

# L'IMAGERIE POLARIMÉTRIQUE

**Julien FADE<sup>1</sup>, Matthieu BOFFETY<sup>2</sup>, Vincent DEVLAMINCK<sup>3</sup>**

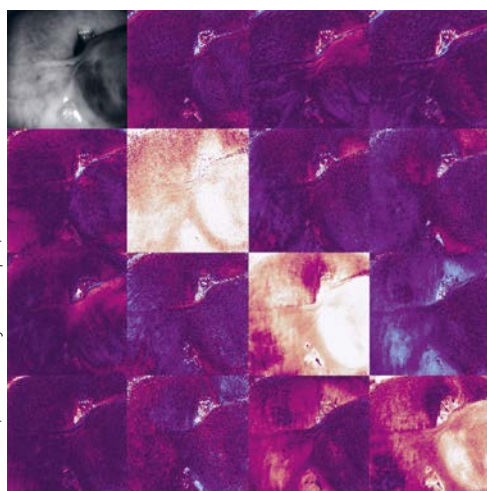
<sup>1</sup> Univ Rennes, CNRS, Institut FOTON, UMR 6082, 35000 Rennes, France

<sup>2</sup> Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Charles Fabry, 91127 Palaiseau, France

<sup>3</sup> Univ. Lille, CNRS, UMR 9189 CRISTAL, 59000 Lille, France

julien.fade@univ-rennes1.fr

© LPI/CW/École Polytechnique/CNRS



**Les concepts de la polarimétrie sont utilisés depuis longtemps pour la caractérisation optique des matériaux. Toutefois, l'instrumentation polarimétrique a connu son véritable essor avec l'apparition de sources artificielles contrôlées et de photodétecteurs sensibles, fournissant des outils de caractérisation très performants (ellipsomètres). Depuis trente ans, c'est au tour de l'imagerie polarimétrique de se développer avec l'apparition de systèmes de plus en plus rapides et compacts à base de composants à cristaux liquides ou, plus récemment, de capteurs d'images micro-structurés.**

<https://doi.org/10.1051/photon/202110957>

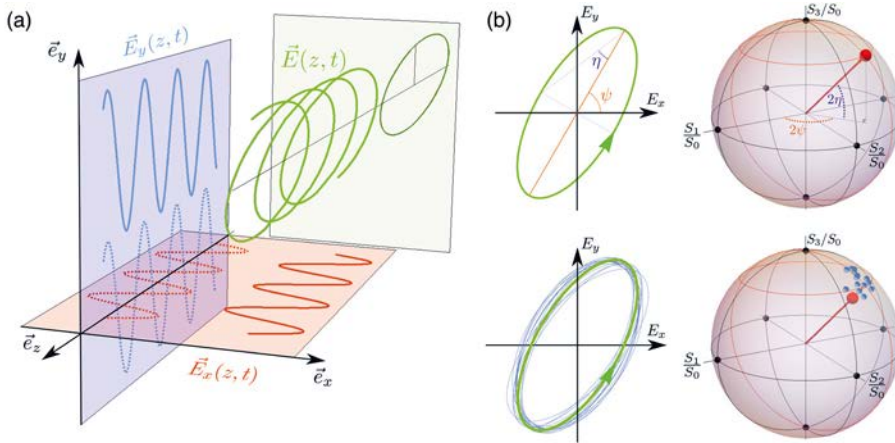
Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation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

**B**ien que découverts assez tardivement au milieu du XVII<sup>e</sup> siècle car indiscernables à l'œil humain (et aux caméras standard), les phénomènes liés à la polarisation de la lumière ont trouvé leur explication avec l'élaboration de la théorie ondulatoire et électromagnétique de la lumière. Communément définie comme la trajectoire du vecteur champ électrique de l'onde électromagnétique dans le plan transverse au vecteur d'onde  $\vec{k}$ , la polarisation de la lumière peut se décrire au moyen de différents formalismes mathématiques [1]. Pour un rayonnement monochromatique de fréquence  $\nu$ , la solution la plus générale de l'équation de propagation pour le champ (complexe)

$\vec{\underline{E}}(\vec{r}, t) = \{A_x \vec{e}_x + A_y \vec{e}_y\} \cdot \exp[-i(2\pi\nu t - \vec{k} \cdot \vec{r})]$  correspond à une trajectoire elliptique parcourue périodiquement au cours du temps (période  $T = 1/\nu$ ) et de l'espace (longueur d'onde  $\lambda = 2\pi / |\vec{k}|$ ) (Fig.1.a). Au-delà de la description purement géométrique en azimuth  $\psi$  et ellipticité  $\eta$  de cette trajectoire (voir Fig.1.a), le formalisme de Jones décrit l'enveloppe complexe du champ  $\vec{\underline{E}}(\vec{r}, t)$  comme un vecteur colonne (complexe) du plan transverse  $\vec{\underline{E}}(\vec{r}, t) \propto [A_x, A_y e^{i\theta}]^T$ , avec  $\theta = \theta_y - \theta_x$  représentant le déphasage (en radians) entre les oscillations des composantes transverses du champ ( $\theta = 0$  pour une polarisation linéaire et  $\theta = \pm\pi/2$  pour une polarisation circulaire). Cette description vectorielle permet une manipulation et une comparaison aisées des états polarimétriques, et permet de décrire toute

transformation linéaire déterministe de l'état de polarisation par une « matrice de Jones »  $J$  à  $2 \times 2$  composantes complexes vérifiant  $\vec{\underline{E}}_s = J \vec{\underline{E}}_e$  ( $e$  : entrée /  $s$  : sortie).

Dans le cas général (et la plupart du temps en imagerie polarimétrique), l'état de polarisation accessible à la mesure n'est cependant pas purement déterministe, et présente une polarisation partielle due à des effets de moyennage sur la distribution (spatiale, spectrale, angulaire, etc.) de la source et/ou du détecteur. Ces phénomènes ne peuvent être directement décrits avec le formalisme de Jones qui repose sur une description cohérente « en champ », grandeur physique difficilement accessible directement dans le domaine optique. La modélisation de Stokes pallie ces inconvénients en ●●●



**Figure 1.** a) Le champ électrique d'une onde lumineuse peut se décomposer en deux composantes transverses déphasées (rouge/bleu), dont la trajectoire résultante est en général une ellipse parcourue au cours du temps et de la direction de propagation. b) Le vecteur de Stokes définit un point (unique) de l'espace dans la représentation de Poincaré: un état polarimétrique pur (déterministe) est nécessairement situé sur une sphère de rayon unité, les états linéaires et circulaires figurant respectivement sur l'équateur et aux pôles (Fig. 1.b, haut). Pour un état partiellement polarisé (résultant d'une distribution statistique d'états purs), la distance de ce point au centre de la sphère est inférieure à l'unité, et égale au degré de polarisation (Fig. 1.b, bas).

décrivant la polarisation par un vecteur à quatre composantes réelles

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \propto \begin{bmatrix} I_x + I_y \\ I_x - I_y \\ I_{45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_G - I_D \end{bmatrix}$$

homogènes à des grandeurs énergétiques d'éclairement ou d'intensité lumineuse et mesurables expérimentalement [1]. Le paramètre  $S_0$  traduit l'intensité totale du champ, tandis que les termes  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  sont définis à partir des différences d'intensité des composantes de l'onde suivant la base des états rectilignes X/Y, suivant la base des états rectilignes à +/- 45° des axes X/Y, et suivant la base des états circulaires gauche/droit (G/D). Pour quantifier le caractère aléatoire ou « désordonné » de l'onde lumineuse, on définit le degré de polarisation  $\mathcal{P} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} / S_0$ , compris entre 0 (lumière totalement dépolarisée, ex : sources de lumière thermiques) et 1 (lumière parfaitement polarisée, ex : faisceau laser monomode) (Fig. 1.b). Enfin, l'interaction de la lumière polarisée avec un milieu linéaire homogène obéit également à une relation matricielle  $\vec{S}_s = M\vec{S}_e$ , où  $M$  désigne la matrice de Mueller à 4x4 composantes réelles qui permet de

décrire aisément les phénomènes de dépoliarisation (Voir encart imagerie de Mueller).

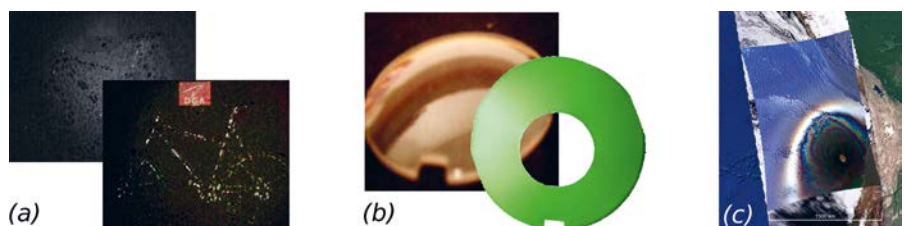
La nature vectorielle de l'information polarimétrique est caractéristique de la richesse de son contenu informationnel mais n'en facilite pas son extraction, notamment en imagerie où l'on souhaite cartographier spatialement certains de ces paramètres. Les très nombreuses techniques d'imagerie polarimétrique peuvent se classer en fonction de leur complexité, les plus simples se limitant à l'utilisation d'un critère scalaire de type « contraste polarimétrique » (degré ou azimut de polarisation

linéaire par exemple), obtenu en « analysant » la polarisation de l'onde lumineuse selon deux directions de polarisation. Cette opération d'analyse est à la base de la quasi-totalité des techniques d'imagerie polarimétrique: elle consiste à imager sur une caméra l'intensité lumineuse obtenue après projection de la lumière sur des états de polarisation prédéfinis (grâce à des composants polariseurs et retardateurs).

Dès lors que l'on souhaite cartographier l'état polarimétrique complet (c'est-à-dire le vecteur de Stokes), ou le degré de polarisation de la lumière, il faut nécessairement recourir à un minimum de quatre mesures d'intensité. Les différentes méthodes de réalisation de cette « imagerie de Stokes » correspondent chacune à un compromis expérimental précis entre rapidité d'acquisition, et résolution spatiale des images finales, mais également sensibilité au bruit, facilité de mise en œuvre, etc. [2]. On distingue généralement les imageurs à division temporelle (mesures séquentielles dans le temps), et les instruments qui opèrent simultanément ces mesures mais en sollicitant des voies optiques différentes (division d'amplitude), ou des zones distinctes du capteur matriciel (division d'ouverture).

L'imagerie de Stokes fournit une information spatiale sur les propriétés polarimétriques de l'onde mesurée : les applications de cette technique d'imagerie — qui peut être passive ou active — visent ainsi en général à remonter aux causes physiques ayant

**Figure 2.** (a) Objet caché sous un filet de camouflage en infrarouge (imagerie active à 1,5 µm à gauche, contraste polarimétrique à droite) © IOGS-LCF/Thales RT/DGA. (b) Reconstruction 3D partielle (en vert) d'un objet transparent (photo) par imagerie polarimétrique © ImViA/VIBOT/Univ. Bourgogne/CNRS. (c) Composition colorée de 3 canaux polarisés (490, 670 et 865 nm) d'un champ de stratocumulus mettant en évidence la diffusion lumineuse par des gouttelettes d'eau © LOA/Univ. Lille 1/CNRS/POLDER-3, mission PARASOL/CNES.

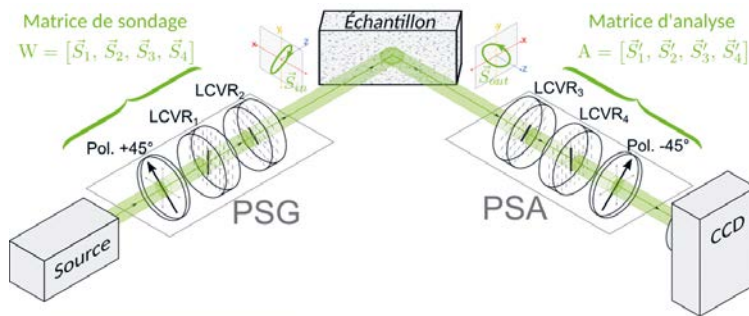


produit ou altéré l'état de polarisation de l'onde (orientation de surfaces, propriétés structurales/chimiques du matériau, etc.)

Pour accéder aux propriétés polarimétriques des *matériaux* eux-mêmes, la méthode privilégiée est l'imagerie de Mueller (Voir encart). Cette méthode

d'imagerie est nécessairement plus « riche » en information que l'imagerie de Stokes, mais elle n'est par contre pas toujours réalisable puisqu'elle suppose un contrôle de l'état de polarisation de la source d'émission (imagerie active), et un nombre de mesures important ●●●

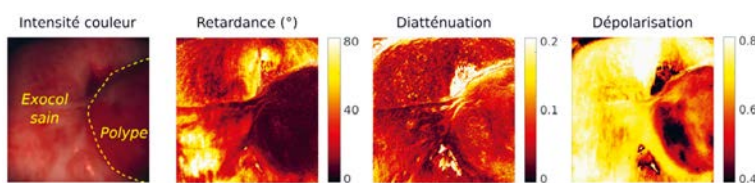
### L'IMAGERIE DE MUELLER



PSG/PSA: polarization state generator/analyzer  
LCVR: liquid crystal variable retarder

La mesure des seize composantes de la matrice de Mueller qui illustrent l'en-tête de cet article repose sur l'utilisation d'un polarimètre imageur séquentiel en réflexion, illustré ci-dessus. Son principe consiste à éclairer l'objet à imager avec une onde lumineuse dont l'état de polarisation est modulé successivement selon quatre configurations avec un générateur d'états de polarisation (PSG). Pour chacune de ces configurations, l'instrument réalise une imagerie de Stokes de l'onde (après interaction en réflexion ou en transmission avec le milieu) au moyen d'un analyseur de polarisation (PSA). Ces PSG/PSA qui vont permettre la sélection des états de polarisation sont classiquement constitués d'un polariseur linéaire suivi/précédé par deux retardateurs à cristaux liquides. Si d'autres approches expérimentales existent pour optimiser la rapidité des mesures, elles reposent sur un principe similaire. En raison du nombre important de mesures, les imageurs de Mueller nécessitent une conception optique très soignée et des protocoles élaborés de calibrage/filtrage des mesures.

Peu informatif en l'état, l'ensemble des seize images « brutes » doit être traité afin de cartographier les propriétés polarimétriques élémentaires du milieu: le dichroïsme (anisotropie d'absorption des états de polarisation propres); la biréfringence (anisotropie de phase); et la dépolarisation (liée aux fluctuations de polarisation, induites par le milieu mais aussi les conditions de mesure). Les méthodes de décomposition classiques utilisent des techniques de factorisation de matrices: le résultat est une combinaison série d'une matrice de diatténuation (quantification du dichroïsme), de retardance (quantifiant la biréfringence) et de dépolarisation [3]. L'exemple d'une telle décomposition présenté ci-contre permet la mise en évidence d'un polype (à droite) au sein de l'échantillon biologique analysé (exocol utérin humain) [4]. Une deuxième famille de méthodes dites « différentielles » fait l'hypothèse d'un modèle de type « constantes distribuées » et constitue une alternative pouvant convenir mieux à certains types de milieux (fibres, milieux diffusants biologiques...) dans lesquels l'hypothèse d'effets localisés est peu vraisemblable [3].



© LPICM/École Polytechnique/CNRS

# The Big LIFT

HASO LIFT 680

680x504 phase points  
30 Hz max frame rate



HASO LIFT 272

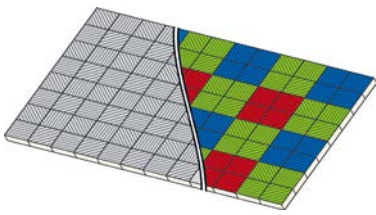
272x200 phase points  
20 Hz max frame rate



sales@imagine-optic.com  
+33 1 64 86 15 60

New Catalogue on  
www.imagine-optic.com

imagine optic™



**Figure 3.** Capteur polarimétrique DoFP intégrant une matrice de micropolariseurs orientés à 0°, 45°, 90° ou 135° devant chaque pixel (gauche: version monochrome; droite: version RGB intégrant une matrice de filtres de Bayer supplémentaire).

pas toujours compatible avec une cadence d'acquisition « temps réel ».

En termes d'applications, un des intérêts majeurs de l'imagerie polarimétrique est de pouvoir faire apparaître des contrastes qui échappent à l'œil ou aux capteurs standards grâce à des architectures d'imageurs optimisées mais relativement simples. Cette facilité de mise en œuvre est un atout essentiel dans le domaine de la défense (applications de type décamouflage et détection de cibles ou d'objets dangereux (Fig. 2.a)), mais aussi pour la sécurité ou l'autonomisation des transports (aide à la vision à travers les milieux diffusants/turbides). L'industrie manufacturière est également un terrain d'applications privilégié de l'imagerie polarimétrique, pour le contrôle de surfaces (pistes électroniques, bains de soudure,...), le tri d'objets automatique par exemple, ou pour des tâches plus élaborées comme la reconstruction tridimensionnelle d'objets transparents par analyse polarimétrique (Fig. 2.b).

Par ailleurs, l'interaction entre lumière polarisée et matière est le siège de nombreux phénomènes physico-chimiques qu'il est impossible d'énumérer ici, mais qui justifient l'utilisation de la polarimétrie dans l'industrie ou la recherche en chimie, en lui adossant une sensibilité spectrale (spectro-polarimétrie). En termes d'imagerie, beaucoup d'instruments astronomiques ou d'observations terrestres intègrent une sensibilité spectro-polarimétrique

pour l'étude de la chimie solaire/stellaire, la détection d'exoplanètes (mission SPIRou, IRAP) ou encore l'étude des aérosols atmosphériques ou des distributions de tailles de gouttelettes d'eau dans les nuages, la polarisation du rayonnement réfléchi par l'atmosphère traduisant de manière unique leurs propriétés (mission POLDER3 (CNES)), et future mission 3MI (ESA/EUMETSAT) (Fig. 2.c).

Enfin, l'imagerie polarimétrique connaît un fort intérêt applicatif pour le diagnostic biomédical et l'investigation de structures biologiques ou cellulaires sans marquage. Comme nous l'illustrons dans l'encart ci-dessus, l'imagerie de Mueller constitue un outil de choix pour l'identification précoce de tissus pathogènes ou lésés (cancer du col utérin, mélanomes, brûlures, etc.). Ces dernières années, des efforts conséquents ont été menés pour tenter de déporter ces mesures par voie endoscopique, la maîtrise de l'état polarimétrique de la lumière à travers un guide d'onde souple demeurant un problème délicat. Par ailleurs, la polarimétrie tend à s'immiscer dans la plupart des technologies de microscopie avancée actuelles (non-linéaire, super-résolutive, etc.) ou d'imagerie biophotonique (imagerie de phase, photoacoustique, tomographique, OCT, etc.).

Les applications de l'imagerie polarimétrique se répandent toujours plus rapidement grâce aux progrès technologiques récents qui en facilitent l'usage. Ainsi, il aura fallu moins de vingt ans pour passer du

concept théorique à la commercialisation de caméras polarimétriques munies d'une grille de micropolariseurs métalliques rendant chaque pixel sensible à une direction de polarisation particulière (imageurs « *Division of Focal Plane* » (DoFP) illustrés en Fig. 3). Ces premiers modèles au coût très élevé souffraient de problèmes de diaphonie qui limitaient la sensibilité polarimétrique, mais ces verrous ont été levés depuis 2017 par le constructeur Sony en intégrant la fabrication et l'alignement des microgrilles directement dans son processus de production en série de capteurs polarimétriques abordables. Le développement des caméras DoFP inspire déjà de nouvelles générations de capteurs capables d'estimer le vecteur de Stokes complet (« *full-Stokes* »), ou encore à visée spectro-polarimétrique en exploitant la dépendance spectrale de la profondeur de pénétration de la lumière dans la matière pour accéder à l'information colorimétrique au sein du pixel. Ainsi un capteur à pixels multispectraux (15 canaux) et sensibles à trois états de polarisation linéaires différents a récemment été proposé à base de photodiodes organiques [5]. Enfin, d'autres approches prometteuses combinent un capteur standard avec une métasurface nanostructurée permettant d'associer chaque état de polarisation et longueur d'onde à un ordre de diffraction donné [6]. Le développement de ces nouvelles générations de capteurs laisse augurer des perspectives d'application grand public insoupçonnées... ●

## RÉFÉRENCES

- [1] D. H. Goldstein, *Polarized light*, CRC Press (2011)
- [2] C. Stolz, V. Devlaminck, *Techniques de l'Ingénieur* (2016)
- [3] P. J. J. Gil, R. Ossikovski, *Polarized Light and the Mueller Matrix Approach*, CRC Press (2016)
- [4] J. Vizet *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 2471 (2017)
- [5] A. Altaqui *et al.*, *Sci. Adv.* **7**, eaab3196 (2021)
- [6] N.A. Rubin *et al.*, *Science* **365**, eaax1839 (2019)