

IMAGERIE POLARIMÉTRIQUE ACTIVE : des applications militaires et duales

François GOUDAIL¹, Matthieu BOFFETY¹, Luc LEVIANDIER², Nicolas VANNIER³

¹ Institut d'Optique Graduate School, 2 av. Augustin Fresnel, 91127 Palaiseau

² Thales Research and Technology, 1 av. Augustin Fresnel, 91127 Palaiseau

³ Thales Optronique, 2 av. Gay-Lussac, 78995 Elancourt (affiliation actuelle)

francois.goudail@institutoptique.fr

L'imagerie polarimétrique active permet de révéler des contrastes invisibles à l'œil humain et aux caméras classiques. Elle peut étendre les capacités de décamouflage des systèmes d'imagerie active et améliorer la détection d'objets dangereux sur des pistes. Elle possède également de nombreuses applications duales dans des domaines tels que l'imagerie biomédicale ou la vision industrielle.

Révéler des contrastes invisibles à l'œil humain

La polarisation est une propriété fondamentale de la lumière. Bien que l'œil humain n'y soit pas directement sensible, elle est connue depuis le 17^e siècle et a été déterminante dans l'émergence de la théorie ondulatoire de la lumière. En résumé, le champ électromagnétique dans un milieu homogène est un vecteur qui évolue dans le plan orthogonal à la direction de propagation de la lumière. L'extrémité du vecteur décrit au cours du temps une trajectoire qui est, dans le cas général, une ellipse. On parle alors de lumière purement polarisée. Dans le cas d'une lumière émise par

une source thermique (comme le soleil) ou ayant interagi avec un milieu naturel, l'évolution de ce vecteur devient totalement ou partiellement aléatoire. On parle alors de lumière totalement ou partiellement dépolariée.

La polarisation de la lumière est utilisée depuis longtemps pour manipuler la lumière dans de nombreux instruments optiques (lasers, interféromètres...). Ce n'est que depuis peu qu'elle est utilisée pour faire des images [1]. C'est pourtant une modalité d'imagerie très efficace car la mesure de l'état de polarisation de la lumière diffusée par une scène permet de révéler des contrastes qui sont invisibles à l'œil nu. C'est d'ailleurs une capacité que possède le système visuel

de certains animaux, en particulier des abeilles, et de certaines espèces de crevettes qui l'utilisent pour s'orienter.

Imagerie passive ou active ?

Les systèmes d'imagerie polarimétrique peuvent être passifs ou actifs. Dans les systèmes passifs, la source d'illumination est le soleil ou le rayonnement thermique. Comme elle est totalement dépolariée, le seul phénomène qui peut être détecté est la manière dont les différents matériaux composant la scène polarisent cette lumière, principalement à travers des réflexions (ou transmissions) de Fresnel. Cela permet de différencier les objets manufacturés, qui ont des surfaces lisses et métalliques, des milieux naturels. Cela conduit à des applications intéressantes dans le domaine de la défense [1].

Dans les systèmes actifs, l'état de polarisation de la source d'illumination est contrôlé. Cela permet d'être sensible à toutes les propriétés polarimétriques de la scène, en particulier à la manière dont les objets dépolarisent la lumière polarisée. L'inconvénient est bien sûr que ces systèmes nécessitent une source de lumière artificielle, ce qui limite leur portée et leur discrétion. En revanche, ils bénéficient

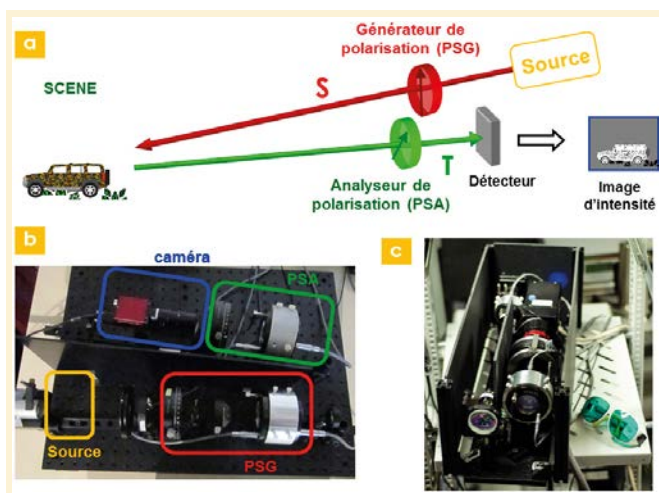


Figure 1.

(a) Principe d'un imageur polarimétrique actif totalement adaptatif.

(b) Photo du système d'imagerie de laboratoire.

(c) Photo du démonstrateur d'imagerie polarimétrique à contraste optimisé AUTOPOL.

des avantages classiques de l'imagerie active, en particulier la vision de nuit avec une meilleure résolution que l'imagerie thermique (sensible à l'émission des corps dans l'infrarouge moyen), tout en apportant un élément déterminant : la sensibilité au contraste polarimétrique.

Imagerie polarimétrique totalement adaptative

Faisant suite à de premières investigations effectuées par Thales Optronique et l'Institut Fresnel, le laboratoire Charles Fabry (LCF) de l'Institut d'Optique et Thales Research and Technology (TRT) se sont engagés dans un partenariat de plusieurs années pour le développement d'imageurs polarimétriques actifs [2]. Le principe en est illustré sur la *figure 1a*. L'état de polarisation de la source est contrôlé électriquement par un générateur d'états de polarisation (PSG - *polarisation state generator*) constitué de deux modulateurs à cristaux liquides qui se comportent comme des composants biréfringents d'axe neutre fixe et de déphasage variable. Si les axes optiques de ces deux modulateurs sont orientés à 45°, il est possible de générer n'importe quelle ellipse de polarisation en jouant sur leurs tensions de contrôle. Avant de former l'image sur le détecteur, l'état de polarisation de la lumière diffusée par la scène passe par un analyseur de polarisation (PSA - *polarisation state analyser*), qui peut être considéré comme un « analyseur généralisé » : alors qu'un analyseur de polarisation classique projette l'état de polarisation incident sur un état rectiligne, le PSA peut le projeter sur un état elliptique quelconque. On obtient finalement une image d'intensité dont l'aspect dépend des états du PSG et du PSA. Ces états sont choisis afin de maximiser le contraste visuel entre un objet d'intérêt et le fond de la scène [3].

Un premier imageur polarimétrique actif totalement adaptatif a permis de valider ce concept en laboratoire (*figure 1b*) [2]. Considérons une scène composée d'une feuille de papier de

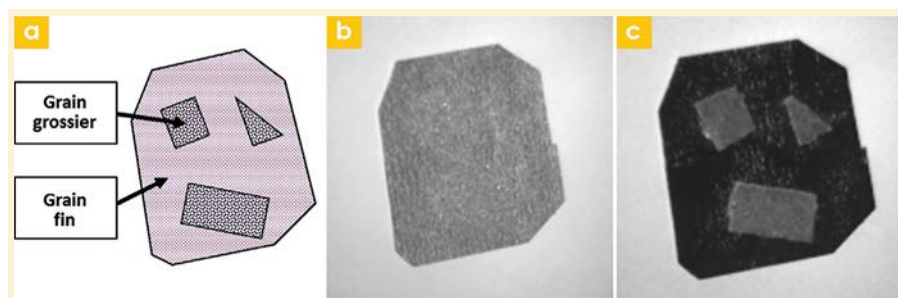


Figure 2. Scène composée de deux zones de rugosités différentes. (a) Description de la scène. (b) Image d'intensité classique. (c) Image polarimétrique à contraste optimisé.

verre à grain fin, sur lequel on a collé des morceaux de papier de verre à grain plus grossier (*figure 2a*). Le tout a été recouvert de peinture, de sorte qu'il n'y a aucun contraste d'albédo entre les deux surfaces : elles ne sont pas différenciables dans une image d'intensité classique (*figure 2b*). Cette scène est observée avec l'imageur polarimétrique dont les états optimaux du PSG et du PSA ont été réglés de manière à maximiser le contraste. On peut alors constater que le contraste d'état de surface présent dans la scène (grains différents des papiers de verre) a été transformé en un contraste de niveau de gris visible sur une image numérique (*figure 2c*).

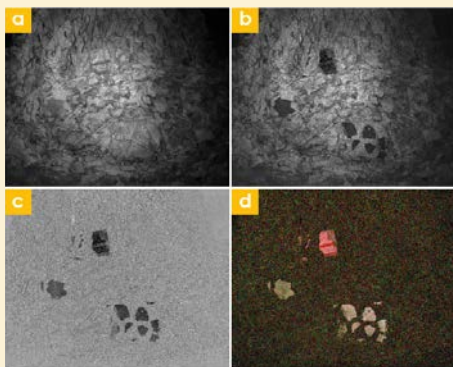
Un imageur polarimétrique pour des applications militaires

Ces capacités ont suscité l'intérêt de la DGA qui a financé un programme ASTRID dénommé « AUTOPOL », destiné à concevoir un imageur reposant sur le même principe et doté d'une portée supérieure (quelques dizaines de mètres). Le consortium réunit le LCF, TRT ainsi que l'équipe PhyTI de l'Institut Fresnel, qui est chargée de développer les algorithmes de traitement d'images permettant de piloter l'optimisation des états du PSG et du PSA par une analyse d'image [4]. La source d'illumination est un laser à la longueur d'onde 1,55 μm , ce qui permet d'assurer un bon niveau de discrétion et de sécurité oculaire, et le détecteur une caméra InGaAs (*figure 1c*). Cet imageur est le premier au monde à être doté de capacités polarimétriques totalement adaptatives. Il a permis de démontrer

l'efficacité de ce type d'imagerie par rapport aux imageurs d'intensité classiques dans un contexte de décamouflage et de détection d'objets manufacturés en environnement complexe [5].

Considérons par exemple une scène composée de plaques de métal sous un filet de camouflage observées par un imageur actif classique (*figure 3a*) : les plaques ne sont pas visibles. En revanche, sur l'image polarimétrique dont les états d'illumination et d'analyse ont été optimisés, elles apparaissent très nettement car elles dépolarisent très nettement la lumière incidente que le filet (*figure 3b*). Cependant, on peut noter que des fluctuations de niveaux de gris subsistent dans le fond de l'image. Cela peut être pénalisant en présence de fonds très complexes et cacher des objets d'intérêt. Il est souvent préférable de produire une image qui s'affranchit complètement des contrastes d'albédo (réflectivité en intensité) et ne fait apparaître que les contrastes polarimétriques. Cela peut être fait en réalisant une image polarimétrique normalisée, consistant à calculer le rapport entre deux images polarimétriques différentes (*figure 3c*). Ce mode fournit donc une image totalement complémentaire de celle délivrée par un imageur d'intensité classique (*figure 3b*).

Dans la plupart des scénarios d'intérêt en décamouflage, nous avons observé que la source de contraste principale est la différence de capacité de dépolarisation des objets composant la scène. Dans ce cas, on peut montrer qu'un contraste quasi-optimal peut être obtenu avec un imageur non totalement adaptatif disposant d'un nombre restreint de degrés de liberté polarimétriques. Cela ouvre la voie à des systèmes



◀ **Figure 3.** Scène composée de plaques métalliques sous un filet de camouflage. (a) Image active d'intensité à 1.55 µm. (b) Image polarimétrique à contraste optimisé. (c) Image polarimétrique normalisée. (d) Image polarimétrique simplifiée.



▽ **Figure 4.** Objet caché sous un filet de camouflage. (a) Photo de la scène dans le spectre visible. (b) Image active d'intensité. (c) Image polarimétrique active.

d'imagerie plus simples mais ayant une efficacité suffisante. Un tel système a été « simulé » à partir du démonstrateur AUTOPOL¹, en faisant l'acquisition de 3 images dans des états d'illumination et d'analyse simples. L'image obtenue apparaît sur la *figure 3d*, en représentation composite où chacune des 3 images correspond à un canal de couleur. On observe que les plaques métalliques apparaissent toujours avec un bon contraste. Les couleurs indiquent les propriétés polarimétriques différentes des plaques métalliques observées, ce qui peut apporter une information supplémentaire sur leur orientation ou leur nature physique.

À titre d'exemple supplémentaire, la *figure 4a* représente un objet caché sous un filet de camouflage et observé dans le spectre visible. Si cette scène est observée avec un imageur actif classique, l'objet caché sous le filet reste difficile à identifier (*figure 4b*). L'image polarimétrique normalisée permet en revanche de l'identifier clairement comme un vélo (*figure 4c*).

Tout un potentiel à explorer

Les voies de développement de ce type d'imageur sont nombreuses. Ainsi, un nouveau projet ASTRID Maturation a été attribué à un consortium constitué du LCF, de TRT et de New Imaging

Technologies (NIT), une PME française spécialiste de la conception et l'intégration des capteurs d'image pour le proche infrarouge. L'objectif est de concevoir un système de portée supérieure, de l'ordre du kilomètre, doté d'une architecture polarimétrique simplifiée et pouvant acquérir de manière instantanée des images normalisées, mieux résolues et acquises à une cadence vidéo. Cela permettra de valider l'imagerie polarimétrique active sur des scénarios de décamouflage réels et de la comparer avec d'autres modalités d'imagerie passive et active.

Il faut également noter que son domaine d'application ne se limite pas à la défense. De nombreuses applications duales sont envisageables, comme par exemple la détection d'objets dangereux sur des routes ou des pistes d'aéroport. La *figure 5a* représente un objet en plastique sur une piste en asphalte observés par un imageur actif classique à 1,55 µm. La piste est mouillée, et les zones noires représentent des flaques d'eau. L'objet, qui a la même réflectivité que les zones mouillées, est donc très difficilement distinguable. En revanche, il apparaît avec un excellent contraste sur l'image polarimétrique normalisée (*figure 5b*).

D'une manière générale, l'imagerie polarimétrique peut apporter des solutions dans toutes les situations où les contrastes accessibles aux imageurs panchromatiques ou spectraux sont insuffisants, ce qui se rencontre fréquemment en imagerie biomédicale, en microscopie ou en vision industrielle. Enfin, il faut noter que la communauté française de l'imagerie polarimétrique, avec notamment, outre les entités déjà mentionnées, des laboratoires de l'École polytechnique et de l'Université de Rennes, est bien placée pour s'attaquer à ces défis, car elle est l'une des plus dynamiques au monde.

Remerciements : les auteurs tiennent à remercier Philippe Adam, de la DGA/MRIS, pour son soutien actif et des échanges fructueux.

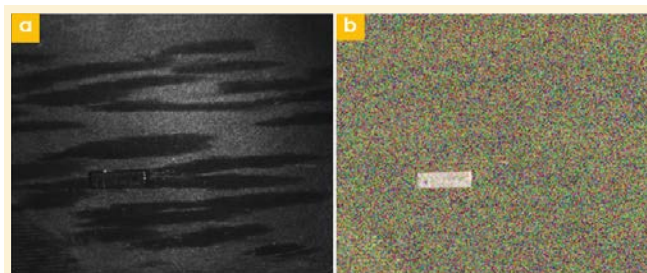


Figure 5. Objet sur une route en asphalte. (a) Image active d'intensité à 1.55 µm. (b) Image polarimétrique active.

POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] J.S. Tyo, D.L. Goldstein, D.B. Chenault, J.A. Shaw, *Appl. Opt.* **45**, 5453 (2006)
- [2] F. Goudail, J.S. Tyo, *J. Opt. Soc. Am. A* **28** (1), 46 (2011)
- [3] G. Anna, H. Sauer, F. Goudail, D. Dolfi, *Appl. Opt.* **51**, 5302 (2012)
- [4] N. Vannier *et al.*, *Appl. Opt.* **54**, 7622 (2015)
- [5] N. Vannier *et al.*, *Appl. Opt.* **55**, 2881 (2016)

¹ Ce démonstrateur bénéficie du nombre maximal de degrés de liberté polarimétriques, car le PSG et le PSA peuvent générer n'importe quelle ellipse de polarisation. Il permet donc d'évaluer n'importe quel autre mode d'imagerie polarimétrique en réduisant le nombre de degrés de liberté.