



HAL
open science

Conception et réalisation d'un polarimètre de Stokes haute cadence à division temporelle utilisant un unique modulateur à cristaux liquides ferroélectriques pour moduler la polarisation

Luc Gendre

► **To cite this version:**

Luc Gendre. Conception et réalisation d'un polarimètre de Stokes haute cadence à division temporelle utilisant un unique modulateur à cristaux liquides ferroélectriques pour moduler la polarisation. Autre. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2011. Français. NNT : 2011MULH5731 . tel-00713656

HAL Id: tel-00713656

<https://theses.hal.science/tel-00713656>

Submitted on 2 Jul 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

présentée à

l'Université de Haute Alsace

pour obtenir le titre de

Docteur de l'Université de Haute Alsace

Discipline : Traitement du Signal

par

Luc GENDRE

**Conception et réalisation d'un polarimètre de Stokes
haute cadence à division temporelle utilisant
un unique modulateur à cristaux liquides
ferroélectriques pour moduler la polarisation.**

Soutenue publiquement le 19 juillet 2011 devant le jury suivant :

M. Vincent LAUDE (DR, FEMTO-ST)	Président
M. Juan CAMPOS (Pr, Universitat Autònoma de Barcelona, Espagne)	Rapporteur
M. Vincent DEVLAMINCK (Pr, Université Lille 1)	Rapporteur
M. Laurent BIGUÉ (Pr, Université de Haute Alsace)	Directeur de thèse
M. Alban FOULONNEAU (Mcf, Université de Haute Alsace)	Co-encadrant

Remerciements

En premier lieu, je remercie le professeur Gérard Binder, directeur de l'ENSISA, pour m'avoir permis d'effectuer ma thèse dans ses locaux. Ainsi que le professeur Olivier Haerberle, directeur du laboratoire MIPS (*Modélisation, Intelligence, Processus, et Systèmes*), pour m'avoir accueilli dans son laboratoire au sein du groupe FOTI (*Fonction Optique et Traitement de l'Information*).

Je tiens ensuite à exprimer toute ma gratitude aux professeurs Vincent Devlaminck, et Juan Campos, et au directeur de recherche Vincent Laude pour avoir accepté de consacrer une partie de leur précieux temps à mes travaux. Leurs remarques m'ont permis de prendre du recul et d'apprécier à sa plus juste valeur un travail qui me paraît d'autant plus inachevé que je suis fortement impliqué dans sa réalisation.

Par ailleurs, ce travail n'aurait pu être mené à bien sans l'aide précieuse de mes encadrants, Laurent Bigué et Alban Foulonneau. Je leur adresse à tous les deux mes plus sincères remerciements pour l'encadrement de qualité qu'il m'ont procuré. Ils ont placé leur confiance en moi et m'ont donné une grande autonomie de travail. Ce fut très appréciable. Pour autant, ils ont su se rendre disponibles quand j'en avais besoin. Les échanges lors des réunions ont toujours été fructueux. Les petits différents que nous avons pu avoir ont ouvert sur des discussions constructives lors desquelles je me suis senti pleinement écouté. Au vu des résultats produits, ils ont fait montre d'un esprit critique emprunt d'objectivité, me laissant décider *in fine* de la suite à donner aux travaux. J'ai beaucoup appris de leurs conseils, que ce soit par exemple pour la calibration d'éléments optiques sur un banc, pour la rédaction des différents articles et communications, ou encore pour la préparation des conférences. En résumé, ils m'ont fait profiter de leur expérience de la recherche et m'ont appris à aimer le métier de chercheur. Sachant que tous les doctorants n'ont pas la même chance que moi, je tiens à leur témoigner ma plus profonde gratitude. Ce fut un plaisir de travailler dans ces conditions à leurs côtés.

J'adresse également mes remerciements à ma femme, Heather, qui a su me soutenir autant qu'elle l'a pu pendant ces années de thèse. A ses côtés, j'ai pu acquérir une grande

maîtrise de la langue anglaise, ce qui a eu un impact non négligeable sur la qualité de mes communications, tant écrites qu'orales. Elle m'a donné une merveilleuse petite fille, Cassidy, que je tiens également à remercier. Avoir un enfant en bas-âge n'est pas de tout repos, mais Cassidy a dépassé mes attentes. Elle est une enfant pleine de vie, joueuse, curieuse, et très observatrice. Retrouver sa petite tête blonde en rentrant le soir est un élément réconfortant après une dure journée de travail.

Je pense aussi au reste de ma famille. Leur intérêt pour mon travail, aussi obscur soit-il pour eux, m'a permis de me confronter à la délicate tâche de la vulgarisation de mes travaux afin de les rendre accessibles à tous. Ce fut une expérience enrichissante que je recommande à tous les doctorants.

Enfin, mes pensées vont à l'ensemble des doctorants et autres personnels de l'ENSISA que j'ai fréquenté, notamment au travers de la toute jeune association Pars-en-Thèse a qui je souhaite un avenir radieux. Je remercie entre autres tous ceux que j'ai côtoyé le mardi midi lors des réunions : Pierre, Jérôme, Rachid, Anne-Flore, Lucie, Guylaine, Thomas, Aurélia, Charles, Fabrice, Axel... et tout ceux que j'oublie... A tous bon courage pour la fin de votre thèse !

Table des matières

Notations	1
Introduction	5
1 Formalisme	11
1.1 La polarisation du point de vue électromagnétique	11
1.2 Formalisme de Stokes	13
1.3 Formalisme de Mueller	17
1.3.1 Aspect général	17
1.3.2 Les éléments spécifiques	17
1.4 Sphère de Poincaré	19
2 Etat de l'art	21
2.1 Les différentes architectures de polarimètres	21
2.1.1 Division d'amplitude	22
2.1.2 Division de front d'onde	23
2.1.3 Division temporelle	24
2.1.4 Tableau récapitulatif	27
2.2 Les différents types de modulateurs à cristaux liquides	27
2.2.1 CL Nématiques alignés parallèlement	30
2.2.2 CL Nématiques en hélice	31
2.2.3 CL Ferroélectriques	32
2.3 Dispositifs commerciaux	33
3 Principe de fonctionnement et essais préliminaires du polarimètre	37
3.1 Le polarimètre dans son fonctionnement nominal	37
3.2 Artéfacts sur les contours des objets en mouvement	40
3.3 Solutions apportées	44
3.3.1 Constitution d'une scène de test	44
3.3.2 Filtrage médian temporel	45
3.3.3 Recalage rigide	51

3.3.4	Application à une scène naturelle	54
3.4	Conclusion	56
4	Extension au troisième paramètre de Stokes	59
4.1	Principe de détermination des paramètres de Stokes	60
4.1.1	Principe de base	60
4.1.2	Conditionnement de la matrice	61
4.1.3	Impact de la dépolarisation	62
4.2	Détermination de l'angle et de la dépolarisation	63
4.2.1	Principe	63
4.2.2	Application	64
4.3	Détermination de la matrice de réduction de données	70
4.3.1	Généralisation du modèle	70
4.3.2	Signal de commande composite	70
4.3.3	Caractérisation finale	71
4.3.4	Conditionnement de la MRD	73
4.4	Validation expérimentale	74
4.4.1	Validation préliminaire	74
4.4.2	Validation en conditions imageantes	76
4.5	Discussion et pistes d'amélioration	81
4.6	Conclusion	81
5	Extension au quatrième paramètre de Stokes	83
5.1	Principe de détermination des paramètres de Stokes	84
5.2	Principe de détermination de l'angle et du retard	85
5.3	Caractérisation avec un signal bipolaire	88
5.3.1	Présentation du banc optique	88
5.3.2	Analyse des mesures d'intensités	89
5.3.3	Estimation de l'angle d'orientation et du retard	90
5.3.4	Etude du conditionnement de la MRD en fonction de la tension de commande du modulateur	90
5.4	Caractérisation avec un signal de commande composite	93
5.4.1	Analyse des mesures d'intensités	93
5.4.2	Estimation de l'angle d'orientation et du retard	93
5.4.3	Etude du conditionnement de la MRD en fonction de la tension de commande du modulateur	96
5.5	Optimisation du signal de commande composite	96
5.5.1	Séquences de commande	97
5.5.2	Evaluation du CN en fonction de la séquence de commande	97

5.6	Validation préliminaire	99
5.6.1	Montage optique	99
5.6.2	Résultats	100
5.7	Validation en conditions imageantes	106
5.7.1	Montage optique	106
5.7.2	Résultats	106
5.8	Discussion et pistes d'amélioration	111
5.9	Conclusion	112
	Conclusion et perspectives	113

Liste des tableaux

1	Tableau des notations utilisées	3
2.1	Synthèse des avantages et inconvénients des différentes architectures de polarimètres (inspiré de [1]).	28
2.2	Comparaison des capacités de différentes architectures d'analyse de polarisation à cristaux liquides.	29
5.1	Estimation du CN minimum et des amplitudes de commande en fonction du mode de calcul du paramètre α de la MRD	92
5.2	CN et amplitudes de commande en fonction du mode de calcul du paramètre α de la MRD pour un signal composite du type $\{+V_1, -V_1, +5V, -5V\}$ avec V_1 variant entre $0V$ et $5V$, et une impulsion de $\pm 10V/200\mu s$	96
5.3	CN minimaux et amplitudes de commande (V_1 et V_2 sont données en Volts) en fonction du mode de calcul du paramètre α de la MRD, pour un signal de commande composite avec une amplitude fixée à $5V$, l'autre variant entre $0V$ et $5V$, et une impulsion de $\pm 10V/200\mu s$	99

Table des figures

1.1	Schéma de propagation des composantes de l'onde lumineuse	12
1.2	Exemples d'états de polarisation	13
1.3	Ellipse de polarisation	14
1.4	Localisation d'un état de polarisation M d'azimut ψ et d'ellipticité ε sur la sphère de Poincaré.	20
2.1	Principe du polarimètre à division d'amplitude. Cube Non Polarisant (CNP), lame Demi-Onde (LDO), lame Quart-d'Onde (LQO) Cube Polarisant (CP). Sur la droite est schématisé le vecteur de Stokes relatif au montage : les quatre composantes du vecteur peuvent être identifiées dans cette configuration.	22
2.2	Prisme de Wollaston : les composantes de polarisation linéaires verticales et horizontales sont diffractées selon deux angles différents, permettant ainsi de les séparer en deux faisceaux lumineux distincts.	23
2.3	Montage utilisé par de Leon <i>et al.</i> [2] pour analyser la totalité de la polarisation. Le faisceau incident est séparé en quatre faisceaux de polarisations différentes à l'aide de cubes séparateurs, de prismes, et de lames retard.	24
2.4	Matrice de micro-polariseurs utilisée pour l'analyse de la polarisation par division de front d'onde. A chaque élément correspond un pixel du capteur. Ainsi, chaque pixel analyse une direction particulière de la polarisation. La matrice présentée dans cette figure permet seulement l'analyse de la polarisation linéaire, comme le montre le vecteur de Stokes schématisé sur la droite.	24
2.5	Principe de polarimètre à polariseur tournant	25
2.6	Principe de polarimètre à lame retard tournante et polariseur fixe	25
2.7	Principe de polarimètre utilisant des modulateurs à cristaux liquides, proposé par Wolff <i>et al.</i> [3]	26
2.8	Élément modulateur de polarisation à CL ferroélectriques utilisé par Gandorfer [4]	26

2.9	Ordre des phases en fonction de la température, depuis la phase cristalline jusqu'à la phase liquide.	30
2.10	Fonctionnement des CL nématiques alignés. Position des CL au repos(a). Position des CL sous tension(b).	31
2.11	Fonctionnement d'une cellule à cristaux liquides nématiques en hélice. Position des CL au repos(a). Position des CL sous tension intermédiaire(b). Position des CL sous tension max(c).	32
2.12	Vue générale de la disposition des molécules sur les couches d'un SmC*	33
2.13	Position des molécules en fonction de la tension de commande. P représente le vecteur de polarisation spontanée.	34
2.14	Schéma de principe du polarimètre SALSA développé par Bossa Nova Technologies. Figure extraite de [5].	34
3.1	Photo et schéma de fonctionnement du polarimètre	38
3.2	Signal en sortie de l'électronique de commande BNS (a), zoom sur la décroissance d'une impulsion (b)	38
3.3	Signal de réponse du modulateur pour différentes fréquences du signal de commande	39
3.4	Objets manufacturés observés en laboratoire à une cadence d'acquisition de 360 images par seconde pour des images de taille 320×240 sur 8 bits. De gauche à droite et de haut en bas : I_0 , I_{90} , image de luminance, $DOLP_P$	41
3.5	Objets manufacturés observés en laboratoire à une cadence d'acquisition de 360 images par seconde pour des images de taille 320×240 sur 8 bits. A gauche : $DOLP_P$ et luminance présentés conjointement. Représentation HSV avec une teinte rouge, le $DOLP_P$ en saturation et la luminance de la scène en dernière composante. A droite : $DOLP_P$ seul.	41
3.6	Exemple d'utilisation du polarimètre à l'extérieur du laboratoire, en condition d'éclairage non contrôlé. (a) : image de luminance de la scène, (b) : $DOLP_P$ obtenu avec un scène statique.	42
3.7	Mise en évidence d'artéfacts sur l'image de $DOLP_P$ lors de l'observation d'une scène contenant des objets en mouvement (scène présentée Fig. 3.6(a)). (a) : $DOLP_P$ obtenu avec une scène statique, (b) : $DOLP_P$ obtenu avec une scène dynamique. Des artéfacts apparaissent.	43
3.8	Simulation exposant la différence entre un $DOLP_P$ calculé lorsque l'objet reste statique pendant les acquisitions des modes de polarisation (première ligne), et un $DOLP_P$ calculé lorsque l'objet a un mouvement de translation de gauche à droite (deuxième ligne). Les contrastes ont été légèrement accentués de manière à mettre en évidence le phénomène à observer.	44

3.9	(a) : Scène mise en place pour l'étude de l'influence du mouvement sur le $DOLP_P$. La portion en mouvement dans la scène est délimitée par le trait rouge. (b) : $DOLP_P$ obtenu en l'absence de mouvement.	45
3.10	Schéma représentant la méthode de calcul du $DOLP_P^{ref}$ et $DOLP_P^{err}$ à partir des modes de polarisation.	46
3.11	Mode d'observation du $DOLP_P$ justifiant l'utilisation d'un filtrage médian. Sur la première ligne : $DOLP_P$ exact de la scène. Sur la deuxième ligne : $DOLP_P$ faussé par le mouvement de l'objet.	47
3.12	Schéma explicitant l'invariance de l'observation d'un artefact sur le $DOLP_P$ en fonction de la vitesse de déplacement de l'objet.	48
3.13	(a) : $DOLP_P^{ref}$ de référence, non influencé par du mouvement dans la scène ; (b) : $DOLP_P^{err}$ faussé par du mouvement dans la scène. Le cadre rouge définit la zone d'étude lorsque la scène n'est étudiée que sur une portion réduite.	49
3.14	Résultat qualitatif du filtrage médian temporel. Le pixel repéré en rouge sert à dresser le profil exposé Fig. 3.15.	50
3.15	Profils temporels au pixel repéré en rouge sur la figure 3.14, obtenus pour le $DOLP_P$ de référence, le $DOLP_P$ erroné, et le résultat du filtrage.	50
3.16	Evaluation quantitative du résultat du filtrage médian temporel selon le critère détaillé Eq. 3.4	51
3.17	Principe de recalage.	53
3.18	Comparaison du résultat qualitatif des corrections. (a) : $DOLP_P^{err}$, (b) : $DOLP_P^{err}$ corrigé par le filtrage médian, (c) : $DOLP_P^{err}$ corrigé par recalage, (d) : $DOLP_P^{ref}$	54
3.19	Evaluation de l'erreur de correction pour le filtrage médian et pour le recalage.	55
3.20	Correction du $DOLP_P$ d'une scène naturelle. (a) : image d'intensité. (b) : $DOLP_P$ erroné sans correction. (c) : obtenu pour une scène statique. (d) : résultat du filtrage médian. (e) : résultat du recalage.	56
3.21	Résultat de $DOLP_P$ après recalage sans suréchantillonnage(a) et avec suréchantillonnage(b) des modes de polarisation.	56
4.1	Banc de caractérisation du modulateur. Elargisseur : Objectif de microscope (MO), Trou calibré (PH), Lentille L_1 . Polariseurs linéaires statiques orientés à 0° (P_1 et P_2), lame demi-onde orientable ($\lambda/2$), Cellule à cristaux liquides ferroélectriques (FLC), Lentille L_2	65
4.2	(a) : Signal de commande nominal délivré par l'électronique BNS, (b) : Signal de commande bipolaire généré avec une carte de génération de signaux.	66

4.3	Intensités mesurées en sortie du modulateur en fonction de la tension de commande, pour différents vecteurs de Stokes en entrée (définis par les relations Eq. (4.14)).	67
4.4	Estimation de l'angle d'orientation θ de la lame équivalente aux CL.	67
4.5	Estimation de la dépolarisation	67
4.6	Variation d'intensité $I_0 + I_{90}$ (a), zoom sur la plage $[0V, +1V]$ (b)	69
4.7	Evolution moyenne de la température au cours des cinq caractérisations effectuées. Le maximum et le minimum représentent respectivement la température la plus élevée et la plus basse atteinte à chaque instant parmi les cinq caractérisations.	69
4.8	Signal de commande composite permettant l'acquisition des trois modes de polarisation nécessaires à l'analyse de la polarisation linéaire. Les niveaux de tensions de la composante carrée du signal de commande sont $+5V$, $-5V$, $+0,1V$, $-0,1V$	71
4.9	Courbes de réponses temporelles du modulateur pour des tensions de commande de $\pm 5V$ (a) et $\pm 0,1V$ (b), pour le vecteur de Stokes \mathbf{S}_{135} en entrée. Considérer les autres vecteurs de Stokes en entrée conduit aux mêmes conclusions.	72
4.10	Conditionnement de la MRD dans le cas idéal et dans le cas expérimental. Le point rouge représente l'état du système final.	73
4.11	Angle azimutal du vecteur de Stokes estimé en sortie de la lame demi-onde présenté conjointement avec l'erreur d'estimation sur l'angle.	75
4.12	Degré de polarisation linéaire calculé à partir du vecteur de Stokes estimé en sortie de la lame demi-onde.	75
4.13	Banc utilisé pour la validation 2D. Elargisseur : Objectif de microscope (MO), Trou calibré (PH), Lentille (L_1). Polariseurs linéaires statiques orientés à 0° (P_1 et P_2) Lamme quart-d'onde ($\lambda/4$), Cellule à cristaux liquides ferroélectriques (FLC).	77
4.14	Echantillon utilisé pour la validation en conditions imageantes. L'échantillon est constitué de trois bandes de polariseurs linéaires fixées sur une lame de microscope par de l'adhésif.	77
4.15	Composantes linéaires du vecteur de Stokes estimées à 150 images par secondes, pour un échantillon orienté à 0° . (a) : s_0 , (b) : $ s_1 /s_0$, (c) : $ s_2 /s_0$. Les orientations de chacun des polariseurs sont précisées sur la sous-figure (b).	77
4.16	Angle estimé à 150 images par secondes pour différentes orientations de l'échantillon : 0° (a), 40° (b), 90° (c), 130° (d).	78
4.17	DOLP estimé à 150 images par secondes pour différentes orientations de l'échantillon : 0° (a), 40° (b), 90° (c), 130° (d).	78

4.18 Régions d'intérêt définies pour quantifier l'estimation, présentées sur une image de <i>DOLP</i>	80
4.19 Courbes de moyenne et d'écart type sur l'erreur d'estimation, selon les régions d'intérêts définies à la figure 4.18. Pour ces données, l'échantillon est statique et orienté comme sur la figure 4.18.	80
5.1 Banc de caractérisation du modulateur. Elargisseur : Objectif de microscope (<i>MO</i>), Trou calibré (<i>PH</i>), Lentille L_1 . Polariseurs linéaires statiques orientés à 0° (P_1 et P_2), lame quart-d'onde orientable ($\lambda/4$), Cellule à cristaux liquides ferroélectriques (FLC), Lentille de focalisation L_2 , Filtre interférentiel à 532nm de largeur 1nm (<i>IF</i>).	88
5.2 Intensités mesurées en sortie du modulateur en fonction de la tension de commande pour différents vecteurs de Stokes en entrée, avec les relations définies Eq. 5.9	89
5.3 Moyenne, valeur maximale, et valeur minimale de l'angle estimé au cours de quatre mesures de caractérisation. On remarque que la dispersion entre les mesures est faible.	91
5.4 Moyenne, valeur maximale, et valeur minimale du retard estimé au cours de quatre mesures de caractérisation. On remarque que la dispersion entre les mesures est faible.	91
5.5 Cartographie du CN de la MRD pour V_1 et V_2 variant entre 0V et 5V, pour le paramètre α calculé selon l'équation (5.15). Les figures correspondant aux équations (5.16), (5.17), et(5.18) sont similaires à celle-ci et ne sont pas présentées.	92
5.6 Intensités mesurées en sortie du modulateur en fonction de la tension de commande pour différents vecteurs de Stokes en entrée, selon le schéma présenté Eq. 5.9. Les figures présentent conjointement l'évolution pour un signal de commande bipolaire et pour un signal de commande composite du type $\{+V_1, -V_1, +5V, -5V\}$ avec V_1 variant dans la plage $[0V, 5V]$	94
5.7 Angle d'orientation de la lame équivalente estimé pour un signal de commande bipolaire et pour un signal de commande composite du type $\{+V_1, -V_1, +5V, -5V\}$ avec V_1 variant dans la plage $[0V, 5V]$	95
5.8 Retard de la lame équivalente estimé pour un signal de commande bipolaire et pour un signal de commande composite du type $\{+V_1, -V_1, +5V, -5V\}$ avec V_1 variant dans la plage $[0V, 5V]$	95
5.9 Evolution du CN en fonction de l'amplitude de commande V_1 dans un signal de commande composite du type $\{+V_1, -V_1, +5V, -5V\}$ avec une impulsion de $\pm 10V/200\mu s$	96

5.10	Signaux de commande composites utilisés pour l'étude de l'influence de l'ordre des tensions sur l'état du modulateur.	98
5.11	Réponse du modulateur aux trois séquences de commande retenues pour les six vecteurs de Stokes en entrée $\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_{45}, \mathbf{S}_{90}, \mathbf{S}_{135}, \mathbf{S}_d, \mathbf{S}_g$	100
5.12	Estimation du vecteur de Stokes en entrée du modulateur en fonction de l'orientation de la $\lambda/4$	101
5.13	Estimation de l'angle et de l'ellipticité en fonction de l'orientation de la $\lambda/4$	103
5.14	Estimation du <i>DOP</i> en fonction de l'orientation de la $\lambda/4$	104
5.15	Estimation du <i>DOLP</i> , et du <i>DOCP</i> en fonction de l'orientation de la $\lambda/4$	105
5.16	Banc de validation en conditions imageantes. Elargisseur : Objectif de microscope (<i>MO</i>), Trou calibré (<i>PH</i>), Lentille L_1 . Polariseurs linéaires statiques orientés à 0° (P_1 et P_2), lame quart-d'onde orientée à $+45^\circ$ ($\lambda/4$), cellule à cristaux liquides ferroélectriques (<i>FLC</i>).	106
5.17	Composantes du vecteur de Stokes estimées à 200 images par seconde. (a) : s_0 , (b) : $ s_1 /s_0$, (c) : $ s_2 /s_0$, (c) : $ s_3 /s_0$. Les orientations de chacun des polariseurs sont précisées sur la sous-figure (a).	107
5.18	Angle azimutal(a) et ellipticité(b) estimés à 200 images par seconde.	107
5.19	<i>DOP</i> (a), <i>DOLP</i> (b), et <i>DOCP</i> (c) estimés à 200 images par seconde.	109
5.20	Régions d'intérêt définies pour quantifier l'estimation, présentées sur une image de <i>DOLP</i>	110
5.21	Moyenne et écart-type de l'erreur pour l'estimation de l'angle et de l'ellipticité à une cadence de 200im/s. Les couleurs correspondent aux ROI définies Fig. 5.20.	110
5.22	Moyenne et écart-type de l'erreur pour l'estimation du <i>DOLP</i> et du <i>DOCP</i> à une cadence de 200im/s. Les couleurs correspondent aux ROI définies Fig. 5.20. Pour le <i>DOCP</i> les résultats ne tiennent pas compte du fait que le diffuseur dépolairise.	111

Notations

Symbole	Signification
\mathbf{S}_{in}	Vecteur de Stokes incident
\mathbf{S}_{out}	Vecteur de Stokes émergent
s_0	Première composante du vecteur de Stokes, relative à l'intensité totale du faisceau
s_1	Deuxième composante du vecteur de Stokes, relative à la polarisation linéaire parallèle et orthogonale à l'axe de référence angulaire
s_2	Troisième composante du vecteur de Stokes, relative à la polarisation linéaire à $+45^\circ$ et $+135^\circ$ de l'axe de référence angulaire
s_3	Quatrième composante du vecteur de Stokes, relative à la polarisation circulaire droite et gauche
ψ	Angle azimutal de la polarisation
ε	Ellipticité de la polarisation

...

Symbole	Signification
θ	Angle d'orientation de l'axe rapide d'une lame de polarisation
φ	Retard d'une lame de polarisation
$DOLP_p$	Degré de polarisation linéaire partiel
$DOLP$	Degré de polarisation linéaire complet
$DOCP$	Degré de polarisation circulaire
DOP	Degré de polarisation total
I_0	Mode de polarisation acquis lors de l'analyse de la polarisation linéaire parallèle à l'axe de référence angulaire
I_{90}	Mode de polarisation acquis lors de l'analyse de la polarisation linéaire perpendiculaire à l'axe de référence angulaire
I_{45}	Mode de polarisation acquis lors de l'analyse de la polarisation linéaire à $+45^\circ$ de l'axe de référence angulaire
I_{135}	Mode de polarisation acquis lors de l'analyse de la polarisation linéaire à $+135^\circ$ de l'axe de référence angulaire
I_d	Mode de polarisation acquis lors de l'analyse de la polarisation circulaire droite
I_g	Mode de polarisation acquis lors de l'analyse de la polarisation circulaire gauche
MRD	Matrice de réduction des données permettant d'estimer un vecteur de Stokes à partir d'un vecteur d'intensités

Symbole	Signification
CN	Nombre de conditionnement de la MRD
λ	Longueur d'onde
δ	Déphasage entre les composantes E_x et E_y du champ électrique

TABLE 1 – Tableau des notations utilisées

Introduction

Quand nous observons notre environnement à l'œil nu, nous ne percevons qu'une partie de l'information disponible. Par exemple, nous ne voyons pas les rayons X, utilisés pour les radiographies, ni les rayons infrarouges, utilisés pour la vision nocturne ou le diagnostic thermique. Par conséquent, des capteurs ont dû être développés pour pouvoir accéder à ces informations. Au total, la lumière véhicule une information caractérisée par quatre grandeurs : l'amplitude, la fréquence, la phase, et la polarisation. Dans sa gamme de sensibilité, dite lumière visible, l'œil humain perçoit la fréquence et l'intensité, cette dernière grandeur étant directement reliée à l'amplitude. La fréquence se traduit par la couleur que l'on attribue à un objet. L'intensité, elle, peut être associée à un caractère d'éblouissement ou d'assombrissement. En revanche, la phase de la lumière nous échappe. Cette grandeur apporte une information de cohérence temporelle entre les différents trains d'ondes composant un faisceau lumineux. L'holographie vise précisément à capturer la relation de phase entre deux faisceaux issus d'une même source de lumière cohérente pour créer un hologramme sur un support photo-sensible (plaque photographique ou capteur CCD). La polarisation quant à elle renvoie à l'orientation du champ électrique dans l'espace lors de la propagation de l'onde lumineuse. Nous définirons plus en détail ce qu'est la polarisation un peu plus loin dans ce manuscrit, puisque c'est l'objet essentiel du présent travail. Nous ne pouvons pas observer cette grandeur à l'œil nu, contrairement à certains animaux comme les abeilles par exemple qui l'utilisent couramment pour s'orienter. L'homme, lui, doit une fois de plus s'appuyer sur des instruments, appelés polarimètres, afin d'estimer l'information de polarisation contenue dans une onde lumineuse.

On s'accorde souvent à dater les premières recherches scientifiques concernant la polarisation du XVI^{ème} siècle, avec les travaux pionniers de Bartholin et Huyghens sur la *double réfraction* du Spath d'Islande et son explication. Le formalisme mathématique permettant de décrire la polarisation date, lui, de 1852 avec les travaux de Stokes [6]. Il a cependant fallu attendre un siècle supplémentaire pour que l'imagerie de polarisation suscite un intérêt avec les travaux de Walraven [7] et de Solomon [8] il y a une trentaine d'années. Depuis, les applications ont foisonné et on trouve mention dans la littérature d'applications telles que la discrimination d'objets dans l'analyse de scènes [9, 10, 11], la

localisation d'objets manufacturés dans la végétation, ou plus généralement la détection de cible dans une scène [12, 13, 14, 15]. La polarimétrie peut également être utilisée pour estimer les dimensions d'un objet en 3D [16, 17, 18, 19, 20] ou pour le diagnostic médical [21, 22, 23]. L'astronomie solaire s'appuie aussi sur la polarimétrie pour s'affranchir des turbulences atmosphériques [4, 24, 25]. La multiplicité des applications ne doit cependant pas occulter le fait que peu de solutions sont réellement opérationnelles en termes de systèmes imageants de mesure de la polarisation. Il existe plusieurs schémas de polarimètres selon les exigences de l'application : précision, vitesse d'acquisition, caractère embarquable du système, système d'imagerie active ou passive... Le principe de base est le même : on utilise un capteur photo-sensible au devant duquel sont placés des éléments sensibles à la polarisation. On effectue une série de mesures en modifiant la configuration des éléments optiques devant le capteur ce qui permet *in fine* d'estimer l'information de polarisation. Les polarimètres les plus simples et présentant potentiellement la meilleure qualité optique sont des systèmes incorporant des éléments optiques non dynamiques, éventuellement orientés à l'aide de platines motorisées. Cependant, ils ont des vitesses de fonctionnement limitées. Depuis une vingtaine d'années, les cellules à cristaux liquides (CL) ont été incorporées dans des polarimètres, permettant ainsi d'effectuer des mesures à une cadence plus élevée [26]. Un montage destiné à la vision par ordinateur appliquée à la robotique a ainsi été proposé par Wolff en 1997 [3]. Les cellules à cristaux liquides s'imposent dès lors comme une alternative crédible aux lames polarisantes traditionnelles pour qui veut atteindre des cadences d'acquisition élevées.

Les performances d'un polarimètre sont en étroite relation avec le type de cellules à cristaux liquides utilisées. Certaines cellules font tourner la polarisation autour de l'axe de propagation sans déformer la figure de polarisation. C'est le cas des cellules à CL ferroélectriques par exemple. Les cellules à CL nématiques alignés parallèlement introduisent un déphasage entre les deux composantes transverses du champ électrique ce qui modifie la figure de polarisation sans appliquer de rotation. Enfin, d'autres technologies, telles que les cristaux liquides nématiques en hélice, permettent de combiner déphasage et rotation. En fonction de la technologie utilisée, la polarisation peut être analysée en partie ou en totalité. Ces différentes technologies présentent également des caractéristiques différentes du point de vue de la cadence de fonctionnement. Certains composants sont limités à 50Hz alors que d'autres peuvent atteindre le kiloHertz.

Le laboratoire MIPS dispose d'une bonne expérience quant à l'utilisation de modulateurs à CL. Depuis une vingtaine d'année, le MIPS a utilisé ces composants pour des travaux d'implantation de filtres de corrélation [27], d'holographie [28], et plus récemment de polarimétrie [29]. Avant le début de cette thèse, le MIPS a mis en place un polarimètre imageant. Il se compose d'une unique caméra CCD au devant de laquelle est placé un

unique modulateur à CL ferroélectriques. L'ensemble du système est potentiellement très compact, ce qui le rend portable et facilement embarquable ou intégrable dans un système pré-existant. Une étude préliminaire [30], restreinte au fonctionnement nominal du modulateur (bistable), rapporte une utilisation du système à une cadence de 360 images par secondes pour l'analyse d'une fraction de la polarisation linéaire. Les capacités du modulateur seul permettent de dépasser cette cadence d'acquisition pour atteindre le kiloHertz. Ces deux éléments de vitesse et de compacité constituent les points forts ouvrant à de nouvelles applications. Dans la présente thèse, nous nous attachons à développer un polarimètre de Stokes complet opérationnel, à partir du montage préliminaire.

Notre contribution

Notre contribution touche à deux domaines distincts inhérents à la mise en œuvre de ce polarimètre : le développement matériel d'une part, et le post-traitement des images acquises d'autre part.

Notre point de départ est un polarimètre à cristaux liquides ferroélectriques capable d'évaluer seulement deux états de polarisation croisés. C'est le modulateur à cristaux liquides qui dans son fonctionnement nominal (bistable) limite les potentialités du polarimètre à l'analyse d'une fraction de la polarisation linéaire. Dès lors, l'analyse de la totalité de la polarisation linéaire requiert a priori l'intégration de plusieurs modulateurs, ce que nous souhaitons éviter. De plus, les cristaux liquides ferroélectriques ne permettent a priori pas de moduler la circularité de l'onde lumineuse incidente. Donc pour analyser la totalité de la polarisation, il est nécessaire d'intégrer des lames retard dans le montage, en complément des modulateurs. Tout cela donne au final un montage relativement encombrant. Notre contribution originale va consister à optimiser la commande de ce modulateur de manière à pouvoir analyser la totalité de la polarisation sans modifier le montage optique existant.

Le post-traitement des images acquises constitue également une phase délicate. Un polarimètre à division temporelle tel que le nôtre présente un défaut lorsque l'on observe une scène dans laquelle un ou plusieurs objets sont en mouvement. Avec notre polarimètre, l'information de polarisation étant estimée à partir de la combinaison de plusieurs images d'intensités acquises les unes après les autres, il est important de compenser le mouvement dans la scène pour restituer la correspondance entre les différents pixels des images d'intensités. Ne pas traiter ce mouvement se traduit par l'apparition d'artéfacts pendant la phase d'estimation de la polarisation. Nous apportons dans ce manuscrit des solutions à ce problème ; l'une d'elle a été implantée dans une application restituant l'information de polarisation corrigée en temps réel à une cadence de 50 images par seconde.

Plan du mémoire

Le manuscrit se compose de 5 chapitres. Le premier chapitre pose les bases mathématiques de la polarimétrie telles que nous allons les utiliser dans ce mémoire. Il fait le lien entre la représentation de la lumière sous forme d'onde électromagnétique et le formalisme de Stokes. Ce dernier permet de représenter l'état de polarisation d'une onde sous la forme d'un vecteur à quatre composantes. Nous introduisons également le formalisme de Mueller servant pour sa part à modéliser le changement de polarisation d'une onde incidente interagissant avec un milieu.

Dans un deuxième chapitre, nous dressons l'état de l'art des différentes méthodes pour mesurer la polarisation. Trois structures de polarimètres sont présentées : la division d'amplitude, la division de front d'onde, et la division temporelle. Nous comparons les potentialités de notre polarimètre à celles des architectures rapportées dans la littérature, et nous nous situons par rapport aux quelques dispositifs commerciaux existants. Les modulateurs à cristaux liquides sont également abordés dans ce chapitre. Nous comparons les potentialités de différentes technologies de CL pour la polarimétrie.

Le troisième chapitre traite du fonctionnement de notre polarimètre à division temporelle dans sa version préliminaire, avec une utilisation standard du modulateur. Des artéfacts dus au mouvement dans la scène peuvent tromper l'œil d'un utilisateur non averti, ou déclencher des fausses alarmes dans un algorithme de traitement automatique. Il est essentiel de corriger les artéfacts dus au mouvement. Deux voies sont envisageables : soit une approche en pré-traitement pour corriger le mouvement dans les images d'intensité, avant d'estimer l'information de polarisation, soit une approche en post-traitement consistant à corriger les artéfacts alors qu'ils sont déjà présents dans l'image. Nous proposons une méthode dans chacune des deux approches.

Le quatrième chapitre traite du caractère *a priori* bistable du modulateur, et de la technique que nous proposons pour nous en affranchir. Dans son fonctionnement nominal, un modulateur à CL ferroélectriques ne permet d'estimer qu'une fraction de la polarisation linéaire. Ceci signifie qu'il est nécessaire de combiner le modulateur avec d'autres composants optiques pour pouvoir accéder au reste de la polarisation. Cependant, nous montrons dans ce chapitre qu'il est possible d'analyser la totalité de la polarisation linéaire avec un seul modulateur à CL ferroélectriques. Pour cela, nous concevons un nouveau signal de commande qui permet d'utiliser le modulateur dans un mode de fonctionnement autre que son mode nominal. L'étude complète du comportement du modulateur est exposée. Une phase de validation présente les capacités du polarimètre utilisé dans ces conditions.

Enfin, le cinquième chapitre montre que l'on peut analyser également la circularité avec un modulateur à CL ferroélectriques. A sa longueur d'onde nominale, un modulateur à CL ferroélectriques a un retard déterminé ne permettant pas d'analyser la polarisation circulaire. Or le retard dépend de la longueur d'onde de travail. Donc si l'on utilise le modulateur à une longueur d'onde différente de la longueur d'onde nominale, on peut modifier la valeur du retard et par conséquent analyser la polarisation circulaire en plus de la polarisation linéaire. Ainsi, le prototype devient capable d'analyser la totalité de la polarisation avec un seul et unique modulateur à CL ferroélectriques pour tout élément sensible à la polarisation. Aucune lame ni aucun modulateur ne sont utilisés en complément. Le chapitre présente l'étude complète du modulateur à 532nm, alors que sa longueur d'onde nominale est de 633nm. Une phase de validation vient exposer les capacités d'un tel système.

Chapitre 1

Formalisme

Un faisceau lumineux issu d'une source, qu'il s'agisse d'un élément naturel comme le soleil ou d'une source artificielle, interagit avec l'environnement avant d'atteindre le capteur. Le faisceau arrivant au capteur porte ainsi la marque de l'élément avec lequel il a interagi. Par exemple, analyser la polarisation d'un faisceau réfléchi sur une surface, provenant d'une source dont la polarisation est connue, permet de recueillir des informations sur cette surface. On procède de même pour une transmission plutôt que pour une réflexion.

En représentant la lumière sous la forme d'une onde électromagnétique, la polarisation est définie comme l'orientation du champ électrique de la lumière. Nous allons voir dans ce chapitre comment représenter mathématiquement la polarisation d'une onde lumineuse. Nous considérons dans la suite le cas des radiations lumineuses dans la bande spectrale visible, extensible sans perte de généralité à n'importe quelle radiation électromagnétique. Le modèle utilisé est celui d'une onde plane monochromatique. Nous abordons ce que sont le formalisme de Stokes qui sert à représenter l'état de polarisation de la lumière, et le formalisme de Mueller qui permet d'exprimer l'interaction entre un milieu et la polarisation d'un faisceau incident. Nous concluons avec un schéma permettant de représenter l'ensemble des états de polarisation d'une onde sur une sphère appelée sphère de Poincaré.

1.1 La polarisation du point de vue électromagnétique

Fresnel et Arago [31] ont montré que la lumière se propageant dans une direction donnée est polarisée uniquement dans le plan transverse. En conséquence, le champ électrique d'une onde plane monochromatique de longueur d'onde λ se propageant selon l'axe z , comme représenté Fig. 1.1, est décrit par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y) \\ E_z(z, t) = 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

avec E_{0x} et E_{0y} les amplitudes des composantes du champ électromagnétique, ω la pulsation, $k = 2\pi/\lambda$ la norme du vecteur d'onde, et δ_x et δ_y les phases des composantes.

On définit le déphasage δ entre les deux composantes $E_x(z, t)$ et $E_y(z, t)$ comme suit :

$$\delta = \delta_y - \delta_x \quad (1.2)$$

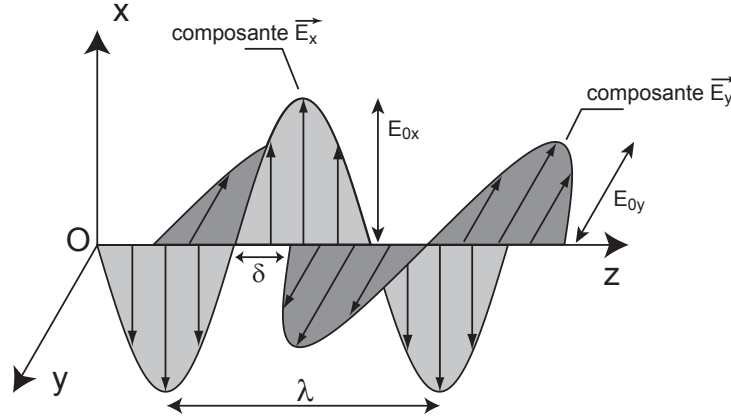


FIGURE 1.1 – Schéma de propagation des composantes de l'onde lumineuse

L'état de polarisation d'une onde est défini par la courbe décrite par l'extrémité du vecteur champ électrique en fonction du temps, projetée sur le plan orthogonal à la direction de propagation. Si on se place dans plan $z = \text{constante}$, par exemple le plan $z = 0$, et en éliminant la dépendance temporelle ωt entre les composantes E_x et E_y , on montre [32] que l'extrémité du vecteur champ électrique suit une trajectoire correspondant à l'équation suivante :

$$\left(\frac{E_x(z, t)}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y(z, t)}{E_{0y}}\right)^2 - 2\frac{E_x(z, t) E_y(z, t)}{E_{0x} E_{0y}} \cos(\delta) = \sin^2(\delta) \quad (1.3)$$

Si δ n'est pas constant dans le temps, alors l'onde est non polarisée. La figure de polarisation peut alors ressembler à l'exemple présenté Fig. 1.2(a). Si δ est constant dans le temps alors l'équation (1.3) correspond à une ellipse. L'onde est alors dite polarisée elliptiquement, ce qui correspond au cas le plus général d'une onde totalement polarisée. Plaçons-nous pour le moment dans ce cas-là. La figure décrite par l'extrémité du vecteur champ électrique est représentée Fig. 1.2(b) et Fig. 1.3. Le sens de parcours de cette ellipse est lié au paramètre δ et est par convention déterminé pour un observateur regardant en direction de la source de lumière. Lorsque $\sin(\delta) > 0$, l'ellipse est parcourue dans le sens horaire et la polarisation est dite droite. Quand $\sin(\delta) < 0$ l'ellipse est parcourue dans le sens trigonométrique et la polarisation est dite gauche. De plus, l'ellipse est caractérisée par deux paramètres géométriques : ψ et ε représentant respectivement l'angle d'orientation de l'ellipse et son ellipticité. Ces deux grandeurs s'expriment en fonction du champ électrique

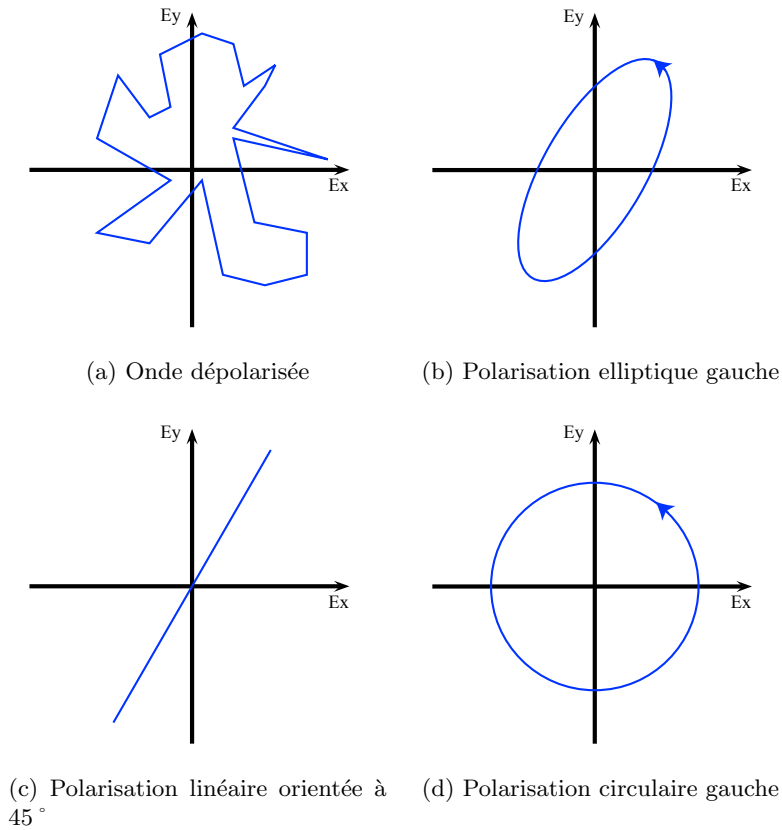


FIGURE 1.2 – Exemples d'états de polarisation

de la manière suivante :

$$\tan 2\psi = 2 \frac{E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \cos \delta \quad (1.4)$$

$$\tan 2\varepsilon = 2 \frac{E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} \sin \delta \quad (1.5)$$

Deux cas particuliers de polarisation elliptique peuvent être mentionnés. Quand $\sin(\delta) = 0$, la trajectoire du vecteur champ électrique est une droite, comme présenté Fig. 1.2(c) et la polarisation est dite linéaire. Lorsque $\sin(\delta) = \pm 1$, la figure décrite est un cercle et la polarisation est dite circulaire gauche si $\sin(\delta) = -1$ et circulaire droite si $\sin(\delta) = +1$, comme présenté Fig. 1.2(d).

1.2 Formalisme de Stokes

La description de la lumière en termes d'onde électromagnétique avec une amplitude et une phase permet de se représenter l'évolution de l'onde dans l'espace. Cependant, l'am-

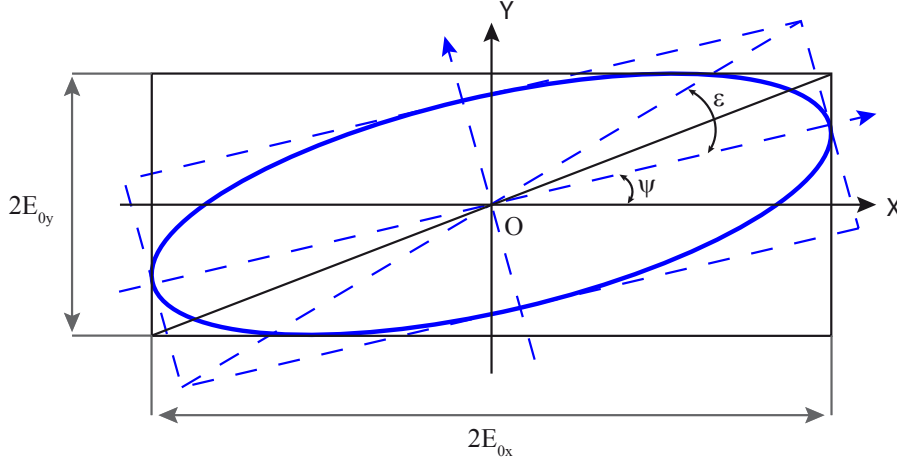


FIGURE 1.3 – Ellipse de polarisation

plitude de l'onde lumineuse n'est pas directement mesurable, contrairement à l'intensité du faisceau, celle-ci étant la moyenne temporelle du carré de l'amplitude.

En multipliant l'équation (1.3) par $4E_{0x}^2 E_{0y}^2$ et en prenant la valeur moyenne, symbolisée par $\langle \cdot \rangle$, on obtient l'équation suivante :

$$4E_{0y}^2 \langle E_x^2(0, t) \rangle + 4E_{0x}^2 \langle E_y^2(0, t) \rangle - 8E_{0x} E_{0y} \langle E_x(0, t) E_y(0, t) \rangle \cos \delta = (2E_{0x} E_{0y} \sin \delta)^2 \quad (1.6)$$

Les valeurs moyennes des différents termes dans l'équation (1.6) valent :

$$\langle E_x^2(0, t) \rangle = \frac{1}{2} E_{0x}^2 \quad (1.7)$$

$$\langle E_y^2(0, t) \rangle = \frac{1}{2} E_{0y}^2 \quad (1.8)$$

$$\langle E_x(0, t) E_y(0, t) \rangle = \frac{1}{2} E_{0x} E_{0y} \cos \delta \quad (1.9)$$

D'où :

$$2E_{0x}^2 E_{0y}^2 + 2E_{0x}^2 E_{0y}^2 - (2E_{0x} E_{0y} \cos \delta)^2 = (2E_{0x} E_{0y} \sin \delta)^2 \quad (1.10)$$

Additionner et soustraire le terme $E_{0x}^4 + E_{0y}^4$ dans le membre de gauche permet de réécrire l'équation (1.10) sous la forme suivante :

$$(E_{0x}^2 + E_{0y}^2)^2 - (E_{0x}^2 - E_{0y}^2)^2 - (2E_{0x} E_{0y} \cos \delta)^2 = (2E_{0x} E_{0y} \sin \delta)^2 \quad (1.11)$$

A partir de cette équation, les paramètres de Stokes d'une onde plane sont couramment

définis comme suit :

$$\begin{cases} s_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ s_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ s_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \\ s_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \end{cases} \quad (1.12)$$

On constitue ainsi le vecteur présenté Eq. (1.13), appelé vecteur de Stokes [6], qui permet de représenter complètement l'état de polarisation d'une onde plane monochromatique. Ce vecteur permet de lier cet état à des grandeurs mesurables que sont les intensités I_0 , I_{45} , I_{90} , I_{135} , I_g , et I_d . Chacune de ces intensités correspond à la mesure d'un capteur photo-sensible placé derrière un polariseur linéaire orienté à 0° , 45° , 90° , et 135° pour I_0 , I_{45} , I_{90} , et I_{135} , et derrière un polariseur circulaire gauche et circulaire droit respectivement pour I_g et I_d .

$$\begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \\ 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \end{bmatrix} \propto \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_g - I_d \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

s_0 représente l'intensité totale de l'onde, s_1 symbolise la proportion de polarisation linéaire horizontale ou verticale, s_2 la proportion de polarisation linéaire à $+45^\circ$ ou -45° , et s_3 quantifie la polarisation circulaire droite ou gauche.

Les vecteurs de Stokes sont souvent normalisés par rapport à la composante s_0 . Six vecteurs représentant des états de polarisation remarquables peuvent ainsi être exprimés de la façon suivante :

$$\{\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_{90}, \mathbf{S}_{45}, \mathbf{S}_{135}, \mathbf{S}_d, \mathbf{S}_g\} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \right\} \quad (1.14)$$

où \mathbf{S}_0 représente une polarisation linéaire parallèle à l'axe de référence angulaire, \mathbf{S}_{90} une polarisation linéaire orthogonale à ce même axe, \mathbf{S}_{45} et \mathbf{S}_{135} des polarisations linéaires respectivement à $+45^\circ$ et $+135^\circ$ de l'axe de référence, et \mathbf{S}_d et \mathbf{S}_g respectivement les états de polarisation circulaire droit et circulaire gauche.

En injectant les termes définis à l'équation (1.12) dans l'équation (1.11), on établit la relation suivante liant les composantes du vecteur de Stokes d'une onde totalement polarisée :

$$s_0^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 \quad (1.15)$$

Pour étendre cette relation au cas général d'une onde partiellement polarisée, on

représente en premier lieu le vecteur de Stokes de l'onde comme la somme d'un vecteur représentant une onde totalement dépolarisée et d'un vecteur représentant une onde totalement polarisée ; ce qui correspond à l'écriture vectorielle suivante :

$$\begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_0 - \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Les composantes du vecteur de Stokes d'une onde partiellement polarisée sont alors liées par la relation ci-dessous :

$$s_0^2 \geq s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 \quad (1.17)$$

On définit également le degré de polarisation, que nous appellerons *DOP* pour l'abréviation anglaise de *degree of polarization*, par la relation suivante :

$$DOP = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0} \quad (1.18)$$

Cette grandeur, bornée entre 0 et 1, quantifie la part du faisceau lumineux qui est polarisée. Ainsi, le degré de polarisation vaut 1 lorsque l'onde est totalement polarisée et 0 quand l'onde est totalement dépolarisée. Toute valeur comprise entre 0 et 1 renvoie à une onde partiellement polarisée. On définit également des *DOP* spécifiques à la polarisation linéaire et circulaire, appelés respectivement degré de polarisation linéaire (*DOLP*) et degré de polarisation circulaire (*DOCP*) :

$$DOLP = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0} \quad (1.19)$$

$$DOCP = \frac{\sqrt{s_3^2}}{s_0} = \frac{|s_3|}{s_0} \quad (1.20)$$

Enfin, mentionnons que les paramètres ψ et ε de l'ellipse de polarisation s'expriment en fonction des paramètres de Stokes de la manière suivante :

$$\tan(2\psi) = \frac{s_2}{s_1} \quad \text{avec } 0 \leq \psi < \pi \quad (1.21)$$

$$\sin(2\varepsilon) = \frac{s_3}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}} \quad \text{avec } -\frac{\pi}{4} \leq \varepsilon \leq \frac{\pi}{4} \quad (1.22)$$

avec ψ l'angle azimutal de l'ellipse, et ε son ellipticité.

1.3 Formalisme de Mueller

1.3.1 Aspect général

L'interaction entre un matériel et un faisceau lumineux polarisé est modélisée par le formalisme de Mueller [33], encore appelé formalisme de Stokes-Mueller puisque la polarisation du faisceau est représentée par un vecteur de Stokes. Dans ce formalisme, exposé Eq. (1.23), la fonction de transfert polarimétrique de l'élément matériel est une matrice 4×4 \mathbf{M} appelée matrice de Mueller. La polarisation du faisceau émergent, représenté par le vecteur de Stokes \mathbf{S}_{out} , est déterminé par multiplication entre la matrice de Mueller \mathbf{M} du système et le vecteur de Stokes \mathbf{S}_{in} représentant la polarisation du faisceau incident.

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_{\text{in}} \quad (1.23)$$

1.3.2 Les éléments spécifiques

La lumière interagit avec des milieux présentant des propriétés polarimétriques qui résultent de la combinaison de trois comportements élémentaires : la diatténuation, le retard, et la rotation de polarisation. En laboratoire, on utilise des composants optiques associés en théorie à un et un seul de ces comportements élémentaires. On distingue ainsi le diatténuateur, le retardateur, et le rotateur.

- Le diatténuateur.

Plus couramment appelé polariseur, ce composant agit sur les amplitudes des composantes du champ électrique en transmettant ou en absorbant l'onde dans une direction davantage que dans une autre. En termes de polarisation, cela signifie que le diatténuateur transmet un état de polarisation privilégié et réfléchit ou absorbe l'état de polarisation orthogonal, selon la technologie utilisée. Il existe des polariseurs linéaires, circulaires, et elliptiques. En pratique, les polariseurs transmettent quand même une fraction de l'état de polarisation orthogonal. Un polariseur est alors caractérisé par sa transmission pour chacun des états parallèle et orthogonal, ainsi que par son ouverture angulaire et sa réponse spectrale. La position du polariseur est repérée par l'angle entre l'axe du référentiel servant de référence angulaire et l'axe rapide du polariseur caractérisant l'état de polarisation transmis.

La matrice de Mueller d'un polariseur idéal dont l'axe rapide est orienté d'un angle θ est la suivante :

$$\mathbf{M}_{\text{Pol}}(\theta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ \cos(2\theta) & \cos^2(2\theta) & \cos(2\theta) \sin(2\theta) & 0 \\ \sin(2\theta) & \cos(2\theta) \sin(2\theta) & \sin^2(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

- Le retardateur.

Cet élément est une lame retard. Cette lame est biréfringente, c'est-à-dire que l'indice optique de la lame est différent selon deux axes appelés axe rapide et axe lent. Ceci provoque un retard de φ radians entre les composantes E_x et E_y qui s'exprime sous la forme suivante :

$$\varphi = 2\pi(n_l - n_r)\frac{d}{\lambda} \quad (1.25)$$

où n_l est l'indice optique selon l'axe lent, n_r l'indice optique selon l'axe rapide, d l'épaisseur de la lame, et λ la longueur d'onde.

On peut alors formuler le déphasage δ' entre les composantes E_x et E_y du champ électrique de l'onde émergeant de la lame retard comme présenté Eq. (1.26). δ' dépend du déphasage δ de l'onde incidente et d'un terme fonction $f(\theta)$ relatif à l'orientation θ de la lame. Si les composantes E_x et E_y sont respectivement alignées avec l'axe lent et l'axe rapide, alors le déphasage δ sera accru d'une quantité φ , et inversement.

$$\delta' = \delta + f(\varphi) \quad (1.26)$$

Deux retardateurs sont couramment utilisés :

- la lame demi-onde, qui introduit un déphasage de π rad équivalent à un chemin optique d'une demi longueur d'onde. Elle agit comme un rotateur de polarisation, sans en être un.

- la lame quart-d'onde, qui introduit un déphasage de $\frac{\pi}{2}$ rad équivalent à un chemin optique d'un quart de longueur d'onde. L'intérêt majeur d'une telle lame est de pouvoir obtenir une polarisation linéaire à partir d'une polarisation circulaire, et inversement. En effet, cette lame circularise une onde incidente polarisée linéairement et orientée à 45° de son axe rapide, ou inversement transforme une polarisation incidente circulaire en un polarisation linéaire dont l'orientation dépendra de la position angulaire de la lame quart d'onde.

Les matrices de Mueller de ces éléments, pour un axe rapide orienté d'un angle θ , sont respectivement :

$$\mathbf{M}_{\frac{\lambda}{2}}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(4\theta) & \sin(4\theta) & 0 \\ 0 & \sin(4\theta) & -\cos(4\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

$$\mathbf{M}_{\frac{\lambda}{4}}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta) & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & -\sin(2\theta) \\ 0 & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & \sin^2(2\theta) & \cos(2\theta) \\ 0 & \sin(2\theta) & -\cos(2\theta) & 0 \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

- Le rotateur.

Un rotateur a pour fonction de modifier l'angle d'orientation ψ de la polarisation incidente d'un angle $\Delta\psi$ sans en modifier l'ellipticité. $\Delta\psi$ est constant et indépendant de l'orientation de la lame. L'effet magnéto-optique permet par l'application d'un champ magnétique à certains matériaux d'obtenir une rotation de la polarisation [32]. L'angle de rotation dépend notamment de l'amplitude du champ magnétique. En pratique, le rotateur pur est peu utilisé. On préfère la lame demi-onde, principalement pour la souplesse qu'elle apporte par rapport à un rotateur pur. Bien qu'étant par définition un retardateur, la lame demi-onde produit le même résultat qu'un rotateur à ceci près que l'angle $\Delta\psi$ dépend de l'orientation de la lame demi-onde. En d'autres termes, une lame demi-onde constitue un rotateur au $\Delta\psi$ accordable alors qu'un rotateur pur possède un $\Delta\psi$ constant.

1.4 Sphère de Poincaré

Les différents états de polarisation peuvent être représentés de manière géométrique, sur une sphère appelée sphère de Poincaré, présentée Fig. 1.4. En coordonnées polaires, un état de polarisation est repéré par l'angle azimutal ψ et l'ellipticité ε , associés à un rayon unitaire représentant l'intensité totale normée du faisceau lumineux. En coordonnées cartésiennes, un état de polarisation est repéré par les composantes s_1 , s_2 , et s_3 issues du vecteur de Stokes. Ces coordonnées sont placées dans le repère orthonormé $(O, \vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3)$. L'axe s_1 représente les composantes polarisées linéairement horizontalement et verticalement. L'axe s_2 représente les composantes polarisées linéairement à $+45^\circ$ et à -45° . Et l'axe s_3 représente les composantes polarisées circulairement droite et gauche. Ainsi, l'équateur représente l'ensemble des polarisations linéaires pures, sans composante circulaire. Les pôles représentent respectivement pour le pôle nord l'état de polarisation circulaire droit, et pour le pôle sud l'état de polarisation circulaire gauche. Chaque hémisphère représente les polarisations elliptiques. Une découpe de la sphère en méridiens et parallèles fait ressortir les ensembles d'états de polarisation respectivement à angle azimutal constant et à ellipticité constante.

La sphère de Poincaré permet de représenter l'ensemble des états complètement polarisés correspondant au cas d'égalité de l'équation (1.17). Le cas d'inégalité au sens large de cette même équation permet de considérer les états partiellement polarisés, ce qui d'un point de vue géométrique revient à passer d'une sphère à une boule. La boule se décompose alors en trois parties :

- la surface, qui correspond aux états totalement polarisés
- le centre, qui correspond à l'état totalement dépolarisé
- l'intérieur de la boule, surface et centre exclus, qui correspond aux états partiellement polarisés

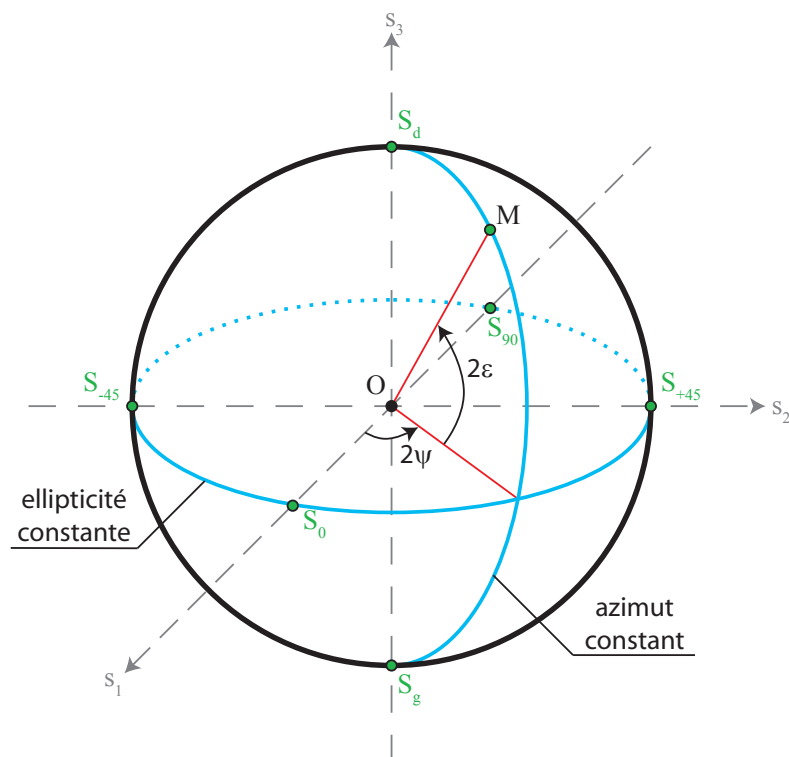


FIGURE 1.4 – Localisation d'un état de polarisation M d'azimut ψ et d'ellipticité ϵ sur la sphère de Poincaré.

Chapitre 2

Etat de l'art

Le présent chapitre dresse un état de l'art des technologies utilisées en polarimétrie de Stokes imageante. Dans un premier temps nous évoquons les polarimètres eux-mêmes. Nous nous limitons volontairement aux polarimètres de Stokes, c'est à dire aux montages permettant d'estimer le vecteur de Stokes de l'onde incidente. Le polarimètre développé au MIPS rentre dans cette catégorie de polarimètres. Il existe d'autres polarimètres, dits de Mueller, permettant d'estimer la matrice de Mueller de l'élément observé. Ces montages ne sont pas abordés dans ce manuscrit. Nous détaillons les trois architectures principales : les polarimètres à division temporelle, à division d'amplitude, à et division de front d'onde. Dans un deuxième temps, nous présentons les modulateurs à cristaux liquides. Différentes technologies sont disponibles selon les exigences imposées par l'application visée. Certains modulateurs agissent uniquement sur la phase, d'autres opèrent simplement en rotation de polarisation, et d'autres encore modifient à la fois la phase et l'amplitude de la polarisation. Certaines technologies de CL permettent également des vitesses de modulation plus élevées que d'autres.

2.1 Les différentes architectures de polarimètres

Un polarimètre a pour fonction d'analyser la polarisation de la lumière, donc d'identifier les quatre paramètres du vecteur de Stokes définis au chapitre précédent. Pour ce faire, il convient de mesurer différentes intensités, à l'image de ce qui a été présenté Eq. (1.13). En pratique, ces intensités ne sont pas nécessairement I_0 , I_{45} , I_{90} , I_{135} , I_g , et I_d , comme nous le verrons dans les chapitres suivants. Quatre intensités définies de manière appropriée peuvent suffire pour remonter à la totalité de l'information de polarisation du faisceau incident. Davantage d'intensités peuvent être acquises pour augmenter le rapport signal sur bruit mais au prix d'un allongement du temps d'acquisition. Davantage d'informations seront données au Chapitre 4. Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur les principes mis en oeuvre pour acquérir ces intensités. Il existe trois méthodes principales.

Ces méthodes sont décrites dans les trois sous-sections suivantes.

2.1.1 Division d'amplitude

Cette méthode consiste à séparer le faisceau en plusieurs bras secondaires à l'aide de lames séparatrices. On parle alors de division d'amplitude [34, 2]. Un schéma de principe est présenté Fig. 2.1. Il y a autant de bras secondaires que de mesures à effectuer, ce qui mène à des montages relativement lourds. Cette méthode présente l'avantage de pouvoir effectuer toutes les mesures au même instant. Par contre il est indispensable d'utiliser des éléments optiques de grande qualité et leur nombre important rend leur caractérisation plus critique, les erreurs se cumulant. En pratique, il est également nécessaire de recalibrer les images acquises sur chacune des différentes caméras, soit mécaniquement en réglant la position de la caméra, soit par logiciel une fois l'acquisition effectuée. De plus, il est indispensable de synchroniser les différentes caméras entre elles.

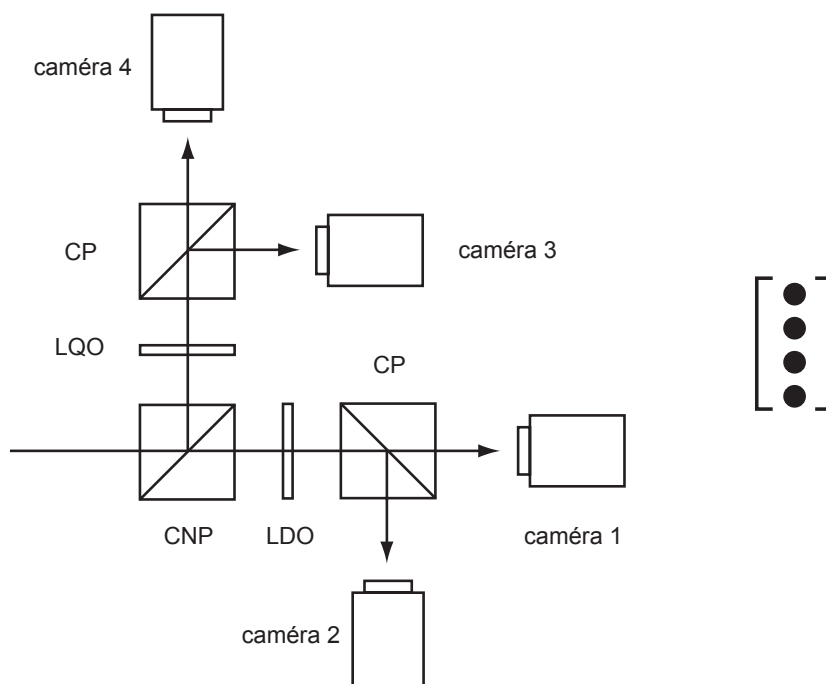


FIGURE 2.1 – Principe du polarimètre à division d'amplitude. Cube Non Polarisant (CNP), lame Demi-Onde (LDO), lame Quart-d'Onde (LQO) Cube Polarisant (CP). Sur la droite est schématisé le vecteur de Stokes relatif au montage : les quatre composantes du vecteur peuvent être identifiées dans cette configuration.

Une variante plus compacte consiste à utiliser des prismes de Wollaston. Un tel prisme sépare deux composantes linéaires orthogonales en deux faisceaux distincts, comme schématisé Fig. 2.2. Il est alors possible de juxtaposer les deux composantes en sortie d'un prisme de Wollaston sur un même capteur. Une seule caméra peut même suffire si tous

les bras secondaires sont redirigés vers ce capteur, comme par exemple dans les travaux de Bènière *et al.* [35] pour l'analyse d'états de polarisation orthogonaux, ou encore dans les travaux de Fujita *et al.* [36] dédiés à l'analyse de la polarisation linéaire. On peut ainsi s'affranchir des contraintes de synchronisation des différents capteurs. On notera également un montage Fig. 2.3 proposé par de Leon *et al.* [2] permettant d'analyser la totalité de la polarisation avec une seule caméra. Des cubes séparateurs et des lames polarisantes sont utilisés plutôt qu'un prisme de Wollaston pour séparer le faisceau en plusieurs bras. Toutefois, le montage reste relativement volumineux et demande de la précision dans l'alignement des différents éléments.

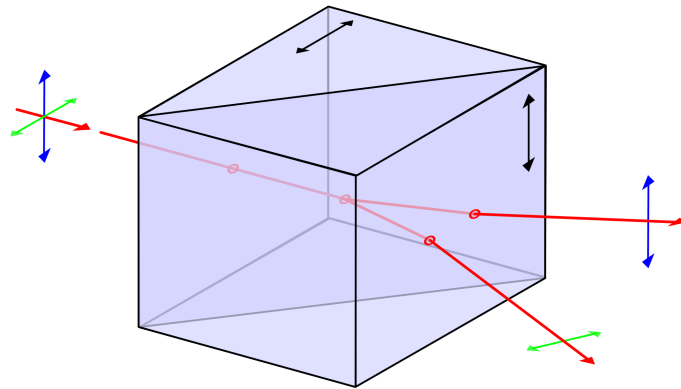


FIGURE 2.2 – Prisme de Wollaston : les composantes de polarisation linéaires verticales et horizontales sont diffractées selon deux angles différents, permettant ainsi de les séparer en deux faisceaux lumineux distincts.

2.1.2 Division de front d'onde

Cette deuxième solution consiste à positionner une matrice de micro-polariseurs, telle que celle présentée Fig. 2.4, immédiatement devant le capteur photo-sensible. Cette méthode reprend l'idée de la matrice de Bayer utilisée pour l'analyse de la couleur en RGB [37]. C'est ce qu'on appelle la division de front d'onde [38]. Chaque pixel analyse une direction particulière de la polarisation incidente. En interpolant l'information acquise sur des pixels voisins, le vecteur de Stokes de l'onde incidente peut être déterminé.

Etant donné qu'il est technologiquement difficile de fabriquer des lames retard de très petites dimensions, cette méthode est utilisée surtout pour l'analyse de la polarisation linéaire [38, 39]. Toutefois des solutions dans l'infrarouge existent pour analyser la totalité du vecteur de Stokes [40]. L'inconvénient d'une telle méthode est son coût élevé et le potentiel risque de diaphonie si la matrice est éloignée du capteur, c'est-à-dire le risque de voir le faisceau issu d'un micro-polariseur éclairer partiellement les pixels voisins du pixel auquel se rapporte le micro-polariseur.

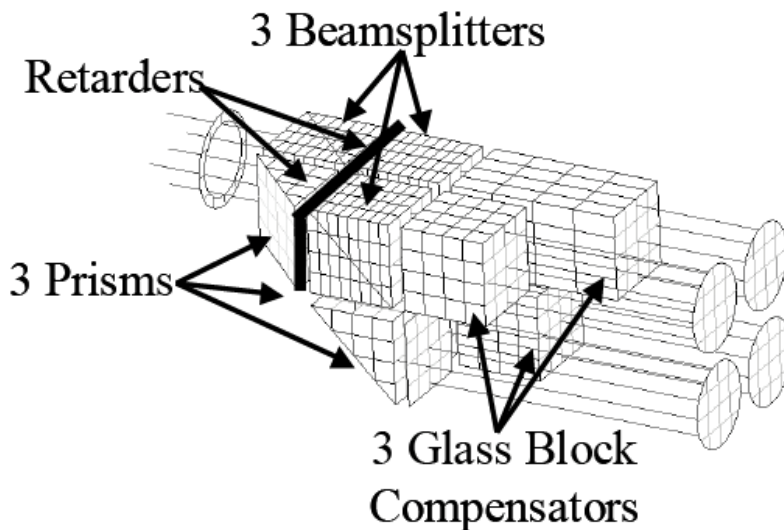


FIGURE 2.3 – Montage utilisé par de Leon *et al.* [2] pour analyser la totalité de la polarisation. Le faisceau incident est séparé en quatre faisceaux de polarisations différentes à l'aide de cubes séparateurs, de prismes, et de lames retard.

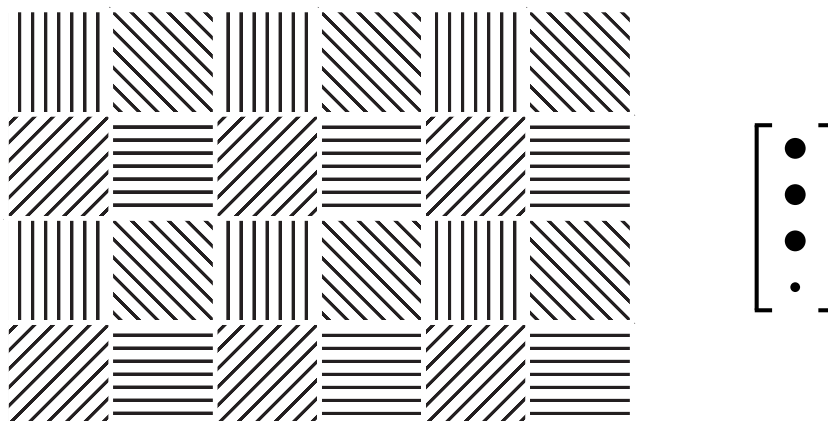


FIGURE 2.4 – Matrice de micro-polariseurs utilisée pour l'analyse de la polarisation par division de front d'onde. A chaque élément correspond un pixel du capteur. Ainsi, chaque pixel analyse une direction particulière de la polarisation. La matrice présentée dans cette figure permet seulement l'analyse de la polarisation linéaire, comme le montre le vecteur de Stokes schématisé sur la droite.

2.1.3 Division temporelle

Une troisième méthode consiste à acquérir les différentes intensités successivement. C'est ce que l'on appelle la division temporelle. Un polarimètre à division temporelle n'est constitué que d'un seul capteur photo-sensible contrairement à la division d'amplitude. Au devant de ce capteur sont placées différentes lames. Selon le nombre et le type de lames utilisées, le polarimètre permet d'analyser la totalité de la polarisation ou seulement une

fraction de celle-ci. Cette méthode se différencie de la division de front d'onde en ceci que l'image formée par le capteur ne représente qu'un seul mode de polarisation. Pour acquérir le nombre d'images nécessaires à l'étude de la polarisation, il convient d'acquérir plusieurs images l'une après l'autre en modifiant la configuration des lames positionnées devant le capteur.

Polarimètre à lames tournantes

Ce type de polarimètre est conceptuellement le plus simple qui soit. Par exemple, un seul polariseur tournant (cf. Fig. 2.5) suffit pour identifier les trois premières composantes du vecteur de Stokes, c'est-à-dire celles caractérisant la polarisation linéaire. Ajouter une lame retard, dont le retard n'est pas multiple de $\lambda/2$, devant le polariseur, comme présenté Fig. 2.6, permet d'accéder à la circularité. Dans cette configuration, il n'est pas nécessaire de faire tourner les deux lames. La seule rotation de la lame retard suffit. Par exemple, Terrier [41] positionne une lame quart d'onde à cinq angles bien précis $(-\frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{8}, 0, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4})$ devant un polariseur linéaire fixe. A chaque position une mesure d'intensité est effectuée. Avec ces cinq intensités, le vecteur de Stokes incident peut être totalement identifié. Ce type de montage demeure lent mais présente potentiellement la meilleure qualité optique.

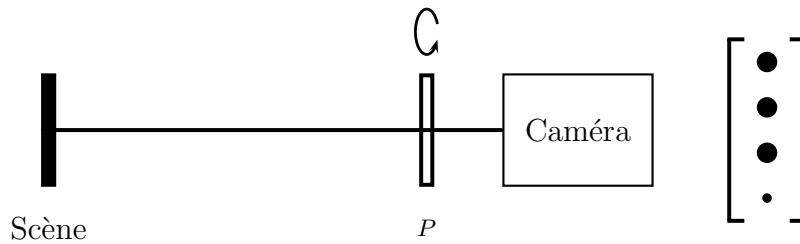


FIGURE 2.5 – Principe de polarimètre à polariseur tournant

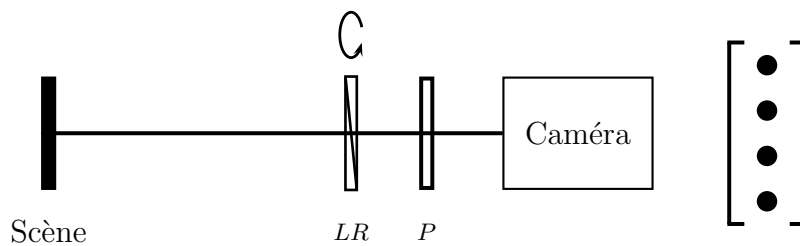


FIGURE 2.6 – Principe de polarimètre à lame retard tournante et polariseur fixe

Polarimètre à cristaux liquides

Nous présentons ici les architectures de polarimètres utilisant des cellules à cristaux liquides. Les propriétés polarimétriques de chaque cellule seront détaillées ultérieurement.

Wolff [3] a proposé en 1997 de remplacer la lame retard tournante par une cellule à CL. Plus exactement par deux cellules car celles-ci étant commandées en "tout ou rien", l'utilisation d'une seule cellule ne permet d'acquérir que deux intensités alors qu'un minimum de 4 est requis pour remonter au vecteur de Stokes. On obtient alors le montage présenté Fig. 2.7 qui permet en pratique de déterminer la totalité de l'information de polarisation du faisceau incident, bien que Wolff ne l'ait utilisé que pour analyser la partie linéaire.

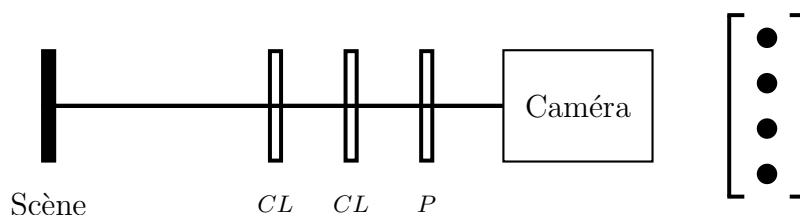


FIGURE 2.7 – Principe de polarimètre utilisant des modulateurs à cristaux liquides, proposé par Wolff *et al.* [3]

Ce montage est fonctionnel aussi bien avec des cellules à CL se comportant comme des retardateurs purs [14, 42, 43] qu'avec des cellules couplant le retard avec une rotation de polarisation, telles que les cellules à cristaux liquides nématiques en hélice [3]. En revanche, l'utilisation d'éléments rotateurs de polarisation, tels que les CL ferroélectriques lorsqu'ils sont utilisés à leur longueur d'onde nominale, nécessite l'ajout d'un ou plusieurs éléments retardateurs dans le montage. Ainsi Gandorfer [4] a-t-il proposé le montage Fig. 2.8 permettant d'analyser la totalité de la polarisation du faisceau incident. Les seuls éléments dynamiques sont les cellules à CL ferroélectriques (FLC) commandées en bistable de manière à faire tourner la polarisation incidente ou bien à la laisser inchangée en fonction du signal de commande. Les deux lames retard $\lambda/8$ ainsi que le polariseur linéaire de Glan sont fixes. Le fonctionnement général du polarimètre est donc similaire à celui proposé par Wolff. Avec ce montage, Gandorfer a atteint une cadence de 250Hz tout en mentionnant que des fréquences de modulation de l'ordre du kiloHertz sont "facilement atteignables" avec ces mêmes CL.

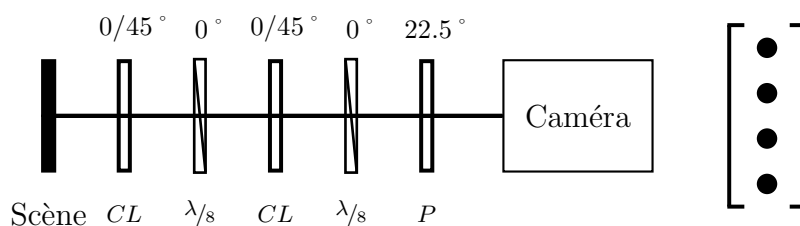


FIGURE 2.8 – Élément modulateur de polarisation à CL ferroélectriques utilisé par Gandorfer [4]

L'utilisation de deux cellules à CL est nécessaire tant que les cellules sont commandées de manière bistable. Dès lors que les cellules peuvent être commandées de manière accordable, une seule cellule peut suffire. Dans des travaux menés au MIPS, Jaulin *et al.* [44] ont utilisé une cellule à cristaux liquides ferroélectriques pour analyser la totalité de la polarisation linéaire, à une cadence de 234Hz. Blakeney *et al.* [45] quant à eux proposent un montage permettant d'analyser à la fois la polarisation linéaire et circulaire, en utilisant une cellule à CL nématiques en hélice, à une cadence de 50Hz.

On notera pour terminer qu'il est possible de combiner différents principes de polarimètres, à l'image des travaux de Gu *et al.* [46] par exemple dans lesquels la division temporelle est combinée à la division d'amplitude. Seuls deux bras de mesures sont utilisés. Ils sont précédés d'un modulateur à CL ferroélectriques commandé de manière bistable, et agissant donc comme un rotateur de polarisation. Pour chaque position du modulateur, on acquiert deux intensités simultanément. En utilisant ce matériel pour acquérir successivement les deux couples d'intensités (I_0, I_{90}) et (I_{45}, I_{135}) , les trois premières composantes du vecteur de Stokes peuvent être estimées.

2.1.4 Tableau récapitulatif

Le tableau Tab. 2.1 est inspiré de celui synthétisé par Tyo [1] et rassemble les caractéristiques des polarimètres que nous venons d'exposer. Nous avons également ajouté les capacités en termes de détermination du vecteur de Stokes. La division d'amplitude reste très lourde à mettre en œuvre et nécessite des éléments optiques de très haute qualité, difficilement disponibles. La division de front d'onde repose sur un élément-clé, la matrice de micro-éléments polarisants, difficile à fabriquer. La solution des éléments tournants est à écarter pour des applications dynamiques.

Nous dressons séparément un tableau (Tab. 2.2) synthétisant les capacités des montages à cristaux liquides que nous venons de mentionner.

- Les cellules nématiques alignées parallèlement ont fait l'objet de nombreux montages. Elle connaîtront peut-être un regain d'intérêt avec l'apparition des cellules *dual-frequency nematic*, capables d'atteindre les 500 Hz.
- Les cellules nématiques en hélice sont répandues, mais réputées difficiles à maîtriser.
- Les cellules ferroélectriques sont principalement utilisées pour leur comportement en rotateurs bistables à haute cadence.

2.2 Les différents types de modulateurs à cristaux liquides

A l'image de ce qui a été présenté à l'équation (1.13), l'analyse de la polarisation consiste à acquérir différentes intensités correspondant au passage du faisceau lumineux dans un polariseur orienté selon différents angles. L'acquisition des intensités I_0, I_{45}, I_{90} ,

technologie	caractéristiques	fabrication, inconvénients, coût	problèmes de recalage	nombre de composantes de Stokes
division d'amplitude	<ul style="list-style-type: none"> - acquisitions simultanées - système encombrant 	<ul style="list-style-type: none"> - rigidité mécanique requise - coûteux - encombrant 	<ul style="list-style-type: none"> - recalage des images nécessaire - recalage pré-fixé - recalage peut-être non-linéaire 	4 avec les contraintes mentionnées
division de front d'onde	<ul style="list-style-type: none"> - acquisitions simultanées - système peu encombrant - perte de résolution spatiale 	<ul style="list-style-type: none"> - fabrication délicate - alignement délicat - coût très élevé 	<ul style="list-style-type: none"> - nécessite une interpolation - recalage fixe 	3 dans le visible et 4 dans l'infrarouge
élément tournant	<ul style="list-style-type: none"> - robuste - petites dimensions - pas adapté aux scènes dynamiques 	<ul style="list-style-type: none"> - facile à réaliser - coût réduit 	<ul style="list-style-type: none"> - facile à réaliser - déviation du faisceau négligeable ou compensable logiquement 	4 avec les contraintes mentionnées
polarimètres à cristaux liquides	<ul style="list-style-type: none"> - acquisitions successives 	<ul style="list-style-type: none"> - intégration facile - peu encombrant 	<ul style="list-style-type: none"> - recalage des scènes dynamiques délicat - sensibilité des cristaux liquides à la température 	2 assurément et jusqu'à 4 selon la technologie utilisée

TABLE 2.1 – Synthèse des avantages et inconvénients des différentes architectures de polarimètres (inspiré de [1]).

référence	technologie	Polarisation analysée	vitesse
Wolff (1997) [3]	2 cellules à CL nématiques en hélice	linéaire complet	50Hz
Gandorfer (1999) [4]	2 cellules à CL ferroélectriques + 2 lames retard fixes	linéaire et circulaire	250Hz
Blakeney (2002) [45]	1 cellule à CL nématiques en hélice	linéaire et circulaire	50Hz
Jaulin 2008 [44]	1 cellule à CL ferroélectriques	linéaire complet	234Hz

TABLE 2.2 – Comparaison des capacités de différentes architectures d’analyse de polarisation à cristaux liquides.

et I_{135} par exemple peut se faire à l’aide d’un seul et unique polariseur linéaire que l’on positionne mécaniquement aux angles 0° , 45° , 90° , puis 135° . Les technologies disponibles pour fabriquer les polariseurs linéaires et les lames quart d’onde de précision permettent de disposer d’éléments de haute qualité, bien que coûteux. Il en va de même pour les dispositifs mécaniques servant à positionner les lames. Cependant, cette action d’orientation mécanique prend du temps, ce qui peut être contraignant pour certaines applications. Si le phénomène observé est dynamique ou si le polarimètre est en mouvement, des artéfacts risquent d’apparaître lors de l’estimation de l’information de polarisation. On utilise alors des cellules à cristaux liquides qui permettent de moduler la polarisation à des fréquences que l’on ne peut atteindre avec des lames orientées mécaniquement. Nous détaillons dans cette section les trois principales technologies de cristaux liquides utilisées en polarimétrie : les CL nématiques alignés parallèlement, les CL nématiques en hélice, et les CL ferroélectriques. Nous évoquons leur comportement et leur influence sur la polarisation incidente ainsi que les vitesses maximales d’opération.

D’un point de vue physico-chimique, parler de cristaux liquides fait référence à une étape intermédiaire entre l’état liquide et l’état cristallin d’un corps [47]. On parle de phase cristalline, phase cristal liquide, et phase liquide. Ces phases s’arrangent comme présenté figure 2.9. Dans cette section nous allons parler de deux phases de cristal liquide principales : la phase nématique et la phase smectique. Dans chaque phase, les molécules peuvent s’organiser de différentes façons, comme on peut l’observer figure 2.9. Nous évoquerons quelques-uns de ces arrangements dans les paragraphes à venir. La phase et l’arrangement des molécules jouent un grand rôle dans les propriétés polarimétriques des cristaux liquides.

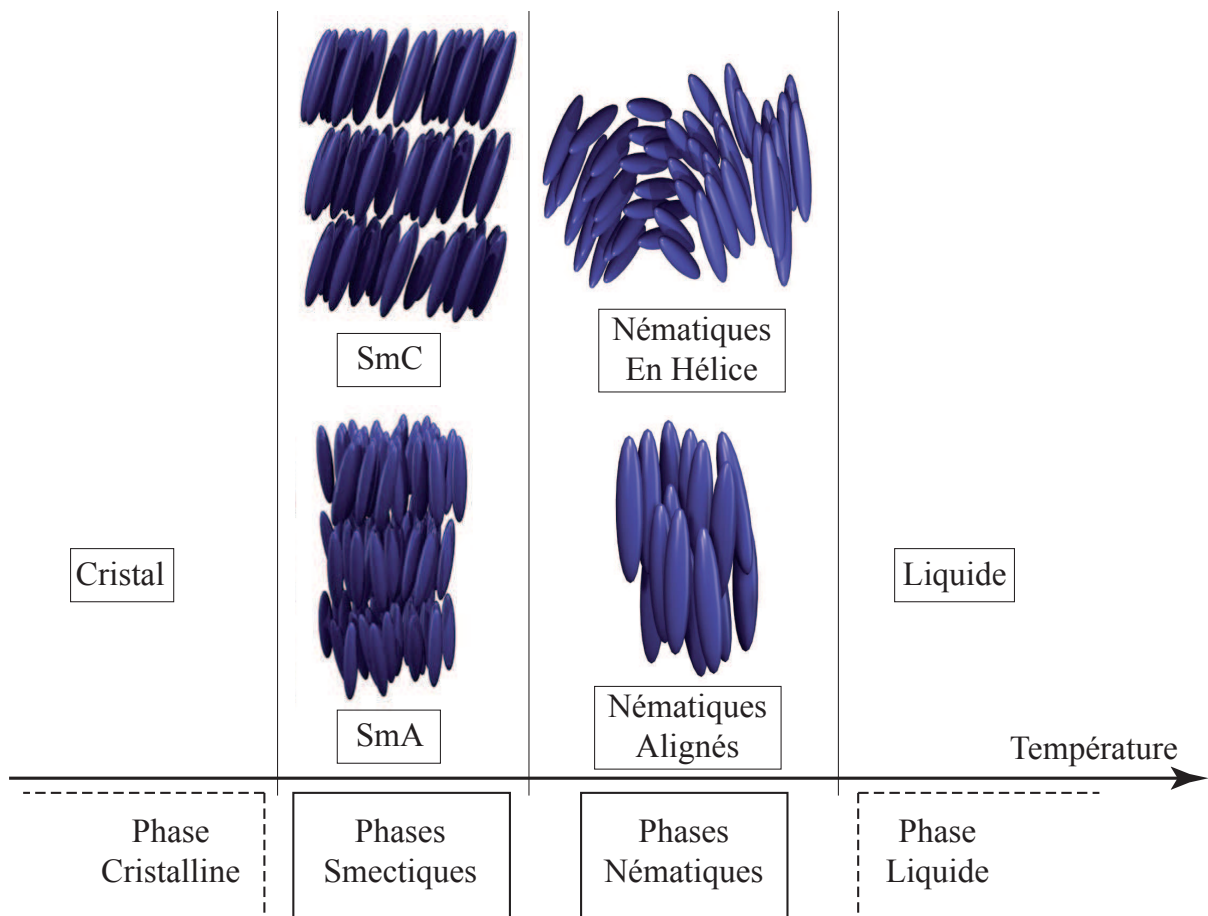


FIGURE 2.9 – Ordre des phases en fonction de la température, depuis la phase cristalline jusqu'à la phase liquide.

2.2.1 CL Nématiques alignés parallèlement

Dans cette phase, les molécules sont globalement orientées dans une direction commune mais ne sont pas alignées les unes par rapport aux autres, comme présenté Fig. 2.9. Le grand axe des molécules est également parallèle à la surface de la cellule, comme illustré figure 2.10. Cette figure présente également le principe de fonctionnement des CL nématiques du point de vue de la polarisation. Fig. 2.10(a) lorsqu'une tension de commande nulle est appliquée aux bornes de la cellule, la disposition des molécules est telle que la polarisation incidente est transmise sans modification. Fig. 2.10(b) lorsqu'une tension V non nulle est appliquée à la cellule, les molécules vont tourner pour s'orienter en fonction de la direction du champ électrique. Ceci provoque un changement de la biréfringence du milieu ayant pour conséquence de modifier la phase de l'onde lumineuse. La cellule à cristaux liquides se comporte alors comme une lame retard pure dont le retard est fonction de la tension de commande. La cadence de commutation d'un état à un autre est typiquement de l'ordre de 50 à 60 Hertz. De telles cellules sont notamment disponibles auprès de la

société Meadowlark pour une utilisation en polarimétrie [14, 25, 48].

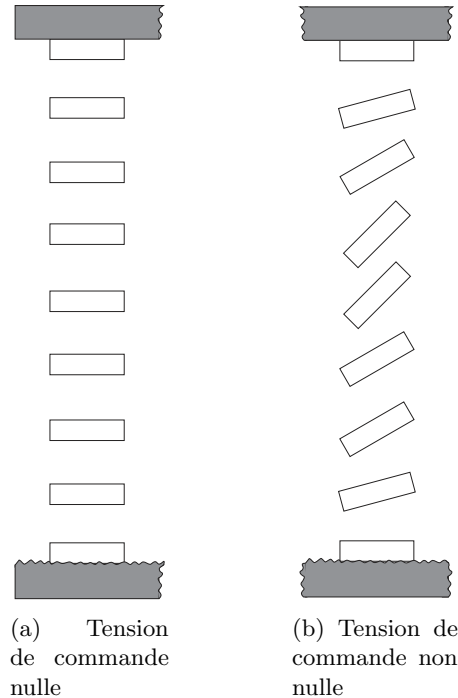


FIGURE 2.10 – Fonctionnement des CL nématiques alignés. Position des CL au repos(a). Position des CL sous tension(b).

2.2.2 CL Nématiques en hélice

Les molécules sont orientées parallèlement à la surface de la cellule et sont positionnées les unes par rapport aux autres de telle sorte que l'ensemble décrit une figure hélicoïdale dans le volume de la cellule, comme présenté Fig. 2.9. Du point de vue de la polarisation, on distingue deux états remarquables. Pour décrire de ces états, nous nous appuyerons sur la figure 2.11 qui présente le fonctionnement des CL nématiques en hélice. Le premier état remarquable, Fig. 2.11(a), est obtenu pour une tension de commande de 0 volt : la cellule est au repos et les molécules forment l'hélice que nous venons de décrire. Dans cet état la cellule à CL provoque une rotation de 90° de la polarisation incidente, sans modification de l'ellipticité. En fait, l'onde lumineuse tourne pour suivre l'orientation en hélice des molécules dans la cellule. Le second état remarquable, Fig. 2.11(c), ne modifie également pas l'ellipticité. Il est atteint pour une tension V_{max} permettant de briser complètement l'hélice. Dans cette configuration, la polarisation incidente est transmise sans aucune modification. Pour des tensions comprises entre 0 et V_{max} , Fig. 2.11(b), l'hélice est partiellement déroulée et l'on obtient une configuration permettant d'appliquer à la fois une rotation et un retard à la polarisation incidente. La cadence de commutation d'un état à un autre est

typiquement de l'ordre de 50 à 60 Hertz. Ces CL ont été utilisés en polarimétrie notamment par Blakeney [45]. Les vidéoprojecteurs sont un bon exemple d'application grand public pour des CL nématiques en hélice.

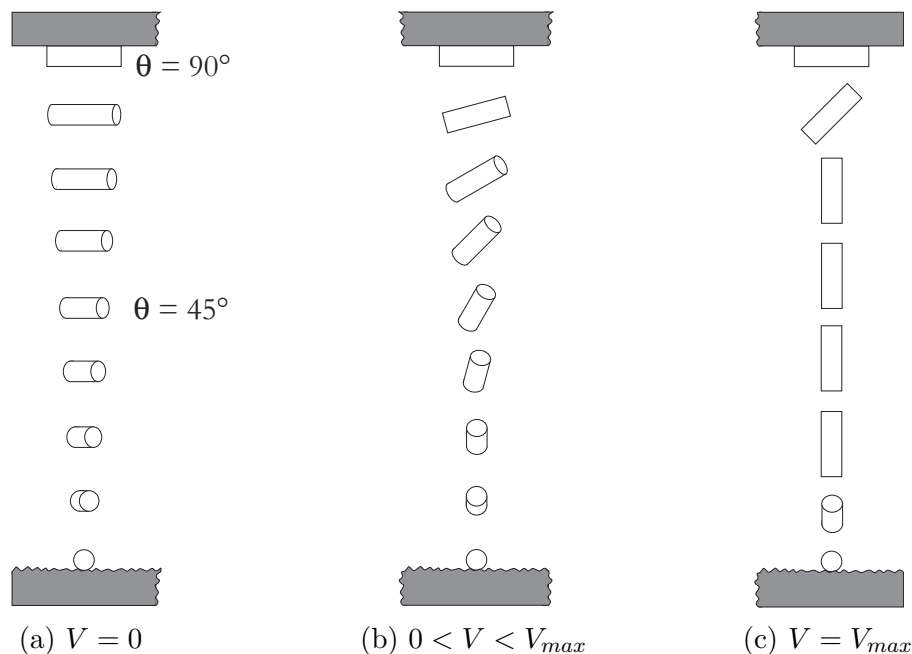


FIGURE 2.11 – Fonctionnement d'une cellule à cristaux liquides nématiques en hélice. Position des CL au repos(a). Position des CL sous tension intermédiaire(b). Position des CL sous tension max(c).

2.2.3 CL Ferroélectriques

Certains composés chimiques acceptent en plus de la phase nématique une phase smectique, intermédiaire entre la phase cristalline et la phase nématique, comme présenté Fig. 2.9. Ces CL smectiques sont communément appelés CL ferroélectriques car la phase smectique présente une propriété dite de ferroélectricité découverte il y a plus de 30 ans par Meyer *et al.* [49]. Dans la phase smectique, les molécules sont positionnées en couches en plus d'être alignées dans une direction commune. Il existe un grand nombre de phases smectiques notées de A à K, ainsi que les lettres O et Q avec des sous-catégories. Cependant, les phases A et C sont de loin les plus répandues en polarimétrie. La phase A est la plus similaire à la phase nématique en ceci que les molécules sont parallèles à la surface de la cellule. Dans la phase C, les molécules sont inclinées, comme illustré Fig. 2.9 [47].

Si les molécules ont une géométrie telle qu'elles ne sont pas superposables à leur image dans un miroir, on dit qu'elles sont chirales. La chiralité peut exister dans la phase A aussi bien que dans la phase C, mais seule cette dernière présente une différence de comportement entre la phase non chirale et la phase chirale. On note la phase smectique C chirale

de la manière suivante : SmC*. Il existe également plusieurs structures de SmC* que nous ne détaillerons pas ici. Le lecteur intéressé pourra se référer notamment à [47].

Dans la phase SmC*, les couches sont orientées parallèlement à la direction de propagation de la lumière, comme exposé Fig. 2.12. Sur chaque couche, le lieu des positions possibles pour chaque molécule décrit un cône, comme présenté Fig. 2.13. Chaque molécule possède une polarisation spontanée, représentée Fig. 2.13 par le vecteur \vec{P} . En fonction de la tension de commande appliquée, les molécules s'orientent sur le cône pour aligner le vecteur \vec{P} avec la direction du champ électrique.

Des modulateurs à CL ferroélectriques bistables sont disponibles commercialement, notamment auprès des sociétés Boulder Nonlinear System, Inc., et DisplayTech.

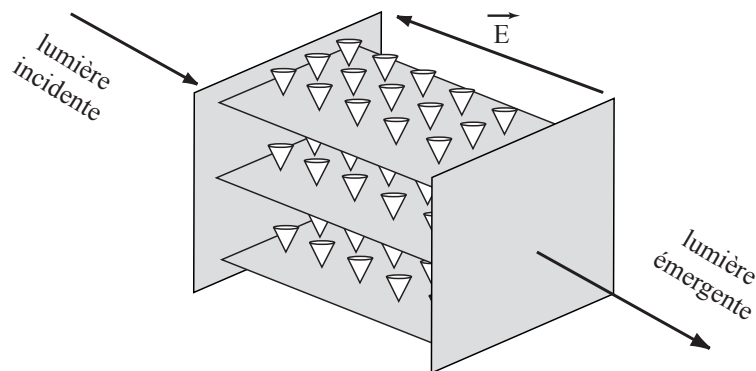


FIGURE 2.12 – Vue générale de la disposition des molécules sur les couches d'un SmC*

2.3 Dispositifs commerciaux

Une des originalités du polarimètre développé au laboratoire MIPS est son caractère compact qui le rend portable et facilement embarquable pour des applications à l'extérieur du laboratoire. Dès lors, il peut être utile de se comparer à des dispositifs commerciaux disponibles sur le marché. En voici un aperçu non exhaustif. Il est à noter que certaines informations sont parfois difficiles à trouver étant donné que les applications embarquées intéressent aujourd'hui principalement les agences militaires, peu connues pour leur transparence en matière de recherche scientifique.

- Bossa Nova Technologies

L'entreprise Bossa Nova propose un polarimètre dénommé SALSA permettant d'afficher l'information de polarisation linéaire à une cadence de 8.75 im/s pour des images de taille 782×582 [50]. En réduisant la résolution à 320×240 , une cadence de 28 im/s est atteinte. Le polarimètre fonctionne sur le principe de la division temporelle et est composé de quatre lames au total, comme présenté Fig. 2.14. En commandant électriquement l'orientation des axes des lames quart-d'onde et demi-onde programmables, un total de

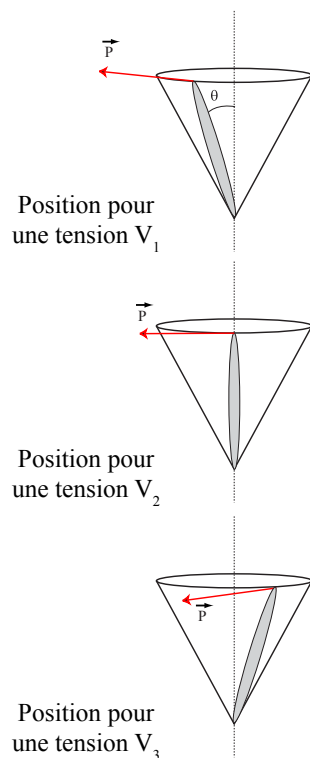


FIGURE 2.13 – Position des molécules en fonction de la tension de commande. P représente le vecteur de polarisation spontanée.

quatre images d'intensité est acquis afin d'estimer l'information de polarisation linéaire. Plus d'informations sur le fonctionnement du polarimètre peuvent être trouvées dans [5]. Avec ce polarimètre, Vedel *et al.* [51] et Lefaudeux *et al.* [5, 52] présentent des résultats pour une bande spectrale de 520 à 550nm. Cependant, il semble que le polarimètre puisse fonctionner en large bande [50], de 400 à 700nm. Cette information reste à confirmer, notamment compte tenu du fait que développer un polarimètre large bande performant est une tâche compliquée. Sur la plage 520-550nm, les performances annoncées du polarimètre sont bonnes. L'écart-type sur l'estimation du degré de polarisation linéaire est de 0,35%. Pour l'angle azimutal, l'écart-type vaut $0,15^\circ$ [5].

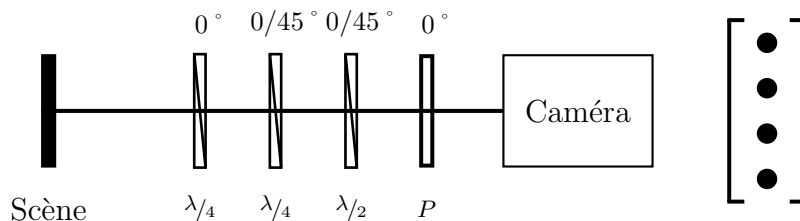


FIGURE 2.14 – Schéma de principe du polarimètre SALSA développé par Bossa Nova Technologies. Figure extraite de [5].

- Equinox Corporation

La société Equinox Corporation propose un polarimètre dans l'infrarouge ($3\text{-}5\mu\text{m}$) qui mesure deux des quatre composantes du vecteur de Stokes. Les images d'intensités devant servir à estimer l'information de polarisation sont acquises à une cadence de 60im/s . Peu d'information est disponible sur ce système pour cause de confidentialité. Un deuxième polarimètre fonctionnant dans le visible est également disponible. Trois des quatre paramètres de Stokes sont estimés. La résolution est de 512×512 avec une cadence de 15im/s .

- Polaris Sensor Technologies, Inc.

Cette société propose des polarimètres aussi bien dans le visible que dans l'infrarouge moyen et l'infrarouge lointain. Pour la bande visible ($430\text{-}630\text{nm}$), qui est la bande dans laquelle nous allons travailler, le polarimètre le plus rapide atteint 60 images par seconde. Il s'agit du modèle Ursa High Speed Visible. Ce polarimètre est basé sur le principe d'un polarimètre à division d'amplitude, ce qui le rend relativement volumineux : les dimensions sont $254 \times 203.2 \times 304.8\text{mm}$. Des polarimètres plus petits sont également disponibles mais les performances sont réduites : analyse de la polarisation linéaire seulement, fréquence d'acquisition de 15 images par seconde au mieux. Le poids de $6,8\text{kg}$ est aussi relativement important. Le modèle Ursa High Speed Visible permet d'analyser la totalité de la polarisation avec une précision annoncée de 0.25% sur le vecteur de Stokes [53].

En ce qui concerne les polarimètres dans l'infrarouge, les longueurs d'onde vont de $3\mu\text{m}$ à $5\mu\text{m}$ ou de $7\mu\text{m}$ à $13,5\mu\text{m}$. Retenons que la vitesse maximale disponible est de 120 images par seconde pour des polarimètres n'analysant que la polarisation linéaire, avec une précision annoncée de $0,1$ à $0,25\%$ selon la bande spectrale considérée [54, 55]. Les polarimètres dans l'infrarouge sont basés sur le principe de lame tournante ou de division d'amplitude. Notons surtout le poids conséquent de ces dispositifs qui peut atteindre près de 16kg .

- Autres entreprises

D'autres entreprises existent et fournissent des produits sur lesquels il est difficile de recueillir des informations, comme par exemple Photonic Lattice, ou encore Teledyne Corporation. Cette dernière entreprise est présente lors de manifestations où les polarimètres sont présentés, mais ne diffuse pas pour autant des renseignements sur des médias plus universels tels qu'internet par exemple.

Chapitre 3

Principe de fonctionnement et essais préliminaires du polarimètre

Le polarimètre de Stokes sur lequel nous allons travailler est un système à division temporelle. Il a été mis en place avant le début de cette thèse et une première étude de son comportement a été rapportée par Bigué *et al.* [30]. Le système se compose d'un modulateur à cristaux liquides ferroélectriques fabriqué par Boulder Nonlinear Systems, Inc. (BNS) [56], et d'une caméra CCD numérique. L'ensemble est de taille réduite, comme on peut l'observer Fig. 3.1, ce qui en fait un système portable. De plus, grâce à la technologie de cristaux liquides ferroélectriques utilisée, le polarimètre peut analyser la polarisation à une fréquence élevée. Une cadence de 572 images par secondes a été atteinte pour des images de taille 160×120 . Comme présenté sur le schéma de principe Fig. 3.1, l'électronique de commande du modulateur assure également la synchronisation entre le modulateur et la caméra. Cette dernière est reliée à un ordinateur par une liaison IEEE1394 permettant la configuration de l'appareil et l'acquisition des images pour le post-traitement. Le comportement du modulateur étant lié à la longueur d'onde, un filtre interférentiel est présent en sortie du modulateur. Ce filtre de largeur 10nm est centré autour de 632,8nm, longueur d'onde nominale du modulateur et permet une utilisation en environnement extérieur où l'éclairage n'est pas contrôlé.

3.1 Le polarimètre dans son fonctionnement nominal

L'électronique de commande fournit le signal présenté Fig. 3.2. Ce signal doit être de moyenne nulle pour ne pas endommager le matériel. Il est composé d'un signal carré symétrique auquel vient s'ajouter une impulsion sur chaque front. Le signal carré détermine l'état dans lequel se trouve la cellule à cristaux liquides. Les FLCs étant sensibles à la polarité de la tension de commande, deux états différents sont atteints pour les deux niveaux $+5V$ et $-5V$ du signal carré. L'impulsion sert à réduire la durée du régime transitoire

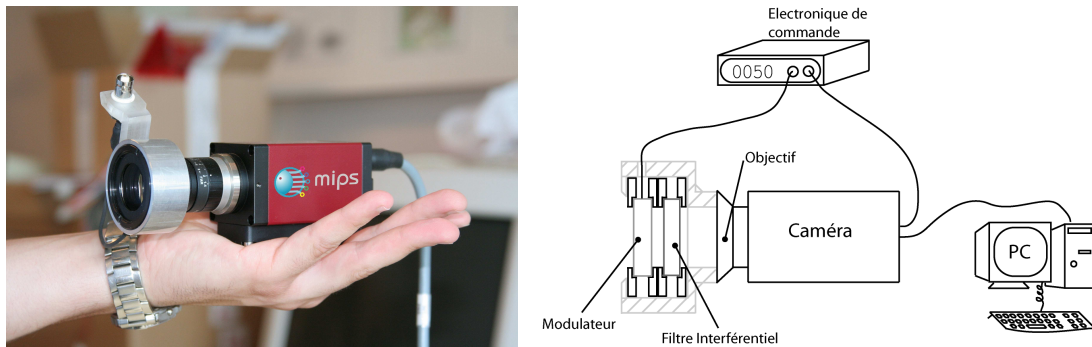


FIGURE 3.1 – Photo et schéma de fonctionnement du polarimètre

entre ces deux états. Elle porte la tension de commande à $\pm 15V$ et décroît exponentiellement sur $340\mu s$ (temps de réponse à 5%). Seule la fréquence du signal de commande du modulateur est réglable. Les niveaux du signal carré restent inchangés quel que soit le paramétrage fréquentiel, de même que l'amplitude et le temps de réponse de l'impulsion.

A titre de comparaison, on peut mentionner que les cristaux liquides nématiques, eux, ne sont pas sensibles à la polarité de la tension de commande et n'atteignent qu'un seul état avec un signal de commande carré à moyenne nulle. La Fig. 3.3 présente la réponse temporelle du modulateur en fonction de la fréquence de commande. Cette figure, issue des travaux de Bigué *et al.* [30], montre que le modulateur peut a priori être utilisé jusqu'à une fréquence de commande de 1kHz, ce qui est particulièrement élevé. Dans la présente étude, nous fixons la fréquence de commande à 100Hz. Comme deux états distincts sont atteints par le modulateur pour cette fréquence (un état pour $+5V$ et un état pour $-5V$), cela signifie que la cadence d'acquisition de la caméra est de 200 images par seconde.

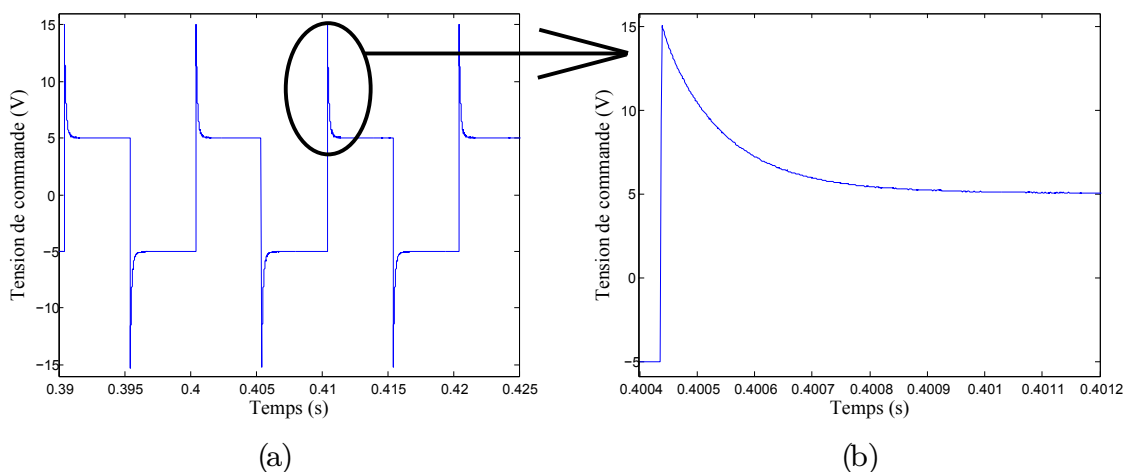


FIGURE 3.2 – Signal en sortie de l'électronique de commande BNS (a), zoom sur la décroissance d'une impulsion (b)

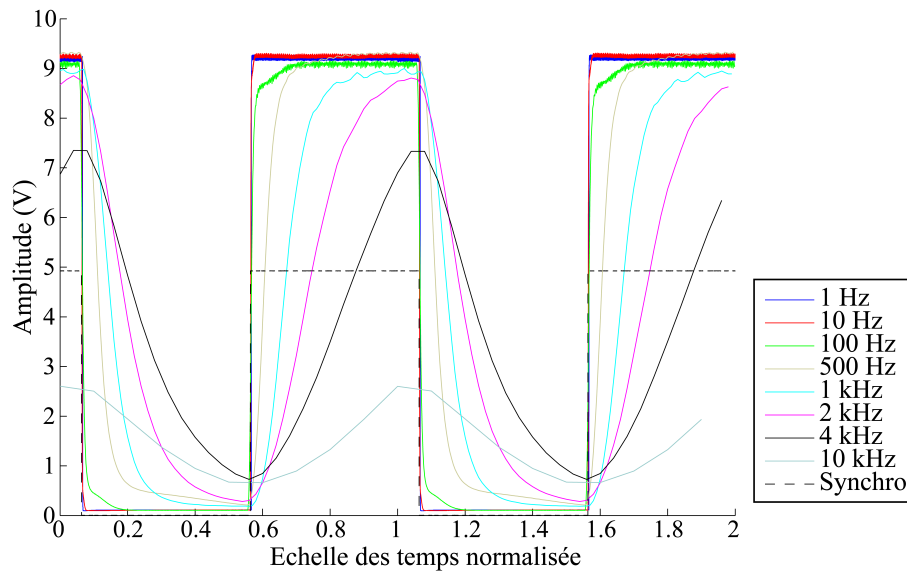


FIGURE 3.3 – Signal de réponse du modulateur pour différentes fréquences du signal de commande

En termes de polarisation, à 632,8nm et avec l'électronique fournie par le constructeur, le modulateur est censé se comporter en rotateur de polarisation bistable permettant de mesurer deux états de polarisation linéaires croisés. Commandé avec une tension de $+5V$, il permet d'obtenir I_0 , et avec une tension de $-5V$, I_{90} . Ces deux états correspondent aux intensités qui seraient mesurées en sortie d'un polariseur linéaire orienté respectivement à 0° et 90° .

On peut dès lors déterminer les deux premières composantes s_0 et s_1 du vecteur de Stokes incident de la manière suivante :

$$\mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ - \\ - \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ - \\ - \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Les composantes s_2 et s_3 restent indéterminées et ne peuvent être évaluées avec ce schéma de fonctionnement.

A partir de ce vecteur de Stokes, on peut calculer un degré de polarisation linéaire partiel comme suit :

$$DOLP_P = \frac{|s_1|}{s_0} = \frac{|I_0 - I_{90}|}{I_0 + I_{90}} \quad (3.2)$$

Il a été montré que cette information de polarisation, bien que très parcellaire, est particulièrement adaptée à la détection de petites cibles [57, 58] car elle permet de s'affranchir des non-uniformités de l'éclairage. Cette information peut également servir à d'autres ap-

plications, comme par exemple différencier des surfaces diélectriques et métalliques les unes des autres.

Un exemple d'utilisation du polarimètre en laboratoire à 360 images par secondes est présenté Fig. 3.4 et Fig. 3.5. Différents objets tels qu'une pièce de monnaie, de l'adhésif, et du polystyrène, fixés sur une roue en aluminium sont observés sous un éclairage polarisé linéairement à 0° . A partir des modes de polarisation I_0 et I_{90} , on peut déterminer l'image de luminance de la scène et le $DOLP_P$, comme présenté Fig. 3.4. Ces deux dernières informations peuvent être représentées conjointement, comme présenté Fig. 3.5. Etant donné que l'éclairage est polarisé, l'étude de la scène montre la caractéristique de dépolarisation ou de modification de la polarisation, mais pas une propriété de polarisation d'une lumière non polarisée. Sur cette scène, on observe que les surfaces métalliques (la pièce de monnaie et la roue) ont une composante I_0 plus élevée que la composante I_{90} . Cela signifie que ces surfaces reflètent la polarisation incidente sans la modifier. Le $DOLP_P$ est par conséquent relativement élevé. Par contre, les surfaces diélectriques comme l'adhésif double-face sous la pièce de monnaie dépolarise la lumière : l'intensité de la lumière réfléchie sur la composante I_0 est identique à celle pour la composante I_{90} . Le $DOLP_P$ est par conséquent faible. On peut ainsi facilement différencier l'adhésif double face de la pièce de monnaie et de la roue métallique sur l'image de $DOLP_P$, alors que sur l'image de luminance, les intensités relatives à chaque élément sont bien plus proches les unes des autres. On notera enfin que le bruit observable en périphérie de l'image de $DOLP_P$ est dû au fait que les deux modes de polarisation ont une luminance très faible sur la région correspondante.

L'intégration d'un filtre interférentiel dans le système permet d'utiliser le polarimètre à l'extérieur du laboratoire, en conditions d'éclairage non contrôlé. Un exemple est exposé Fig. 3.6. Cette scène est une zone résidentielle avec des voitures stationnées, des bâtiments, et des arbres. L'ensemble des éléments dans la scène dépolarise, à l'exception des pare-brises des voitures, et de certaines portions des carrosseries, orientées de manière adéquate pour polariser la lumière incidente.

3.2 Artéfacts sur les contours des objets en mouvement

L'utilisation de notre polarimètre en conditions d'éclairage non contrôlées, à l'extérieur du laboratoire, a mis en évidence l'apparition de défauts sur le contour de certains objets lorsque la scène est dynamique, c'est-à-dire contenant des éléments en mouvement dans la scène, comme présenté Fig. 3.7. Lors de l'acquisition des images, le polarimètre est fixé sur un pied et peut tourner autour de l'axe de fixation. En laissant le polarimètre statique, on détermine le $DOLP_P$ correct des objets dans la scène, comme présenté Fig. 3.7(b), et en faisant tourner le polarimètre autour de l'axe de fixation pendant l'acquisition des images, on détermine un $DOLP_P$ présentant des artéfacts, comme on peut l'observer Fig. 3.7(c). Le polarimètre est suffisamment loin de la scène pour que l'on considère le mouvement

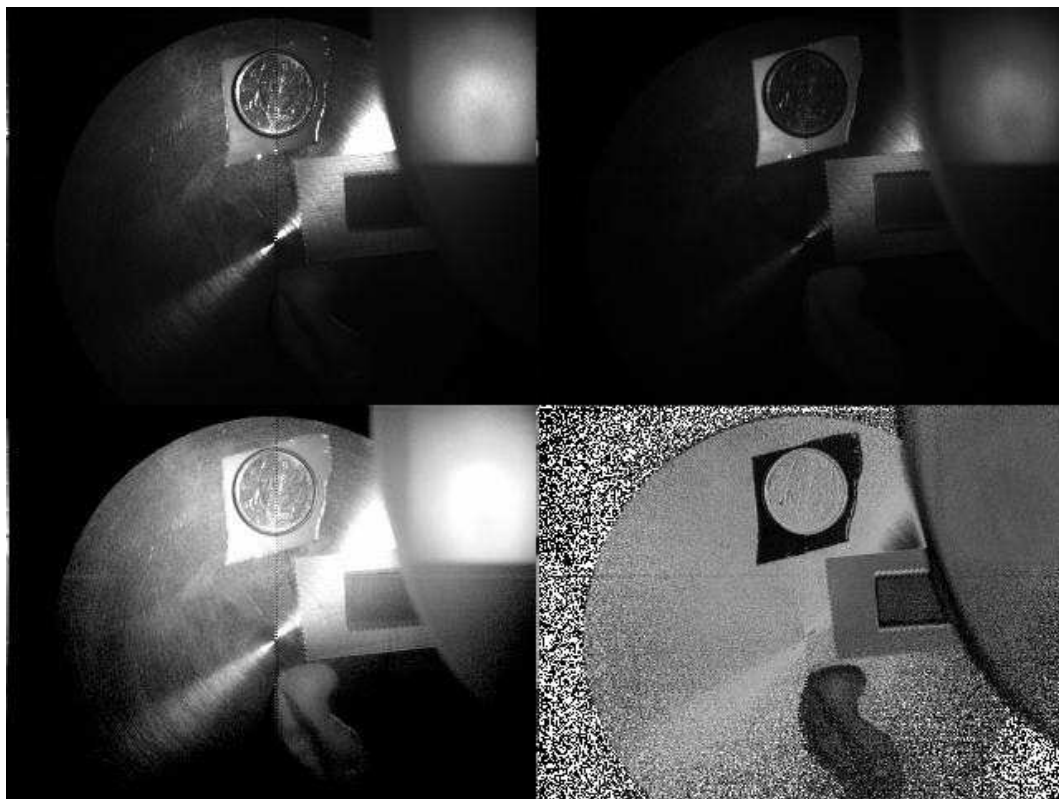


FIGURE 3.4 – Objets manufacturés observés en laboratoire à une cadence d’acquisition de 360 images par seconde pour des images de taille 320×240 sur 8 bits. De gauche à droite et de haut en bas : I_0 , I_{90} , image de luminance, $DOLP_P$.

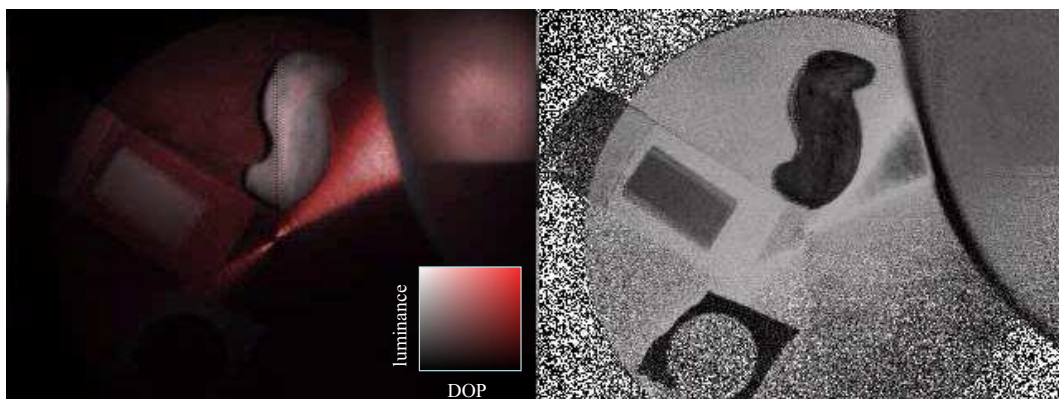


FIGURE 3.5 – Objets manufacturés observés en laboratoire à une cadence d’acquisition de 360 images par seconde pour des images de taille 320×240 sur 8 bits. A gauche : $DOLP_P$ et luminance présentés conjointement. Représentation HSV avec une teinte rouge, le $DOLP_P$ en saturation et la luminance de la scène en dernière composante. A droite : $DOLP_P$ seul.

général comme étant une translation, même si rigoureusement ce n’est pas le cas.

Pour comprendre l’origine du problème, considérons la scène de synthèse présentée Fig. 3.8. L’objet est un rectangle partiellement polarisant se déplaçant sur un fond statique



(a)



(b)

FIGURE 3.6 – Exemple d’utilisation du polarimètre à l’extérieur du laboratoire, en condition d’éclairage non contrôlé. (a) : image de luminance de la scène, (b) : $DOLP_P$ obtenu avec un scène statique.

totale­ment dépolari­san­te. Les intensités des différents modes de polarisation, normalisées entre 0 et 1, sont pour l’objet $I_{90} = 0,2$ et $I_0 = 0,1$, et pour le fond $I_{90} = 0,5$ et $I_0 = 0,5$. Lorsque l’objet est parfaite­ment statique pendant le temps nécessaire à l’acquisition des deux modes de polarisation, le calcul du $DOLP_P$ peut se faire simple­ment en appli­quant l’équation (3.2) à chaque pixel des images I_0 et I_{90} . On obtient alors un $DOLP_P$ de 0,33 pour l’objet et un $DOLP_P$ de 0 pour le fond, comme pré­senté sur la première ligne de la figure 3.8.

Examinons maintenant le cas où l’objet est en mouvement, présenté sur la deuxième ligne de la figure 3.8. En raison de la structure même du polarimètre, analysant la polarisation par division temporelle, les différents modes de polarisation sont acquis successivement les uns après les autres à une cadence dont la période d’échantillonnage vaut T . Pendant cette période T , l’objet se déplace dans la scène, et par conséquent celui-ci ne se trouve pas exactement à la même position sur les deux images des modes de polarisation. Dès lors, appliquer simple­ment l’équation 3.2 sans tenir compte du mouvement revient à mélanger l’information du fond et l’information de l’objet sur certaines portions de l’image. Ainsi, l’information au point de coordonnées (x_1, y_1) sur l’image de $DOLP_P$ sur la deuxième

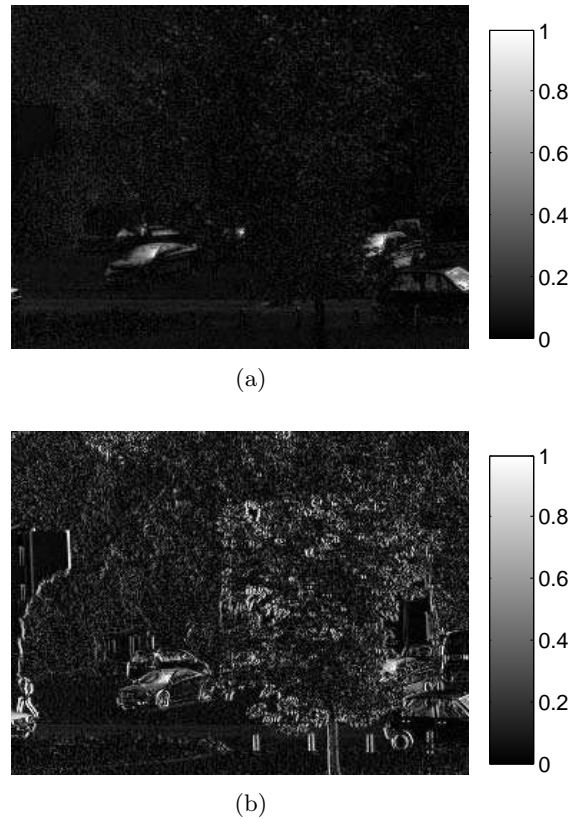


FIGURE 3.7 – Mise en évidence d’artéfacts sur l’image de $DOLP_P$ lors de l’observation d’une scène contenant des objets en mouvement (scène présentée Fig. 3.6(a)). (a) : $DOLP_P$ obtenu avec une scène statique, (b) : $DOLP_P$ obtenu avec une scène dynamique. Des artéfacts apparaissent.

ligne de la figure 3.8 est obtenue de la manière suivante :

$$DOLP_P(x_1, y_1, t + T) = \frac{|I_0(\text{objet}, t + T) - I_{90}(\text{fond}, t)|}{I_0(\text{objet}, t + T) + I_{90}(\text{fond}, t)} \quad (3.3)$$

On observe alors un $DOLP_P$ erroné de $|0,2 - 0,5|/(0,2 + 0,5) = 0,67$ qui n’est représentatif ni du fond ($DOLP_P = 0$) ni de l’objet ($DOLP_P = 0,33$). De plus, si l’objet en mouvement ne polarise pas uniformément, le $DOLP_P$ est fondamentalement faux sur l’ensemble de l’objet. Il apparaît donc important de tenir compte du mouvement dans l’évaluation des caractéristiques polarimétriques de la scène. Par ailleurs, la taille du défaut dépend du rapport entre la vitesse apparente de déplacement de l’objet et la vitesse d’acquisition. Plus la vitesse de l’objet est importante par rapport à la vitesse d’acquisition des modes de polarisation, plus le défaut est important.

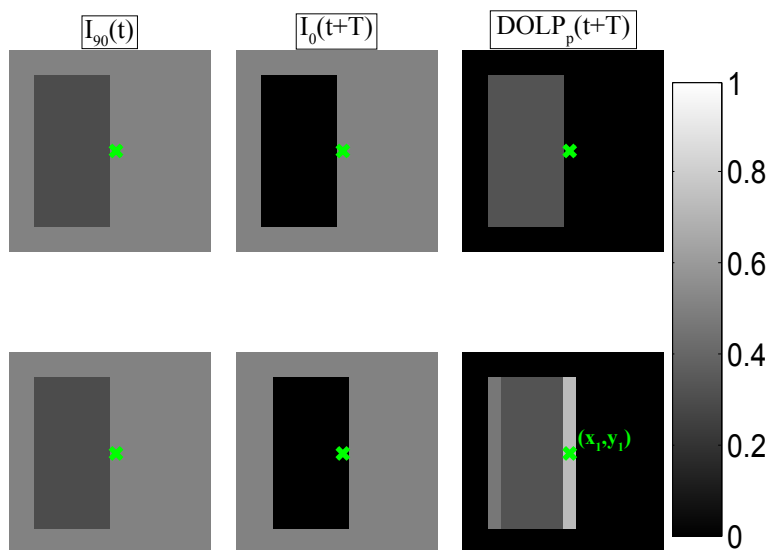


FIGURE 3.8 – Simulation exposant la différence entre un $DOLP_P$ calculé lorsque l’objet reste statique pendant les acquisitions des modes de polarisation (première ligne), et un $DOLP_P$ calculé lorsque l’objet a un mouvement de translation de gauche à droite (deuxième ligne). Les contrastes ont été légèrement accentués de manière à mettre en évidence le phénomène à observer.

3.3 Solutions apportées

Afin d’étudier des algorithmes permettant de corriger le problème exposé précédemment, une scène de test est constituée en laboratoire. Elle va permettre de synthétiser des séquences de test et des séquences de référence.

3.3.1 Constitution d’une scène de test

La figure 3.9 présente une photo de la scène. Celle-ci se compose d’une plaque en aluminium verticale sur laquelle sont fixés des bandes d’adhésif vert type ”chatterton”, de l’adhésif double-face, un morceau de polystyrène blanc dont la surface de la moitié droite a été coloriée en noir à l’aide d’un feutre. L’objet est fixé sur une platine de translation produisant un mouvement contrôlé pas à pas de la gauche vers la droite. Seul un mouvement de translation uniforme est étudié. Le fond de la scène, statique, est une plaque métallique noire sur laquelle se trouvent quelques morceaux d’adhésif blanc.

A partir de cette scène, deux $DOLP_P$ différents sont produits selon le schéma présenté Fig. 3.10. Etant donné que le mouvement de l’objet peut être contrôlé, un $DOLP_P$ de référence est estimé à partir de modes de polarisation acquis sans déplacement de l’objet entre les acquisitions des deux modes, comme si en pratique l’acquisition pouvait se faire à un seul et même instant t pour les deux modes de polarisation. Ce $DOLP_P$ permet d’estimer au mieux les véritables caractéristiques polarimétriques des différents éléments.

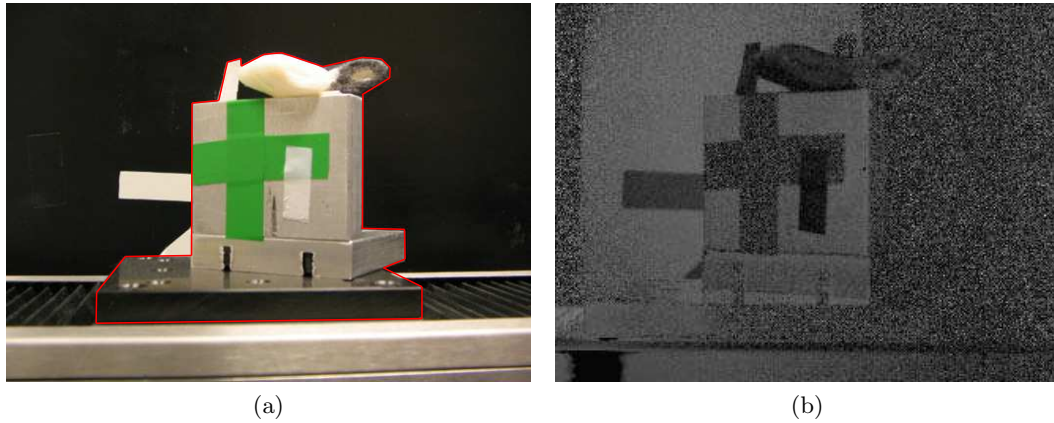


FIGURE 3.9 – (a) : Scène mise en place pour l'étude de l'influence du mouvement sur le $DOLP_P$. La portion en mouvement dans la scène est délimitée par le trait rouge. (b) : $DOLP_P$ obtenu en l'absence de mouvement.

La notation $DOLP_P^{ref}$ renvoie désormais à cette grandeur. En parallèle, un deuxième $DOLP_P$ est produit à partir de modes de polarisation acquis de manière à reproduire le comportement réel du polarimètre : un premier mode de polarisation est acquis à l'instant t et le mode suivant à l'instant $t + T$. Entre deux acquisitions, on déplace l'objet à l'aide de la platine motorisée afin de simuler le mouvement de l'objet qu'on pourrait avoir dans une scène non contrôlée. On obtient ainsi un $DOLP_P$ affecté par le défaut présenté dans la section précédente. La notation $DOLP_P^{err}$ renvoie désormais à cette grandeur. Pour chacun de ces $DOLP_P$, on produit une séquence vidéo d'une quarantaine d'images. Dans les sections suivantes sont exposés deux procédés développés pour corriger le $DOLP_P^{err}$ de manière à se rapprocher le plus possible du $DOLP_P^{ref}$.

D'après l'équation (3.2) le $DOLP_P$ est proportionnel à la valeur absolue de la différence arithmétique entre les modes I_0 et I_{90} . On peut donc calculer un nouveau $DOLP_P$ dès qu'un mode est acquis, sans se soucier du fait qu'il s'agisse de I_0 ou de I_{90} .

3.3.2 Filtrage médian temporel

Dans un premier temps, il est intuitif de vouloir compenser le mouvement de l'objet entre les deux modes de polarisation par un algorithme d'estimation de mouvement et de recalage. Ces algorithmes sont complexes et coûteux en calculs. Afin de pouvoir les utiliser pour des applications "temps réel", une implantation sur des structures spécifiques, à base de FPGA ou GPU par exemple, est nécessaire. Dans la présente section, nous allons explorer une voie qui vise à déterminer dans quelle mesure une approche plus simple pourrait permettre de corriger les artéfacts en temps réel, tout en restant sur une plateforme de type PC.

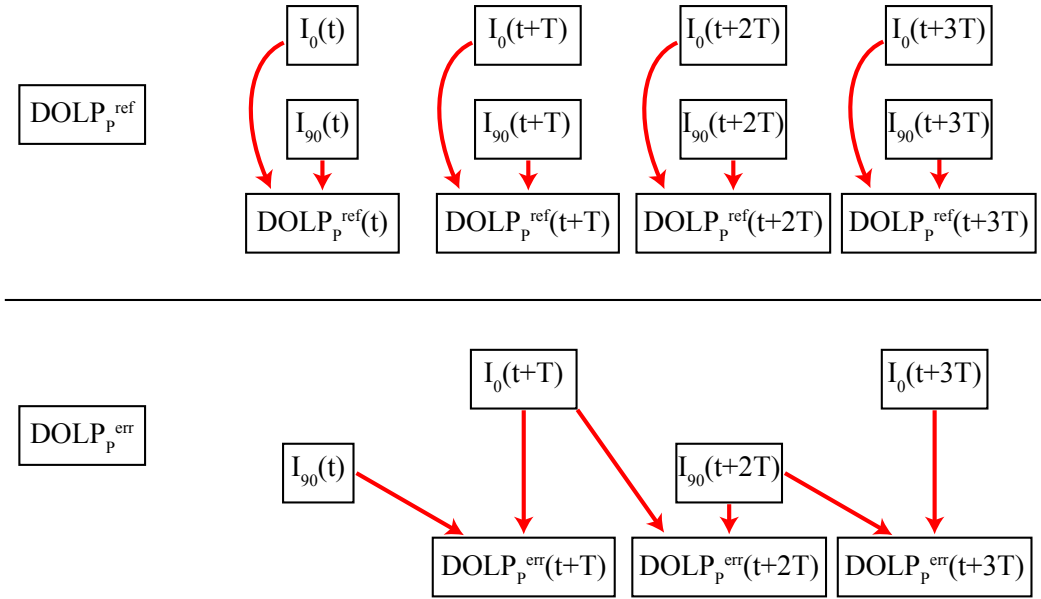


FIGURE 3.10 – Schéma représentant la méthode de calcul du $DOLP_p^{ref}$ et $DOLP_p^{err}$ à partir des modes de polarisation.

Principe

La correction est effectuée directement sur l'image de $DOLP_P$ et non sur les modes de polarisation. Le filtrage est basé sur un mode d'observation temporel du $DOLP_P$ exposé figure 3.11. L'objet est un rectangle se déplaçant de la gauche vers la droite dans un mouvement de translation. Sur cette scène, les $DOLP_P$ de l'objet et du fond sont constants. Dans le cas idéal, lorsque les modes de polarisation nécessaires au calcul du $DOLP_P$ peuvent être acquis simultanément, l'image finale de $DOLP_P$ n'est pas influencée par le mouvement de l'objet et seules deux valeurs de $DOLP_P$ apparaissent : celle du fond et celle de l'objet. On obtient alors la situation présentée sur la première ligne de la figure 3.11. Si l'on observe l'évolution du $DOLP_P$ en fonction du temps, en un pixel donné (repéré en rouge sur la figure), un profil temporel peut être tracé. Dans le cas idéal, on obtient le profil présenté en figure 3.11(d). Seulement, en pratique, les modes de polarisation ne peuvent pas être acquis simultanément, donc le mouvement de l'objet vient fausser le $DOLP_P$ et l'on se trouve dans la situation présentée sur la deuxième ligne de la figure 3.11. Le $DOLP_P$ des contours de l'objet est erroné. Ce problème est visible sur le profil temporel : la transition entre le $DOLP_P$ de l'objet et du fond n'est plus directe mais passe par une valeur singulière caractéristique du défaut dû au mouvement dans la scène.

Dans une scène idéale comme cette scène de synthèse, le filtrage médian temporel est bien adapté au problème. Comme son nom l'indique, le filtre médian sélectionne l'échantillon de la fenêtre d'analyse ayant la valeur médiane. Ce filtre est insensible à la présence de valeurs aberrantes si leur nombre est inférieur à $L/2$, L étant le nombre

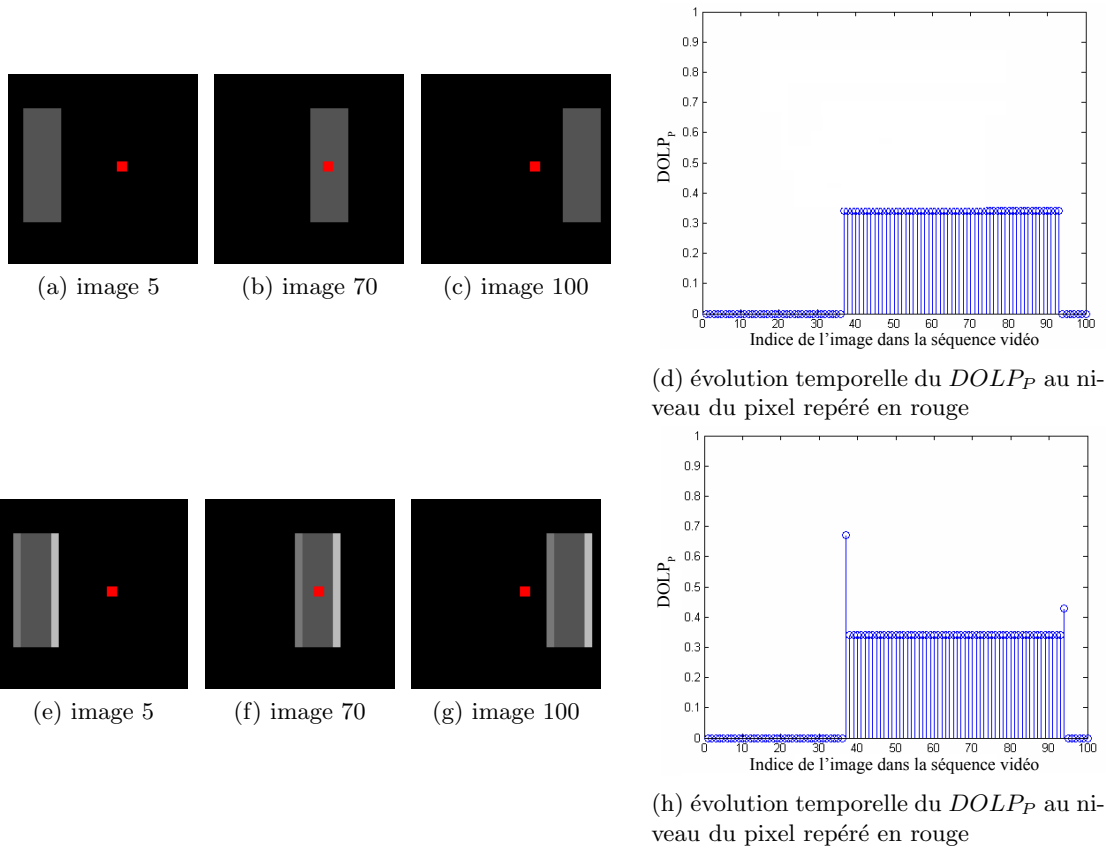


FIGURE 3.11 – Mode d’observation du $DOLP_P$ justifiant l’utilisation d’un filtrage médian. Sur la première ligne : $DOLP_P$ exact de la scène. Sur la deuxième ligne : $DOLP_P$ faussé par le mouvement de l’objet.

d’échantillons dans la fenêtre de filtrage. Il est donc très utile dans le cas de perturbations à caractère impulsionnel [59]. Or il se trouve que notre perturbation est précisément à caractère impulsionnel.

Par ailleurs, le filtrage médian temporel reste adapté quelle que soit l’ampleur du mouvement de l’objet. En fait, plus le déplacement de l’objet est important entre les deux modes de polarisation, plus le défaut est important sur l’image de $DOLP_P$. Cependant, sur le profil temporel issu de l’observation du $DOLP_P$ en fonction du temps, le défaut n’apparaît qu’une seule fois, et ceci, quelle que soit la vitesse du déplacement de l’objet. La figure 3.12 explique pourquoi. Sur cette figure sont présentés les modes de polarisation tels qu’ils sont acquis par le polarimètre : $I_{90}(t), I_0(t+T), I_{90}(t+2T), I_0(t+3T)...$ avec T la période d’acquisition des images. Trois vitesses de déplacement différentes de l’objet sont étudiées. Pour chaque couple (I_{90}, I_0) , un $DOLP_P$ est calculé. Un pixel repéré en vert représente le pixel en lequel est étudiée l’évolution temporelle du $DOLP_P$. Pour qu’un artefact soit observé au niveau du pixel vert sur l’image de $DOLP_P$, le pixel doit se trouver sur le fond dans l’un des modes de polarisation et sur l’objet dans l’autre mode.

Or ce cas-là ne se produit que pour le couple $(I_{90}(t + 2T), I_0(t + 3T))$. Pour les autres couples de modes de polarisation, soit le pixel appartient au fond dans les deux modes, soit il appartient à l'objet dans les deux modes, ne produisant alors aucun artefact au niveau du pixel vert sur l'image de $DOLP_p$. Cette configuration se produit quelle que soit l'amplitude du déplacement de l'objet. Le défaut caractéristique du mouvement n'est donc observable que sur le $DOLP_p$ à $t + 3T$. Aux autres instants, soit le fond, soit l'objet sont observés. Donc sur le profil temporel, le défaut n'apparaît qu'en un seul et unique échantillon, comme on peut l'observer Fig. 3.11(h). Les échantillons voisins représentent soit le fond, soit l'objet.

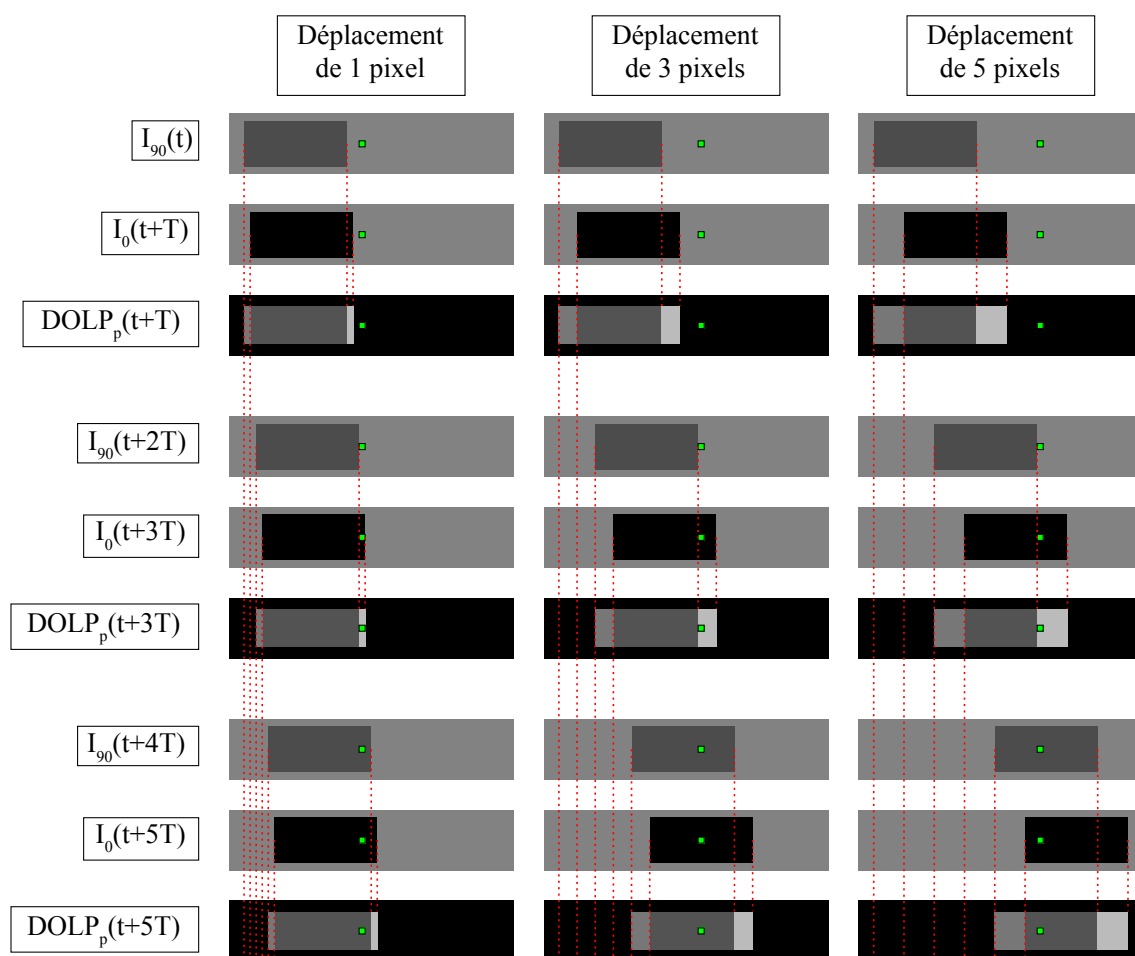


FIGURE 3.12 – Schéma explicite de l'invariance de l'observation d'un artefact sur le $DOLP_p$ en fonction de la vitesse de déplacement de l'objet.

Mise en œuvre

Reprenons maintenant notre scène présentée Fig. 3.9. Un $DOLP_p^{ref}$ et un $DOLP_p^{err}$ sont présentés Fig. 3.13. Cette scène sera étudiée principalement sur la portion réduite

représentée par le cadre rouge, afin d'avoir une scène totalement en mouvement. On étudie l'évolution du $DOLP_P$ en un pixel donné, sur une portion réduite de la scène afin de démontrer la validité de la démarche.

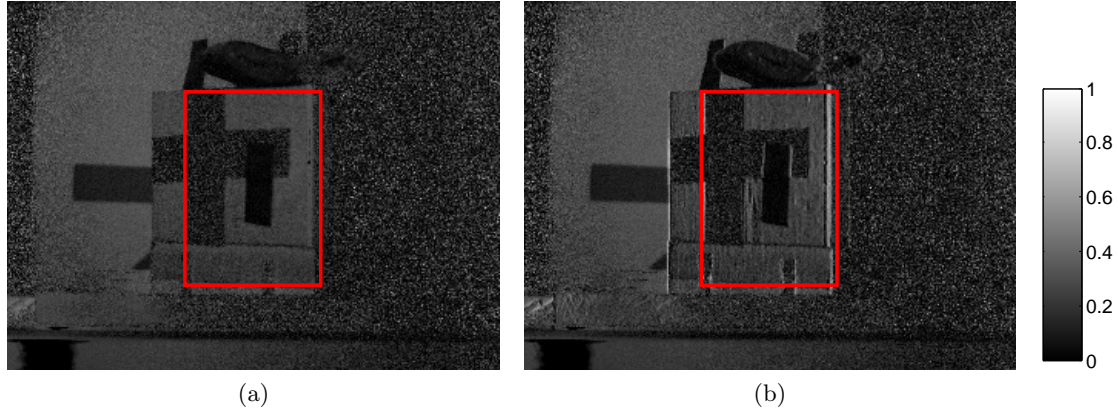


FIGURE 3.13 – (a) : $DOLP_P^{ref}$ de référence, non influencé par du mouvement dans la scène; (b) : $DOLP_P^{err}$ faussé par du mouvement dans la scène. Le cadre rouge définit la zone d'étude lorsque la scène n'est étudiée que sur une portion réduite.

D'après ce qu'on a vu précédemment, un artefact ne produira qu'un seul échantillon erroné sur le profil temporel, le filtre médian temporel peut donc être appliqué sur un voisinage nécessaire et suffisant de trois échantillons. Le résultat du filtrage est présenté Fig. 3.14. Un exemple de profil est donné figure 3.15. Cette information étant difficile à interpréter, nous ne l'étudions pas directement et préférons utiliser un critère d'erreur que nous définissons plus loin. Une fenêtre de cinq échantillons a également été testée sans amélioration notable sur les résultats. Qualitativement parlant, le résultat est satisfaisant. On observe que quasiment tous les défauts ont été estompés. Seul un défaut reste partiellement visible sur la droite de l'objet, là où le défaut était initialement relativement important.

$$corr = \frac{\sum_{m,n} (DOLP_P^c(m,n) - \overline{DOLP_P^c})(DOLP_P^{ref}(m,n) - \overline{DOLP_P^{ref}})}{\sqrt{\sum_{m,n} (DOLP_P^c(m,n) - \overline{DOLP_P^c})^2 \sum_{m,n} (DOLP_P^{ref}(m,n) - \overline{DOLP_P^{ref}})^2}} \quad (3.4)$$

avec $DOLP_P^c$ le résultat de la correction du $DOLP_P^{err}$ par le filtrage médian, et $\overline{DOLP_P}$ la moyenne spatiale du $DOLP_P$.

Parallèlement, pour quantifier le résultat, on évalue le critère d'erreur Eq. (3.4), basé sur la corrélation des images. Ce critère d'erreur a été utilisé dans un contexte similaire par Guyot *et al.* [22]. La valeur de ce critère varie entre 0 pour des images différentes,

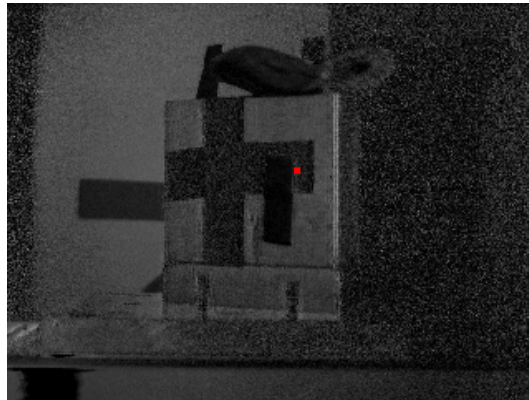


FIGURE 3.14 – Résultat qualitatif du filtrage médian temporel. Le pixel repéré en rouge sert à dresser le profil exposé Fig. 3.15.

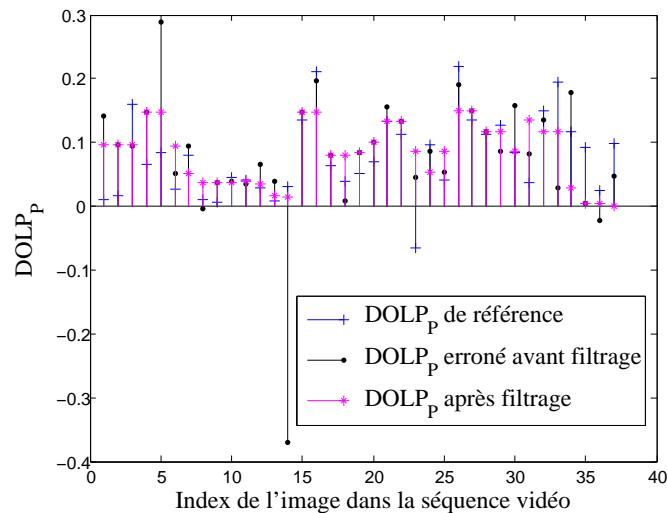


FIGURE 3.15 – Profils temporels au pixel repéré en rouge sur la figure 3.14, obtenus pour le $DOLP_p$ de référence, le $DOLP_p$ erroné, et le résultat du filtrage.

donc totalement décorréelées, et 1 pour des images identiques. L'évaluation de ce critère de corrélation présenté Fig. 3.16 montre à la fois la corrélation entre le $DOLP_p^{ref}$ et le $DOLP_p^{err}$, et la corrélation entre le $DOLP_p^{ref}$ et le $DOLP_p^c$. Si l'évaluation est faite sur une portion réduite de la scène totalement en mouvement alors il est manifeste que le filtrage médian améliore la situation. Si l'on prend l'intégralité de la scène, il se trouve que le filtrage médian semble détériorer l'image, ce qui est en contradiction avec le résultat qualitatif Fig. 3.14. Ceci est dû au bruit sur le fond statique de l'image qui n'a pas été filtré avant l'application du filtrage médian. Théoriquement, comme le filtrage médian temporel s'applique à l'évolution temporelle de la valeur des pixels considérés, notre filtrage médian temporel n'a aucun effet sur une scène parfaitement statique dépourvue de bruit. Donc en l'absence de bruit, les textures des objets et le fond de la scène sont strictement identiques

sur les trois images $DOLP_P^{ref}$, $DOLP_P^{err}$, et $DOLP_P^c$. Seulement, en pratique, le bruit sur le $DOLP_P^{err}$ est passé au travers d'un filtre défini de manière totalement indépendante des caractéristiques de ce bruit, et qui se révèle au final inadapté. Donc les deux réalisations du bruit sur $DOLP_P^{ref}$ et $DOLP_P^{err}$ sont davantage similaires que la réalisation du bruit sur $DOLP_P^{ref}$ et le résultat du filtrage sur $DOLP_P^c$. En fait, du point de vue de notre critère d'erreur, il semble préférable de ne pas filtrer le bruit plutôt que de le filtrer avec notre filtrage médian temporel. Quoiqu'il en soit, le filtrage apporte tout de même une réelle amélioration sur les défauts de l'objet en mouvement.

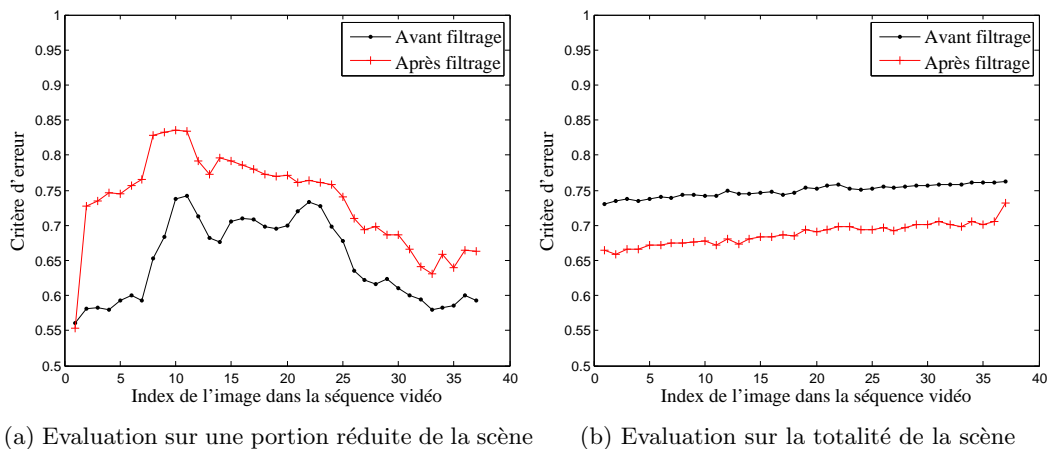


FIGURE 3.16 – Evaluation quantitative du résultat du filtrage médian temporel selon le critère détaillé Eq. 3.4

Il est important de souligner que la démarche entreprise pour étudier le filtrage médian temporel n'a fait appel à aucune hypothèse sur la nature du mouvement. Certes, la scène étudiée ne contenait qu'un mouvement de translation, mais étant donné que le $DOLP_P$ est étudié localement en chaque pixel en fonction du temps, la notion d'objet dans la scène disparaît et par là même la notion de mouvement. Par conséquent, on peut considérer que le processus de filtrage présenté ici est indépendant de la nature du mouvement de l'objet. De plus, le rendu qualitatif est bon et les ressources informatiques consommées pour appliquer un tel filtrage sont réduites. Ceci a permis d'implanter le filtrage sur une application en C++ permettant de filtrer les défauts en temps réel. Le temps de filtrage obtenu est inférieur à 3ms pour des images 640×480 pixels, sur 8 bits, ce qui permettrait de fonctionner à une cadence d'acquisition supérieure à 330 images par seconde. Dans notre application, les images étaient affichées sur un écran d'ordinateur à 50Hz.

3.3.3 Recalage rigide

Si l'on étudie simplement la portion de la scène réduite, comme présentée Fig. 3.13, alors toute la scène est en mouvement. De plus, ici le déplacement est une translation uni-

forme. Donc à titre de comparaison avec le filtrage médian, nous avons testé une compensation de mouvement basée sur un recalage rigide des modes de polarisation. La distance entre le centre de la figure de corrélation et son maximum reflète le déplacement de l'objet entre les modes de polarisation corrélés. Le mouvement peut alors être compensé avant de calculer le $DOLP_P$.

Principe

Pour diminuer le temps de calcul, ce ne sont pas les modes de polarisation eux-mêmes que l'on corrèle, mais les images binaires issues des extractions de contours de ces modes à l'aide d'un filtre de Canny. La figure 3.17 montre le déroulement du processus de correction. D'abord on extrait les contours dans les images des modes de polarisation, puis on corrèle les images de contour. Sur la figure de corrélation, le vecteur ayant pour origine le centre de la figure de corrélation et pour extrémité le maximum de corrélation donne le déplacement de l'objet entre les deux modes de polarisation. Il suffit alors de translater l'un des modes de polarisation avec le déplacement estimé, et de recalculer le $DOLP_P$ corrigé.

Mise en œuvre

Avec cette méthode de recalage, le mouvement est étudié dans la globalité de la scène et non par bloc. Une fois le déplacement estimé, la correction est appliquée par translation de la totalité de l'image étudiée. Notre scène comportant des portions en mouvement et des portions statiques, nous définissons une région d'intérêt sur l'image de la scène de manière à réduire l'image à une portion de la scène totalement en mouvement. Seule cette portion réduite est étudiée avec le recalage, contrairement à ce qui avait été présenté Fig. 3.16(a) pour le filtrage médian.

En pratique, les objets dans la scène peuvent ne pas avoir la même intensité sur les images de deux modes de polarisation différents, comme nous l'avons vu précédemment figure 3.4. Donc l'extraction des contours des objets donne des résultats différents sur chacun des modes. Par conséquent, on corrèle les contours extraits de deux modes de polarisation de même nature, acquis à deux périodes d'échantillonnage d'écart. Cela permet de maximiser la ressemblance des images de contours. De plus, les images des modes de polarisation sont suréchantillonnées avant extraction des contours afin d'affiner l'estimation du déplacement. L'utilité du suréchantillonnage est mise en évidence dans la section suivante.

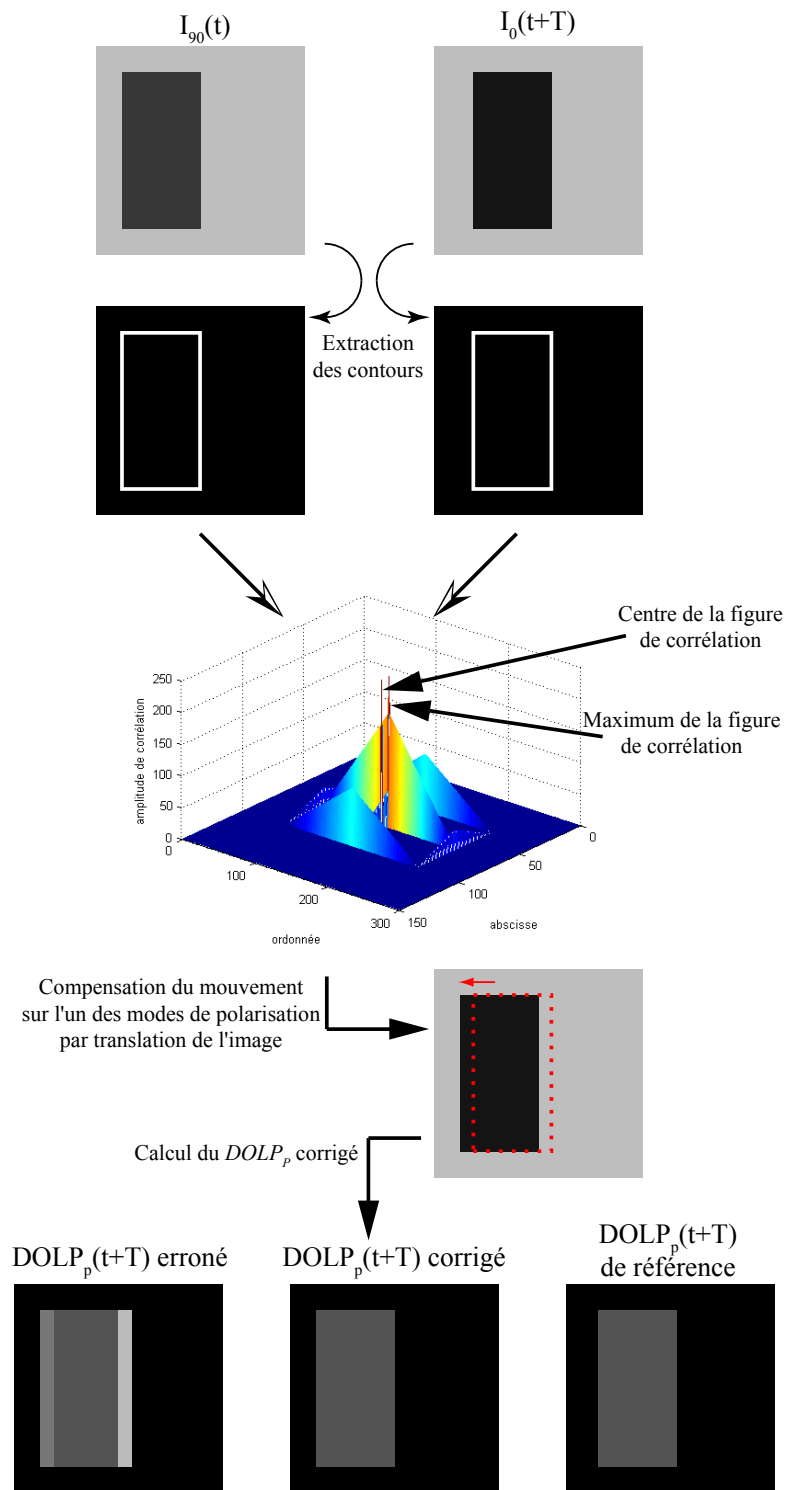


FIGURE 3.17 – Principe de recalage.

Résultats obtenus et comparaison avec le filtrage médian temporel

Fig. 3.18 sont présentés les résultats qualitatifs des deux méthodes de correction, juxtaposés avec le $DOLP_P^{err}$ et le $DOLP_P^{ref}$. La correction par recalage est plus efficace que le filtrage médian. Le défaut important sur la droite de l'objet est davantage corrigé. En fait, en agissant directement sur le $DOLP_P$, le filtrage médian estompe les défauts en remplaçant un pixel aberrant par un pixel plus en correspondance avec le voisinage du pixel considéré. Cependant, ce procédé ne garantit pas de restituer l'information exacte qui devrait se trouver au pixel corrigé si le $DOLP_P$ n'avait pas été affecté par le mouvement dans la scène. A contrario, le recalage permet de restituer la correspondance entre les modes de polarisation avant de calculer le $DOLP_P$, et donc en théorie de calculer immédiatement l'information exacte. Cette observation est confirmée Fig. 3.19 par l'évaluation du critère d'erreur présenté Eq. (3.4). Le recalage permet de restituer une information de polarisation plus proche du $DOLP_P$ de référence. La tendance générale de la courbe à décroître est due à l'entrée dans la scène d'un objet dépolarisant, dont le $DOLP_P$ est donc très sensible au bruit. Comme ce bruit n'est pas filtré, il prend de plus en plus d'importance dans l'évaluation du critère d'erreur et dégrade ce dernier.

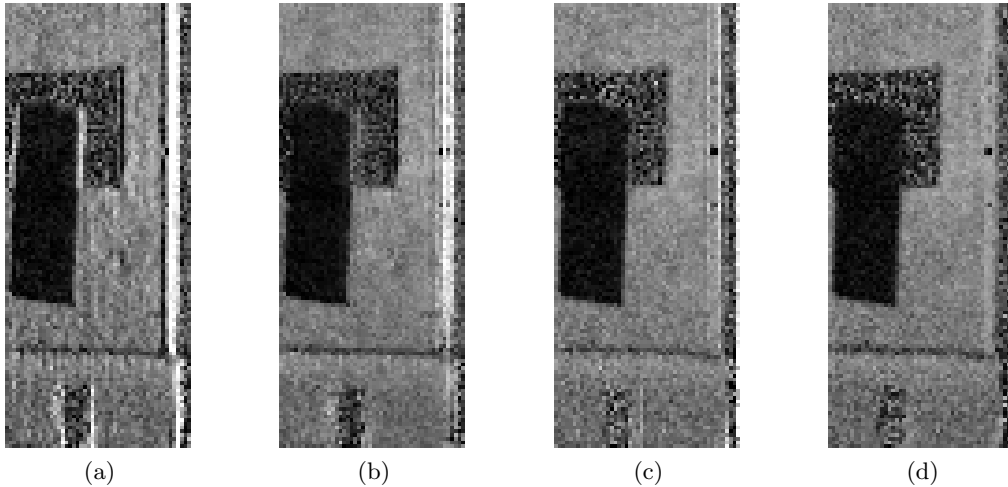


FIGURE 3.18 – Comparaison du résultat qualitatif des corrections. (a) : $DOLP_P^{err}$, (b) : $DOLP_P^{err}$ corrigé par le filtrage médian, (c) : $DOLP_P^{err}$ corrigé par recalage, (d) : $DOLP_P^{ref}$

3.3.4 Application à une scène naturelle

Dans cette section, les méthodes de correction précédentes sont appliquées à une scène naturelle déjà présentée Fig. 3.6. Lors de l'acquisition des images, le polarimètre est fixé sur un pied et tourné autour de l'axe de fixation. Le système étant tourné à la main et non pas à l'aide d'un élément motorisé, sa position n'est pas précisément connue. Par conséquent, il est impossible de répéter l'opération avec suffisamment de précision pour

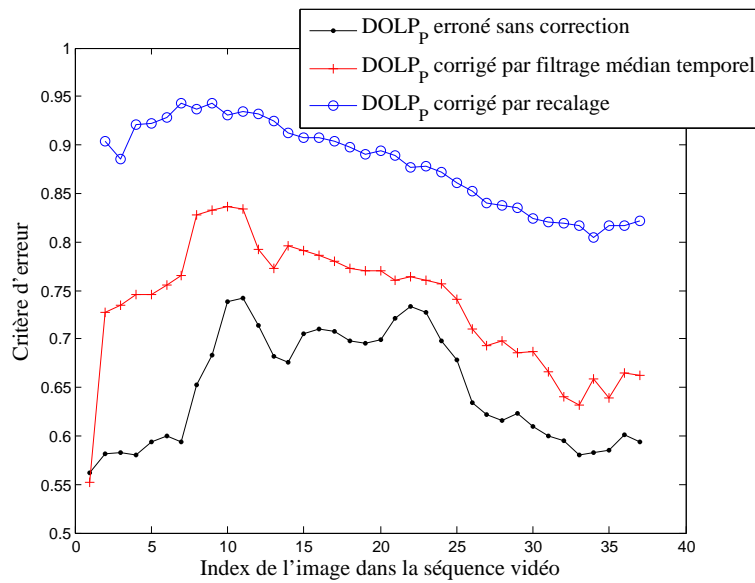


FIGURE 3.19 – Evaluation de l'erreur de correction pour le filtrage médian et pour le recalage.

générer à la fois un $DOLP_P^{ref}$ et le $DOLP_P^{err}$ correspondant. Ainsi, seuls des résultats qualitatifs sont présentés Fig. 3.20. Aucun résultat quantitatif n'est évalué. Le polarimètre est suffisamment loin de la scène pour que l'on considère le mouvement général comme étant une translation, même si fondamentalement ce n'est pas le cas. Comme précédemment, le recalage affiche de meilleurs résultats que le filtrage médian. Ce dernier estompe les défauts sans totalement les supprimer, tel qu'on peut l'observer dans le feuillage des arbres. Le recalage restitue davantage le $DOLP_P$ réel.

Le recalage affiche tout de même quelques limites. Les défauts du feuillage sont encore légèrement visibles Fig. 3.20(e). Pour améliorer ces résultats, il a été mis en place un suréchantillonnage avant extraction des contours dans les images, en utilisant une méthode d'interpolation bicubique. Si le déplacement est trop faible, la corrélation des modes de polarisation dans leur résolution native ne permet pas de déterminer le déplacement dans la scène. Un suréchantillonnage accorde alors la possibilité de quantifier un déplacement subpixelique. La Fig. 3.21 montre la comparaison entre le résultat du recalage sans suréchantillonnage, et avec un suréchantillonnage d'un facteur 2 sur les lignes et sur les colonnes des images, donc multipliant par 4 la taille globale de l'image. Le suréchantillonnage apporte une solution à la détection de faibles déplacements. Un suréchantillonnage d'un facteur 4 a été testé mais apporte peu d'amélioration pour un temps de calcul beaucoup plus long.

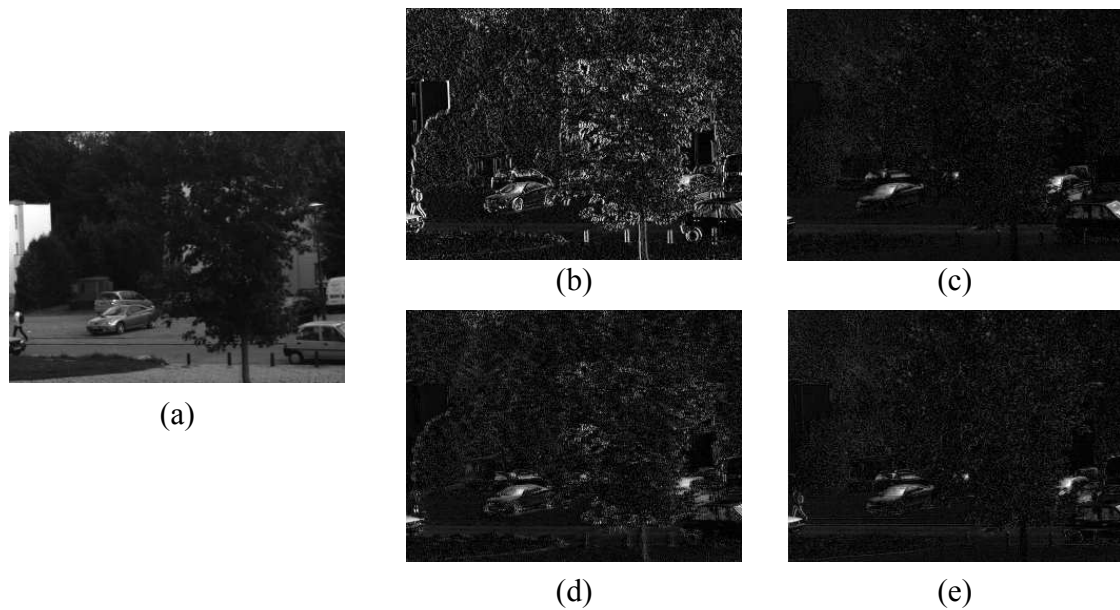


FIGURE 3.20 – Correction du $DOLP_P$ d’une scène naturelle. (a) : image d’intensité. (b) : $DOLP_P$ erroné sans correction. (c) : obtenu pour une scène statique. (d) : résultat du filtrage médian. (e) : résultat du recalage.

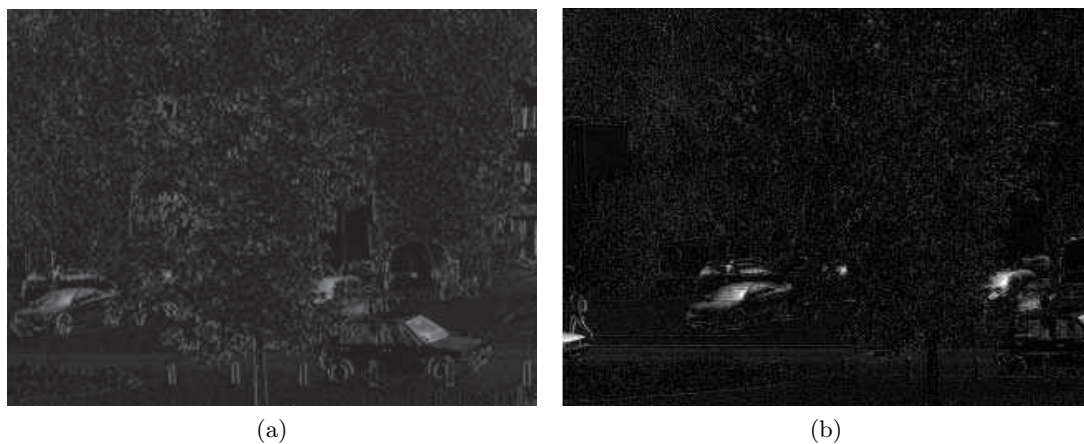


FIGURE 3.21 – Résultat de $DOLP_P$ après recalage sans suréchantillonnage(a) et avec suréchantillonnage(b) des modes de polarisation.

3.4 Conclusion

Le laboratoire MIPS dispose d’un polarimètre imageant déjà utilisé pour déterminer le $DOLP_P$ d’une scène à une cadence de 572 images par seconde, ce qui est particulièrement rapide compte tenu du fait que le système n’utilise qu’un seul et unique modulateur de lumière.

Observer la caractéristique polarimétrique d’objets en mouvement avec un polarimètre

à division temporelle demande des précautions. Le $DOLP_P$ est faussé sur les contours des objets, et si le corps de l'objet ne polarise pas uniformément, alors l'objet lui-même affiche un $DOLP_P$ erroné. Cependant, les solutions à ce problème existent, y compris pour des applications temps réel. Dans ce chapitre, un filtrage médian temporel s'est avéré un bon compromis pour développer une application temps réel tout en diminuant l'importance des défauts sur les images de $DOLP_P$. Ce filtrage a prouvé son efficacité lors d'une intégration à une application en C++. Le système dans son ensemble permet d'effectuer, à une cadence de 50 images par secondes, à la fois l'acquisition des modes de polarisation, le calcul du $DOLP_P$, le filtrage des artéfacts, et l'affichage du $DOLP_P$ d'une scène. Etant donné que le temps de post-traitement est inférieur à 3ms, cela autorise des applications temps réel à plus haute cadence.

Comparé à un recalage par corrélation des modes de polarisation, le filtrage médian semble moins efficace. Cependant, un tel recalage consomme beaucoup de ressources et s'applique donc difficilement dans un cadre temps réel. D'autres méthodes de recalage par flot optique par exemple, éventuellement développées sur d'autres architectures comme des FPGA ou des GPU, permettent certainement de dépasser les limites du filtrage médian et du recalage rigide exposées dans ce chapitre. Cette piste d'amélioration fait maintenant l'objet d'une nouvelle thèse au laboratoire MIPS ayant déjà fourni des premiers résultats [60]. Néanmoins, nous avons démontré que les défauts liés à l'observation d'objets en mouvement peuvent être corrigés.

Tout problème lié au mouvement mis à part, l'utilité du polarimètre se trouve réduite par le fait qu'il ne permet d'analyser qu'une petite portion de la polarisation de la lumière incidente. L'angle azimutal et le degré de polarisation linéaire complet sont des grandeurs qui apportent une information complémentaire par rapport au $DOLP_P$. Il en va de même pour l'ellipticité et le degré de polarisation complet. Nous allons donc voir dans les deux chapitres suivants dans quelle mesure les performances de notre polarimètre peuvent être étendues dans un premier temps à l'analyse de la totalité de la polarisation linéaire dans le chapitre 4, puis à l'analyse de la totalité de la polarisation dans le chapitre 5.

Chapitre 4

Extension au troisième paramètre de Stokes

Dans son fonctionnement nominal, le modulateur a un comportement bistable, qui ne permet d'analyser que le *DOLP*. Toutefois, son fabricant BNS commercialise des modulateurs spatiaux de lumière à cristaux liquides ferroélectriques permettant d'outrepasser cette limite [61]. Ils se comportent en rotateurs de polarisation accordables (lame demi-onde). L'angle d'orientation de la lame est alors lié à la tension électrique appliquée à la cellule à cristaux liquides. La totalité de la polarisation linéaire peut alors être analysée. Le groupe FOTI du laboratoire MIPS possède une bonne expérience de tels dispositifs [62, 29, 63], dont on peut présumer que notre modulateur diffère assez peu. Nous avons donc décidé de concevoir une architecture de commande (logicielle et matérielle) permettant de contrôler notre cellule de manière accordable. Dans ce chapitre, on pose donc l'hypothèse selon laquelle la cellule à CL se comporte comme une lame demi-onde d'angle accordable, pourvu qu'elle soit commandée convenablement. Le présent chapitre expose la démarche entreprise pour étendre les capacités du polarimètre à l'analyse de la totalité de la polarisation linéaire. Dans une première section, on détaille le principe sur lequel repose l'utilisation du polarimètre pour analyser la polarisation linéaire du faisceau incident. Dans une deuxième section, on présente la méthodologie utilisée pour estimer l'angle d'orientation de la lame demi-onde équivalente ainsi que son éventuelle dépolarisation en fonction de la tension de commande. Dans cette même section, l'analyse des résultats issus de la mise en application de cette méthodologie est présentée. Puis en Section 4.3 on détermine la matrice caractérisant le comportement du modulateur, que l'on valide Section 4.4 en utilisant le modulateur en analyseur d'états de polarisation. Enfin, une discussion sur les travaux est présentée en Section 4.5.

4.1 Principe de détermination des paramètres de Stokes

Le fonctionnement nominal du modulateur permet de calculer les paramètres s_0 et s_1 du vecteur de Stokes incident \mathbf{S}_{in} par simple addition et soustraction des états de polarisation acquis, comme présenté précédemment dans le chapitre 3. L'obtention du paramètre s_2 peut se faire de la même manière si l'on dispose de deux modes de polarisation supplémentaires bien précis, à savoir I_{45} et I_{135} . Le vecteur de Stokes est alors calculé de la manière suivante :

$$\mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} s_{in0} \\ s_{in1} \\ s_{in2} \\ - \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ - \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Avec cette méthode, quatre modes de polarisations bien déterminés doivent être acquis. Cependant, les trois premiers paramètres du vecteur de Stokes peuvent également être identifiés avec une autre méthode ne nécessitant l'acquisition que de trois modes de polarisation. De plus, ces trois modes sont déterminés en fonction des capacités du polarimètre et non uniquement par la théorie. Cette méthode est exposée dans le paragraphe suivant.

4.1.1 Principe de base

Le modulateur étant constitué d'une cellule FLC, que nous modélisons par une lame demi-onde, et d'un polariseur linéaire, la matrice de Mueller du système, présentée Eq. (4.2), est obtenue à partir des équations (1.27) et (1.24). La lame demi-onde équivalente est considérée avec une orientation de θ degrés, alors que le polariseur linéaire est considéré orienté à 0 degré.

$$\mathbf{M}(\theta) = \mathbf{M}_{\text{Pol}}(0) \cdot \mathbf{M}_{\frac{\lambda}{2}}(\theta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(4\theta) & \sin(4\theta) & 0 \\ 1 & \cos(4\theta) & \sin(4\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

L'intensité du faisceau en sortie mesurée par un photo-détecteur correspond à la composante s_{out0} du vecteur de Stokes \mathbf{S}_{out} en sortie du modulateur. D'après les équations (1.23) et (4.2), cette intensité est déterminée par l'équation suivante, considérée pour un vecteur de Stokes incident \mathbf{S}_{in} :

$$I(\theta) = s_{out0}(\theta) = \frac{1}{2} [s_{in0} + s_{in1} \cdot \cos(4\theta) + s_{in2} \cdot \sin(4\theta)] \quad (4.3)$$

L'angle θ mentionné ci-dessus dépend de la tension électrique de commande V appliquée au modulateur. L'angle devrait alors être rapporté comme $\theta(V)$. Cependant,

comme aucune confusion n'est possible, la notation est réduite à un simple θ .

Considérons l'équation (4.3) pour l'acquisition de trois intensités différentes $I_1(\theta_1)$, $I_2(\theta_2)$, et $I_3(\theta_3)$. On peut établir le système suivant :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} s_{in0} \\ s_{in1} \\ s_{in2} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

où, dans le cas d'une lame demi-onde dont on peut contrôler l'orientation,

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(4\theta_1) & \sin(4\theta_1) \\ 1 & \cos(4\theta_2) & \sin(4\theta_2) \\ 1 & \cos(4\theta_3) & \sin(4\theta_3) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

\mathbf{A} est appelée la matrice du système [1].

Si la matrice \mathbf{A} est de rang 3, c'est à dire si les trois angles ne sont pas égaux modulo $\pi/2$, alors \mathbf{A} est inversible et il est possible de remonter aux trois paramètres de Stokes s_{in0} , s_{in1} , s_{in2} en utilisant l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} s_{in0} \\ s_{in1} \\ s_{in2} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

où \mathbf{A}^{-1} est l'inverse de la matrice \mathbf{A} . \mathbf{A}^{-1} est appelée Matrice de Réduction des Données (MRD) [1].

Ainsi, avec seulement trois modes de polarisation, les trois premiers paramètres de Stokes peuvent être identifiés. En pratique, de manière à accroître la précision de l'estimation, davantage de modes de polarisation peuvent être acquis [64]. La matrice \mathbf{A} devient alors une matrice rectangulaire de dimension $N \times 3$ avec N le nombre de modes de polarisation utilisés. La détermination de \mathbf{A}^{-1} doit alors se faire par pseudo-inversion. Cependant, pour des problèmes de compensation de mouvement présentés dans le chapitre 3, nous préférons limiter le nombre de modes de polarisation. Par conséquent seuls trois modes de polarisation sont utilisés pour déterminer les paramètres linéaires du vecteur de Stokes incident. Il convient donc de déterminer trois angles θ_1 , θ_2 , θ_3 de manière à ce que \mathbf{A} soit inversible.

4.1.2 Conditionnement de la matrice

Le choix des angles θ_1 , θ_2 , θ_3 influence le conditionnement de la matrice du système \mathbf{A} , c'est à dire sa propension à être inversée. Ainsi, certaines configurations permettront de remonter avec plus de précision aux paramètres de Stokes que d'autres. Sabatke *et al.* [65, 66] et Tyo [67] ont montré que le rapport signal sur bruit du vecteur de Stokes

reconstruit est maximum lorsque le nombre de conditionnement, noté CN, est minimum. Ce nombre est défini à partir de la norme de la matrice \mathbf{A} selon l'équation (4.7). D'autres moyens d'évaluer le conditionnement de la matrice existent également [65, 66, 67, 64] mais ne sont pas utilisés dans le présent travail.

$$CN = \|\mathbf{A}\| \cdot \|\mathbf{A}^{-1}\| \quad (4.7)$$

La norme la plus couramment utilisée est la norme L_2 de la matrice [68] :

$$\|\mathbf{A}\|_2 = \sup_{\mathbf{x}} \frac{\|\mathbf{A} \cdot \mathbf{x}\|_2}{\|\mathbf{x}\|_2} \quad (4.8)$$

où $\|\mathbf{x}\|_2$ est la norme euclidienne du vecteur \mathbf{x} .

En pratique le nombre de conditionnement correspond au rapport entre les modules de la plus grande et de la plus petite valeur singulière de la matrice \mathbf{A} [68] et vaut $\sqrt{N-1}$ [68] avec N le nombre de paramètres de Stokes recherchés.

Si pour analyser la polarisation on dispose d'une lame demi-onde parfaite pouvant être orientée de 0° à 180° , alors le CN idéal vaut $\sqrt{2}$ et est obtenu lorsque la lame est orientée successivement selon trois angles equirépartis dans la plage $[0^\circ; 180^\circ]$, c'est à dire 0° , 60° , 120° [65, 68]. Ne sachant pas a priori si le modulateur est capable d'atteindre ces angles, nous déterminerons la matrice de réduction des données de manière à minimiser le CN, estimé Section 4.3.

4.1.3 Impact de la dépolarisation

En pratique il se peut que la cellule à cristaux liquides dépolarise. On se limitera ici au cas d'une dépolarisation isotrope. Si l'on considère la matrice de dépolarisation suivante :

$$\mathbf{M}_\Delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

alors l'équation (1.27) devient :

$$\mathbf{M}_{\frac{\lambda}{2}}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d \cos(4\theta) & d \sin(4\theta) & 0 \\ 0 & d \sin(4\theta) & -d \cos(4\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

et l'équation (4.3) devient :

$$I(\theta) = \frac{1}{2}[s_{in0} + s_{in1}.d. \cos(4\theta) + s_{in2}.d. \sin(4\theta)] \quad (4.11)$$

ce qui modifie la matrice du système, Eq. (4.5), comme suit :

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & d \cos(4\theta_1) & d \sin(4\theta_1) \\ 1 & d \cos(4\theta_2) & d \sin(4\theta_2) \\ 1 & d \cos(4\theta_3) & d \sin(4\theta_3) \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

L'équation (4.12) donne le modèle sur lequel baser l'étude du modulateur. La démarche expérimentale est exposée dans la section suivante.

4.2 Détermination de l'angle et de la dépolarisation

Idéalement, pour connaître le comportement exact du modulateur, il faudrait pouvoir dans un premier temps opérer une caractérisation de Mueller sur la cellule FLC seule, ce qui fournirait entre autre la variation de l'angle θ et de la dépolarisation en fonction de la tension de commande. La multiplication matricielle entre la matrice de Mueller de la cellule FLC et la matrice de Mueller d'un polariseur linéaire donnerait alors la matrice de Mueller du modulateur d'où l'on tirerait ensuite l'expression de l'intensité en fonction des paramètres de la matrice et du vecteur de Stokes incident, comme précédemment pour établir l'équation (4.3). La matrice \mathbf{A} pourrait enfin être établie. Seulement le modulateur dont nous disposons actuellement ne permet pas de séparer la cellule FLC du polariseur linéaire. Il est donc impossible d'effectuer une caractérisation de Mueller de la cellule FLC seule. Il faut utiliser une autre méthode pour identifier la variation de l'angle d'orientation θ de la lame demi-onde équivalente en fonction de la tension de commande, afin de pouvoir à terme sélectionner trois angles $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ permettant d'établir la matrice \mathbf{A} . Le procédé est exposé dans le paragraphe suivant.

4.2.1 Principe

A l'aide d'un générateur d'état de polarisation, les vecteurs de Stokes suivants sont générés.

$$\{\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_{90}, \mathbf{S}_{45}, \mathbf{S}_{135}\} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (4.13)$$

Ces vecteurs sont normalisés par rapport à l'intensité maximale du faisceau lumineux. Lorsqu'ils sont introduits en entrée du système, l'équation (4.11) permet de déterminer les intensités en sortie :

$$\begin{cases} I_0 = \frac{1}{2}[1 + d \cos(4\theta)] & \text{pour } \mathbf{S}_0 \\ I_{90} = \frac{1}{2}[1 - d \cos(4\theta)] & \text{pour } \mathbf{S}_{90} \\ I_{45} = \frac{1}{2}[1 + d \sin(4\theta)] & \text{pour } \mathbf{S}_{45} \\ I_{135} = \frac{1}{2}[1 - d \sin(4\theta)] & \text{pour } \mathbf{S}_{135} \end{cases} \quad (4.14)$$

d'où peuvent être extraits θ et d :

$$\begin{cases} \theta = \frac{1}{4} \arctan\left(\frac{I_{45} - I_{135}}{I_0 - I_{90}}\right) & \text{pour } I_0 \neq I_{90} \\ \theta = \frac{\pi}{8} \left[\frac{\pi}{4}\right] & \text{pour } I_0 = I_{90} \end{cases} \quad (4.15)$$

On note au passage que les termes $(I_{45} - I_{135})$ et $(I_0 - I_{90})$ ne sont jamais nuls simultanément, ce qui écarte un cas potentiel d'indétermination.

$$d = \sqrt{(I_0 - I_{90})^2 + (I_{45} - I_{135})^2} \quad (4.16)$$

En répétant ce processus pour chaque tension de commande possible pour le modulateur, on détermine les variations de l'angle et de la dépolarisation en fonction de la tension de commande.

4.2.2 Application

Bien que le polarimètre soit prévu pour fonctionner en mode imageant, la phase de caractérisation du modulateur est conduite avec des signaux spatialement moyennés pour s'affranchir des problèmes d'anisotropie de la cellule FLC et rester dans le cadre de la démonstration de faisabilité. Une validation des résultats en conditions imageantes sera présentée en fin de chapitre, section 4.4.2. Par ailleurs, une phase de caractérisation spatiale du modulateur pourrait être envisagée par la suite.

Présentation du banc optique

Le banc présenté Fig. 4.1 est mis en place pour la caractérisation. Un laser Hélium-Néon stabilisé en puissance produit un faisceau à 633nm, longueur d'onde nominale du modulateur. Le faisceau est élargi puis polarisé linéairement à 0° par le polariseur fixe P_1 . Une lame demi-onde oriente ensuite la polarisation pour produire les quatre vecteurs de Stokes mentionnés Eq. (4.13) qui sont introduits dans le modulateur composé de la cellule FLC et du polariseur P_2 . Le faisceau est enfin focalisé sur un photo-détecteur par la lentille L_2 .

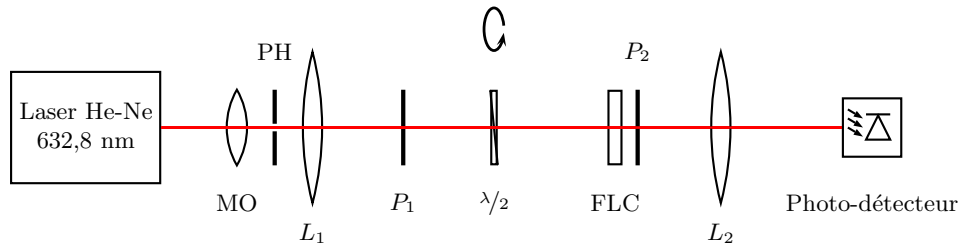


FIGURE 4.1 – Banc de caractérisation du modulateur. Elargisseur : Objectif de microscope (MO), Trou calibré (PH), Lentille L_1 . Polariseurs linéaires statiques orientés à 0° (P_1 et P_2), lame demi-onde orientable ($\lambda/2$), Cellule à cristaux liquides ferroélectriques (FLC), Lentille L_2 .

Pour chaque vecteur de Stokes en entrée, la tension de commande parcourt la plage de tensions recommandée par le constructeur du modulateur, à savoir $[-5V, +5V]$, avec un pas de $0,01V$. Le signal de commande nominal fourni par l'électronique de commande BNS a été introduit précédemment, Chapitre 3, et est rappelé Fig. 4.2(a). Cette commande offre de paramétrer le signal en fréquence uniquement. L'amplitude et le nombre des tensions de commande sont fixes. Or pour la phase de caractérisation, il est nécessaire de faire varier la tension de commande pour faire varier l'orientation de la lame demi-onde équivalente. La commande BNS est donc remplacée par une carte de génération de signaux contrôlée par ordinateur. Le signal en sortie, présenté Fig. 4.2(b), reproduit celui de l'électronique BNS, à ceci près que pour des raisons techniques, l'impulsion n'a pour amplitude que $\pm 10V$ et non $\pm 15V$, et qu'elle est de forme carrée et non à décroissance exponentielle. Le modulateur est donc caractérisé à l'aide de ce nouveau signal, appelé signal bipolaire. L'amplitude du signal carré varie entre $-5V$ et $+5V$. L'impulsion reste de $\pm 10V/200\mu s$ en permanence.

Exploitation des mesures

Pour chacun des vecteurs de Stokes exposés Eq. (4.13), et pour chaque tension de commande, l'intensité en sortie du modulateur est mesurée par un photo-détecteur. Un total de cinq mesures est effectué, et une moyenne est retenue pour déterminer l'angle et la dépolarisation selon les équations (4.15) et (4.16). Les courbes de moyennes sont présentées Fig. 4.3, et l'estimation de l'angle et de la dépolarisation sont respectivement présentés Fig. 4.4 et 4.5. De manière à simplifier l'analyse des courbes, on s'autorisera à parler de l'intensité $I(V)$ lors de l'analyse des courbes Fig. 4.3 bien qu'il s'agisse en réalité de la tension aux bornes du photo-détecteur. L'intégration du photo-détecteur [69] dans un macro-composant électronique est faite de telle manière qu'intensité lumineuse et tension mesurée sont proportionnelles. De plus on se référera aux différentes grandeurs par les notations $I_{\text{vecteur de Stokes incident}}(\text{tension de commande})$, $\theta(\text{tension de commande})$, et

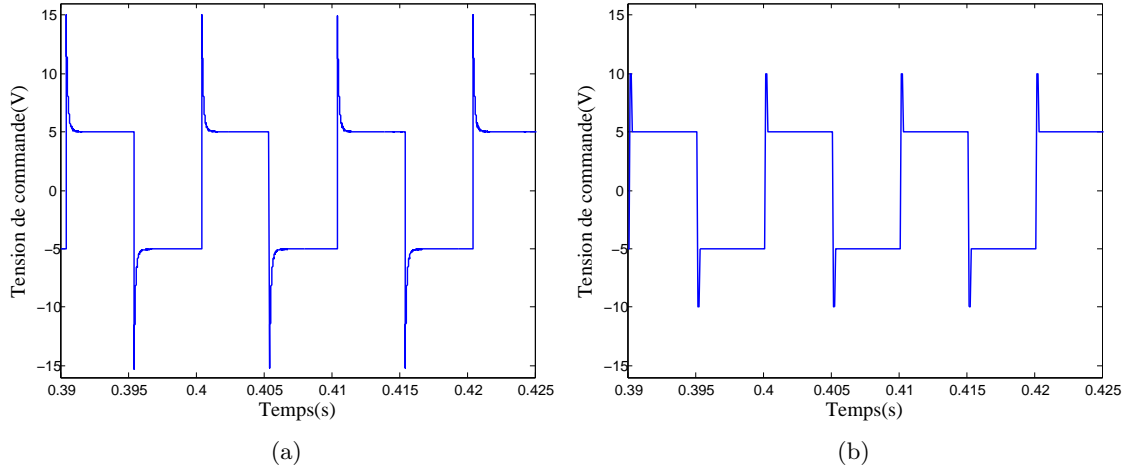


FIGURE 4.2 – (a) : Signal de commande nominal délivré par l'électronique BNS, (b) : Signal de commande bipolaire généré avec une carte de génération de signaux.

$d(\text{tension de commande})$. Par exemple, $I_0(+5)$ renvoie à la figure 4.3(a) à la tension de commande spécifique de $+5V$, et $\theta(-0,1)$ renvoie à la figure 4.4 à la tension de commande $-0,1V$.

- Aspect général des courbes Fig. 4.3.

Si la cellule FLC correspondait parfaitement à une lame demi-onde, alors les courbes $I_0(V)$ et $I_{90}(V)$ devraient être symétriques l'une de l'autre, comme le montre l'équation (4.14). Il devrait en être de même pour les courbes I_{45} et I_{135} . C'est globalement le cas des courbes Fig. 4.3 même si certains écarts sont observables. Ceci signifie que le comportement de la cellule FLC est proche d'une lame demi-onde, mais ne lui correspond pas exactement. Focalisons nous dans un premier temps sur l'analyse de la situation aux deux tensions $+5V$ et $-5V$.

- Tension de commande de $+5V$.

D'après le mode de fonctionnement nominal du modulateur, l'orientation de la lame demi-onde équivalente est a priori de 0° pour une tension de commande de $+5V$. Or la figure 4.4 montre que $\theta(+5) = 0,5^\circ$. Ceci s'explique en analysant les courbes d'intensités. Si la cellule FLC se comporte comme une lame demi-onde parfaite, et si à $+5V$ la lame équivalente est orientée à 0° , alors les intensités I_{45} et I_{135} doivent être égales. Or ce n'est pas exactement le cas. A ce stade on peut faire l'hypothèse qu'en utilisant une tension de commande supérieure à $+5V$, on pourrait atteindre une orientation de 0° . Cependant, nous ne chercherons pas à vérifier cette hypothèse dans le présent travail et nous ne dépasserons pas une tension de commande de $+5V$ (sauf pour l'impulsion).

- Tension de commande de $-5V$.

De la même manière, l'orientation de la lame demi-onde équivalente est a priori de 45° pour une tension de commande de $-5V$. Or la figure 4.4 montre que $\theta(-5) = 41,5^\circ$.

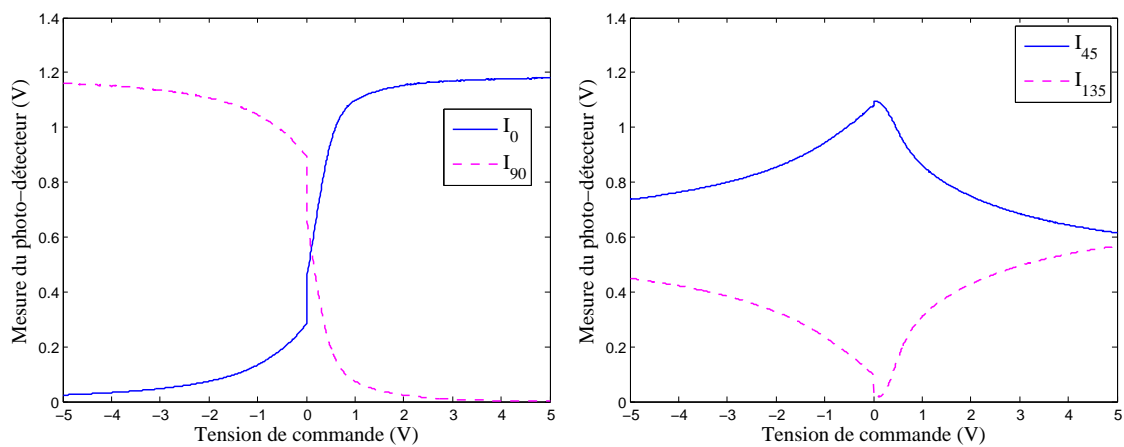


FIGURE 4.3 – Intensités mesurées en sortie du modulateur en fonction de la tension de commande, pour différents vecteurs de Stokes en entrée (définis par les relations Eq. (4.14)).

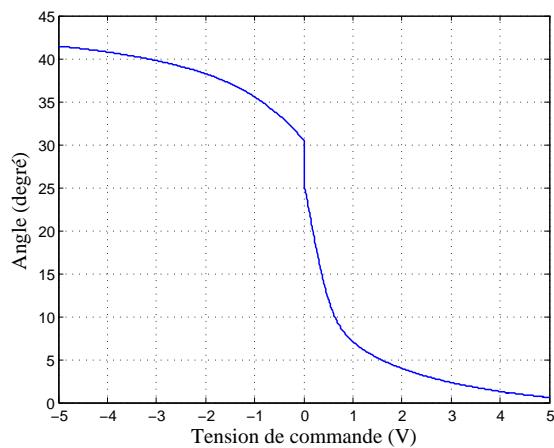


FIGURE 4.4 – Estimation de l'angle d'orientation θ de la lame équivalente aux CL.

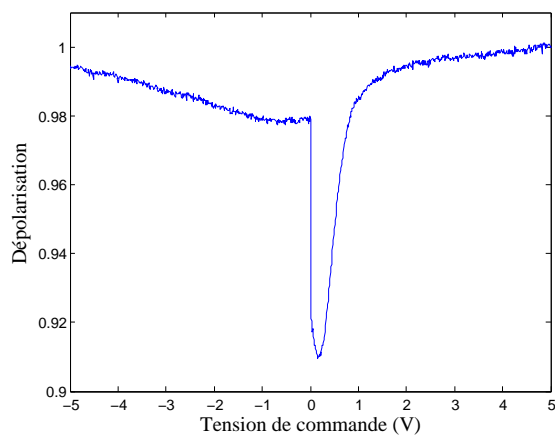


FIGURE 4.5 – Estimation de la dépolarisation

Ceci s'explique en analysant les courbes d'intensités. Si la cellule FLC se comporte comme une lame demi-onde parfaite, et si à $-5V$ la lame équivalente est orientée à 45° , alors on doit observer, entre autres choses, que d'une part les intensités I_{45} et I_{135} sont égales, et d'autre part I_0 est nulle. Or aucun de ces points n'est vérifié. Donc la lame demi-onde équivalente n'est pas orientée à 45° . On peut faire l'hypothèse qu'en utilisant une tension de commande inférieure à $-5V$, on puisse atteindre une orientation de 45° . Cependant, nous ne chercherons pas à vérifier cette hypothèse dans le présent travail et nous ne descendrons pas en dessous d'une tension de commande de $-5V$ (sauf pour l'impulsion).

En résumé, les angles correspondant aux tensions $+5V$ et $-5V$ ne sont pas exactement les angles attendus a priori. Cependant, ils correspondent aux extrema de la courbe d'angle, donc nous retenons ces angles et les tensions de commande qui leur sont associées pour l'optimisation du polarimètre.

- Détermination d'une troisième tension.

Une troisième tension de commande doit encore être choisie. Pour cela on se base dans un premier temps sur le principe exposé paragraphe 4.1.2 selon lequel il est préférable de prendre des angles les plus également dispersés possible dans la plage angulaire disponible. L'angle central de la plage $[0,6^\circ, 41,5^\circ]$ est $21,05^\circ$, et correspond à la tension $+0,15V$, comme le montre la figure 4.4. Cependant, certaines zones de la plage de tensions de commande $[-5V, +5V]$ s'avèrent problématiques. La figure 4.6 représente la somme d'intensités $I_0 + I_{90}$. D'après l'équation (4.14), cette somme doit être constante et égale à l'intensité maximale, quelle que soit la tension de commande et quelle que soit la dépolarisation. Or on observe sur la figure que cette somme présente une fluctuation pour des tensions entre $0V$ et $+1V$. Cela signifie que le modèle de lame demi-onde ne correspond pas à la réalité du comportement du modulateur entre ces tensions. Par conséquent, la plage de tensions $[0V, +1V]$ est a priori écartée des tensions disponibles pour optimiser le polarimètre. $+0,15V$ ne convient donc pas comme troisième tension. Etudier la somme $I_{45} + I_{135}$ plutôt que $I_0 + I_{90}$ conduit aux mêmes conclusions. En examinant à nouveau la figure 4.4, on observe que la variation de l'angle est plus importante entre $-5V$ et $0V$ qu'entre $+1V$ et $+5V$. Par conséquent une tension de commande négative est préférable à une tension de commande positive afin de choisir trois angles les plus éloignés possible les uns des autres. Pour choisir cette tension, on observe sur la figure 4.6(b) que c'est en $0V$ très exactement que se situe la limite inférieure des tensions à exclure dans la plage $[0V, +1V]$. La résolution en tension étant de $0,01V$, on choisit arbitrairement de s'éloigner de $0V$ d'une dizaine de pas. $-0,1V$ est alors choisi comme un compromis entre maximiser la distance avec les angles extrémaux et une trop grande proximité avec la tension $0V$. Les trois tensions retenues pour établir la matrice de réduction de données sont au final $-5V$, $-0,1V$, et $+5V$, et correspondent respectivement aux angles $41,5^\circ$, $31,2^\circ$, et $0,5^\circ$.

- Dépolarisation.

La courbe de dépolarisation présentée Fig. 4.5 fait également apparaître un comportement particulier dans la plage de tensions $[0V, +1V]$. Si on exclut cette plage de tensions, la dépolarisation est au maximum de 2,5% et varie selon la tension de commande.

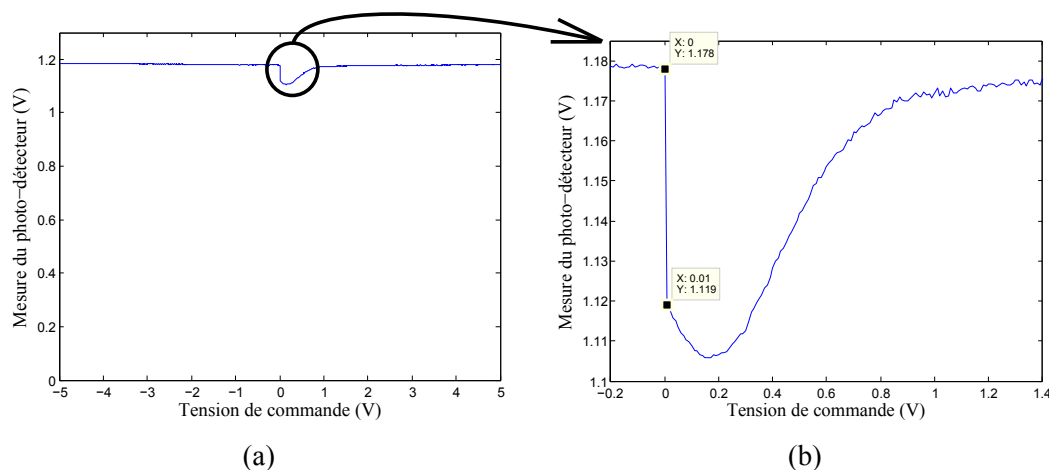


FIGURE 4.6 – Variation d'intensité $I_0 + I_{90}$ (a), zoom sur la plage $[0V, +1V]$ (b)

- Température.

Les cristaux liquides d'une manière générale sont réputés sensibles à la température [70, 71, 72, 73]. Durant la phase de caractérisation, la température de la pièce a été mesurée (cf. Fig. 4.7), mais non contrôlée, au voisinage du modulateur. Les variations sont de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ autour d'une moyenne de $20,3^\circ\text{C}$. Cette variation a un effet négligeable sur le comportement du modulateur pour l'étude menée dans le cas présent.

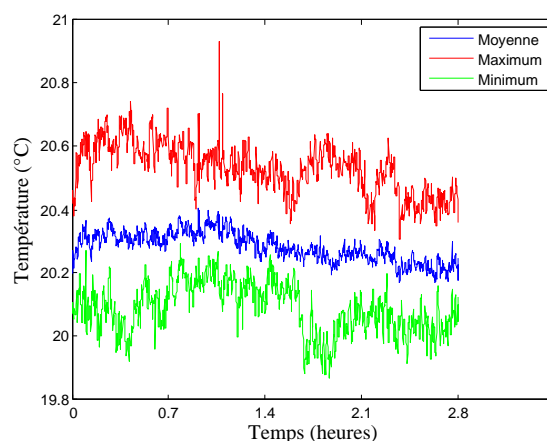


FIGURE 4.7 – Evolution moyenne de la température au cours des cinq caractérisations effectuées. Le maximum et le minimum représentent respectivement la température la plus élevée et la plus basse atteinte à chaque instant parmi les cinq caractérisations.

4.3 Détermination de la matrice de réduction de données

4.3.1 Généralisation du modèle

L'hypothèse de base servant à l'étude du modulateur consiste à considérer la cellule à cristaux liquides comme une lame demi-onde parfaite. Cette hypothèse a déjà été élargie une première fois en attribuant à cette lame demi-onde équivalente une éventuelle dépolarisation isotrope. De manière à élargir davantage le modèle (par exemple à une lame de dépolarisation non isotrope), on assimile désormais la cellule à cristaux liquides à une lame à retard fixe de 180° , sans hypothèse restrictive sur la dépolarisation ou la diatténuation. En d'autres termes, on suppose simplement que la lame équivalente ne circularise pas la polarisation linéaire incidente, ni ne linéarise la polarisation circulaire incidente. On considère donc toujours une matrice \mathbf{A} de dimension 3×3 .

En pratique, la matrice du système est calculée purement numériquement, directement à partir des intensités mesurées, sans passer par un calcul d'angle. On cherche alors à déterminer une matrice \mathbf{A} de la forme suivante :

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \alpha(V_1) & \beta(V_1) & \gamma(V_1) \\ \alpha(V_2) & \beta(V_2) & \gamma(V_2) \\ \alpha(V_3) & \beta(V_3) & \gamma(V_3) \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Par conséquent, l'équation 4.11 devient :

$$I(V) = \frac{1}{2} [s_{in0} \cdot \alpha(V) + s_{in1} \cdot \beta(V) + s_{in2} \cdot \gamma(V)] \quad (4.18)$$

Donc le système d'équation 4.14 s'écrit maintenant :

$$\begin{cases} I_0(V) = \frac{1}{2}[\alpha(V) + \beta(V)] & \text{pour } \mathbf{S}_h \\ I_{90}(V) = \frac{1}{2}[\alpha(V) - \beta(V)] & \text{pour } \mathbf{S}_v \\ I_{45}(V) = \frac{1}{2}[\alpha(V) + \gamma(V)] & \text{pour } \mathbf{S}_{45} \\ I_{135}(V) = \frac{1}{2}[\alpha(V) - \gamma(V)] & \text{pour } \mathbf{S}_{135} \end{cases} \quad (4.19)$$

D'où on déduit la matrice du système :

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{I_0(V_1)+I_{90}(V_1)+I_{45}(V_1)+I_{135}(V_1)}{2} & I_0(V_1) - I_{90}(V_1) & I_{45}(V_1) - I_{135}(V_1) \\ \frac{I_0(V_2)+I_{90}(V_2)+I_{45}(V_2)+I_{135}(V_2)}{2} & I_0(V_2) - I_{90}(V_2) & I_{45}(V_2) - I_{135}(V_2) \\ \frac{I_0(V_3)+I_{90}(V_3)+I_{45}(V_3)+I_{135}(V_3)}{2} & I_0(V_3) - I_{90}(V_3) & I_{45}(V_3) - I_{135}(V_3) \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

4.3.2 Signal de commande composite

Le signal de commande bipolaire utilisé jusqu'à présent ne permet d'acquérir que deux modes de polarisation. Pour pouvoir acquérir un troisième mode de polarisation, une mo-

dification s'impose afin que le signal de commande incorpore au minimum trois tensions distinctes (impulsion mise à part). Par exemple, considérons que le signal bipolaire commande le modulateur avec les tensions $+5V$ et $-5V$. Il faut d'après les résultats obtenus à la section 4.2.2 incorporer la tension $-0,1V$ au signal. L'incorporation de cette troisième tension doit respecter la contrainte de moyenne nulle du signal de commande. La solution la plus simple est d'incorporer conjointement au signal de commande la tension $-0,1V$ avec la tension de polarité opposée $+0,1V$, comme présenté Fig. 4.8. L'ordre d'application des tensions est arbitrairement défini selon la séquence $\{+5V, -5V, +0,1V, -0,1V\}$. De cette manière le signal de commande reste de moyenne nulle. Le signal Fig. 4.8 est appelé signal de commande composite. L'inconvénient d'une telle technique est que le modulateur prend quatre états différents dans une période du signal de commande, alors que seuls trois sont utilisés. Donc il y a une perte d'efficacité en terme de vitesse d'acquisition. Dans le cas présent, chaque niveau de commande (impulsion comprise) dure 5ms. Etant donné que seuls trois états sur quatre sont utiles, cela signifie que la fréquence moyenne d'acquisition est de 150Hz. Une autre méthode consisterait à incorporer uniquement trois tensions au signal de commande et à dimensionner le temps d'application de chacune de ces tensions de manière à ce que la moyenne soit nulle. Mais pour des raisons de simplicité et compte tenu du fait que ce travail vise uniquement à démontrer la faisabilité d'un polarimètre avec un unique modulateur, on utilisera la première méthode.

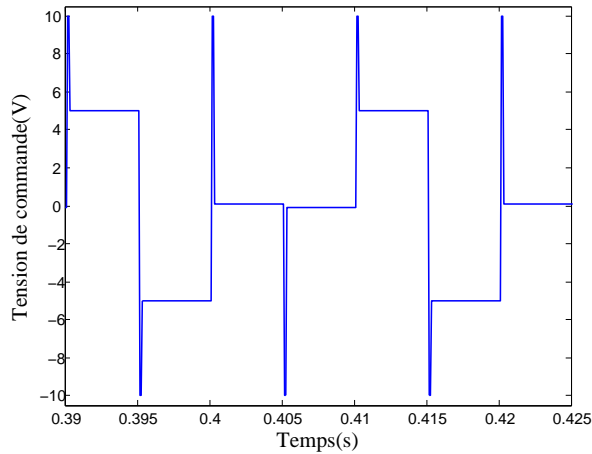
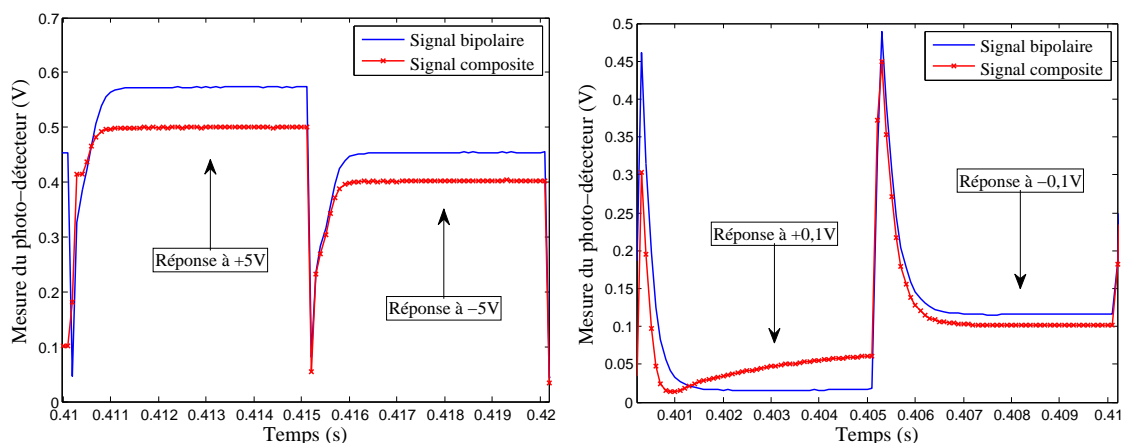


FIGURE 4.8 – Signal de commande composite permettant l'acquisition des trois modes de polarisation nécessaires à l'analyse de la polarisation linéaire. Les niveaux de tensions de la composante carrée du signal de commande sont $+5V$, $-5V$, $+0,1V$, $-0,1V$.

4.3.3 Caractérisation finale

On procède maintenant à une nouvelle caractérisation avec le signal de commande composite. Le banc utilisé est le même que précédemment, Fig. 4.1. Les conditions d'utilisation sont également les mêmes, à l'exception du signal de commande. Le but de cette

caractérisation est de vérifier le bon fonctionnement du modulateur dans sa nouvelle utilisation, et plus particulièrement vérifier que l'on atteint bien un régime établi pour chacune des tensions de commande. La figure 4.9 présente les réponses temporelles aux tensions de commande $\pm 5V$, et $\pm 0,1V$ avec un signal de commande composite. A titre indicatif, la figure reprend également les courbes de réponse du modulateur soumis aux mêmes tensions pour un signal de commande bipolaire.



(a) Réponse pour un signal de commande de $\pm 5V$ (b) Réponse pour un signal de commande de $\pm 0,1V$

FIGURE 4.9 – Courbes de réponses temporelles du modulateur pour des tensions de commande de $\pm 5V$ (a) et $\pm 0,1V$ (b), pour le vecteur de Stokes \mathbf{S}_{135} en entrée. Considérer les autres vecteurs de Stokes en entrée conduit aux mêmes conclusions.

Les courbes de réponses montrent que le modulateur atteint bien un régime établi pour les tensions de commande $-5V$, $-0,1V$, et $+5V$. Donc le signal de commande composite est validé. Mais les courbes montrent d'autres informations sur le comportement du modulateur. Tout d'abord on observe que pour une tension de commande de $+0,1V$ dans un signal de commande bipolaire, le modulateur atteint bien un régime établi. En revanche, cette même tension de $+0,1V$, incorporée dans le signal composite, ne permet pas au modulateur d'atteindre un régime établi. Cette observation conforte le choix précédent d'exclure la plage de tension $[0V, +1V]$. Un autre élément intéressant vient de la comparaison entre les niveaux des réponses pour un signal de commande bipolaire et un signal composite. Pour une même tension de commande, la réponse du modulateur peut différer entre les deux types de commande. Le phénomène est facilement observable sur la figure 4.9(a). Or la seule différence entre les deux commandes se situe au niveau du nombre de tensions différentes dans le signal carré. Donc l'état dans lequel se trouve le modulateur dépend à la fois de la tension de commande courante, mais également de l'état dans lequel se trouvait la modulateur avant l'application de cette tension.

4.3.4 Conditionnement de la MRD

Compte tenu du fait que le signal de commande composite est validé, on établit expérimentalement la MRD suivante :

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} 0,77 & -0,25 & 0,61 \\ -0,71 & 0,18 & 0,54 \\ -1,45 & 1,83 & -0,38 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Utiliser une lame demi-onde parfaite avec les angles $\{\theta_i\} = \{45^\circ, 22,5^\circ, 0^\circ\}$ donnerait la MRD suivante :

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

On compare l'utilisation de la MRD expérimentale et la MRD théorique en utilisant le calcul de conditionnement de matrice présenté précédemment. Le résultat est présenté Fig. 4.10. On rappelle qu'avec une lame demi-onde idéale, la configuration optimale pour analyser la polarisation linéaire est de positionner la lame aux angles $\{\theta_i\} = \{0^\circ, 30^\circ, 60^\circ\}$, et que le CN vaut dans ce cas $\sqrt{2}$. Dans notre cas, et selon les données du constructeur, l'angle de rotation disponible pour la lame demi-onde équivalente à la cellule FLC n'est que de $[0^\circ, 45^\circ]$. Pour les angles extrémaux $\{0^\circ, 45^\circ\}$, le CN minimum est obtenu avec la configuration $\{\theta_i\} = \{0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ\}$ et vaut 2,41. Si la plage angulaire est réduite à $[0,5^\circ, 41,5^\circ]$, en accord avec les mesures effectuées précédemment, le minimum est obtenu pour la configuration $\{\theta_i\} = \{0,5^\circ, 20,9^\circ, 41,5^\circ\}$ et vaut 2,98. Enfin, dans la configuration retenue de $\{\theta_i\} = \{0,5^\circ, 31,2^\circ, 41,5^\circ\}$, le CN vaut 4,36, ce qui est suffisamment proche de 2,98 pour considérer le conditionnement de la MRD comme acceptable.

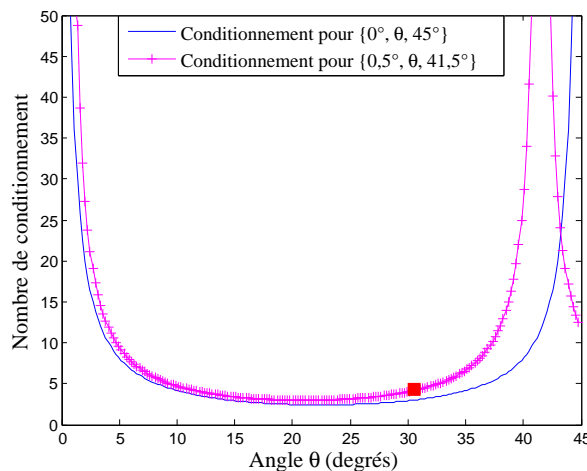


FIGURE 4.10 – Conditionnement de la MRD dans le cas idéal et dans le cas expérimental. Le point rouge représente l'état du système final.

4.4 Validation expérimentale

4.4.1 Validation préliminaire

Le banc servant à la validation est le même que celui utilisé jusqu'à maintenant, Fig. 4.1. Le modulateur est commandé par le signal composite, et la lame demi-onde qui la précède tourne de manière à générer différents états de polarisation qui sont analysés par le modulateur.

Sur la figure 4.11, le graphique supérieur montre l'estimation de l'angle d'orientation ψ de la polarisation incidente et l'angle théorique en fonction de la position angulaire θ de la lame demi-onde. Les deux courbes se superposent relativement bien. La précision d'estimation est détaillée sur le graphique inférieur de la figure 4.11, représentant la simple soustraction mathématique entre l'angle estimé et l'angle théorique. L'erreur varie autour d'une moyenne de $0,25^\circ$ avec une variation de $1,27^\circ$ entre le maximum et le minimum. Nous considérons cette précision comme bonne, bien que nous n'ayons pas trouvé dans la littérature de résultats avec lesquels effectuer une comparaison. Les oscillations sur la courbe d'erreur peuvent être dues à un problème de géométrie de la lame demi-onde, ou à un défaut dans la mécanique de rotation.

L'estimation du *DOLP* de l'onde incidente est présentée Fig. 4.12. En théorie, avec notre banc, le vecteur de Stokes en entrée du modulateur est totalement linéairement polarisé, quelle que soit la position de la lame demi-onde en rotation. Le *DOLP* de l'onde incidente est donc en théorie constant et égal à 1. En pratique, le *DOLP* varie entre 0.991 et 0.975. L'erreur d'estimation peut être due à une DRM non optimale, un défaut dans la mécanique de rotation, ou encore un défaut dans la géométrie de la lame elle-même, comme pour l'estimation de l'angle.

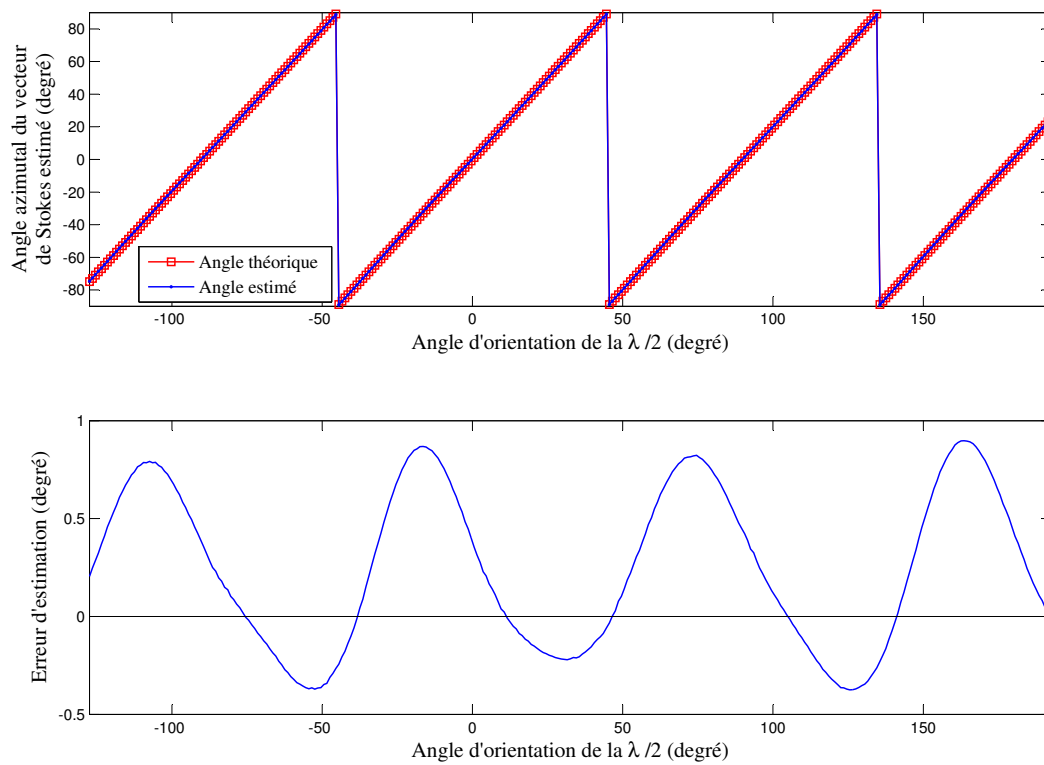


FIGURE 4.11 – Angle azimutal du vecteur de Stokes estimé en sortie de la lame demi-onde présenté conjointement avec l'erreur d'estimation sur l'angle.

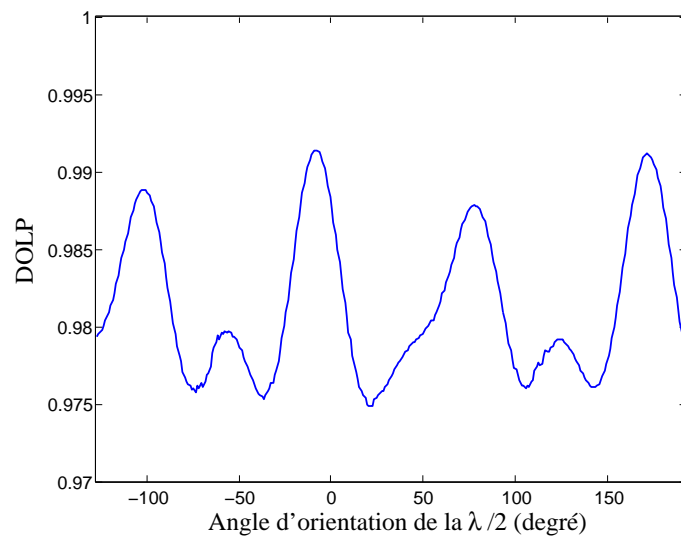


FIGURE 4.12 – Degré de polarisation linéaire calculé à partir du vecteur de Stokes estimé en sortie de la lame demi-onde.

4.4.2 Validation en conditions imageantes

La figure 4.13 présente le banc mis en place pour valider le fonctionnement du modulateur en conditions imageantes. Le laser He-Ne produit un faisceau polarisé linéairement. Une lame quart-d'onde est orientée de manière à produire une polarisation incidente totalement circulaire, afin d'obtenir un $DOLP_P$ nul. Un diffuseur est inséré entre la lame quart-d'onde et l'échantillon afin de s'affranchir du speckle. Ce diffuseur est constitué d'un disque tournant. La polarisation du faisceau émergent de l'échantillon est analysée par le modulateur formé de la cellule FLC et du polariseur linéaire, puis l'image est acquise par la caméra CCD. L'échantillon présenté Fig. 4.14 est constitué de trois bandes de polariseurs linéaires fixées sur une lame de microscope. Pour des raisons techniques, la direction d'analyse, définie par l'orientation du polariseur P_2 du modulateur, n'est plus un axe remarquable (horizontal ou vertical). Pour fixer l'origine des angles, l'échantillon est orienté de manière à ce que l'un des trois polariseurs (choisi arbitrairement) soit aligné avec la direction d'analyse. Les trois bandes de polariseurs sont orientées à 0° , -45° , 90° . L'échantillon est monté sur une platine de rotation afin de pouvoir l'étudier dans différentes orientations. Cependant, de manière à s'affranchir des problèmes exposés Chapitre 3, la polarisation n'est pas analysée pendant que l'échantillon est en mouvement. Lorsque l'échantillon est dans une orientation donnée, une séquence de 100 images de vecteurs de Stokes, $DOLP$, et d'angle est produite. L'échantillon est tourné successivement sur une plage de 360° avec un pas de 10° . La polarisation est analysée à une cadence de 150 images par secondes, avec des images de taille 320×240 pixels sur 8 bits. Des images de vecteurs de Stokes, d'angle, et de $DOLP$ sont présentées Fig. 4.15, 4.16, et 4.17.

Observons d'abord les images de Stokes reconstruites. Fig. 4.15, les polariseurs orientés à 0° et 90° ont une forte intensité sur la composante s_1 du vecteur de Stokes, alors que le polariseur à -45° est sombre. L'inverse est observable sur la composante s_2 , ce qui correspond à la théorie. Par ailleurs, le $DOLP$ des différents polariseurs Fig. 4.17 est élevé, ce qui correspond à la théorie prévoyant un $DOLP$ de 1.

L'angle estimé correspond également à l'angle attendu, Fig. 4.16. Les polariseurs sont bien estimés à -45° les uns des autres, avec le polariseur de référence correctement estimé à 0° . Le bord des images est fortement bruité en raison de la faible intensité mesurée sur les modes de polarisation. Ceci est dû au profil gaussien du faisceau, centré au milieu de l'image. Au centre de l'image, autour des polariseurs, un angle de polarisation est estimé alors que la polarisation est normalement circulaire. Il y a donc une composante linéaire résiduelle en sortie de la lame quart-d'onde. Pour connaître la proportion de cette composante linéaire, il faut observer la figure d'angle conjointement avec la figure de $DOLP$. En effet, on observe Fig. 4.17 que le $DOLP$ autour des polariseurs est très faible. Cela signifie que la composante linéaire présente en sortie de la lame quart-d'onde est très faible. Donc la lumière est bien polarisée majoritairement circulairement.

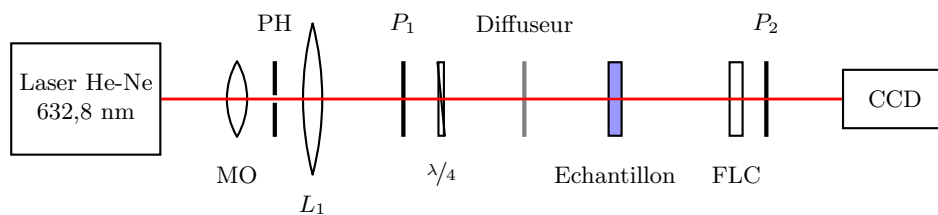


FIGURE 4.13 – Banc utilisé pour la validation 2D. Elargisseur : Objectif de microscope (MO), Trou calibré (PH), Lentille (L_1). Polariseurs linéaires statiques orientés à 0° (P_1 et P_2) Lamme quart-d'onde ($\lambda/4$), Cellule à cristaux liquides ferroélectriques (FLC).



FIGURE 4.14 – Echantillon utilisé pour la validation en conditions imageantes. L'échantillon est constitué de trois bandes de polariseurs linéaires fixées sur une lame de microscope par de l'adhésif.

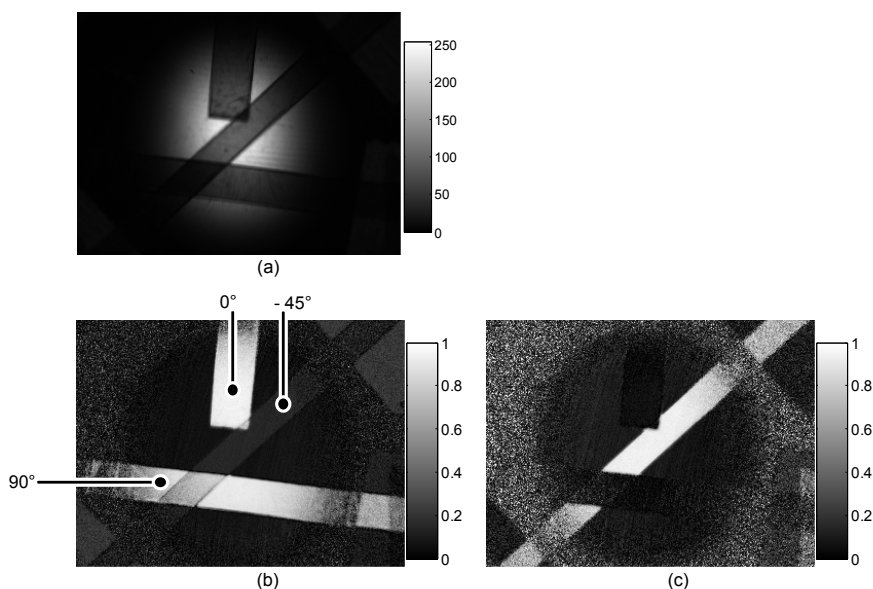


FIGURE 4.15 – Composantes linéaires du vecteur de Stokes estimées à 150 images par secondes, pour un échantillon orienté à 0° . (a) : s_0 , (b) : $|s_1|/s_0$, (c) : $|s_2|/s_0$. Les orientations de chacun des polariseurs sont précisées sur la sous-figure (b).

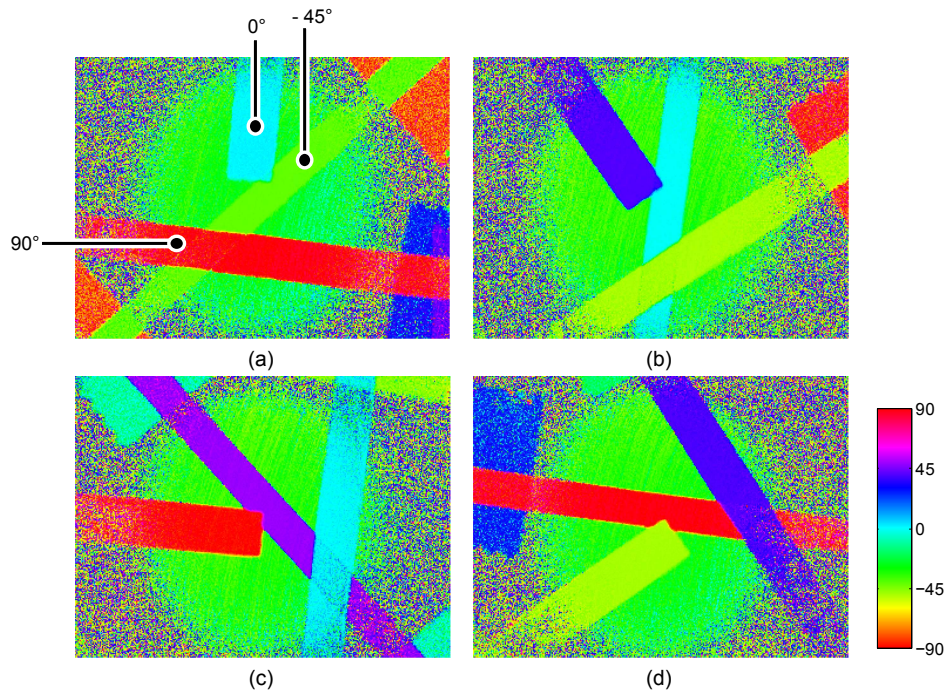


FIGURE 4.16 – Angle estimé à 150 images par secondes pour différentes orientations de l'échantillon : 0° (a), 40° (b), 90° (c), 130° (d).

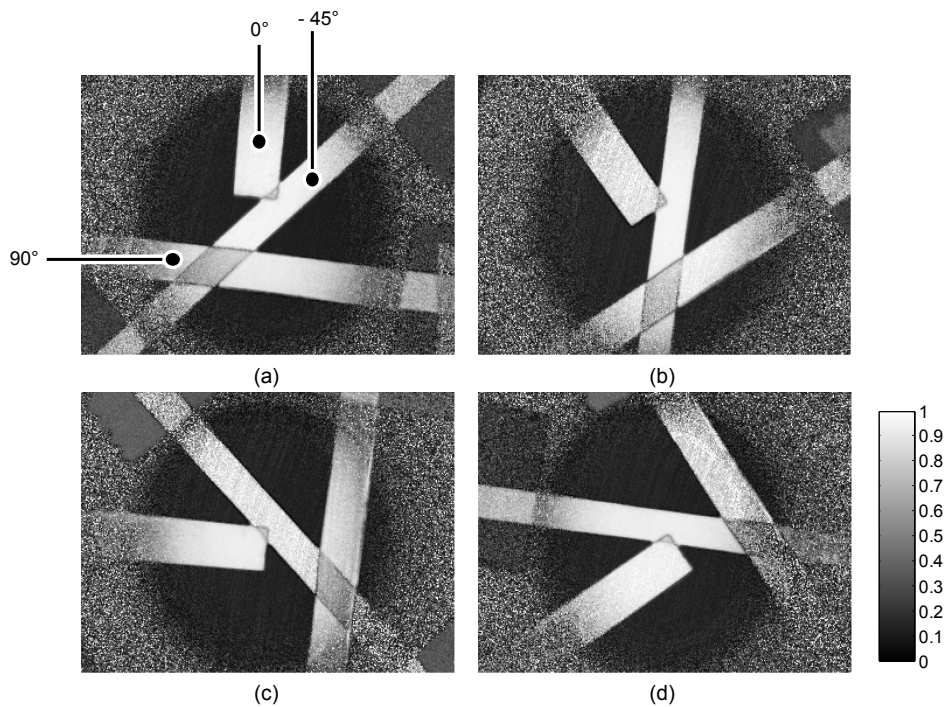


FIGURE 4.17 – DOLP estimé à 150 images par secondes pour différentes orientations de l'échantillon : 0° (a), 40° (b), 90° (c), 130° (d).

Pour quantifier l'estimation, des régions d'intérêts (ROI) rectangulaires de 27×17 pixels sont définies arbitrairement sur les trois bandes de polariseurs, comme présenté Fig. 4.18. Pour chaque image de la séquence de 100 images produite, une moyenne spatiale et un écart type spatial sur la ROI sont évalués. La figure 4.19 montre l'évolution de ces grandeurs en fonction de l'indice de l'image dans la séquence, c'est-à-dire en fonction du temps, pour un échantillon orienté à 0° .

L'erreur dépend de l'orientation des polariseurs. L'erreur spatiale moyenne de l'angle atteint jusqu'à $2,75^\circ$ avec une moyenne à $2,1^\circ$, ce qui est supérieur à ce qui a été obtenu en mono-dimensionnel. Une observation similaire peut être faite au sujet du *DOLP*. L'erreur atteint 0,09 pour l'un des polariseurs. Même si une part de l'erreur peut être attribuée à un mauvais calibrage du banc optique, une grande partie de cette erreur est due au bruit. Figure 4.17, les polariseurs sont plus ou moins bruités en fonction de leur orientation. Le bruit est dû en partie au diffuseur, composé d'un disque tournant, responsable d'une variation d'intensité de 3,5% pour une dépolarisation de la composante linéaire de 1,5%. De plus le diffuseur n'agit pas de manière isotrope sur les différentes composantes polarimétriques. Certaines directions sont plus bruitées que d'autres. Enfin, l'uniformité du faisceau incident joue aussi un rôle dans le bruit. Par exemple, le polariseur en haut à droite Fig. 4.17(d) est au bord du faisceau gaussien, donc il est éclairé par une faible intensité. Ce polariseur affiche une erreur moyenne sur le *DOLP* de 0,16 avec un maximum à 0,3. Mais si l'on considère le polariseur au centre de la figure 4.17(c), quasiment dans la même orientation que le polariseur précédent, mais éclairé par un faisceau de plus forte intensité car plus au centre du faisceau gaussien, l'erreur moyenne sur le *DOLP* n'est plus que de 0,08 avec un maximum à 0,19. Donc l'intensité du faisceau incident influence le bruit sur l'image. Plus l'intensité est faible, plus le bruit est élevé.

En résumé, une erreur moyenne de $2,1^\circ$ sur l'angle et de 0,09 sur le *DOLP* est obtenue.

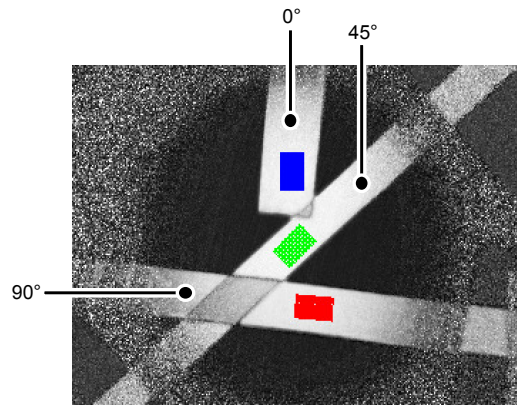


FIGURE 4.18 – Régions d'intérêt définies pour quantifier l'estimation, présentées sur une image de *DOLP*.

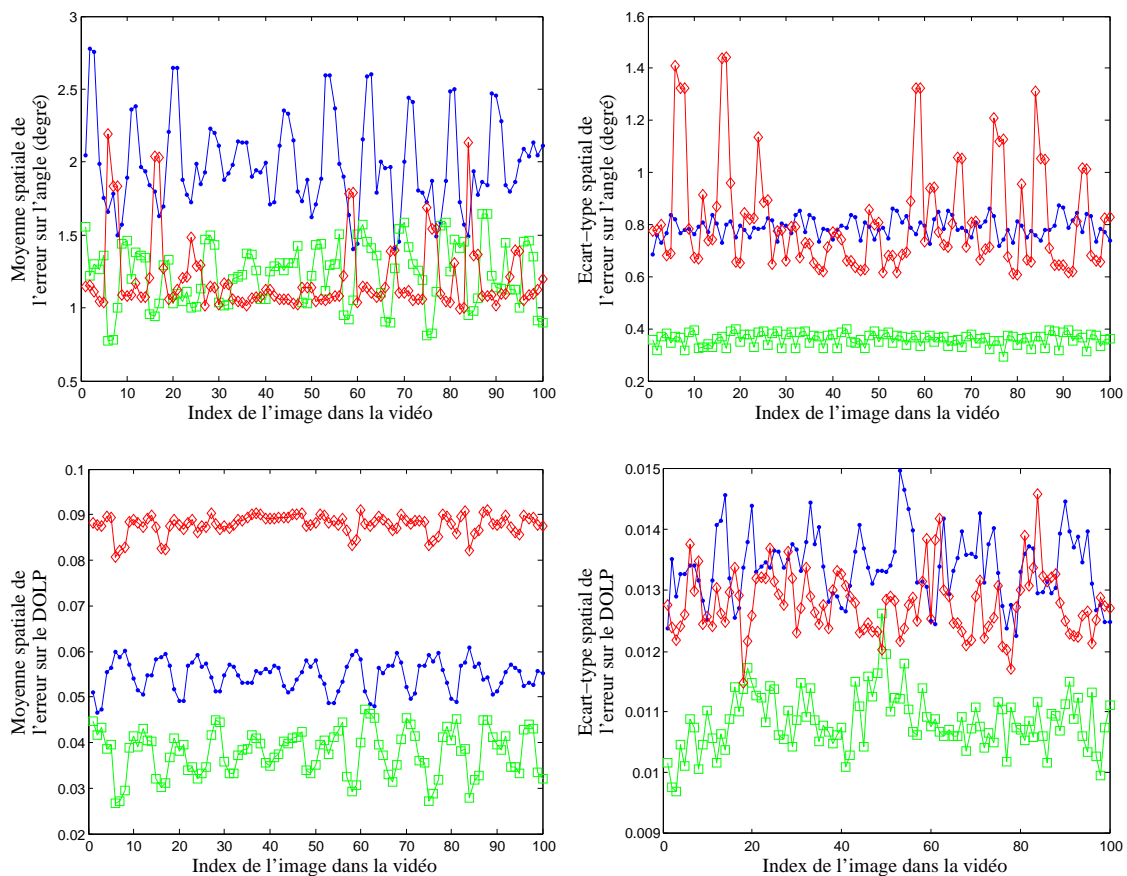


FIGURE 4.19 – Courbes de moyenne et d'écart type sur l'erreur d'estimation, selon les régions d'intérêts définies à la figure 4.18. Pour ces données, l'échantillon est statique et orienté comme sur la figure 4.18.

4.5 Discussion et pistes d'amélioration

Le système peut être amélioré selon trois axes principaux. Tout d'abord, étudier le comportement du système en fonction de l'ordre des tensions dans le signal de commande, et étudier son influence sur le conditionnement de la MRD. Une première étude peut permettre d'identifier une séquence de tensions permettant d'obtenir un CN acceptable vis-à-vis de l'application visée, mais il se peut que changer l'ordre de ces tensions dans la séquence de commande sans changer les tensions elles-mêmes améliore les performances du système.

Un deuxième axe repose sur l'étude approfondie du comportement du modulateur dans la plage de tensions $[0V, +1V]$. Cette plage de tensions a été écartée car le modèle actuellement utilisé ne correspond pas à la réalité. Mais en se basant sur un modèle plus général de lame, il est envisageable que cette plage de tensions devienne exploitable.

Un troisième axe d'amélioration vise à augmenter la vitesse d'acquisition. Trois méthodes sont envisageables. La première repose sur l'utilisation de la plage $[0V, +1V]$ et est donc conditionnée par le fait que cette plage puisse être exploitable. Le signal composite envoyé au modulateur contient les quatre tensions $\pm 5V, \pm 0,1V$. Seulement, la tension $+0,1V$ est ignorée malgré le fait qu'elle soit bel et bien appliquée au modulateur. Donc si la plage $[0V, +1V]$ devient exploitable, alors le même signal composite fournirait quatre tensions utiles au lieu de trois. Par conséquent, la cadence d'acquisition passerait de 150 images par secondes à 200 images par secondes en continuant à utiliser le modulateur dans les mêmes conditions. Une deuxième méthode vise à n'inclure en tout et pour tout dans le signal de commande que les trois tensions utiles et à dimensionner les temps d'application de chaque tension (et de l'impulsion qui lui est associée) de manière à ce que le signal global soit à moyenne nulle. La troisième méthode pour accroître la vitesse d'acquisition consiste à augmenter la fréquence du signal de commande et augmenter la vitesse d'acquisition de la caméra. Des travaux antérieurs [30] ont montré qu'avec une commande bipolaire, le modulateur fonctionne correctement jusqu'à une cadence permettant d'envisager l'analyse de la polarisation à 2000 images par seconde. Cependant, le présent travail s'inscrivant dans le cadre de la démonstration de faisabilité d'un polarimètre de Stokes utilisant un unique modulateur FLC pour tout élément polarisant, nous avons préféré rester à une fréquence de commande plus faible afin d'atteindre plus aisément un régime établi à chaque tension de commande. Cependant, étudier précisément le comportement du système aux alentours des 2000 images par seconde peut s'avérer intéressant.

4.6 Conclusion

Le polarimètre est maintenant capable d'analyser la totalité de la polarisation linéaire à une cadence de 150Hz. Dans le cas d'une utilisation avec des signaux moyennés spatiale-

ment, la précision est de 2% sur le *DOLP* et $0,25^\circ$ sur l'angle. En conditions imageantes, la précision est de 9% sur le *DOLP* et de $2,1^\circ$ sur l'angle. Par ailleurs ce chapitre montre que les cristaux liquides ferroélectriques peuvent être utilisés en dehors de leur comportement bistable du moment que la commande électrique est correctement dimensionnée. Utilisés à leur longueur d'onde nominale, ces cristaux liquides affichent un comportement proche d'une lame demi-onde pour la plupart des tensions de commande. Une étape supplémentaire sera franchie dans le chapitre suivant qui montre que les modulateurs à cristaux liquides ferroélectriques peuvent sous certaines conditions être utilisés pour analyser la totalité de la polarisation incidente.

Chapitre 5

Extension au quatrième paramètre de Stokes

Dans le chapitre précédent, il a été montré que notre cellule à CL ferroélectriques affiche un comportement proche de celui d'une lame demi-onde à sa longueur d'onde nominale de 633nm. Ce travail est en accord avec l'équation 5.1, rapportée dans [74], donnant l'évolution de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde d'utilisation des cristaux liquides.

$$\Delta n(\lambda).d = \frac{\lambda_0}{2} + C.d.\left(\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_0^2}\right) \quad (5.1)$$

avec d l'épaisseur de la cellule ($3\mu m$ dans notre cas), C une constante liée aux cristaux, λ_0 et λ respectivement la longueur d'onde nominale et la longueur d'onde d'utilisation des cristaux. Nous ne disposons pas de la valeur de la constante C propre à notre modulateur. Cependant, la technologie que nous utilisons est très similaire à celle étudiée par Jaulin [29]. Nous choisissons donc d'utiliser le terme $C.d$ identifié dans ces travaux, à savoir $3.10^7 nm^3$. On constate bien que pour $\lambda = \lambda_0$, on obtient une biréfringence de $\lambda_0/2$. On détermine le retard φ d'une lame à partir de sa biréfringence à l'aide de l'équation (5.2), ce qui pour la longueur d'onde nominale donne un retard de 180° .

$$\varphi = \frac{360}{\lambda}.\Delta n(\lambda).d \quad (5.2)$$

Si on utilise la cellule FLC à une longueur d'onde différente de λ_0 , le comportement est a priori différent de celui d'une lame demi-onde et le polarimètre devrait alors être capable d'analyser la totalité de la polarisation incidente. Nous allons utiliser le modulateur à 532nm, ce qui signifie que la lame équivalente n'est plus une $\lambda/2$ mais une $\lambda/1,53$, c'est à dire une lame avec un retard de $234,7^\circ$. Le présent chapitre développe la démarche entreprise pour montrer dans quelles limites le polarimètre peut être utilisé pour analyser la totalité de la polarisation. Dans un premier temps, Section 5.1, nous exposons le principe de

détermination des paramètres de Stokes du faisceau incident, avant de détailler l'estimation de l'angle d'orientation et du retard du modulateur dans la Section 5.2. Nous présentons ensuite la caractérisation du modulateur avec un signal bipolaire en Section 5.3 afin de se faire une première idée du comportement du composant à 532nm. S'en suit une deuxième phase d'étude avec un signal de commande composite, Section 5.4, qui permet de mettre en évidence les nuances de comportement lorsque le modulateur est commandé avec un signal bipolaire ou un signal composite. C'est dans cette section que le signal de commande final est défini. Il est toutefois encore légèrement modifié Section 5.5 afin d'améliorer les conditions d'utilisation du modulateur. On établit alors la matrice de réduction des données. Ensuite prennent place les phases de validation de la MRD, d'abord avec des signaux moyennés spatialement Section 5.6, puis en conditions imageantes Section 5.7. Enfin, une discussion sur les résultats obtenus et les pistes d'amélioration est présentée Section 5.8.

5.1 Principe de détermination des paramètres de Stokes

Le principe de reconstruction des paramètres de Stokes est le même que celui utilisé dans la section précédente. On représente dans un premier temps la cellule FLC par la matrice de Mueller d'une lame quelconque de retard φ et d'angle d'orientation θ , Eq. 5.3.

$$\mathbf{M}(\varphi, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \cos \varphi \sin^2 2\theta & (1 - \cos \varphi) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin \varphi \sin 2\theta \\ 0 & (1 - \cos \varphi) \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta + \cos \varphi \cos^2 2\theta & \sin \varphi \cos 2\theta \\ 0 & \sin \varphi \sin 2\theta & -\sin \varphi \cos 2\theta & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Le modulateur étant constitué d'une cellule FLC et d'un polariseur linéaire fixe, considéré horizontal pour l'instant et servant de référence des angles, on en déduit l'intensité qui est mesurée par un photo-détecteur en sortie du modulateur pour un vecteur de Stokes incident \mathbf{S}_{in} :

$$I(\varphi, \theta) = \frac{1}{2} [s_{in0} + s_{in1}(\cos^2 2\theta + \cos \varphi \sin^2 2\theta) + s_{in2}(1 - \cos \varphi) \sin 2\theta \cos 2\theta - s_{in3} \sin \varphi \sin 2\theta] \quad (5.4)$$

Si on considère quatre intensités $I_1(\varphi_1, \theta_1)$, $I_2(\varphi_2, \theta_2)$, et $I_3(\varphi_3, \theta_3)$, et $I_4(\varphi_4, \theta_4)$ mesurées pour quatre couples (φ, θ) différents, la relation suivante peut être établie :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} s_{in0} \\ s_{in1} \\ s_{in2} \\ s_{in3} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

où la matrice \mathbf{B} du système est :

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos^2 2\theta_1 + \cos \varphi_1 \sin^2 2\theta_1 & (1 - \cos \varphi_1) \sin 2\theta_1 \cos 2\theta_1 & -\sin \varphi_1 \sin 2\theta_1 \\ 1 & \cos^2 2\theta_2 + \cos \varphi_2 \sin^2 2\theta_2 & (1 - \cos \varphi_2) \sin 2\theta_2 \cos 2\theta_2 & -\sin \varphi_2 \sin 2\theta_2 \\ 1 & \cos^2 2\theta_3 + \cos \varphi_3 \sin^2 2\theta_3 & (1 - \cos \varphi_3) \sin 2\theta_3 \cos 2\theta_3 & -\sin \varphi_3 \sin 2\theta_3 \\ 1 & \cos^2 2\theta_4 + \cos \varphi_4 \sin^2 2\theta_4 & (1 - \cos \varphi_4) \sin 2\theta_4 \cos 2\theta_4 & -\sin \varphi_4 \sin 2\theta_4 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

De la même manière que dans le chapitre précédent, si la matrice \mathbf{B} est inversible, les paramètres du vecteur de Stokes incident peuvent être estimés en appliquant l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} s_{in0} \\ s_{in1} \\ s_{in2} \\ s_{in3} \end{bmatrix} = \mathbf{B}^{-1} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

A l'instar de ce qui a été mentionné dans le chapitre précédent pour l'analyse de la polarisation linéaire, davantage de modes de polarisation peuvent être acquis de manière à accroître la précision de la reconstruction des paramètres de Stokes. La matrice \mathbf{B} est alors de dimension $N \times 4$ avec N le nombre de modes de polarisation acquis. Cependant, pour les mêmes raisons que dans le chapitre précédent, nous nous limiterons à une matrice 4×4 .

5.2 Principe de détermination de l'angle et du retard

Dans cette section, nous cherchons à estimer l'angle d'orientation θ et le retard φ de la lame équivalente présentée Eq. (5.3). A l'aide d'un générateur opto-mécanique d'états de polarisation, les vecteurs de Stokes suivants sont générés.

$$\{\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_{90}, \mathbf{S}_{45}, \mathbf{S}_{135}, \mathbf{S}_d, \mathbf{S}_g\} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \right\} \quad (5.8)$$

Ces vecteurs sont introduits en entrée du système soumis à une tension de commande

donnée. On obtient ainsi l'ensemble d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{ll} I_0 = \frac{1}{2}[1 + \cos^2 2\theta + \cos \varphi \sin^2 2\theta] & \text{pour } \mathbf{S}_0 \\ I_{90} = \frac{1}{2}[1 - \cos^2 2\theta - \cos \varphi \sin^2 2\theta] & \text{pour } \mathbf{S}_{90} \\ I_{45} = \frac{1}{2}[1 + (1 - \cos \varphi) \sin 2\theta \cos 2\theta] & \text{pour } \mathbf{S}_{45} \\ I_{135} = \frac{1}{2}[1 - (1 - \cos \varphi) \sin 2\theta \cos 2\theta] & \text{pour } \mathbf{S}_{135} \\ I_d = \frac{1}{2}[1 - \sin \varphi \sin 2\theta] & \text{pour } \mathbf{S}_d \\ I_g = \frac{1}{2}[1 + \sin \varphi \sin 2\theta] & \text{pour } \mathbf{S}_g \end{array} \right. \quad (5.9)$$

Chaque intensité est normalisée par rapport au maximum d'intensité I_{max} du faisceau lumineux.

Du système (5.9) peuvent être extraits θ et φ :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{1+I_{90}-I_0}{I_{45}-I_{135}} \right) & \text{pour } I_{45} \neq I_{135} \\ \theta = 0 \left[\frac{\pi}{4} \right] & \text{pour } I_{45} = I_{135} \text{ et } \varphi \neq 0 [2\pi] \\ \theta \text{ indéterminé} & \text{pour } I_{45} = I_{135} \text{ et } \varphi = 0 [2\pi] \end{array} \right. \quad (5.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \varphi = \pm \arctan \left(\frac{\sqrt{(I_g-I_d)^2 + \left(\frac{(I_{45}-I_{135})(I_g-I_d)}{1+I_{90}-I_0} \right)^2}}{\frac{(I_g-I_d)^2}{1+I_{90}-I_0} - 1} \right) & \text{pour } \frac{(I_g-I_d)^2}{1+I_{90}-I_0} - 1 \neq 0 \\ \varphi = \pi [2\pi] & \text{pour } \frac{(I_g-I_d)^2}{1+I_{90}-I_0} - 1 = 0 \\ \varphi = 0 [2\pi] & \text{pour } 1 + I_{90} - I_0 = 0 \\ \varphi \text{ indéterminé} & \text{pour } \theta = 0 \left[\frac{\pi}{2} \right] \end{array} \right. \quad (5.11)$$

Dans le calcul de l'angle θ , Eq. (5.10), une indétermination apparaît si les termes $(1 + I_{90} - I_0)$ et $(I_{45} - I_{135})$ sont tout les deux nuls, c'est à dire si φ est nul à 2π près ou si θ est nul à π près. Or nous vérifions expérimentalement, dans des résultats présentés ultérieurement, que ces conditions ne sont jamais atteintes. Par conséquent, nous ne cherchons pas à résoudre l'indétermination.

Pour le calcul du retard φ , Eq. (5.11), il y a plusieurs cas d'indétermination liés à l'annulation du numérateur et du dénominateur d'une des fractions intervenant dans l'équation. Au final, il y a indétermination si φ est nul à π près ou si θ est nul à $\pi/2$ près. Là encore, nous vérifions expérimentalement, dans des résultats présentés ultérieurement, que ces conditions ne sont jamais atteintes. Par conséquent, nous ne cherchons pas à résoudre l'indétermination.

L'évaluation de l'angle et du retard permet notamment de vérifier que la cellule à cristaux liquides ne se comporte plus comme une lame demi-onde à 532nm. Injectés dans

l'équation (5.6), ils permettent également d'établir la MRD. Cependant, comme dans le chapitre précédent, en pratique la MRD est calculée directement à partir des intensités mesurées par le photo-détecteur, comme présenté ci-dessous.

On considère une MRD de la forme :

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \alpha(V_1) & \beta(V_1) & \gamma(V_1) & \zeta(V_1) \\ \alpha(V_2) & \beta(V_2) & \gamma(V_2) & \zeta(V_2) \\ \alpha(V_3) & \beta(V_3) & \gamma(V_3) & \zeta(V_3) \\ \alpha(V_4) & \beta(V_4) & \gamma(V_4) & \zeta(V_4) \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Par conséquent, l'équation 5.4 devient :

$$I(V) = \frac{1}{2} [s_{in0} \cdot \alpha(V) + s_{in1} \cdot \beta(V) + s_{in2} \cdot \gamma(V) - s_{in3} \cdot \zeta(V)] \quad (5.13)$$

Donc le système d'équations (5.9) s'écrit maintenant :

$$\left\{ \begin{array}{ll} I_0(V) = \frac{1}{2}[\alpha(V) + \beta(V)] & \text{pour } \mathbf{S}_0 \\ I_{90}(V) = \frac{1}{2}[\alpha(V) - \beta(V)] & \text{pour } \mathbf{S}_{90} \\ I_{45}(V) = \frac{1}{2}[\alpha(V) + \gamma(V)] & \text{pour } \mathbf{S}_{45} \\ I_{135}(V) = \frac{1}{2}[\alpha(V) - \gamma(V)] & \text{pour } \mathbf{S}_{135} \\ I_d(V) = \frac{1}{2}[\alpha(V) - \zeta(V)] & \text{pour } \mathbf{S}_d \\ I_g(V) = \frac{1}{2}[\alpha(V) + \zeta(V)] & \text{pour } \mathbf{S}_g \end{array} \right. \quad (5.14)$$

D'après ce système, on remarque qu'il y a plusieurs équations possibles pour déterminer le paramètre $\alpha(V)$, par exemple :

$$\alpha(V) = I_0(V) + I_{90}(V) \quad (5.15)$$

$$\alpha(V) = I_{45}(V) + I_{135}(V) \quad (5.16)$$

$$\alpha(V) = I_g(V) + I_d(V) \quad (5.17)$$

$$\alpha(V) = \frac{I_0(V) + I_{90}(V) + I_{45}(V) + I_{135}(V) + I_g(V) + I_d(V)}{3} \quad (5.18)$$

La matrice de réduction des données s'exprime alors en fonction de α de la manière suivante :

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \alpha(V_1) & I_0(V_1) - I_{90}(V_1) & I_{45}(V_1) - I_{135}(V_1) & I_g(V_1) - I_d(V_1) \\ \alpha(V_2) & I_0(V_2) - I_{90}(V_2) & I_{45}(V_2) - I_{135}(V_2) & I_g(V_2) - I_d(V_2) \\ \alpha(V_3) & I_0(V_3) - I_{90}(V_3) & I_{45}(V_3) - I_{135}(V_3) & I_g(V_3) - I_d(V_3) \\ \alpha(V_4) & I_0(V_4) - I_{90}(V_4) & I_{45}(V_4) - I_{135}(V_4) & I_g(V_4) - I_d(V_4) \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

avec $\alpha(V_i)$ pouvant s'exprimer selon l'une des équations mentionnées Eq. (5.15) à (5.18). Le choix du mode de calcul sera effectué plus tard, Section 5.3.4.

5.3 Caractérisation avec un signal bipolaire

A l'instar de ce qui a été réalisé dans le chapitre précédent à 633nm, on commence par une caractérisation avec un signal bipolaire pour avoir une première idée du comportement du modulateur à 532nm.

5.3.1 Présentation du banc optique

Une première caractérisation est lancée sans tenir compte de l'utilisation future du modulateur en conditions imageantes. La caractérisation est effectuée avec des signaux moyennés spatialement. Le banc présenté Fig. 5.1 est composé d'une source de lumière centrée sur 532nm, constituée de LED, dont le faisceau est conditionné par un élargisseur. Le polariseur P_1 reste statique et a pour fonction de fixer la polarisation dans un état donné. L'ensemble tournant $\{\lambda/2, \lambda/4\}$ permet de produire les vecteurs de Stokes mentionnés précédemment Eq. (5.8), qui sont ensuite analysés par le modulateur constitué de la cellule FLC et du polariseur linéaire P_2 . Le faisceau est enfin concentré sur un photo-détecteur par la lentille L_2 . Un filtre interférentiel centré à 532nm avec une largeur de 1nm est également utilisé pour s'affranchir des conséquences du large spectre de la source.

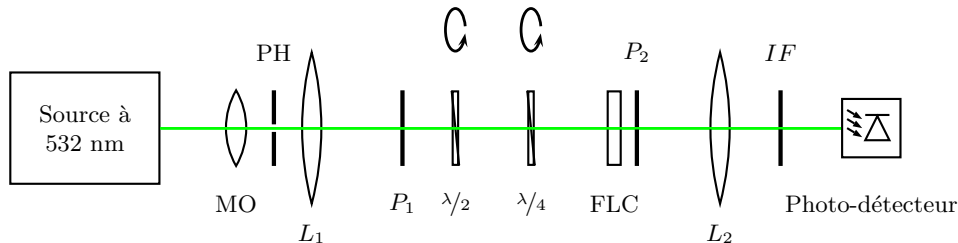


FIGURE 5.1 – Banc de caractérisation du modulateur. Elargisseur : Objectif de microscope (MO), Trou calibré (PH), Lentille L_1 . Polariseurs linéaires statiques orientés à 0° (P_1 et P_2), lame quart-d'onde orientable ($\lambda/4$), Cellule à cristaux liquides ferroélectriques (FLC), Lentille de focalisation L_2 , Filtre interférentiel à 532nm de largeur 1nm (IF).

Comme dans le chapitre précédent, on envoie dans un premier temps un signal de commande bipolaire au modulateur. Le signal a été présenté Fig. 4.2(b). Les niveaux de la composante en signal carré varient entre $-5V$ et $+5V$, et l'impulsion est de $\pm 10V$ pendant $200\mu s$. Les intensités mesurées pour chacun des vecteurs de Stokes Eq. (5.8) sont présentées Fig. 5.2. A partir de ces intensités, les Eq. (5.10) et (5.11) donnent respectivement l'angle et le retard, présentés Fig. 5.3 et 5.4. De la même manière que dans le chapitre précédent, on confondra volontairement l'intensité du faisceau lumineux avec la tension mesurée aux

bornes du photo-détecteur.

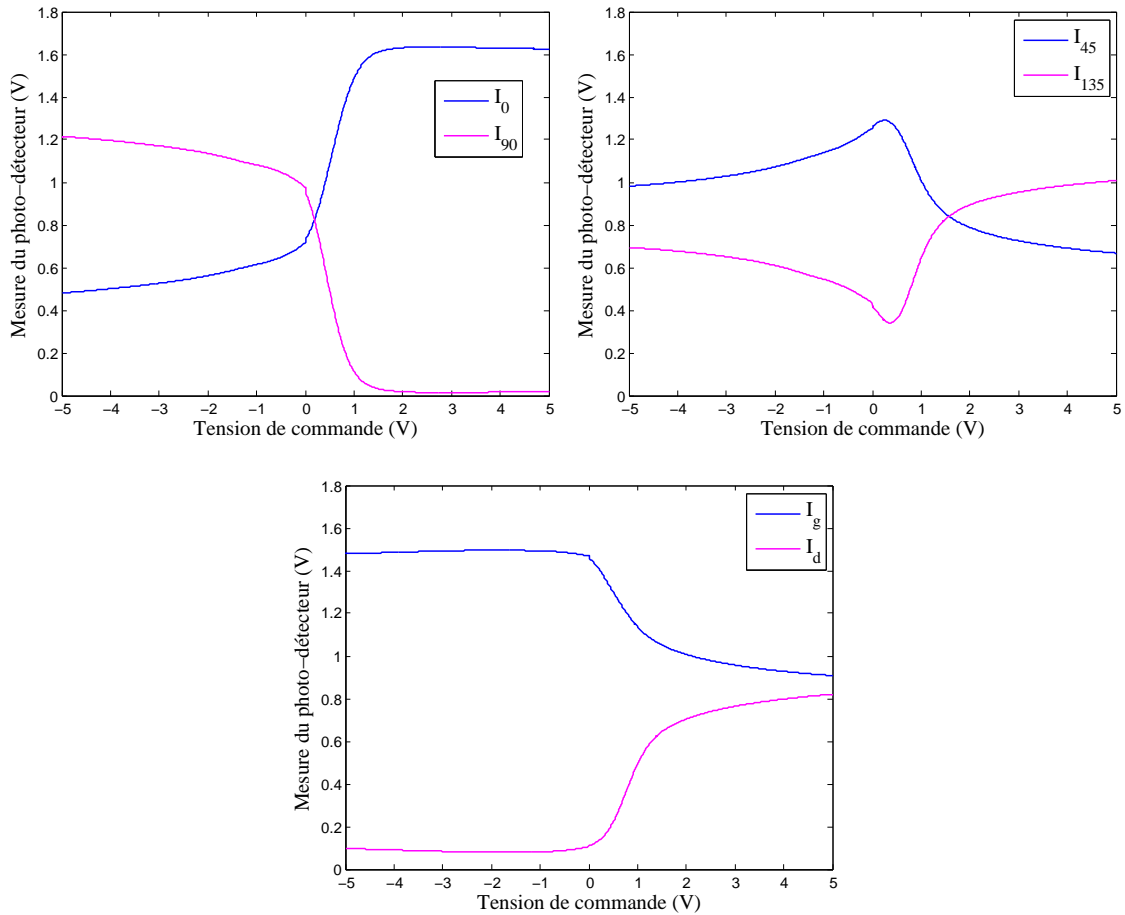


FIGURE 5.2 – Intensités mesurées en sortie du modulateur en fonction de la tension de commande pour différents vecteurs de Stokes en entrée, avec les relations définies Eq. 5.9

5.3.2 Analyse des mesures d'intensités

Au vu des intensités Fig. 5.2 on constate que le comportement de la cellule FLC n'est plus celui d'une lame demi-onde, ce qui correspond aux attentes. En effet, si la cellule FLC se comportait comme une lame demi-onde, l'ellipticité de l'onde incidente ne serait pas modifiée par le composant, et par conséquent les intensités I_d et I_g Fig. 5.2 seraient égales et constantes en fonction de la tension de commande. Par ailleurs, comme le système d'équations (5.9) le laissait présager, les courbes d'intensités relatives à deux modes de polarisation orthogonaux sont symétriques par rapport à leur moyenne. La mesure paraît donc sur ce point en accord avec la théorie.

Un deuxième constat peut être fait. Avant de positionner le modulateur sur le banc optique, nous avons mesuré l'intensité totale du faisceau lumineux et obtenu une tension aux

bornes du photo-détecteur de 1,96V. On constate qu'aucune des intensités présentées Fig. 5.2 n'atteint cette valeur. A priori cela peut signifier deux choses. Soit le modulateur absorbe une partie de la lumière quelle que soit la caractéristique de polarisation du faisceau incident, à l'image d'une densité neutre par exemple. Soit cela traduit une caractéristique polarimétrique du modulateur en ceci que la cellule à CL modifie la polarisation de telle manière que le faisceau en sortie du polariseur linéaire du modulateur ait une intensité plus faible que le faisceau incident. A titre d'exemple, on peut se placer dans le cas où la cellule à CL circulariserait partiellement la polarisation linéaire incidente. Une partie de cette composante circulaire serait alors filtrée par le polariseur linéaire du modulateur, et par conséquent l'intensité du faisceau à la sortie du modulateur serait inférieure à l'intensité du faisceau incident. Cet exemple mis à part, nous ne ferons aucune hypothèse à ce stade de l'étude du modulateur sur cette caractéristique polarimétrique.

5.3.3 Estimation de l'angle d'orientation et du retard

Le calcul de l'angle et du retard à partir des Eq. (5.10) et (5.11) nécessite de connaître le maximum d'intensité I_{max} du faisceau incident. On remarque au passage que la connaissance de I_{max} n'était pas requise dans le chapitre précédent étant donné que l'évaluation de l'angle, Eq. (4.15), était indépendante de cette valeur. La tension de photodiode correspondant à l'intensité maximale est mesurée et réinsérée dans les équations. Les figures 5.3 et 5.4 présentent la moyenne, la valeur maximale, et la valeur minimale de l'angle et du retard sur quatre mesures de caractérisation en fonction de la tension de commande. L'élément principal à noter est que le retard évolue en fonction de la tension de commande, ce qui est contraire aux hypothèses. Étant donné que la biréfringence varie en fonction de la longueur d'onde, on s'attendait à ce que le retard soit différent de 180° , angle correspondant à une lame demi-onde. Le retard devait théoriquement être constant à $234,7^\circ$. Par conséquent le choix des tensions de commande du modulateur qui servent à l'évaluation de la MRD doit s'effectuer en fonction du couple $\{\theta, \varphi\}$ et non uniquement en fonction de θ . Cependant, en pratique la MRD n'est pas évaluée en fonction de l'angle et du retard : maintenant que nous avons vérifié que le modulateur ne se comporte pas comme une lame demi onde à 532nm, la MRD est évaluée directement en fonction des intensités mesurées expérimentalement, comme présenté précédemment Section 5.2. Cela permet d'obtenir une MRD qui tient compte de la caractéristique complète du modulateur sans être limité par un modèle.

5.3.4 Etude du conditionnement de la MRD en fonction de la tension de commande du modulateur

Dans cette section, la MRD est évaluée comme présentée Eq. (5.19), directement à partir des intensités acquises expérimentalement en fonction de 4 tensions V_1, V_2, V_3, V_4 . Ce

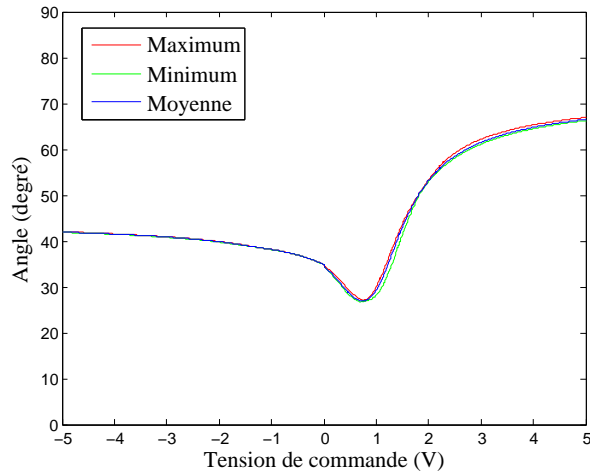


FIGURE 5.3 – Moyenne, valeur maximale, et valeur minimale de l'angle estimé au cours de quatre mesures de caractérisation. On remarque que la dispersion entre les mesures est faible.

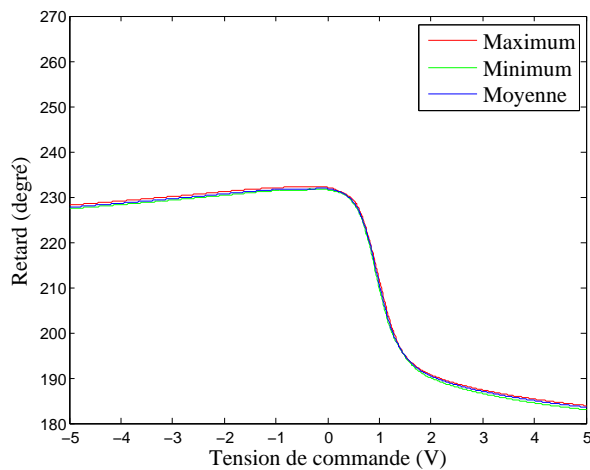


FIGURE 5.4 – Moyenne, valeur maximale, et valeur minimale du retard estimé au cours de quatre mesures de caractérisation. On remarque que la dispersion entre les mesures est faible.

sont ces quatre tensions qui vont *in fine* déterminer le signal de commande du modulateur. Elles peuvent être quelconque tant que le signal de commande final reste à moyenne nulle. Cependant, comme dans le chapitre précédent, nous allons nous limiter à deux amplitudes V_1 et V_2 . On cherche donc un signal de commande du type de celui présenté Fig. 4.8 basé sur une séquence de quatre tensions de la forme $\{+V_1, -V_1, +V_2, -V_2\}$.

Pour évaluer la pertinence des tensions, on calcule le CN de la MRD comme dans le chapitre précédent. Une première recherche consiste à faire varier les amplitudes V_1 et V_2 toutes les deux dans la plage $[0V, 5V]$. Pour chaque couple $\{V_1, V_2\}$, on évalue une MRD avec l'équation (5.19), puis on calcule le CN. On dresse ainsi une cartographie du CN en

fonction de V_1 et V_2 , présenté Fig. 5.5.

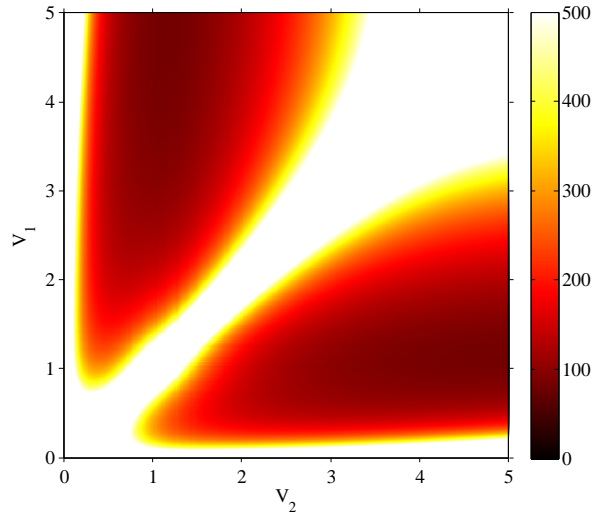


FIGURE 5.5 – Cartographie du CN de la MRD pour V_1 et V_2 variant entre $0V$ et $5V$, pour le paramètre α calculé selon l'équation (5.15). Les figures correspondant aux équations (5.16), (5.17), et (5.18) sont similaires à celle-ci et ne sont pas présentées.

	$\alpha = I_0 + I_{90}$	$\alpha = I_{45} + I_{135}$	$\alpha = I_d + I_g$	$\alpha = 1/3 \sum I$
CN	83,52	87,41	84,84	85,23
V_1 (en V)	1,13	1,27	1,27	1,27
V_2 (en V)	5	5	5	5

TABLE 5.1 – Estimation du CN minimum et des amplitudes de commande en fonction du mode de calcul du paramètre α de la MRD

En théorie [68], un polarimètre idéal a un CN optimal de $\sqrt{3}$ (soit 1,732). En pratique, Terrier *et al.* [42] ont atteint un CN de 1,914 avec un montage à division temporelle intégrant deux cellules à cristaux liquides nématiques et un polariseur linéaire. Le tableau 5.1 présente la variation du CN minimal que nous avons obtenu en pratique en fonction de l'équation utilisée pour le paramètre α . On remarque que quel que soit le mode de calcul de α considéré, l'amplitude V_2 vaut toujours $5V$. Une des deux amplitudes est donc désormais fixée à $5V$. Il reste à déterminer l'autre amplitude.

Ce travail préliminaire n'est qu'une estimation du comportement du modulateur basé sur une caractérisation effectuée avec un signal de commande bipolaire tel que celui présenté Fig. 4.2(b). Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, le comportement du modulateur est différent lorsque le signal de commande devient un signal composite, tel que celui présenté Fig. 4.8 par exemple. Par conséquent nous procédons à une deuxième phase de caractérisation du modulateur, présentée dans la section suivante.

5.4 Caractérisation avec un signal de commande composite

Lors de cette caractérisation, le modulateur est commandé par un signal composite basé sur le schéma $\{+V_1, -V_1, +V_2, -V_2\}$, comme présenté Fig. 4.8. Au vu des résultats obtenus dans la section précédente, on fixe l'une des amplitudes à $5V$. L'autre varie sur la plage $[0V, 5V]$. Le banc optique est le même que dans la section précédente et a déjà été présenté Fig. 5.1. Le mode opératoire est identique à la section précédente. Seul le signal de commande diffère. Au vu de l'écart entre le maximum et le minimum sur les figures 5.3 et 5.4, on effectuera une seule caractérisation et non plus quatre.

5.4.1 Analyse des mesures d'intensités

La figure 5.6 présente l'évolution de la tension aux bornes du photo-détecteur pour chacun des vecteurs de Stokes Eq. (5.8). L'allure générale des courbes est similaire à ce qui avait été obtenu avec un signal de commande bipolaire et mène aux mêmes observations. Toutefois, on note un petit changement d'amplitude qui nous conforte dans notre démarche de procéder à une deuxième caractérisation avec un signal composite.

5.4.2 Estimation de l'angle d'orientation et du retard

On remarque figure 5.7 que la courbe d'angle varie surtout dans la plage des tensions de commande positives. Figure 5.8, le retard est principalement affecté au niveau de la zone d'inflexion entre $0V$ et $+2V$. Ces courbes permettent de mettre en évidence que le modulateur change de comportement lorsque le signal de commande change. Ces résultats reflètent uniquement le passage d'un signal de commande bipolaire à un signal de commande composite du type $\{+V_1, -V_1, +5V, -5V\}$ avec une impulsion de $\pm 10V/200\mu s$. Utiliser un autre ordre dans la séquence de tension comme par exemple $\{+V_1, +5V, -V_1, -5V\}$ donne des résultats encore différents. Cette option sera étudiée Section 5.5, uniquement du point de vue du conditionnement de la matrice. Nous n'étudierons pas davantage les courbes d'angle et de retard étant donné qu'en pratique la MRD est calculée directement à partir des intensités et non à partir de l'estimation de l'angle et du retard.

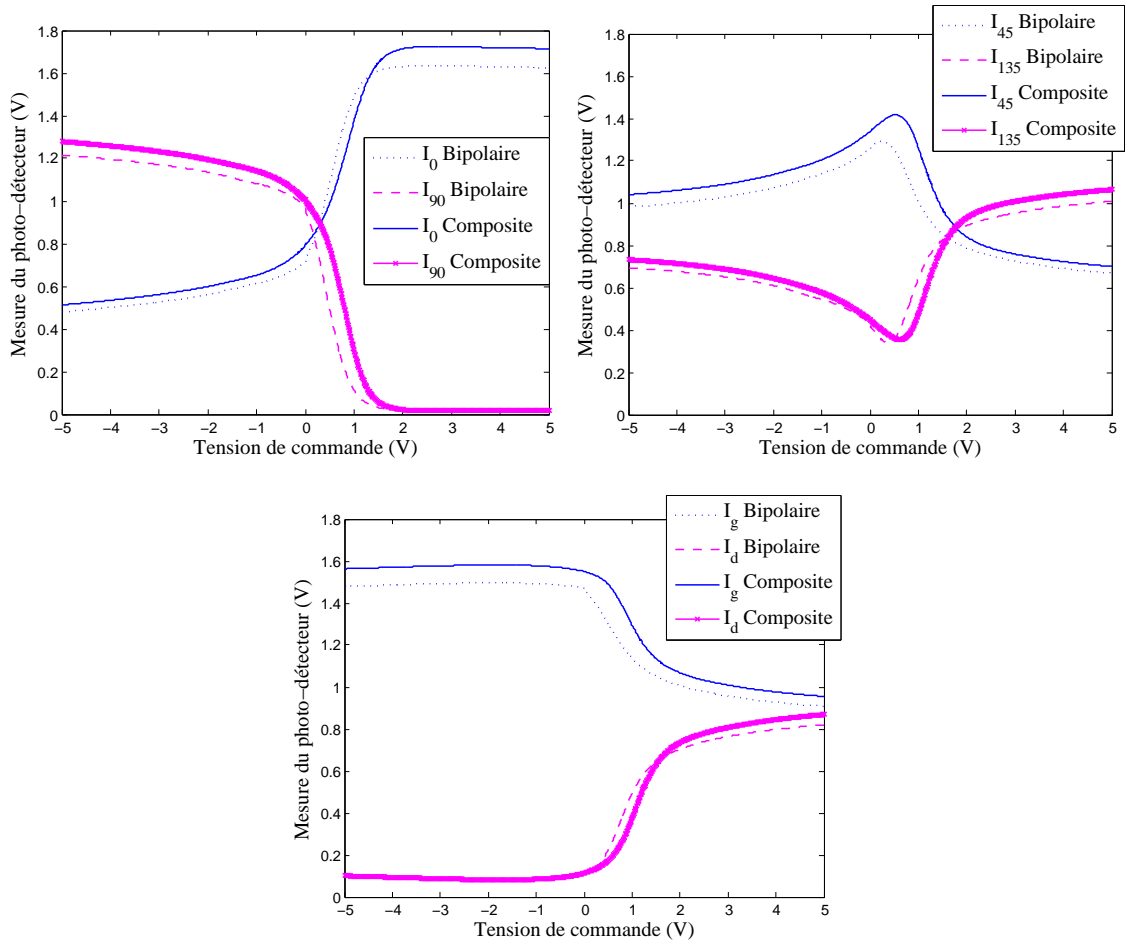


FIGURE 5.6 – Intensités mesurées en sortie du modulateur en fonction de la tension de commande pour différents vecteurs de Stokes en entrée, selon le schéma présenté Eq. 5.9. Les figures présentent conjointement l'évolution pour un signal de commande bipolaire et pour un signal de commande composite du type $\{+V_1, -V_1, +5V, -5V\}$ avec V_1 variant dans la plage $[0V, 5V]$.

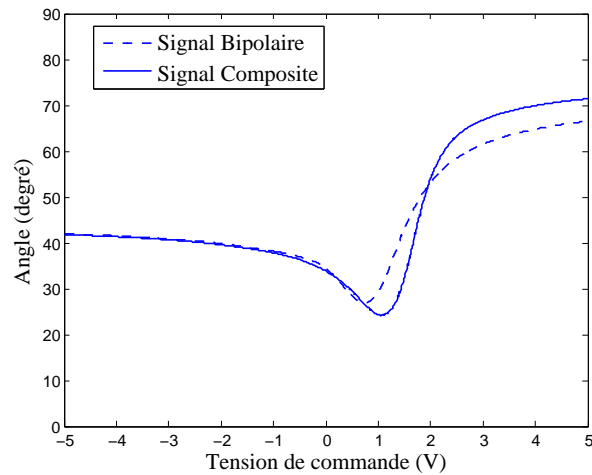


FIGURE 5.7 – Angle d’orientation de la lame équivalente estimé pour un signal de commande bipolaire et pour un signal de commande composite du type $\{+V_1, -V_1, +5V, -5V\}$ avec V_1 variant dans la plage $[0V, 5V]$.

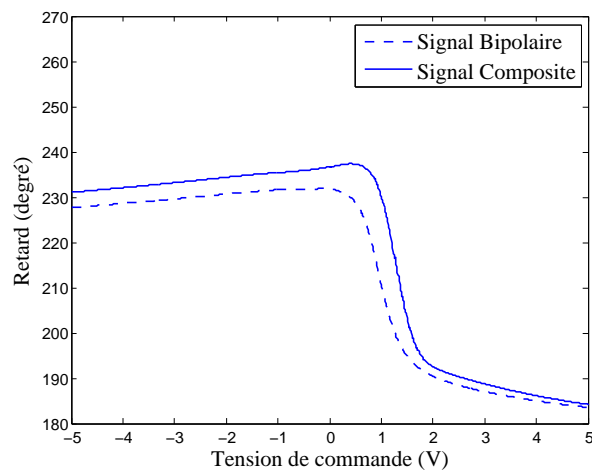


FIGURE 5.8 – Retard de la lame équivalente estimé pour un signal de commande bipolaire et pour un signal de commande composite du type $\{+V_1, -V_1, +5V, -5V\}$ avec V_1 variant dans la plage $[0V, 5V]$.

5.4.3 Etude du conditionnement de la MRD en fonction de la tension de commande du modulateur

La figure 5.9 donne l'évolution du CN en fonction de la tension de commande. Les valeurs des CN minimaux ainsi que des amplitudes de commande pour chacun des modes de calculs du coefficient α sont rassemblées dans le tableau 5.2. On remarque que les valeurs sont particulièrement élevées. Cependant, comme nous allons le voir dans la section suivante, il existe des solutions pour optimiser le signal de commande et réduire le CN.

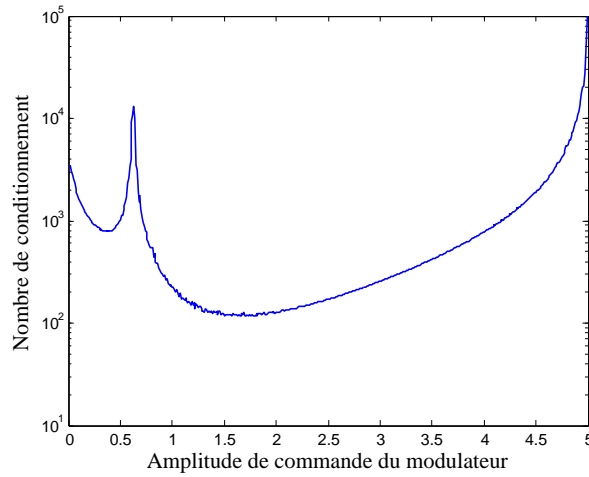


FIGURE 5.9 – Evolution du CN en fonction de l'amplitude de commande V_1 dans un signal de commande composite du type $\{+V_1, -V_1, +5V, -5V\}$ avec une impulsion de $\pm 10V/200\mu s$.

	$\alpha = I_0 + I_{90}$	$\alpha = I_{45} + I_{135}$	$\alpha = I_d + I_g$	$\alpha = 1/3 \sum I$
CN	116,10	125,92	120,99	121,53
V_1 (en V)	1,75	1,73	1,77	1,75
V_2 (en V)	5	5	5	5

TABLE 5.2 – CN et amplitudes de commande en fonction du mode de calcul du paramètre α de la MRD pour un signal composite du type $\{+V_1, -V_1, +5V, -5V\}$ avec V_1 variant entre $0V$ et $5V$, et une impulsion de $\pm 10V/200\mu s$.

5.5 Optimisation du signal de commande composite

Comme nous venons de le voir, et comme il avait été mis en évidence Section 4.3.3, le fait de passer d'un signal de commande bipolaire à un signal de commande composite change le comportement du modulateur. Dans cette section, nous allons jouer sur un autre paramètre pour optimiser le signal de commande et réduire le CN. Nous allons modifier l'ordre des tensions dans le signal de commande, sans modifier l'impulsion. Nous compa-

rons ainsi les résultats obtenus avec les six séquences signaux de commande composite réalisable à partir de ces quatre valeurs.

5.5.1 Séquences de commande

Nous allons soumettre le modulateur à différents signaux de commande composites. L'évolution des amplitudes de commande est la même que dans la section précédente, à savoir que l'une des amplitudes est fixée à $5V$ et l'autre varie sur la plage $[0V, 5V]$. Les différents signaux de commande se différencient uniquement par l'ordre dans lequel sont appliquées les tensions. L'impulsion reste inchangée et fixée à $\pm 10V/200\mu s$. Etant donné que nous utilisons quatre tensions au total ($+V_1, -V_1, +5V, -5V$), toutes les combinaisons possibles se résument aux six séquences présentées Fig. 5.10. Toute autre séquence de commande envisageable revient à une permutation circulaire d'une des séquences présentées sur cette figure. Seul l'impact sur le conditionnement de la MRD est présenté ici.

5.5.2 Evaluation du CN en fonction de la séquence de commande

Le tableau 5.3 rassemble les valeurs minimales des CN et les amplitudes de commande correspondantes pour chaque séquence de commande et pour chaque mode de calcul du paramètre α de la MRD. Dans un premier temps, on retient trois séquences qui fournissent des CN similaires : $\{+0, 59V, -0, 59V, -5, +5V\}$, $\{+0, 01V, -5V, -0, 01V, +5V\}$, et $\{+0, 82V, -5V, +5V, -0, 82V\}$. Pour ces séquences, on remarque que le mode de calcul du terme α influence peu le CN. Nous décidons alors d'utiliser l'équation (5.18) car elle fait intervenir l'ensemble des intensités mesurées et reflète ainsi mieux le comportement général du modulateur. Les résultats présentés par la suite feront référence uniquement à ce mode de calcul du terme α .

Afin de trancher sur la séquence de commande à retenir parmi les trois séquences pré-sélectionnées, on se penche sur la réponse temporelle du modulateur. La figure 5.11 présente les réponses temporelles pour chacune des trois séquences identifiées. On constate que seule la séquence $\{+0, 01V, -5V, -0, 01V, +5V\}$ fournit un régime stable pour chacune des quatre tensions. On retient donc au final uniquement cette séquence, à partir de laquelle on détermine la MRD Eq. (5.20) dont le CN vaut 35.

$$\mathbf{B}^{-1} = \begin{bmatrix} -5.43 & -2.49 & 5.29 & 4.10 \\ 4.37 & 1.27 & -3.62 & -2.07 \\ -3.52 & -4.85 & 6.83 & 1.56 \\ 9.52 & 6.37 & -9.60 & -6.31 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

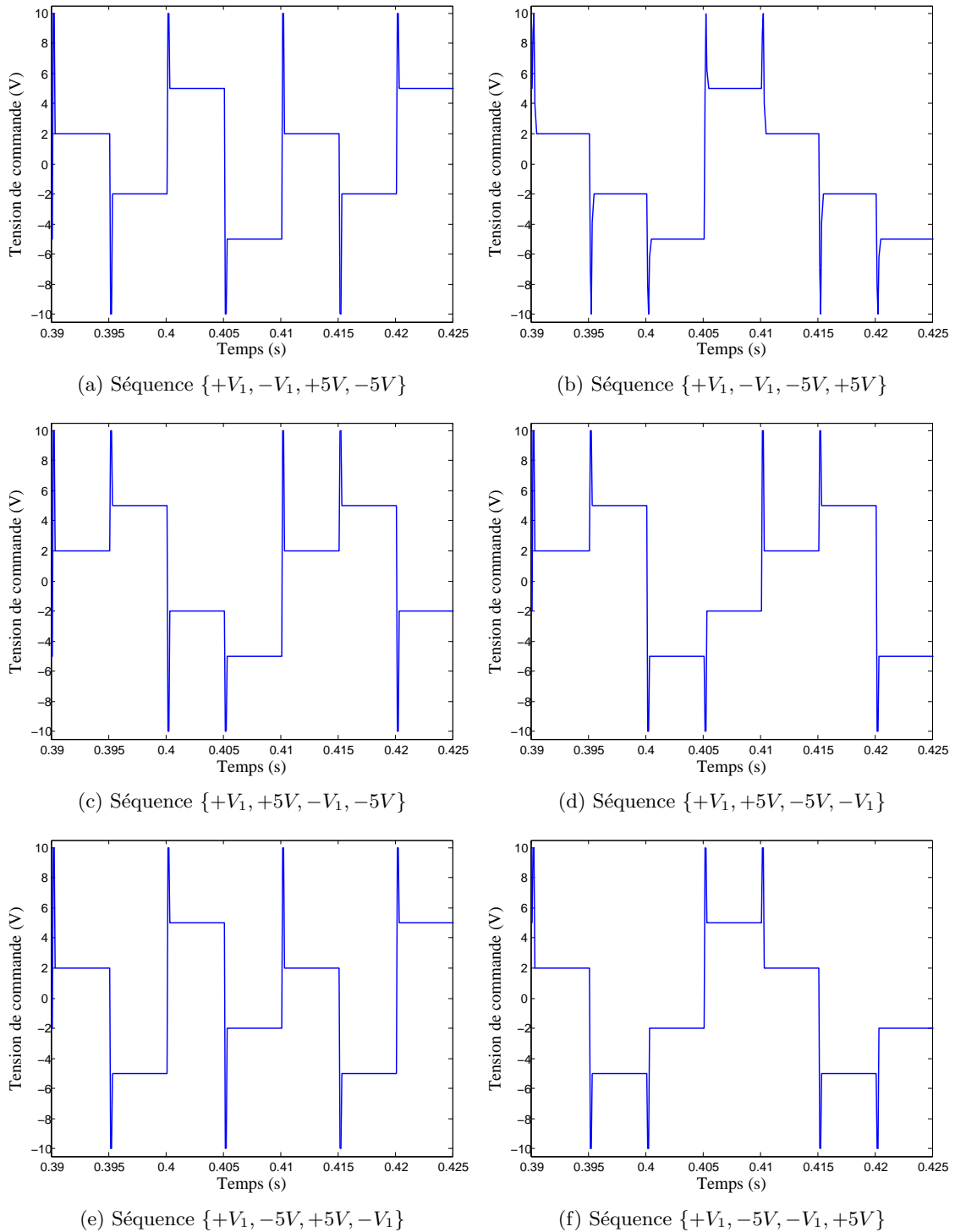


FIGURE 5.10 – Signaux de commande composites utilisés pour l'étude de l'influence de l'ordre des tensions sur l'état du modulateur.

	$\alpha = I_0 + I_{90}$	$\alpha = I_{45} + I_{135}$	$\alpha = I_d + I_g$	$\alpha = 1/3 \sum I$	
$\{+V_1, -V_1, +5V, -5V\}$	CN	116,10	125,92	120,99	121,53
	V_1	1,75	1,73	1,77	1,75
	V_2	5	5	5	5
$\{+V_1, -V_1, -5V, +5V\}$	CN	33,38	34,62	34,22	34,07
	V_1	0,59	0,59	0,64	0,59
	V_2	5	5	5	5
$\{+V_1, +5V, -V_1, -5V\}$	CN	39,92	40,16	39,36	40,06
	V_1	1,14	1,10	1,10	1,10
	V_2	5	5	5	5
$\{+V_1, +5V, -5V, -V_1\}$	CN	68,65	70,49	68,81	69,41
	V_1	0,83	0,94	1,03	1,03
	V_2	5	5	5	5
$\{+V_1, -5V, -V_1, +5V\}$	CN	35,39	35,17	34,38	35,07
	V_1	0,01	0,01	0,01	0,01
	V_2	5	5	5	5
$\{+V_1, -5V, +5V, -V_1\}$	CN	34,13	34,91	34,32	34,47
	V_1	0,82	0,81	0,81	0,81
	V_2	5	5	5	5

TABLE 5.3 – CN minimaux et amplitudes de commande (V_1 et V_2 sont données en Volts) en fonction du mode de calcul du paramètre α de la MRD, pour un signal de commande composite avec une amplitude fixée à $5V$, l'autre variant entre $0V$ et $5V$, et une impulsion de $\pm 10V/200\mu s$.

5.6 Validation préliminaire

Afin de vérifier la pertinence de notre MRD, on procède, comme dans le chapitre précédent, à une première phase de validation à l'aide de signaux moyennés spatialement.

5.6.1 Montage optique

Le montage optique est celui qui a été présenté Fig. 5.1. Cependant, quelques éléments dans la procédure d'utilisation du banc diffèrent. Tout d'abord, le modulateur est commandé en permanence par la séquence de commande $\{+0,01V, -5V, -0,01V, +5V\}$ retenue à la fin de la section précédente. Il n'y a plus de balayage en tension. Ensuite, la lame demi-onde ne tourne plus. Elle reste statique et orientée à 0° pendant toute la phase de validation. Enfin, la lame quart-d'onde n'est plus positionnée de manière à générer six polarisations bien définies. Cette lame est en rotation sur une plage angulaire plus large allant de -112° à $+207^\circ$ avec un pas de 1° . Les bornes ne sont pas symétriques pour des raisons techniques relatives à la rotation de la $\lambda/4$. Différentes polarisations connues sont ainsi générées en entrée du modulateur, lequel est utilisé pour estimer le vecteur de Stokes du faisceau incident. Les performances du modulateur sont quantifiées par la différence

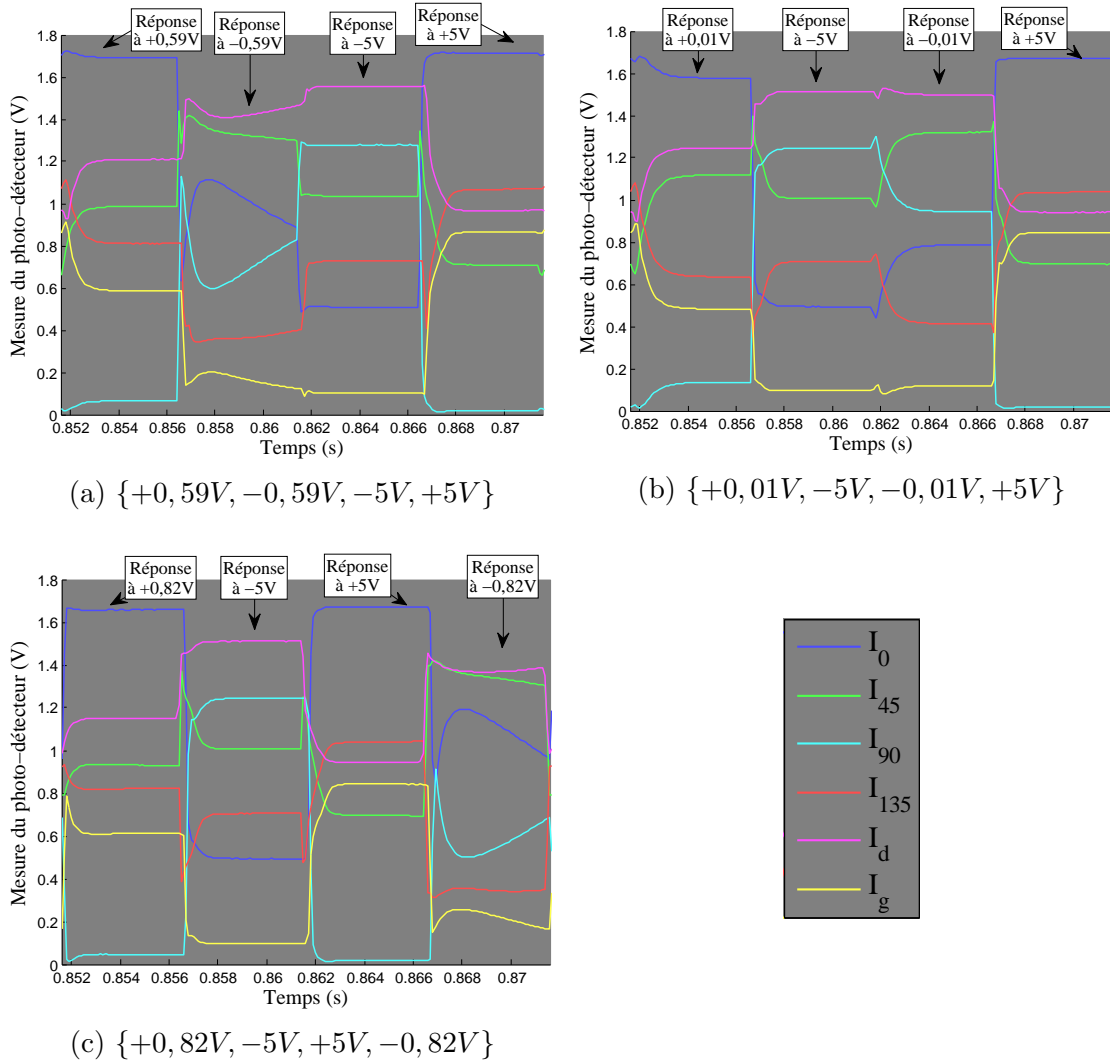


FIGURE 5.11 – Réponse du modulateur aux trois séquences de commande retenues pour les six vecteurs de Stokes en entrée $\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_{45}, \mathbf{S}_{90}, \mathbf{S}_{135}, \mathbf{S}_d, \mathbf{S}_g$.

entre le vecteur de Stokes théorique déterminé à partir du positionnement contrôlé de la $\lambda/4$ et le vecteur de Stokes estimé par le modulateur. On procède de même pour estimer la précision des autres grandeurs.

5.6.2 Résultats

La figure 5.12 présente conjointement l'estimation du vecteur de Stokes en entrée du modulateur et la valeur théorique déterminée à partir de la position angulaire de la $\lambda/4$. Cette figure présente également l'erreur d'estimation, calculée en tant que simple soustraction entre la valeur théorique et la valeur estimée. L'estimation est faite à une cadence de 200Hz.

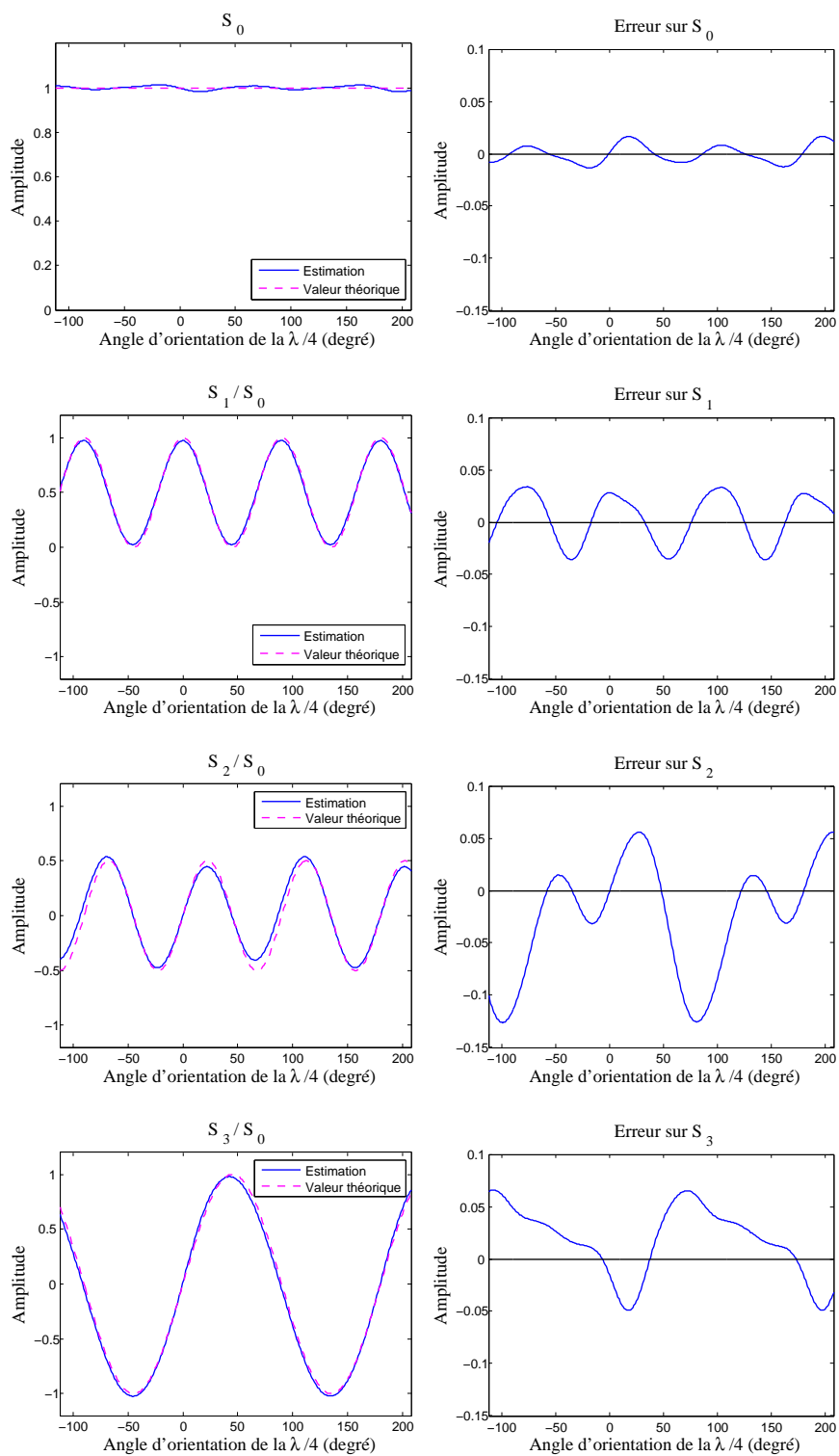


FIGURE 5.12 – Estimation du vecteur de Stokes en entrée du modulateur en fonction de l'orientation de la $\lambda/4$.

L'estimation de chacun des paramètres de Stokes est relativement bonne, compte tenu de la vitesse d'acquisition. L'erreur la plus importante est commise sur l'estimation de s_2 avec une erreur de 24%. Et s_3 est estimé avec 10% d'erreur. L'estimation de s_1 est relativement bonne avec 3,3% d'erreur.

De plus sur les courbes d'erreur on observe une périodicité dans l'évolution des courbes en fonction de la position de la lame quart-d'onde. Il pourrait s'agir d'un défaut dans la lame elle-même ou de son orientation mécanique. Ceci reste toutefois à confirmer avec des expérimentations complémentaires car cette périodicité pourrait aussi montrer une dépendance de l'erreur d'estimation en fonction de la polarisation incidente.

La figure 5.13 présente l'estimation de l'angle et de l'ellipticité du vecteur de Stokes, ainsi que les erreurs d'estimation.

Comme on pouvait s'y attendre, l'angle est difficilement estimé au voisinage des positions de la $\lambda/4$ devant générer une polarisation totalement circulaire, c'est-à-dire les angles $45^\circ \pm k.90^\circ$ avec k entier. Si on ignore les valeurs de l'angle dans un voisinage de $\pm 7,5^\circ$ autour de chaque asymptote, l'erreur d'estimation est au maximum de 4° . Comme pour le vecteur de Stokes, on observe un caractère périodique dans l'évolution de l'erreur d'estimation.

L'ellipticité quant à elle est estimée avec une erreur maximale de 2° . On retrouve également ici une périodicité dans l'erreur d'estimation.

Les figures 5.14 et 5.15 présentent les DOP , $DOLP$, et $DOCP$, et les erreurs d'estimations. Le DOP est estimé avec 8,2% d'erreur au maximum. L'erreur quadratique moyenne nous donne une estimation à 3,3% près.

De la même manière, le $DOLP$ est principalement estimé avec une erreur maximale de 5,3%. En terme d'erreur quadratique moyenne, l'estimation se fait à 2,8% près.

Enfin, le $DOCP$ est quant à lui estimé avec une erreur maximale de 6,5%, pour une erreur quadratique moyenne de 3,7%.

En résumé, le système fournit une estimation du vecteur de Stokes avec des erreurs variant selon les composantes, à une cadence de 200Hz. L'angle et l'ellipticité sont estimés respectivement avec une précision de 4° et 2° . Pour l'angle, l'erreur est plus importante que celle obtenue à 633nm. On peut envisager que cela soit une conséquence de l'utilisation du modulateur à 532nm, longueur d'onde pour laquelle le modulateur n'est pas conçu à la base. Le $DOLP$ quant à lui est estimé avec une erreur maximale de 5,3% à 532nm, alors que l'erreur maximale était de 2% à 633nm, ce qui montre une diminution de précision d'estimation. Cependant nous disposons maintenant de trois données supplémentaires par rapport au chapitre précédent : l'ellipticité dont nous venons de parler, le DOP et le $DOCP$ dont les erreurs maximales sont respectivement de 8,2% et 6,5%.

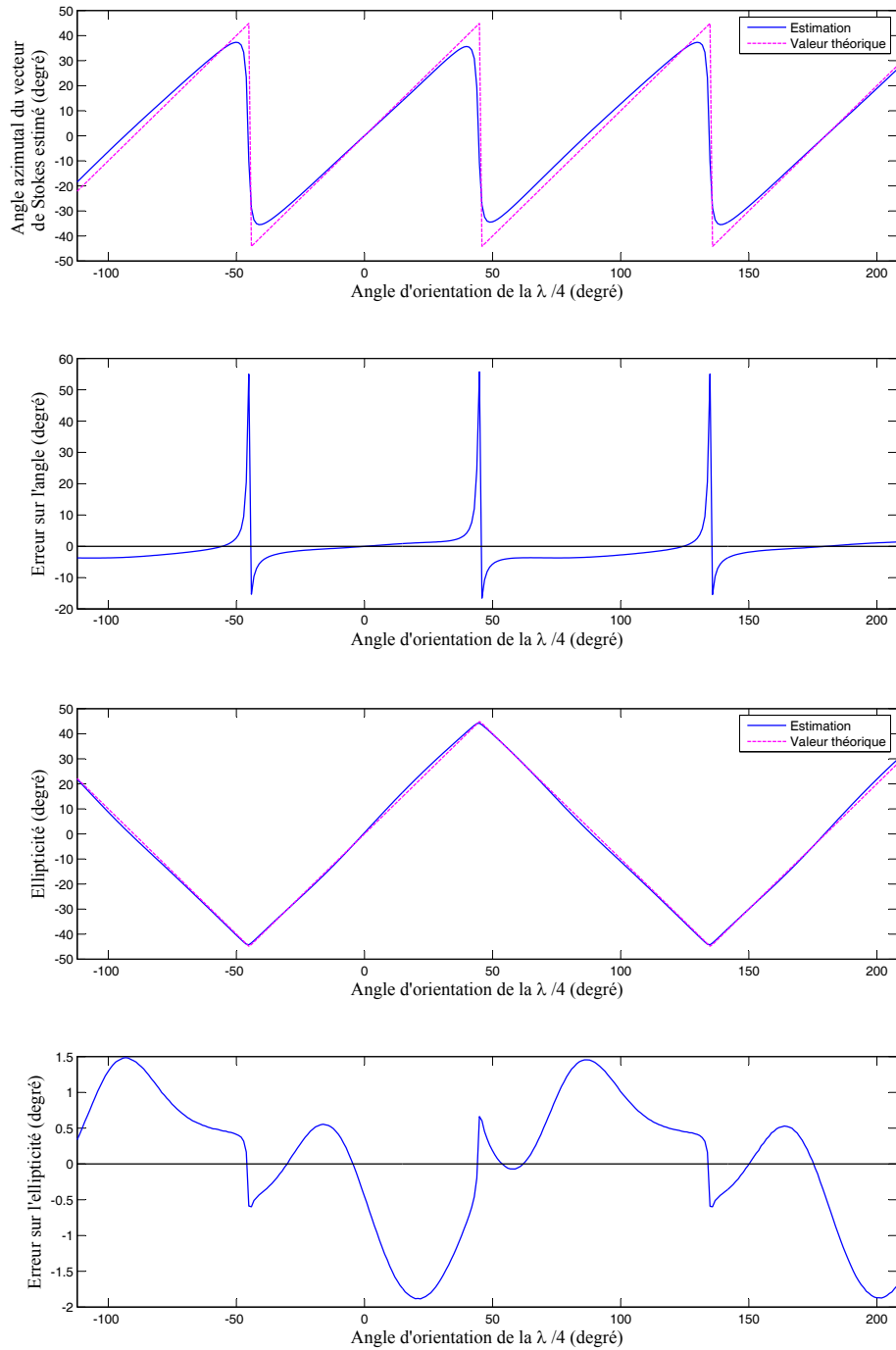
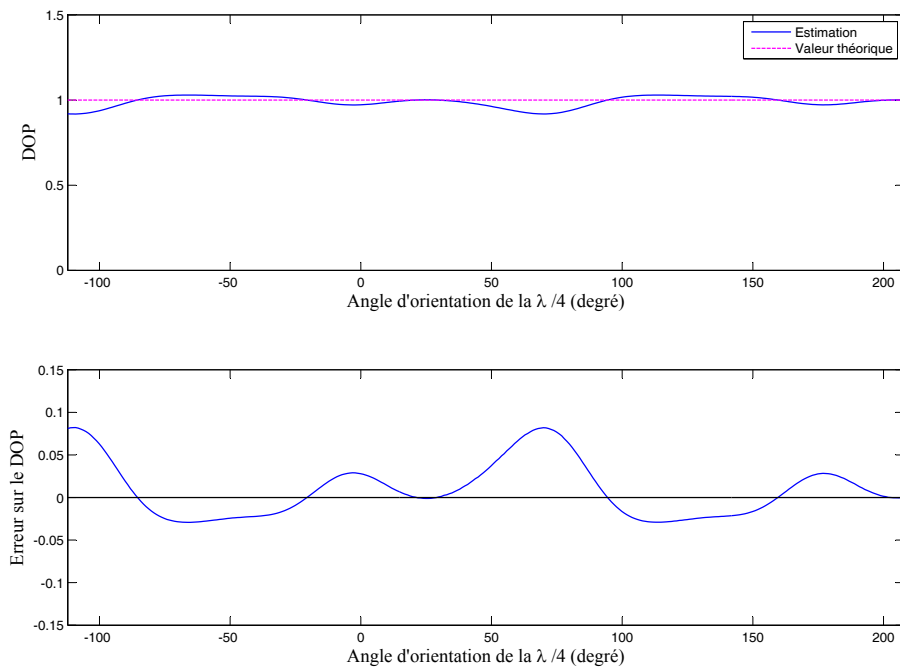
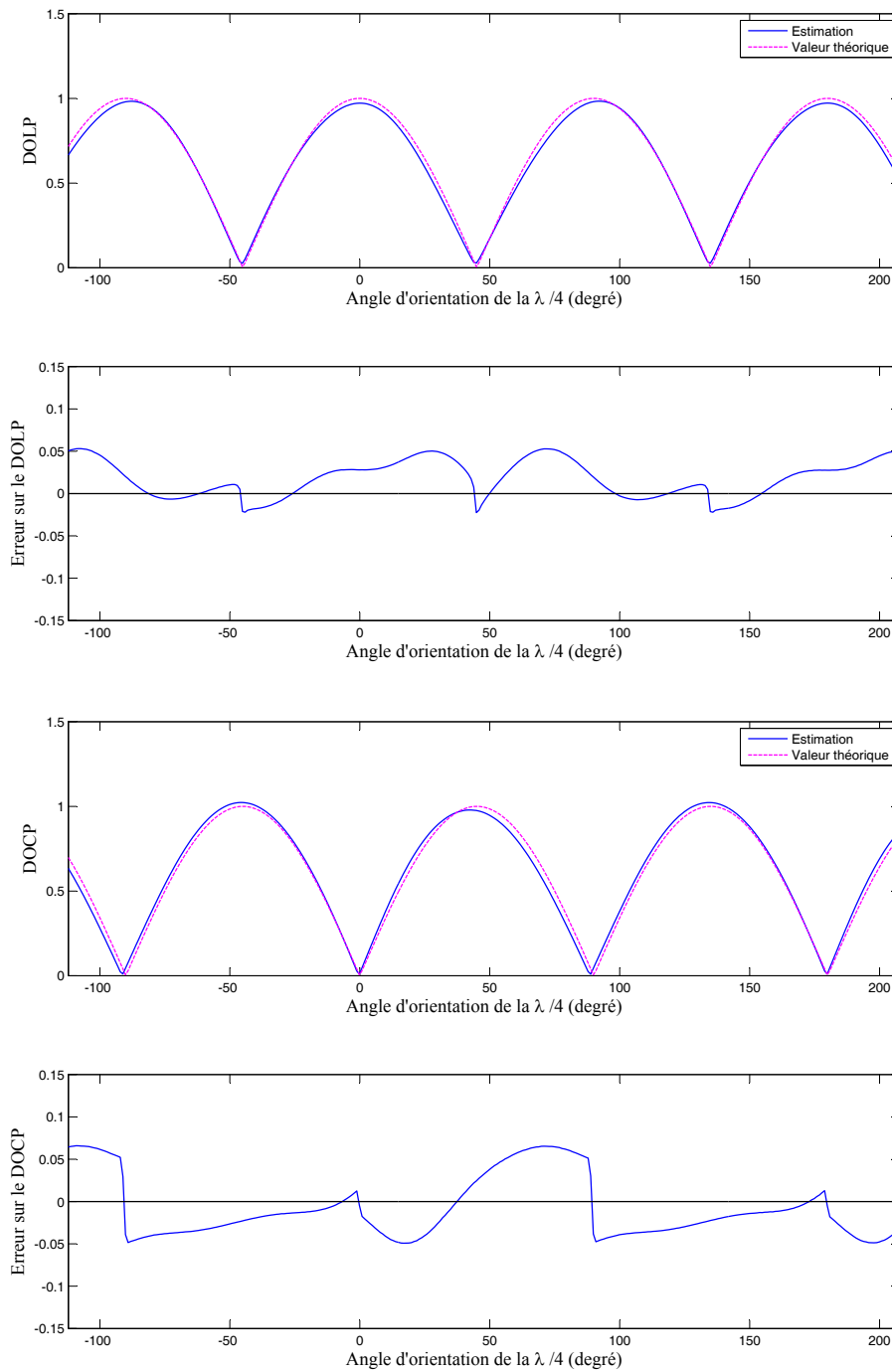


FIGURE 5.13 – Estimation de l'angle et de l'ellipticité en fonction de l'orientation de la $\lambda/4$.

FIGURE 5.14 – Estimation du DOP en fonction de l'orientation de la $\lambda/4$.

FIGURE 5.15 – Estimation du *DOLP*, et du *DOCP* en fonction de l'orientation de la $\lambda/4$.

5.7 Validation en conditions imageantes

Afin d'estimer les performances finales du polarimètre complet, un deuxième banc permettant de produire des images est mis en place.

5.7.1 Montage optique

La figure 5.16 présente le montage utilisé. La source de lumière est ici un laser Nd :YAG à 532nm. Le faisceau est conditionné par un élargisseur, avant de traverser le polariseur P_1 , fixe et orienté à 0° . La $\lambda/4$ est orientée à $+45^\circ$ afin de générer une polarisation circulaire. Le diffuseur est un disque de verre poli statique qui a pour but de diminuer le speckle dû à la source laser. L'échantillon, qui a déjà été présenté Fig. 4.14, est le même que dans le chapitre précédent. Le couple $\{\text{FLC}, P_2\}$ représente le modulateur utilisé pour analyser la polarisation en sortie de l'échantillon. Enfin, le photo-détecteur est remplacé par une caméra CCD.

Dans cette section, le modulateur est commandé en permanence par le signal de commande composite établi Section 5.5.

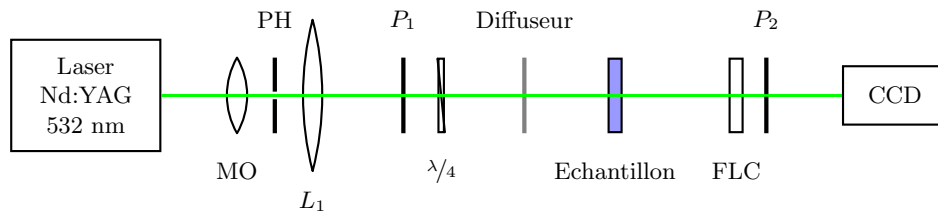


FIGURE 5.16 – Banc de validation en conditions imageantes. Elargisseur : Objectif de microscope (MO), Trou calibré (PH), Lentille L_1 . Polariseurs linéaires statiques orientés à 0° (P_1 et P_2), lame quart-d'onde orientée à $+45^\circ$ ($\lambda/4$), Cellule à cristaux liquides ferroélectriques (FLC).

5.7.2 Résultats

La figure 5.17 présente l'estimation du vecteur de Stokes à une cadence de 200im/s. On distingue bien les polariseurs à 0° et 90° sur la composante s_1 , alors que le polariseur à -45° présente une composante s_2 importante. Ceci correspond aux attentes. La composante s_3 présente, elle, une circularité plus forte sur le fond que sur les polariseurs, ce qui correspond aux réglages du banc que nous venons de détailler. Toutefois, le fond, qui normalement est totalement polarisé circulairement, n'a pas une composante s_3 très élevée. Ceci est dû au diffuseur qui dépolarise partiellement la lumière. On notera de plus que malgré un bruit relativement important, les objets sont facilement observables.

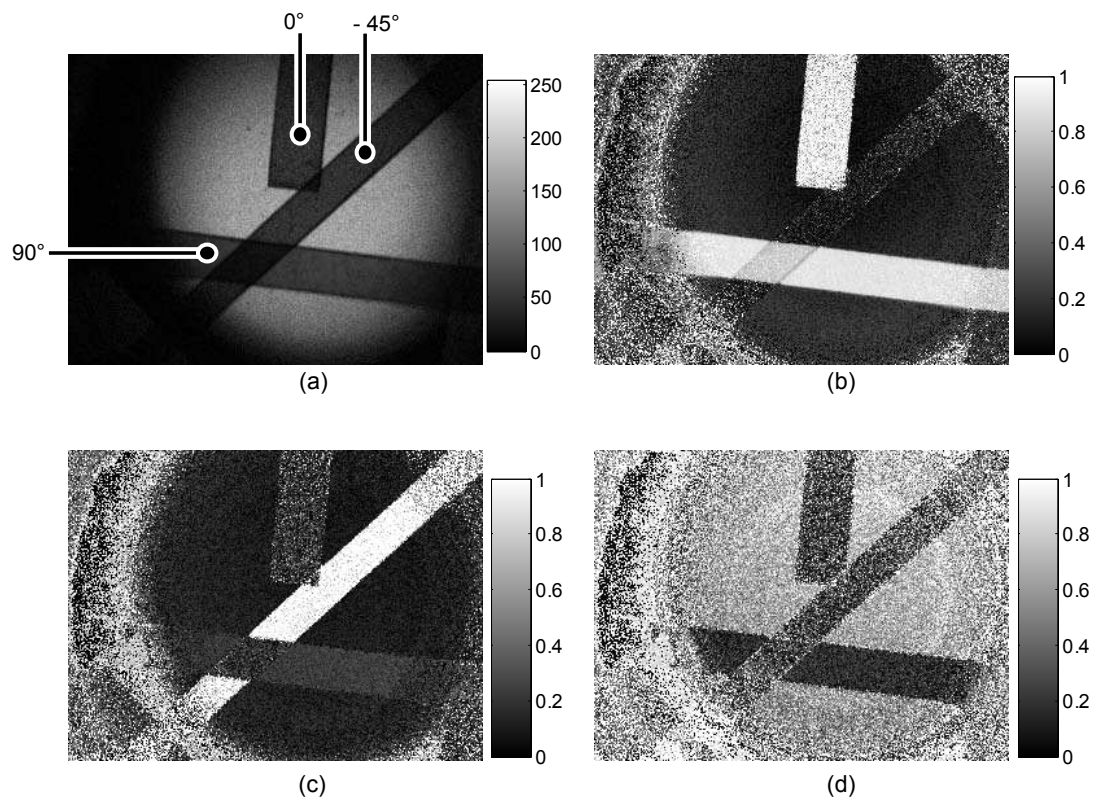


FIGURE 5.17 – Composantes du vecteur de Stokes estimées à 200 images par seconde. (a) : s_0 , (b) : $|s_1|/s_0$, (c) : $|s_2|/s_0$, (d) : $|s_3|/s_0$. Les orientations de chacun des polariseurs sont précisées sur la sous-figure (a).

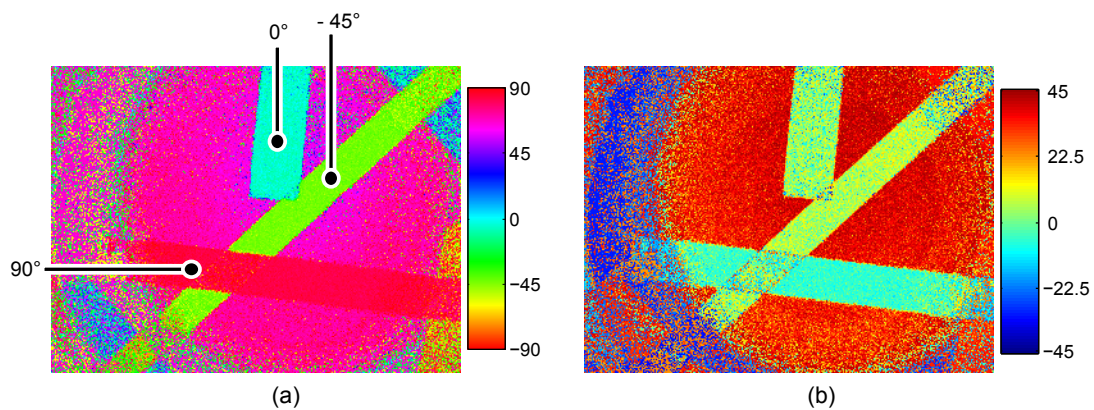


FIGURE 5.18 – Angle azimutal(a) et ellipticité(b) estimés à 200 images par seconde.

L'estimation de l'angle et de l'ellipticité est présentée figure 5.18. Concernant l'angle, on retrouve bien les orientations attendues des trois polariseurs. On remarque également qu'un angle relativement uniforme est estimé pour le fond, alors que celui-ci est censé être totalement circulairement polarisé. Donc a priori, nous aurions dû retrouver du bruit

sur le fond. Nous reviendrons sur ce point un peu plus tard, lorsque nous analyserons l'estimation du *DOLP*. L'ellipticité quant à elle est relativement bien estimée. Le fond présente une ellipticité importante alors que les polariseurs ont une ellipticité faible. Ceci correspond aux caractéristiques et aux réglages des éléments du banc. On remarque tout de même que l'estimation de l'ellipticité sur les polariseurs à 0° et -45° est mieux faite que sur le polariseur à 90° .

Le *DOP*, le *DOLP*, et le *DOCP* sont présentés figure 5.19. Le *DOP* montre que l'ensemble de la scène est polarisée. Cependant, le fond semble moins polarisé que les trois lames, ce qui est confirmé par le *DOCP*. Ceci s'explique de la même manière que l'observation faite précédemment lors de l'analyse du vecteur de Stokes : le diffuseur dépolarise partiellement la lumière, donc le fond n'est plus totalement circulairement polarisé, et par conséquent le *DOCP* est inférieur à 1. Le diffuseur introduit une erreur de près de 30% sur le *DOCP*. Concernant le *DOLP* on observe que les trois lames ont bien un *DOLP* élevé et que le fond n'est pas linéairement polarisé. Cette dernière information est à rapprocher de l'observation faite lors de l'analyse de l'angle. Précédemment, Fig. 5.18, nous avons vu qu'un angle avait été estimé pour le fond. Grâce à la figure du *DOLP* nous voyons que le fond est très faiblement linéairement polarisé. Par conséquent, il faut prendre l'estimation de l'angle avec précaution. Si la valeur du *DOLP* estimé est suffisamment faible pour être considérée comme nulle, au bruit de mesure près, alors l'angle estimé doit être ignoré. Par contre, si le *DOLP* ne peut pas être considéré comme nul, alors l'angle estimé doit être analysé.

Afin de quantifier la précision de l'estimation, nous définissons des régions d'intérêts (ROI) comme au chapitre précédent. Ces ROI sont présentées Fig. 5.20. Sur chacune de ces ROI, on détermine l'erreur d'estimation par la différence arithmétique entre la valeur théorique attendue et la valeur estimée. Puis on calcule la moyenne spatiale et l'écart-type spatial de l'erreur sur la ROI. Ce sont ces deux dernières grandeurs que nous analysons maintenant.

La figure 5.21 présente la précision sur l'angle et l'ellipticité. Contrairement à ce que laissaient présumer les résultats qualitatifs, l'erreur sur l'angle est assez importante pour certains polariseurs. Elle atteint $9,8^\circ$ pour le polariseur à 90° (en rouge). En revanche, elle diminue de moitié pour le polariseur central orienté à 45° . D'une part le polariseur central est mieux éclairé que les deux autres, donc cela peut aider à mieux estimer les différentes grandeurs. D'autre part, la différence est peut-être due à une sensibilité du modulateur en fonction de la polarisation d'entrée, c'est-à-dire à de la diatténuation. L'écart-type quant à lui est différent pour chacun des trois polariseurs avec un minimum à $1,6^\circ$ et un maximum à $3,2^\circ$, ce qui va dans le sens d'une sensibilité du polarimètre à la polarisation incidente.

L'ellipticité quant à elle présente des valeurs similaires à celle de l'angle avec une moyenne spatiale de l'erreur aux environs de $8,3^\circ$, et un écart-type spatial de $4,4^\circ$.

La précision sur le *DOLP* et le *DOCP* est présenté Fig. 5.22. Pour le *DOLP*, on

observe la même chose que précédemment pour l'angle : l'estimation de l'angle pour le polariseur orienté à -45° (courbe en vert) est meilleure que pour les deux autres polariseurs, avec une moyenne spatiale de l'erreur de 5% contre 8% pour les polariseurs à 0° et 90° . Le *DOCP* est lui estimé avec une précision de 34,5%. Ce chiffre est particulièrement élevé mais n'oublions pas que le diffuseur à lui seul cause déjà près de 30% d'erreur.

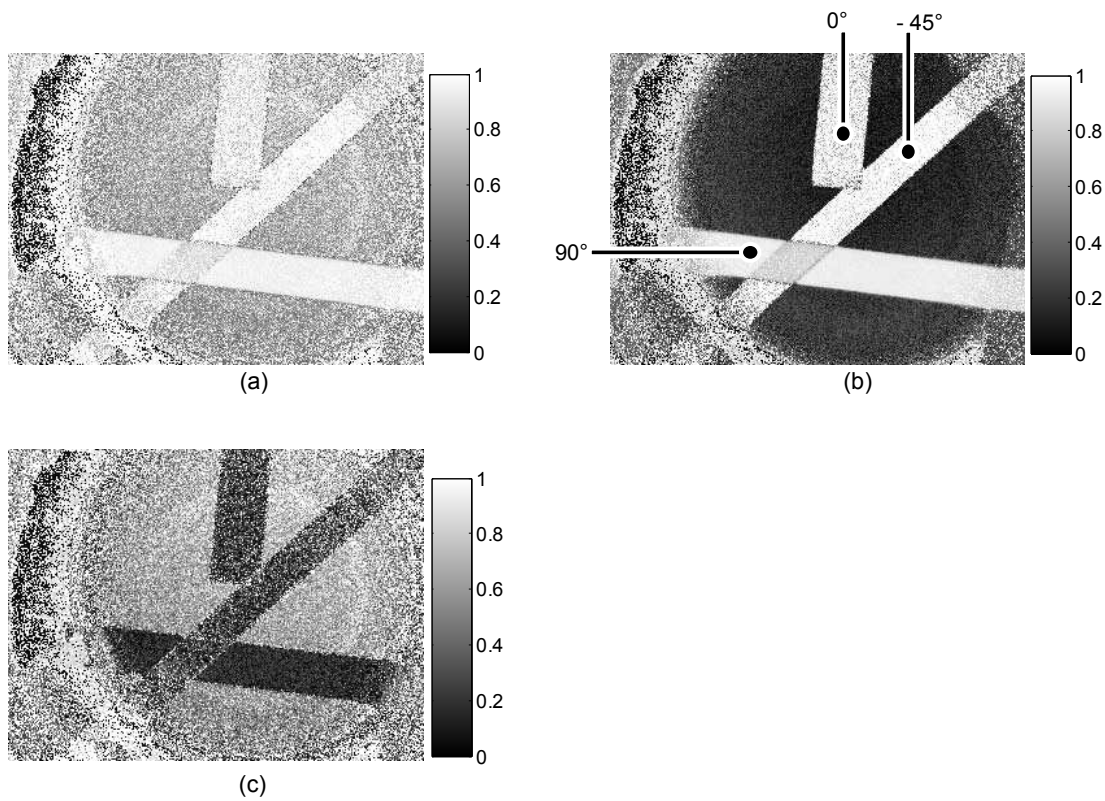


FIGURE 5.19 – DOP(a), DOLP(b), et DOCP(c) estimés à 200 images par seconde.

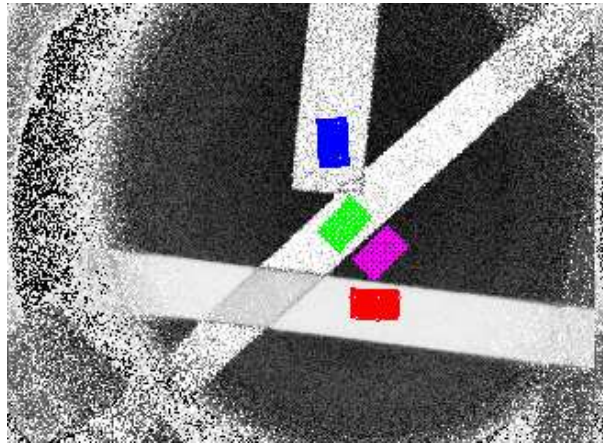


FIGURE 5.20 – Régions d'intérêt définies pour quantifier l'estimation, présentées sur une image de *DOLP*.

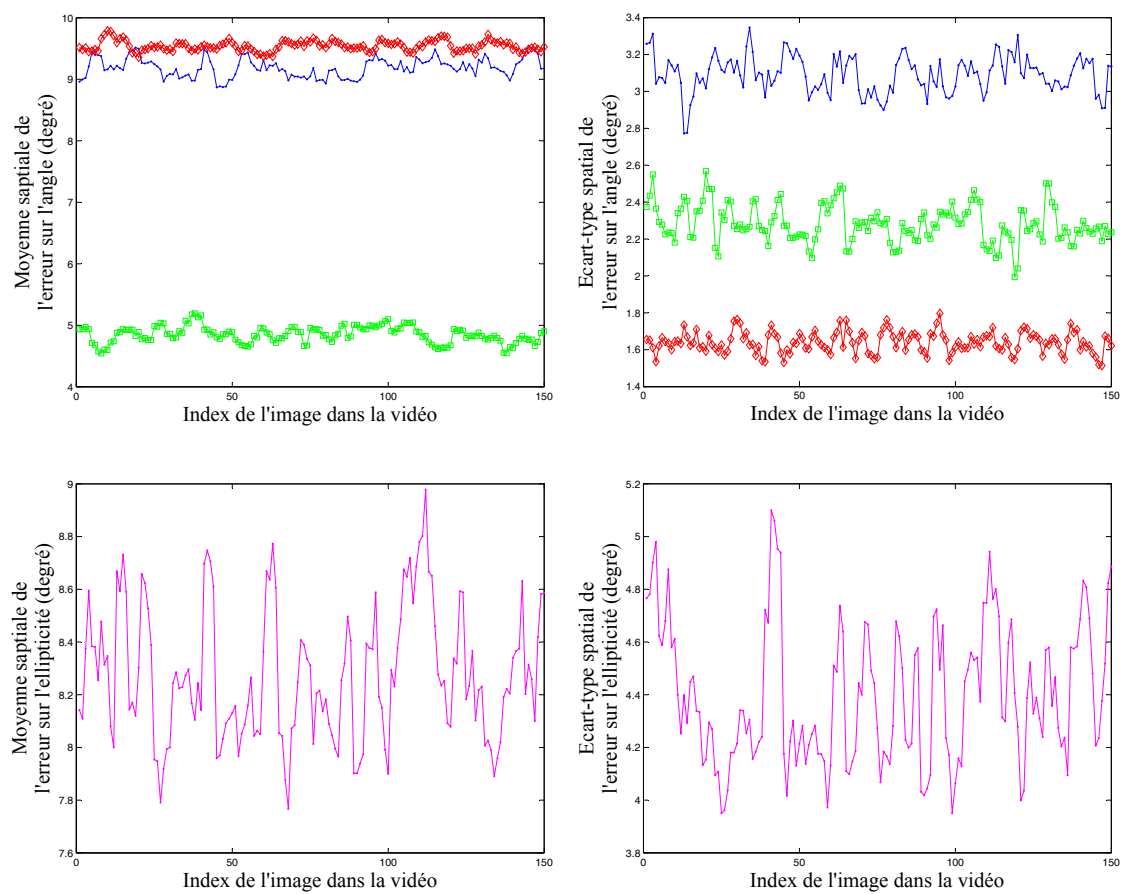


FIGURE 5.21 – Moyenne et écart-type de l'erreur pour l'estimation de l'angle et de l'ellipticité à une cadence de 200im/s. Les couleurs correspondent aux ROI définies Fig. 5.20.

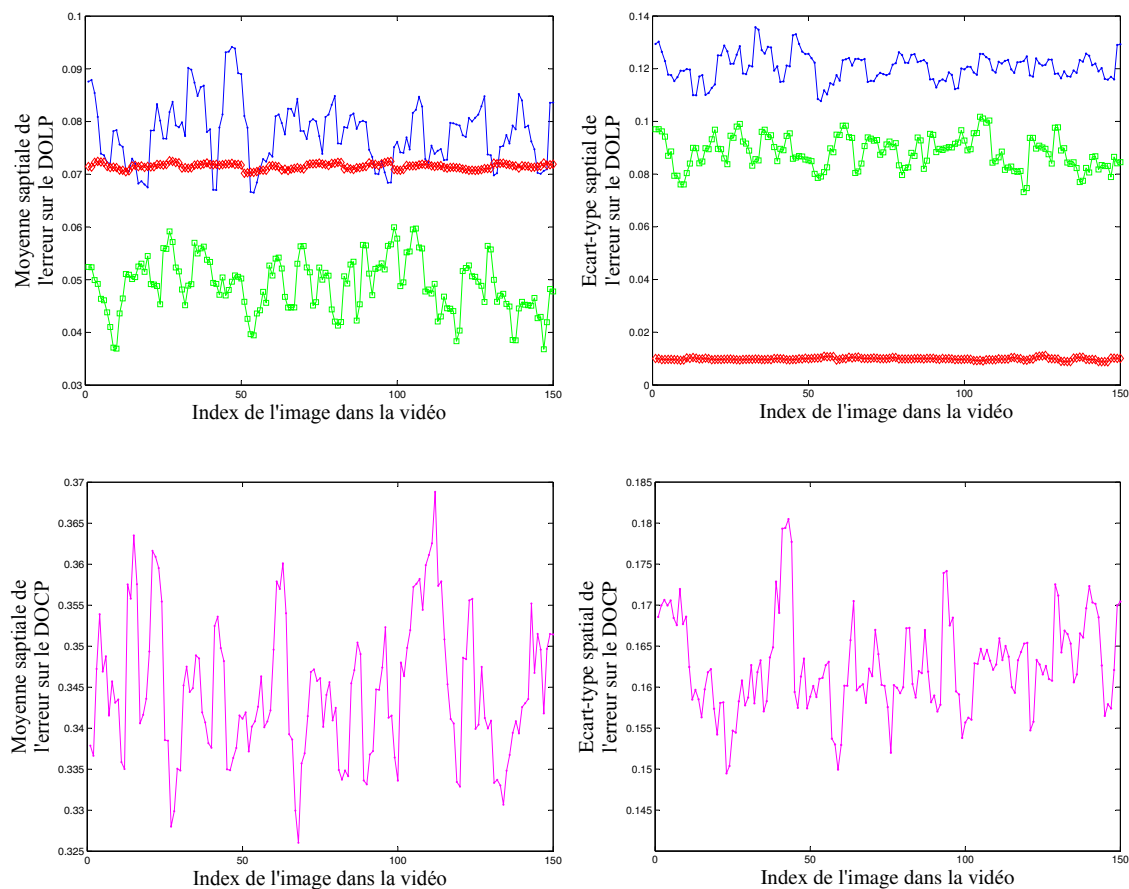


FIGURE 5.22 – Moyenne et écart-type de l'erreur pour l'estimation du *DOLP* et du *DOCP* à une cadence de 200im/s. Les couleurs correspondent aux ROI définies Fig. 5.20. Pour le *DOCP* les résultats ne tiennent pas compte du fait que le diffuseur dépolariise.

5.8 Discussion et pistes d'amélioration

Le premier axe d'amélioration se situe au niveau du signal de commande. L'étude du comportement du système en fonction de la séquence de tensions a été davantage poussée ici que dans le chapitre précédent. Cependant, l'influence de l'impulsion sur la réponse du modulateur n'a toujours pas été étudiée. Jouer sur l'amplitude ou sur la forme de cette impulsion pourrait peut-être améliorer les performances du polarimètre.

Dans la phase de validation en conditions imageantes, les résultats, concernant la composante circulaire principalement, étaient largement bruités par le diffuseur. Conduire de nouvelles expériences avec une autre diffuseur telle qu'une sphère d'intégration par exemple ou bien étudier précisément l'influence du composant sur la mesure permettrait d'estimer plus efficacement les performances réelles du polarimètre.

Comme mentionné dans le chapitre précédent Section 4.5, en se basant sur des travaux

réalisés précédemment [30], il est envisageable d'accroître la vitesse du système à 2000im/s. Seule une étude approfondie permettrait de déterminer si cette cadence peut effectivement être atteinte pour produire des résultats satisfaisants.

5.9 Conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre qu'en utilisant un modulateur à cristaux liquides ferroélectriques à une longueur d'onde différente de sa longueur d'onde nominale, il est possible d'analyser la totalité de la polarisation. Une mise en application concrète a été réalisée par le développement d'un polarimètre à division temporelle n'utilisant qu'un seul et unique modulateur à cristaux liquides ferroélectriques pour tout élément modulateur de polarisation. Une cadence de 200im/s est atteinte. A cette vitesse, l'angle azimutal du vecteur de Stokes incident est estimé avec une précision de 5 à 10°, et l'ellipticité avec une précision de 8,3°. Le degré de polarisation est estimé, lui, avec une erreur de 5 à 8%.

Conclusion et perspectives

Résumé

Nous nous sommes attachés à proposer une architecture de polarimètre performante, rapide, et compacte car conceptuellement simple, de manière à favoriser l'embarquabilité du dispositif, clé de nouvelles applications. Dans la lignée de travaux précédemment menés au laboratoire MIPS, nous avons proposé une solution utilisant un seul modulateur à cristaux liquides ferroélectriques. Dans un mode de fonctionnement nominal, ce type de cristaux liquides ne permet d'obtenir que deux modes de polarisation croisés. Seules les deux premières composantes du vecteur de Stokes peuvent ainsi être estimées. Utiliser un seul modulateur restreint donc a priori les capacités du polarimètre. Nous avons montré que l'utilisation de ce modulateur en dehors de son mode de fonctionnement nominal permet d'outrepasser cette limite.

Modifier le signal de commande tout en restant à la longueur d'onde nominale permet dans un premier temps d'obtenir un comportement proche de celui d'une lame demi-onde. La totalité de la polarisation linéaire peut ainsi être analysée avec notre polarimètre à 632,8nm, ce que nous avons vérifié lors d'une caractérisation de laboratoire classique, puis lors d'une caractérisation en fonctionnement réel [75]. La qualité intrinsèque du processus d'estimation, étudiée au travers du conditionnement de la matrice de réduction des données, atteste que nous sommes proches de l'optimum possible avec ce type de modulateur. Une cadence de 150 images par seconde a été atteinte, ce qui reste inédit pour une architecture portable de ce type. La validation imageante fournit in fine des images de qualité. Même si des améliorations sont bien sûr possibles, nous pouvons estimer que cette phase du travail a fourni une solution relativement mature.

Dans un deuxième temps, nous avons changé de longueur d'onde de travail pour nous écarter de la longueur d'onde nominale. Nous sommes passés de 632,8nm à 532nm. Le retard induit par le modulateur n'est alors plus multiple de 180° , ce qui nous permet d'analyser la circularité de la polarisation [76]. Néanmoins, cette phase du travail a mis en évidence l'évolution du retard en fonction de la tension de commande. Ainsi, angle de la lame équivalente et retard s'avèrent couplés, ce qui nous fournit une implantation moins performante qu'espéré. La qualité intrinsèque du processus d'estimation, étudiée au travers

du conditionnement de la matrice de réduction des données, est ici bien moindre que dans le cas précédent. Une cadence de 200 images par secondes a néanmoins été atteinte en validation imageante, avec des résultats tout à fait probants.

Dans les deux configurations précédentes, les images obtenues ont été fournies brutes de débruitage, elles témoignent donc de la qualité optique pure de notre implantation. Nous avons volontairement éludé ce problème du débruitage pour nous attaquer frontalement à un autre problème, autrement plus épineux : le polarimètre étudié étant basé sur le principe de la division temporelle, l'observation d'un objet en mouvement provoque l'apparition d'artéfacts. Une solution indépendante du mouvement a été proposée via l'implantation d'un filtrage médian temporel. Cette approche a ceci d'original qu'elle considère l'évolution du $DOLP_P$ en un pixel donné au cours du temps. L'aspect spatial de l'information est ignoré. Un deuxième algorithme a été proposé, basé sur le recalage rigide des modes de polarisation pour estimer le mouvement général dans la scène. Ce deuxième algorithme est limité en ceci qu'il détermine la corrélation de l'intégralité des images de modes de polarisation, sans délimiter de régions d'intérêts. Cet algorithme s'avère performant dans le cas d'une scène où tous les éléments sont empreints du même mouvement, mais s'avère plus limité lorsque l'on observe un objet se déplaçant devant un fond statique. Les deux méthodes évoquées ont été comparées l'une à l'autre. La correction par recalage rigide donne de meilleurs résultats, mais consomme plus de ressources informatiques. Le filtrage médian temporel reste, lui, facile à implanter. Un démonstrateur a été mis en place pour cette dernière méthode. Le $DOLP_P$ est filtré et restitué en temps réel à une cadence de 50 images par secondes, le programme étant codé en C++ et tournant sur une plateforme PC. De plus, le temps de filtrage est suffisamment court pour envisager un filtrage en temps réel à une cadence de plus de 300 images par secondes, toujours sur la même plateforme PC.

Nous avons ainsi proposé des mises en oeuvre expérimentales, qui démontrent sans ambiguïté la faisabilité de polarimètres à cristaux liquides simples (une seule cellule à cristaux liquides, pas de contrôle de température), rapides et performants.

Perspectives

Les perspectives d'amélioration portent à la fois sur le matériel et le post-traitement des images acquises.

La commande du modulateur est évidemment l'un des points-clés. Tel qu'il a été étudié dans ce manuscrit, le signal de commande apparaît finalement relativement limité par rapport aux potentialités qu'offre le matériel, ceci sur plusieurs plans : tension maximale admissible, forme du signal, fréquence de fonctionnement.

Dans la présente étude, la composante en signal carré a vu ses niveaux limités entre $+5V$ et $-5V$. Ces tensions ont été choisies car elles correspondent aux tensions nominales

de commande du modulateur. Cependant, de l'avis même du constructeur, il s'avère que l'on peut appliquer des tensions de $\pm 10V$ sur des durées de quelques millisecondes sans risquer d'endommager le matériel. De même, les niveaux de l'impulsion ont été fixés à $\pm 10V$ pour $200\mu s$ de large. Il serait même envisageable de monter à $\pm 25V$, tant que la durée de l'impulsion reste brève. Il est possible, pour ne pas dire probable, que ces nouvelles plages de tensions, disponibles à la fois pour la composante carrée et pour l'impulsion, permettent d'atteindre des états du modulateur ouvrant à un fonctionnement global plus performant.

Un deuxième point consiste à étudier la réponse du modulateur en fonction de la forme du signal de commande. Par exemple, la transition entre l'impulsion et le niveau du signal carré qui suit est un front de type échelon. Il est envisageable de modifier cette transition pour appliquer une forme de type rampe ou exponentielle. La réponse du modulateur en sera assurément modifiée. Il reste à étudier si cela améliore les performances globales ou non. Il en va de même pour la composante en signal carré. Plutôt que d'avoir des niveaux stables, il est envisageable d'utiliser une autre forme de signal moins naturelle. Gardons à l'esprit que l'essentiel est d'obtenir un régime établi sur le signal de réponse du modulateur.

Mentionnons également que la fréquence du signal peut être augmentée. Une cadence de 1000 à 2000Hz a été validée expérimentalement en caractérisation, mais pas démontrée en polarimétrie imageante faute de caméra adéquate. A une telle fréquence, il faudra vraisemblablement appliquer des tensions plus élevées que celles utilisées dans le présent travail, notamment pour l'impulsion, afin de diminuer suffisamment le régime transitoire.

Ces différentes pistes ne remettent pas en cause l'approche précédente, elles s'apparentent dès lors plus à un travail d'ingénierie. Il est envisagé de les explorer dans le cadre de la réalisation d'un démonstrateur pour lequel un soutien financier a été obtenu.

De manière à élargir les conditions d'utilisation du polarimètre, il est également envisageable de compenser l'influence de la température.

Enfin, l'amélioration des performances générales passe aussi par une phase d'amélioration du post-traitement. Nous avons peu ou prou éludé le problème conjoint du débruitage et de l'estimation. L'approche en problème inverse utilisée ici reste une approche relativement sensible au bruit. Si l'on dispose de quelques a priori sur le système et sur la scène observée, il existe des méthodes bayésiennes permettant d'estimer le vecteur de Stokes en réduisant le bruit par rapport à une approche en problème inverse [77]. On peut également affiner l'estimation par une phase de filtrage spécifique du bruit sur les modes de polarisation avant estimation du vecteur de Stokes, ou en filtrant les images obtenues au final. Notons qu'acquérir des images à une cadence de 200im/s ne signifie pas nécessairement restituer l'information de polarisation à la même cadence. Par conséquent, s'il n'est pas nécessaire de traiter les données en temps réel, alors de nombreuses méthodes de traitement d'image peuvent permettre d'améliorer les résultats présentés dans ce document, qui sont, eux, vierges de tout traitement pour les deux derniers chapitres.

Les post-traitements sur lesquels nous nous sommes penchés, relatifs à la suppression des artefacts de mouvements, sont également une piste où beaucoup reste à faire. Une thèse a démarré au laboratoire sur cette problématique, avec des techniques a priori plus performantes (flot optique notamment). Il est également prévu de passer à une implantation plus performante de ces algorithmes, de manière à pouvoir combiner matériel et traitement dans un système temps-réel.

Bibliographie

- [1] Tyo, J. S., Goldstein, D. L., Chenault, D. B., and Shaw, J. A., “Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications,” *Appl. Opt.* **45**(22), 5453–5469 (2006).
- [2] de Leon, E., Brandt, R., Phenis, A., and Virgen, M., “Initial results of a simultaneous stokes imaging polarimeter,” *Polarization Science and Remote Sensing III* **6682**(1), 668215 (2007).
- [3] Wolff, L., Mancini, T., Pouliquen, P., and Andreou, A., “Liquid crystal polarization camera,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **13**(2), 195–203 (1997).
- [4] Gandorfer, A. M., “Ferroelectric retarders as an alternative to piezoelectric modulators for use in solar stokes vector polarimetry,” *Opt. Eng.* **38**(8), 1402–1408 (1999).
- [5] Lefaudeux, N., Lechocinski, N., Breugnot, S., and Clemenceau, P., “Compact and robust linear stokes polarization camera,” *Polarization : Measurement, Analysis, and Remote Sensing VIII* **6972**(1), 69720B (2008).
- [6] Stokes, G., “On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources,” *Transactions of Cambridge Philosophical Society* **9**, 339–416 (1852).
- [7] Walraven, R., “Polarization imagery,” *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers* **112**, 164–167 (1977).
- [8] Solomon, J. E., “Polarization imaging,” *Appl. Opt.* **20**(9), 1537–1544 (1981).
- [9] Egan, W. G., Johnson, W. R., and Whitehead, V. S., “Terrestrial polarization imagery obtained from the space shuttle : characterization and interpretation,” *Appl. Opt.* **30**(4), 435–442.
- [10] Wolff, L. and Boulton, T., “Constraining object features using a polarization reflectance model,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **13**(7), 635–657 (1991).
- [11] Alouini, M., Goudail, F., Refregier, P., Grisard, A., Lallier, E., and Dolfi, D., “Multispectral polarimetric imaging with coherent illumination : towards higher image contrast,” *Polarization : Measurement, Analysis, and Remote Sensing VI* **5432**(1), 133–144 (2004).

- [12] Tyo, J. S., Rowe, M. P., Pugh Jr., E. N., and Engheta, N., "Target detection in optically scattering media by polarization-difference imaging," *Appl. Opt.* **35**(11), 1855–1870 (1996).
- [13] Sadjadi, F. A. and Chun, C. L., "Automatic detection of small objects from their infrared state-of-polarization vectors," *Opt. Lett.* **28**(7), 531–533 (2003).
- [14] Goudail, F., Terrier, P., Takakura, Y., Bigué, L., Galland, F., and DeVlaminck, V., "Target detection with a liquid-crystal-based passive stokes polarimeter," *Appl. Opt.* **43**(2), 274–282 (2004).
- [15] Larive, M., Collot, L., Breugnot, S., Botma, H., and Roos, P., "Laid and flush-buried mine detection using an 8- to 12- μ m polarimetric imager," *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets III* **3392**(1), 115–120 (1998).
- [16] Frankot, R. and Chellappa, R., "A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **10**(4), 439–451 (1988).
- [17] Rahmann, S. and Canterakis, N., "Reconstruction of specular surfaces using polarization imaging," *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* **1**, 149–155 (2001).
- [18] Morel, O., Meriaudeau, F., Stolz, C., and Gorria, P., "Polarization imaging applied to 3d reconstruction of specular metallic surfaces," *Machine Vision Applications in Industrial Inspection XIII* **5679**(1), 178–186 (2005).
- [19] Vedel, M., Lechocinski, N., and Breugnot, S., "3shape reconstruction of optical element using polarization," *Polarization : Measurement, Analysis, and Remote Sensing IX* **7672**(1), 767203 (2010).
- [20] Miyazaki, D., Takashima, N., Yoshida, A., Harashima, E., and Ikeuchi, K., "Polarization-based shape estimation of transparent objects by using raytracing and plzt camera," *Polarization Science and Remote Sensing II* **5888**(1), 588801 (2005).
- [21] Bueno, J. M. and Artal, P., "Double-pass imaging polarimetry in the human eye," *Opt. Lett.* **24**(1), 64–66 (1999).
- [22] Guyot, S., Anastasiadou, M., Deléchelle, E., and de Martino, A., "Registration scheme suitable to mueller matrix imaging for biomedical applications," *Opt. Exp.* **15**(12), 7393–7400 (2007).
- [23] Laude-Boulesteix, B., Martino, A. D., Drévilion, B., and Schwartz, L., "Mueller polarimetric imaging system with liquid crystals," *Appl. Opt.* **43**(14), 2824–2832 (2004).
- [24] Hanaoka, Y., "Ferroelectric liquid crystal polarimeter for high-cadence halpha imaging polarimetry," *Solar Physics* **222**, 265–278 (2004).
- [25] Dayton, D., Gonglewski, J., Restaino, S., Martin, J., Phillips, J., Hartman, M., Kervin, P., Snodgrass, J., Browne, S., Heimann, N., Shilko, M., Pohle, R., Carrion, B.,

- Smith, C., and Thiel, D., “Demonstration of new technology mems and liquid crystal adaptive optics on bright astronomical objects and satellites,” *Opt. Exp.* **10**(25), 1508–1519 (2002).
- [26] Wolff, L. B., “Polarization camera for computer vision with a beam splitter,” *J. Opt. Soc. Am. A* **11**(11), 2935–2945 (1994).
- [27] Bigué, L., *Reconnaissance des formes en temps réel par voie optique : étude comparative d’implantations optiques de filtres de corrélation. Application au corrélateur optique à transformée de Fourier conjointe*, PhD thesis, Université de Haute Alsace (1996).
- [28] Stolz, C., Bigué, L., and Ambs, P., “Implementation of high-resolution diffractive optical elements on coupled phase and amplitude spatial light modulators,” *Appl. Opt.* **40**(35), 6415–6424 (2001).
- [29] Jaulin, A., *Imagerie de polarisation haute cadence à l’aide d’un modulateur de lumière à cristaux liquides ferroélectriques*, PhD thesis, Université de Haute Alsace (2007).
- [30] Bigué, L. and Cheney, N., “High-speed portable polarimeter using a ferroelectric liquid crystal modulator,” *Polarization Science and Remote Sensing III* **6682**(1), 668205 (2007).
- [31] Fresnel, A. J., *L’Oeuvre Complète*, vol. 1, Henri de Senarmont, Emilie Verdet, Leonor Fresnel, Paris (1866).
- [32] Goldstein, D., *Polarized Light*, Marcel Dekker, New York & Basel, second ed. (2003).
- [33] Mueller, H., “The foundation of optics,” *J. Opt. Soc. Am.* **38**, 551 (1948).
- [34] Krishnan, S. and Nordine, P. C., “Fast ellipsometry and mueller matrix ellipsometry using the division-of-amplitude photopolarimeter,” *International Symposium on Polarization Analysis and Applications to Device Technology* **2873**(1), 152–156 (1996).
- [35] Bénéière, A., Alouini, M., Goudail, F., and Dolfi, D., “Design and experimental validation of a snapshot polarization contrast imager,” *Appl. Opt.* **48**(30), 5764–5773 (2009).
- [36] Fujita, K., Itoh, Y., and Mukai, T., “Development of simultaneous imaging polarimeter for asteroids,” *Adv. Space. Res.* **43**, 325–327 (2008).
- [37] Bayer, B., “Color imaging array,” (1976). U.S.A. Patent number 3,971,065.
- [38] Sadjadi, F. A. and Chun, C. S. L., “Remote sensing using passive infrared stokes parameters,” *Opt. Eng.* **43**(10), 2283–91 (2004).
- [39] Gruev, V., Ortu, A., Lazarus, N., der Spiegel, J. V., and Engheta, N., “Fabrication of a dual-tier thin film micropolarization array,” *Opt. Exp.* **15**(8), 4994–5007 (2007).
- [40] Chun, Cornell, S. and Sadjadi, F. A., “Polarimetric imaging system for automatic target detection and recognition,” tech. rep., U.S. Army Communications-Electronics Research, Development, and Engineering Center (2000).

- [41] Terrier, P. and Devlaminck, V., “Système polarimétrique pour l’analyse d’images,” *Trait. Sig.* **17**(5/6), 479–490 (2000).
- [42] Terrier, P., Charbois, J. M., and Devlaminck, V., “Fast-axis orientation dependence on driving voltage for a stokes polarimeter based on concrete liquid-crystal variable retarders,” *Appl. Opt.* **49**(22), 4278–4283 (2010).
- [43] Martino, A. D., Kim, Y.-K., Garcia-Caurel, E., Laude, B., and Drévilion, B., “Optimized mueller polarimeter with liquid crystals,” *Opt. Lett.* **28**(8), 616–618 (2003).
- [44] Jaulin, A. and Bigué, L., “High speed partial stokes imaging using a ferroelectric liquid crystal modulator,” *J. Eur. Opt. Soc. - Rap. Pub.* **3**, 08019 (2008).
- [45] Blakeney, S. L., Day, S. E., and Stewart, J. N., “Determination of unknown input polarisation using a twisted nematic liquid crystal display with fixed components,” *Optics Communications* **214**, 1–8 (2002).
- [46] Gu, D.-F., Winker, B., Wen, B., Mansell, J., Zachery, K., Taber, D., Chang, T., Choi, S., Ma, J., Wang, X., and Sage, K., “Liquid crystal tunable polarization filters for polarization imaging,” *Liquid Crystals XII* **7050**(1), 70500I (2008).
- [47] Fernandes, P., *Nouvelles études structurales de cristaux liquides par réflectivité et diffraction résonante de rayons X*, PhD thesis, Université Bordeaux 1 (2007).
- [48] Dayton, D., Browne, S., Gonglewski, J., and Restaino, S., “Characterization and control of a multielement dual-frequency liquid-crystal device for high-speed adaptive optical wave-front correction,” *Appl. Opt.* **40**(15), 2345–2355 (2001).
- [49] Meyer, R.B., Liebert, L., Strzelecki, L., and Keller, P., “Ferroelectric liquid crystals,” *J. Physique Lett.* **36**(3), 69–71 (1975).
- [50] Tech, B. N. http://www.bossanovatech.com/salsa_specifications.htm.
- [51] Vedel, M., Lechocinski, N., and Breugnot, S., “Compact and robust linear stokes polarization camera,” *EPJ Web of Conferences* **5**, 01005 (2010).
- [52] Lefaudeux, N., Lechocinski, N., Breugnot, S., and Clemenceau, P., “High-speed polarization imaging camera based on electrically driven plzt waveplate and split focal plane,” *Polarization : Measurement, Analysis, and Remote Sensing VIII* **6972**(1), 697205 (2008).
- [53] Polaris Sensor Technologies, Inc.
<http://www.polarissensor.com/products/polarization/polarimeters/visible>.
- [54] Polaris Sensor Technologies, Inc.
<http://www.polarissensor.com/products/polarization/polarimeters/mwir>.
- [55] Polaris Sensor Technologies, Inc.
<http://www.polarissensor.com/products/polarization/polarimeters/lwir>.

- [56] Boulder Nonlinear Systems, Inc.
<http://www.bnolnlinear.com/products/polarRotators/polarRotators.htm>.
- [57] Goudail, F. and Réfrégier, P., “Statistical algorithms for target detection in coherent active polarimetric images,” *J. Opt. Soc. Am. A* **18**(12), 3049–3060 (2001).
- [58] Goudail, F. and Réfrégier, P., “Target segmentation in active polarimetric images by use of statistical active contours,” *Appl. Opt.* **41**(5), 874–883 (2002).
- [59] Cocquerez, J.-P. and Philipp, S., *Analyse d’images : filtrage et segmentation*, Masson (1998).
- [60] Marconnet, P., Gendre, L., Foulonneau, A., and Bigué, L., “Cancellation of motion artifacts caused by a division-of-time polarimeter,” *Polarization Science and Remote Sensing V* **8160**(1), 81600M (2011).
- [61] Boulder Nonlinear Systems, Inc., “Liquid crystal spatial light modulator,” (2002).
<http://www.bnolnlinear.com/products/xyslm/XY.htm>.
- [62] Jaulin, A., Bigue, L., and Ambs, P., “Implementation of a high-speed imaging polarimeter using a liquid crystal ferroelectric modulator,” *Optical Sensing II* **6189**(1), 618912 (2006).
- [63] Jaulin, A., Bigué, L., and Ambs, P., “High-speed degree-of-polarization imaging with a ferroelectric liquid-crystal modulator,” *Opt. Eng.* **47**(3), 033201 (2008).
- [64] Peinado, A., Lizana, A., Vidal, J., Iemmi, C., and Campos, J., “Optimization and performance criteria of a stokes polarimeter based on two variable retarders,” *Opt. Express* **18**(10), 9815–9830 (2010).
- [65] Sabatke, D. S., Descour, M. R., Dereniak, E. L., Sweatt, W. C., Kemme, S. A., and Phipps, G. S., “Optimization of retardance for a complete stokes polarimeter,” *Opt. Lett.* **25**(11), 802–804 (2000).
- [66] Sabatke, D. S., Locke, A. M., Descour, M. R., Sweatt, W. C., Garcia, J. P., Dereniak, E. L., Kemme, S. A., and Phipps, G. S., “Figures of merit for complete stokes polarimeter optimization,” *Polarization Analysis, Measurement, and Remote Sensing III* **4133**(1), 75–81 (2000).
- [67] Tyo, J. S., “Noise equalization in stokes parameter images obtained by use of variable-retardance polarimeters,” *Opt. Lett.* **25**(16), 1198–1200 (2000).
- [68] Tyo, J. S., “Design of optimal polarimeters : Maximization of signal-to-noise ratio and minimization of systematic error,” *Appl. Opt.* **41**(4), 619–630 (2002).
- [69] OSI Optoelectronics. <http://www.osioptoelectronics.com/standard-products/silicon-photodiodes/photodiode-amplifier-hybrids/photop-series.aspx>.
- [70] Baba, J. S. and Boudreaux, P. R., “Wavelength, temperature, and voltage dependent calibration of a nematic liquid crystal multispectral polarization generating device,” *Appl. Opt.* **46**(22), 5539–5544 (2007).

- [71] Heredero, R. L., Uribe-Patarroyo, N., Belenguer, T., Ramos, G., Sánchez, A., Reina, M., Pillet, V. M., and Álvarez Herrero, A., “Liquid-crystal variable retarders for aerospace polarimetry applications,” *Appl. Opt.* **46**(5), 689–698 (2007).
- [72] Reinhart, K.-F., Dorfmüller, L., Marx, K., and Matszczyk, T., “Addressing of ferroelectric liquid crystal matrices and electrooptical characterization,” *Ferroelectrics* **113**(1), 405–417 (1991).
- [73] Terrier, P., Charbois, J., and Devlaminck, V., “System and method for partial lecrv stokes polarimeter thermal drift compensation,” *EPJ Web of Conferences* **5**, 01004 (2010).
- [74] Gisler, D., Feller, A., and Gandorfer, A. M., “Achromatic liquid crystal polarization modulator,” *Polarimetry in Astronomy* **4843**(1), 45–54 (2003).
- [75] Gendre, L., Foulonneau, A., and Bigué, L., “Imaging linear polarimetry using a single ferroelectric liquid crystal modulator,” *Appl. Opt.* **49**(25), 4687–4699 (2010).
- [76] Gendre, L., Foulonneau, A., and Bigué, L., “Full stokes polarimetric imaging using a single ferroelectric liquid crystal device,” *Opt. Eng.* **50**(8), 081209 (2011).
- [77] Sfikas, G., Heinrich, C., Zallat, J., Nikou, C., and Galatsanos, N., “Recovery of polarimetric stokes images by spatial mixture models,” *J. Opt. Soc. Am. A* **28**(3), 465–474 (2011).

Résumé

L'imagerie de polarisation apporte des informations complémentaires à l'imagerie conventionnelle. L'œil humain n'étant cependant pas sensible à la polarisation de la lumière, l'utilisation d'équipements spécifiques est indispensable. Depuis le XIX^{ème} siècle, des scientifiques étudient la polarisation de la lumière : d'abord avec de simples lames polarisantes, puis depuis une vingtaine d'années à l'aide de modulateurs à cristaux liquides (CL). Ces derniers présentent un avantage considérable par rapport aux lames polarisantes : ils permettent des vitesses de modulation de la polarisation de la lumière qui ne peuvent être atteintes avec des lames orientées mécaniquement. Les CL nématiques alignés parallèlement et les CL nématiques en hélice sont les plus répandus aujourd'hui, que ce soit dans des équipements grand public tels que les écrans d'ordinateur, ou dans des équipements professionnels. Ils fonctionnent à des fréquences maximales de l'ordre de 50Hz. La vitesse de fonctionnement de ces CL peut toutefois encore être dépassée en utilisant des CL ferroélectriques, pouvant atteindre le kiloHertz. Ces éléments sont rapportés dans la littérature comme des éléments bistables, donc ne permettant pas de moduler la polarisation incidente de manière accordable, contrairement aux CL nématiques. En d'autres termes, un seul modulateur à CL ferroélectriques ne permet a priori pas d'analyser la totalité de la polarisation. Seulement une fraction de la polarisation linéaire du faisceau incident peut être identifiée.

Le présent travail vise à montrer qu'a posteriori des CL ferroélectriques convenablement commandés peuvent être utilisés de manière accordable pour analyser la totalité de la polarisation. Partant d'un modulateur à CL ferroélectriques conventionnel, il est montré dans un premier temps que l'on peut analyser la totalité de la polarisation linéaire dès lors que la commande électrique est adaptée. Puis dans un deuxième temps, en exploitant la dépendance en longueur d'onde du comportement du modulateur, nous démontrons que cet élément optique peut être utilisé pour analyser la totalité de la polarisation du faisceau incident, c'est-à-dire la composante linéaire aussi bien que circulaire. Un polarimètre à division temporelle est développé pour prouver la faisabilité d'un polarimètre n'utilisant qu'un seul et unique modulateur à CL ferroélectriques pour tout élément polarisant. Un défaut a également été mis en évidence dans la restitution de l'information de polarisation avec un polarimètre à division temporelle lors de l'observation d'objets en mouvement. Avec un

tel système, l'acquisition des différentes images d'intensités nécessaires à l'estimation de l'information de polarisation se fait séquentiellement. Par conséquent, le mouvement d'un objet dans la scène pendant la phase d'acquisition se répercute sur la séquence d'images d'intensités, ce qui produit des artefacts lors de l'estimation de la polarisation. Des solutions à ce problème sont proposées.

Abstract

Analyzing the polarization of the light can bring complementary information to the classical imaging. Since the human eye is not capable of catching the polarization, specific sensing device have to be developed. Since the XIXth century, scientists study the polarization of the light : first with polarizing plates, then for the past two decades with liquid crystals (LC). These last elements have the enormous advantage to allow light modulation frequency far beyond what can be reach with mechanically rotated plates. Aligned nematic LC and twisted nematic LC are the most common technologies used today, either in devices made for the general public such as computer screens, or in professional devices. Their typical modulation rate is 50Hz. Higher modulation rate, around the kiloHertz, can be reached using ferroelectric LC. Ferroelectric LC are known to be bistable components, unable to modulate the polarization in an accordable manner, contrary to nematic LC. As a consequence, only a fraction of the linear polarization can be estimated with ferroelectric LC.

The present work aims to demonstrate that correctly electrically driven, a ferroelectric LC cell can be used to analyzed the whole polarization of the incident light beam. Firstly, it is shown that a single ferroelectric LC modulator is sufficient to analyze the whole linear polarization, as long as the command signal is properly designed. Secondly, based on the wavelength dependency of the modulator's behavior, it is show that a single modulator can be used to analyze the total polarization, that is both linear and circular polarization. A prototype of division of time polarimeter is developed in order to demonstrate the feasibility of a polarimeter using a single ferroelectric LC modulator and no other polarization sensitive component. In the mean time, a defect has been highlighted while observing moving objects with a division of time polarimeter. With this kind of polarimeter, intensity images needed to compute the polarization information are acquired one after another. As a consequence, the motion of an object is observable on the intensity pictures, which leads to defects on the picture of the estimated polarization information. Solutions to this issue are proposed.