédétection active similaire au radar opérant dans la partie optique du spectre électromagnétique. Le principe est d'illuminer un milieu diffusant, soit solide (ex. végétation, peinture) soit dilué (ex. atmosphère, panache de fumée), et d'en collecter la lumière rétrodiffusée. Dans notre étude, deux processus d'interaction lumière-matière mis en jeu au cours de la propagation d'une impulsion laser sont étudiés : la diffusion élastique et l'absorption de la lumière. Les méthodes de diagnostic par méthode lidar donnent des informations sur les paramètres optiques du milieu (coefficients de diffusion et d'absorption). Ces grandeurs dépendent des propriétés de la lumière (longueur d'onde, polarisation) et sont ensuite utilisées pour remonter aux propriétés microscopiques du milieu (i.e. distribution en taille, morphologie, indice optique, concentrations). Les techniques lidar actuelles présentent néanmoins des limitations. Les sources laser utilisées sont limitées à quelques longueurs d'onde visible ou proche infrarouge. Les propriétés optiques des particules composant le milieu diffusant sont donc relatives à ces longueurs d'onde, ce qui ne permet pas aujourd'hui d'identifier complètement les propriétés microphysiques du milieu sans en avoir une connaissance a priori. Des hypothèses sont formulées pour contraindre les méthodes d'inversion et remonter aux informations d'intérêt (i.e. nature, forme ou indice complexe des aérosols) des aérosols naturels et anthropiques (particules carbonées, poussières désertiques, cendres volcaniques, etc.). En outre, les lidars actuels sont souvent destinés à des portées kilométriques alors que de nouveaux besoins tendent vers des mesures à courtes distances : réaliser des mesures in situ en sortie de tuyère, contrôler localement les panaches de particules industrielles à haute résolution spatiale... Les sources laser supercontinuum s'étendent du visible à l'infrarouge et offrent de nouvelles possibilités de mesures des propriétés optiques des aérosols sur un large domaine spectral continu. Leur utilisation dans les systèmes lidar est donc envisagée pour obtenir les paramètres optiques du milieu sur toute une gamme continue de longueurs d'onde. L'un des objectifs majeurs de cette thèse est de démontrer la viabilité des lidars supercontinuum pour la caractérisation spectrale de cibles surfaciques et volumiques à haute résolution spatiale. Trois axes de recherche ont été menés. Le premier concerne l'étude numérique du système. Un simulateur lidar hyperspectral, nommé PERFALIS a été développé pour prédire les performances de l'instrument et montrer d'un point de vue numérique la faisabilité des mesures. Le second axe porte sur la conception instrumentale d'un lidar appelé COLIBRIS, développé pour réaliser des mesures lidar à courtes portées (> 10 m) à haute résolution spatiale (submétrique). Une première version a été proposée en analyse monochromatique et une seconde avec une analyse hyperspectral de la lumière rétrodiffusée. Le dernier axe concerne le développement d'une nouvelle méthode d'inversion lidar, nommée ST-LIM. Cette méthode a permis d'identifier les propriétés optiques d'un panache d'huile sans hypothèse a priori sur le lidar ratio (paramètre optique caractérisant le milieu sondé). La comparaison de mesures expérimentales avec les

résultats de simulations a permis de valider le simulateur lidar dans ses deux modes de fonctionnement (monochromatique et spectral). Nous montrons entre autres qu'il est important de considérer la forme réelle des impulsions laser lors de l'interaction lumière-matière dans le cas de sondages de panaches de faible épaisseur à haute résolution spatiale. À l'avenir, le simulateur lidar pourra être utilisé pour dimensionner de nouveaux instruments lidar supercontinuum ou monochromatique dédiés à des applications spécifiques ou encore d'étudier les performances de nouveaux prototypes COLIBRIS pour en faire une version aéroportée.

**Mots-clés :** Lidar, Télédétection, laser supercontinuum, Hyperspectral, Diffusion, Aérosols

**Summary:** Remote sensing or remote diagnostic techniques meet many dual needs, such as the detection of threats (eg biocontaminants), the characterization of the optical properties of materials (eg paints) or the study of the environment (ex. problem of aerosols and effluents). The usual techniques such as remote sensing by LIDAR or the measurement of optical properties by scatterometer provide partial solutions to the problem of the optical diagnosis of diffusing media. These methods generally require an a priori knowledge of the environment. For example, hypotheses are formulated on the nature of particles (eg spherical form instead of arbitrary shapes, type and index ...), simple diffusion instead of multiple and dependent diffusion, and so on. The emergence of atmospheric LIDARs in the middle infrared range dates back several years. Several institutes and research laboratories, such as the National Institute of Optics (Quebec, Canada) or the Swedish Defense Research Agency (Sweden), have proposed LIDAR concepts in the infrared tunable OPO lasers for the purpose of probing the atmosphere for the detection of bioaerosols. These laser sources are advantageous because they provide high peak powers to probe the atmosphere on several kilometers of distance. However, new needs are emerging for in-situ and short-range measurements. These needs include adapting systems to make them more compact and compatible with embedded and easily deployable solutions in the field. Over the past ten years, the use of hyperspectral lasers of the 'supercontinuum of white light' type has been anticipated to meet these new needs in the field of LIDAR. Several laboratories, such as the Finnish Geodetic Institute (Masala, Finland) or Air Force Research Lab (Ohio, USA), have been offering the first prototypes of hyperspectral LIDAR 'supercontinuum' for nearly 5 years. However, up to now, no solution makes it possible to trace all the microphysical properties of the particles simultaneously. For more than 10 years, LEUKOS has been developing supercontinuum laser sources. Long time oriented towards the generation of UV wavelengths, LEUKOS has recently begun to study the widening of the other side of the spectrum towards the infrared medium. These supercontinuum laser sources appear today as multi-application tools. LEUKOS wishes to focus on industrial products that integrate these new sources in close collaboration with French research centers in the fields of optics and the atmosphere. ONERA, through its work previously carried out in the Optics Department, positions itself as a proposal force in the fusion of spectral and polarimetric and directional data for the optical diagnosis of diffusing media. Research benches have been developed to measure hyperspectral and polarimetric optical signatures of materials and, more generally, of any scattering media. The LOA is particularly interested in the optical properties of diffusers such as aerosols and clouds to constrain radiative transfer models, interpret observations and better estimate the radiative radiative balance. One of the major interests of the proposed work lies in the determination of these properties over a wide spectral range. The measurement of aerosols (hydrometeors, marine salts, pollens, etc.) and the use of  $\mu$ LIDAR data from visible to thermal IR is innovative in the field of atmospheric sciences. The fusion of spectral, polarimetric and multi-directional information makes it possible to simultaneously find all the microphysical properties of interest of a diffusing medium such as size, complex optical index and particle concentration while reducing the number of hypotheses physical effects on the environment. This approach is, however, limited to particles of comparable size to the covered spectral domain. Access to diffusion measurements (eg backscatter coefficients, phase function) over a wide spectral range (typically between 0.4  $\mu\text{m}$  and 4.7  $\mu\text{m}$ ) will make it possible to extract certain microphysical parameters without any simplifying hypothesis and to increase the size range accessible by this method (dust, marine aerosols, agglomerated soot, biocontaminants ...). Several methods are already envisaged (eg methods of differential diffusion, fusion of information ...). This approach makes it possible to improve the characterization of the atmosphere, which is an important need in the environment (study of pollution ...). ONERA, LOA and LEUKOS wish to join forces to extend this optical diagnostic technique which combines both the spectral aspect and the polarimetric aspect of light in the field of the middle infrared.

**Keywords:** Lidar, Remote sensing, Supercontinuum laser, Hyperspectral, Scattering, Aerosols