

Imagerie avancée

Dans le cadre de cette thématique de recherche, le développement et l'optimisation de techniques non conventionnelles **d'imagerie polarimétrique** (imagerie spectro-polarimétrique, imagerie opto-hyperfréquence,...) et **d'imagerie de photons balistiques** à travers les milieux diffusants fournissent les outils nécessaires pour mieux comprendre l'interaction de la lumière polarisée avec la matière. Ces thématiques ont à terme pour vocation d'être étudiées dans le cadre d'applications pour le biomédical en lien avec des collègues biologistes, notamment pour la **microscopie biophotonique non conventionnelle**. Cette thématique s'inscrit dans la dynamique du pôle de compétitivité "*Images & Réseaux*" de la région Bretagne.

Techniques non-conventionnelles pour l'imagerie polarimétrique

L'imagerie polarimétrique, qui consiste à former une cartographie de l'état de polarisation de la lumière émise par une scène, permet de fournir des contrastes physiques complémentaires à ceux obtenus en imagerie classique. Pour cette raison, ce type d'imagerie présente de nombreuses applications pour l'imagerie biomédicale, l'industrie, la télédétection, ou encore pour la caractérisation de matériaux. Il constitue un thème central de recherche parmi les activités en Imagerie avancée.

- **Mesure de dépolarisation/dichroïsme par brisure d'orthogonalité** : Cette nouvelle modalité de mesure proposée en 2011 au sein de l'équipe FOTON-DOP est inspirée de techniques d'optique-hyperfréquence, et permet de fournir une mesure directe, rapide et sensible du pouvoir dépolarisant et/ou du dichroïsme d'un échantillon. Elle repose sur la préparation et l'utilisation d'un faisceau d'illumination spécifique, afin d'éclairer l'objet à caractériser à l'aide de deux ondes lumineuses de fréquences respectives ν_1 et ν_2 très légèrement différentes, et dont les états de polarisation respectifs sont arbitraires (non nécessairement linéaires), mais orthogonaux entre eux au sens mathématique. Lors de l'interaction du faisceau avec un échantillon purement dépolarisant ou dichroïque, l'interférence des deux champs aux fréquences ν_1 et ν_2 provoque une modulation périodique de l'intensité mesurée par le détecteur à la différence de fréquence $\Delta\nu = |\nu_1 - \nu_2|$ entre les deux ondes. L'amplitude de cette modulation renseigne sur le taux de dépolarisation ou de dichroïsme de l'échantillon. En revanche, l'interaction avec un échantillon biréfringent ne provoquera pas de « brisure d'orthogonalité » : ainsi la technique est insensible aux biréfringences et rotations de polarisation, ce qui la rend très adaptée au déport de la mesure par fibre pour des applications endoscopiques. Les premières validations expérimentales de cette technique originale baptisée DSOB (Depolarization/Dichroism Sensing by Orthogonality Breaking) ont été réalisées dans l'infrarouge [Fad12a] à $1,55 \mu\text{m}$ au moyen d'une cavité laser Er:Yb bi-fréquence développée au laboratoire, et qui fournit intrinsèquement l'état d'illumination nécessaire à la technique DSOB. Parallèlement, nous avons implémenté cette technique sur un banc de microscopie avec une source bi-fréquence visible à base d'un montage à acousto-optique. L'interaction entre cet éclairage particulier et un échantillon biologique a mis en évidence de nouvelles structures sur les images d'amplitude et de phase du signal rétrodiffusé (Voir Fig. ? ci-dessous). En outre, l'utilisation d'états de polarisation circulaires à l'émission s'est révélée parfaitement adaptée à la mesure instantanée et complète (taux et angle de diatténuation) d'anisotropies d'absorption (dichroïsmes) [Ort15] (Fig. 1.c). Plus récemment, nous avons conçu un démonstrateur d'imagerie polarimétrique actif infrarouge par brisure d'orthogonalité et étudions son apport pour la détection et la discrimination de cibles à longue portée [Par17] (voir Fig. 2). Enfin, dans le cadre de l'endoscopie polarimétrique, nous explorons le potentiel de la brisure d'orthogonalité pour le déport par fibre optique multimode [Par16].

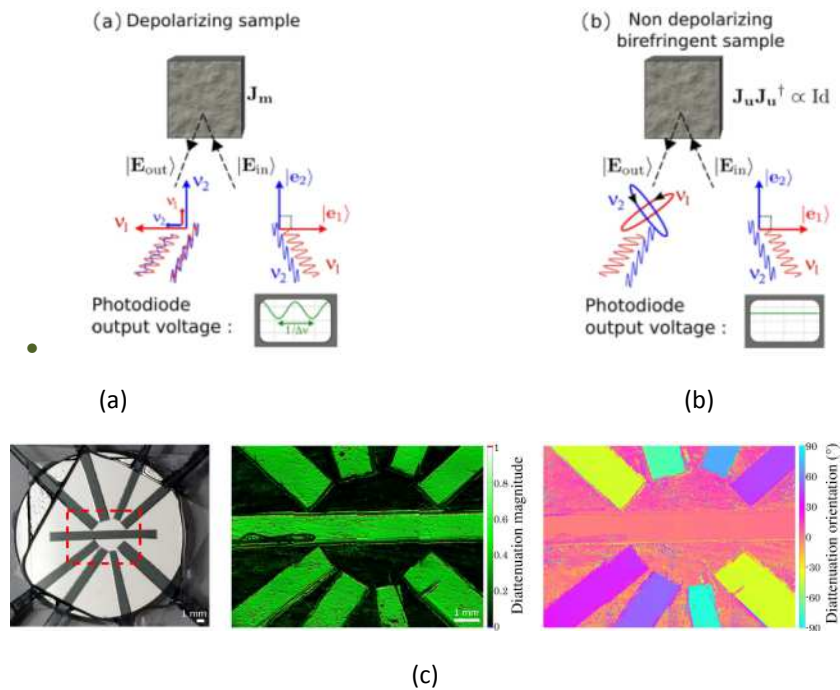


Fig. 1 : Principe de la mesure de dépolarisation par brisure d'orthogonalité. Cas d'un matériau: (a) dépolarisant/dichroïque, (b) isotrope ou biréfringent. L'apparition d'une composante de battement à la fréquence $\Delta\nu$ sur l'intensité mesurée traduit la nature dichroïque/dépolarisante d'un échantillon ; (c) À gauche : image d'intensité classique d'un échantillon dichroïque test composé de morceaux de polariseurs, au centre : image de contraste de DSOB fournissant le taux de diatténuation de l'échantillon, à droite : image de phase du signal DSOB fournissant l'orientation de l'anisotropie d'absorption de l'échantillon.

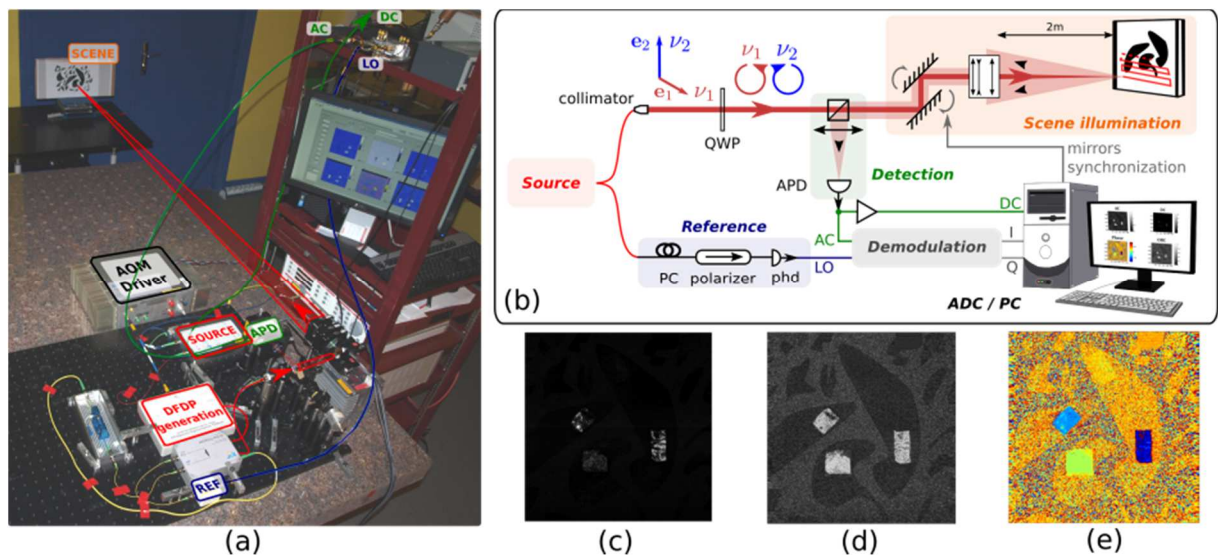


Fig. 2: (a) Photographie et (b) schéma du démonstrateur d'imagerie polarimétrique actif infrarouge par brisure d'orthogonalité. Images (g) d'intensité, (h) de contraste et (i) de phase capturées simultanément par l'imageur en une seule acquisition sur une scène constituée de trois polariseurs infrarouges camouflés sur des motifs noirs imprimés sur une feuille blanche.

- **Imagerie computationnelle de degré de polarisation :** Une autre technique étudiée consiste à réaliser des images du pouvoir dépolarisant d'un objet d'intérêt (par l'estimation du degré de polarisation de la lumière rétrodiffusée par celui-ci) en analysant les fluctuations locales d'intensité de speckle d'une image acquise sous éclairage cohérent (laser), sans nécessiter aucun composant à sensibilité polarimétrique [Fad12b]. Ce travail expérimental mené en collaboration étroite avec l'Institut Fresnel a permis de vérifier les prédictions théoriques sur la précision des estimateurs et de confirmer, à plusieurs longueurs d'onde, la validité de la technique en présence d'échantillons biréfringents. Les travaux actuels s'attachent à caractériser théoriquement les performances de cette technique de mesure instantanée pour des tâches de détection/discrimination [Fad15].

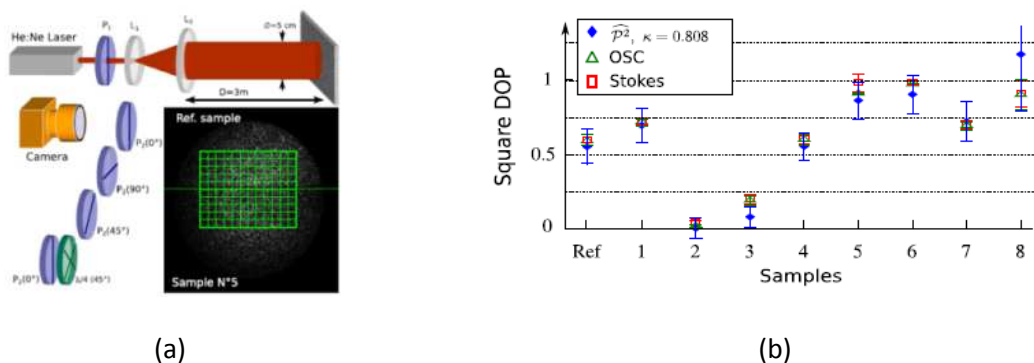


Fig. 2: L'analyse du contraste d'une unique image d'intensité de speckle obtenue en éclairant un objet d'intérêt avec une source cohérente (a) permet d'obtenir une estimation du pouvoir dépolarisant de l'objet en accord avec les techniques usuelles (b).

- **Imagerie spectro-polarimétrique :** La réalisation d'un démonstrateur d'imageur spectro-polarimétrique capable de fournir des images polarimétriques sur plusieurs canaux spectraux ouvre également de nombreuses perspectives en terme de recherche (étude de l'interaction lumière-matière, traitement du signal/image) et d'applications (discrimination de matériaux, décamouflage, etc.) [Alo09]. En effet, l'utilisation conjointe des informations spectrales et polarimétriques permet de révéler des contrastes invisibles sur une image couleur standard. Ces études sont menées en collaboration avec Thales Research and Technology.

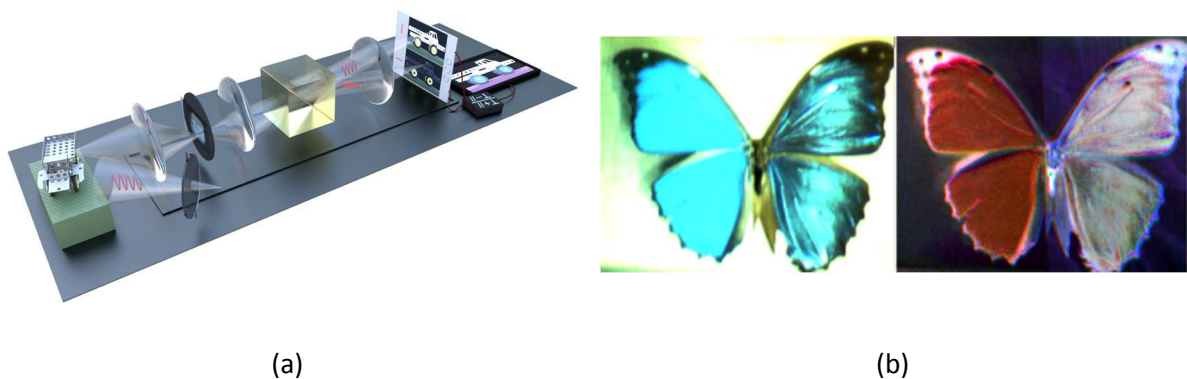


Fig. 3: (a) Schéma de principe du démonstrateur d'imagerie spectro-polarimétrique RGB développé dans l'équipe FOTON-DOP. (b) Exemple de contraste spécifique spectro-polarimétrique (discrimination entre coloration pigmentaire/interférentielle).

Sélection de publications :

[Fad12a] J. Fade, and M. Alouini, "Depolarization remote sensing by orthogonality breaking," *Phys. Rev. Letters* 109 (4), 043901 (2012).

[Ort15] N. Ortega-Quijano, J. Fade, E. Schaub , F. Parnet and M. Alouini, "Full characterization of dichroic samples from a single measurement by circular polarization orthogonality breaking," *Optics Letters* , 40 (7), 1270-1273 (2015).

[Par17] F. Parnet, J. Fade, N. Ortega-Quijano, L. Goulc'hen, L. Frein and M. Alouini, "Free-space active polarimetric imager operating at 1.55 μm by orthogonality breaking sensing," *Optics Letters* , 42 (4), 723-726 (2017).

[Par16] F. Parnet, J. Fade and M. Alouini, "Orthogonality breaking through few-mode optical fiber," *JOSAA*, 55 (10), 2508-2520 (2016).

[Fad12b] J. Fade, M. Roche and M. Alouini, "Computational polarization imaging from a single speckle image," *Optics Letters* 37 (3), 386-388 (2012).

[Fad15] J. Fade, M. Roche, M. Alouini, "Polarizer-free degree of polarization computational imaging from a single speckle image," *SPIE Optical Engineering + Applications, Polarization Science and Remote Sensing VII*, San Diego, United States (2015).

[Alo09] M. Alouini, *et al.*, "Near-infrared active polarimetric and multispectral laboratory demonstrator for target detection," *Applied Optics* 48, 1610-1618 (2009).

Imagerie polarimétrique à l'échelle du grain de speckle

Imagerie temps-réel de photons balistiques

Imagerie biophotonique

Thèses en lien avec cette thématique (passées/en cours) :

Swapnesh Panigrahi, « *Real-time imaging through fog over long distances* », 2016

François Parnet, « *Imagerie spectro-polarimétrique temps réel à longue distance par approche optique-hyper-fréquence et traitement avancé d'images spectro-polarimétriques* »

Collaborations :

Raman Research Institute (Bangalore, India)

Laboratoire Aimé Cotton (Palaiseau)

Thales Research and Technology (Palaiseau)

Institut Fresnel (Marseille)

IRFU, Service d'Astrophysique, CEA (Gif-sur-Yvette)

Laboratoire Charles Fabry Institut d'Optique (Palaiseau)

Institut de Génétique du Développement de Rennes (Rennes)

Plateforme d'imagerie BIOSIT (Rennes)

Contacts :



M. Alouini



J. Fade



G. Loas

Équipe FOTON-DOP

Responsable d'équipe : François BONDU

Tel : +33 223 235 156

francois.bondu@univ-rennes1.fr

Site web : <http://foton.cnrs.fr/v2016/spip.php?rubrique111>

Institut FOTON - Équipe DOP

Université de Rennes 1 – CNRS UMR 6082

Campus de Beaulieu – Bat 11B

263 avenue du Général Leclerc

35042 RENNES CEDEX

