

Mémoire présenté
en vue de l'obtention de
L'Habilitation à Diriger des Recherches

Imagerie par matrice de filtres :
Pré-traitements et Mise en œuvre

Par Pierre-Jean Lapray

Maître de conférences des universités
Au sein de l'Université de Haute-Alsace
À l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud-Alsace (ENSISA),
Rattaché à l'Institut de Recherche en Informatique, Mathématiques,
Automatique et Signal (IRIMAS - EA 7499)

Composition du jury :



Samia Ainouz	Rapporteur	LITIS - INSA Rouen Normandie
Alain Trémeau	Rapporteur	LabHC - Université Jean Monnet
Alamin Mansouri	Rapporteur	ImViA - Université de Bourgogne
Mehdi Alouini	Examineur	Institut Foton - Université de Rennes 1
Laurent Bigué	Garant HDR	IRIMAS - Université de Haute-Alsace

Remerciements

Je veux remercier tout d'abord les membres du jury d'avoir accepté d'expertiser mon travail. Je tiens à remercier Laurent Bigué pour sa bienveillance et son accueil au sein de l'équipe FOTI en 2016. Je n'aurais pas pu mener mes recherches en toute sérénité sans sa confiance. Je remercie également Michel Basset, responsable de l'équipe MIAM.

Un petit mot pour Jean-Baptiste Thomas, avec qui j'ai pu commencer de travailler en tant qu'ingénieur de recherche en 2014. Mon engouement pour la recherche en a été un des résultats. Quel que soit ce que l'on entreprend ou fait, la réalisation est une chose, mais le plus fondamental est de l'envisager de manière enthousiaste. C'est à peu près ce qui résume nos collaborations et maintenant notre amitié.

Je veux saluer aussi les personnes qui m'entourent au quotidien à l'école d'ingénieurs ENSISA, mes collègues enseignants-chercheurs et le personnel administratif et technique. On apprécie l'environnement de travail à l'ENSISA et sur le campus grâce à eux. Je ne me risquerai pas à des remerciements trop exhaustifs de peur d'oublier quelqu'un. L'un des premiers jours après mon arrivée en 2016, j'ai rencontré une personne retraitée à la cafétéria de l'ENSISA (dont j'ignore le nom) et qui m'a dit : "tu es bien tombé". Je le vérifie tous les jours.

Le Haut-Soultzbach, Mars 2024

P.-J. L.

Préambule

Ce document présente mon activité de recherche depuis mon doctorat. L'imagerie à partir de capteurs filtrés sera le sujet, avec comme sous-thèmes l'analyse des dimensions d'imagerie, la restauration d'image et la mise en œuvre des capteurs filtrés.

Le manuscrit est organisé comme suit :

- Le 1^{er} chapitre présente en quelques pages mon curriculum vitae.
- Le 2^{ème} chapitre énumère l'ensemble de mes publications réalisées depuis le début de ma thèse en 2010.
- Le 3^{ème} chapitre, chapitre principal et intitulé « Synthèse de la recherche », est une mise en lumière d'une série de travaux. Ils sont organisés dans un souci d'unification et de mise en perspective. Quand cela a été possible, j'ai tenu à inclure des figures originales, c.-à-d. jamais publiées.
- Le 4^{ème} et dernier chapitre, intitulé « Perspectives », s'appuie sur le chapitre principal, et est consacré à l'élaboration d'une stratégie de recherche et de diffusion à court et moyen termes. Je tenterai d'identifier les directions pertinentes à envisager en tant qu'enseignant-chercheur.

"L'habilitation à diriger des recherches sanctionne la reconnaissance du haut niveau scientifique du candidat, du caractère original de sa démarche dans un domaine de la science, de son aptitude à maîtriser une stratégie de recherche dans un domaine scientifique ou technologique suffisamment large et de sa capacité à encadrer de jeunes chercheurs." (Arrêté du 23 novembre 1988 relatif à l'habilitation à diriger des recherches, Article 1).

Table des matières

Remerciements	i
Préambule	iii
Acronymes	vii
Liste des Figures	xii
Liste des Tableaux	xiii
1 Curriculum Vitae	1
1.1 Affiliations et coordonnées	2
1.2 Diplômes	2
1.3 Emplois	3
1.4 Activités d'enseignement	3
1.4.1 Description et volume horaire	3
1.4.2 L'enseignement de la logique numérique appliquée aux FPGA	4
1.4.3 Encadrement de projets	7
1.4.4 Autres activités liées à l'enseignement	8
1.5 Encadrement	9
1.6 Projets et financements	9
1.7 Principales collaborations	11
1.8 Expertise et diffusion	12
1.8.1 Expertise	12
1.8.2 Activité éditoriale	13
1.8.3 Diffusion des connaissances, des responsabilités et des activités au sein des sociétés savantes	14
1.8.4 Organisation de colloques et conférences	14
1.8.5 Adhésions à des sociétés savantes	15
1.8.6 Responsabilités scientifiques	15
1.9 Résumé chronologique	15

2 Publications	17
2.1 Liste des publications	17
2.2 Référencement de la recherche	22
2.2.1 Citations	22
2.2.2 Sites web	24
2.3 Bases de données et code Matlab	25
3 Synthèse de la recherche	27
3.1 Introduction	28
3.1.1 Contexte	28
3.1.2 Le capteur d'image	29
3.1.3 La dimension d'imagerie	33
3.1.4 Le capteur à matrice de filtres	47
3.2 Analyser les données spectropolarimétriques	52
3.2.1 Imagerie spectrale et polarimétrique	52
3.2.2 Méthode pour l'analyse statistique	53
3.3 Pré-traiter les images filtrées	58
3.3.1 Calibrer les images de polarisation linéaire	58
3.3.2 Restauration des images	61
3.4 Mettre en œuvre les capteurs filtrés	69
3.4.1 Pipeline d'imagerie spectropolarimétrique	69
3.4.2 Pipeline d'imagerie bio-inspirée	77
4 Perspectives	87
4.1 Recherche	87
4.1.1 Dimension temporelle et accélération d'algorithmes	87
4.1.2 Étude de l'impact des arrangements spatiaux pour les capteurs spectropolarimétriques filtrés	89
4.1.3 Conception et réalisation d'un capteur SPFA	90
4.1.4 Applications potentielles	93
4.2 Point de vue sur l'imagerie de polarisation dans le milieu académique	94
4.3 Enseignement	95
4.4 Conclusion	96
Références	109
Annexe 1	110

Acronymes

- AoLP** Angle of Linear Polarization [vi](#), [xi](#), [68](#)
- ASE** Automatique et Systèmes Embarqués [vi](#), [7](#), [8](#)
- CFA** Color Filter Array [vi](#)
- CPFA** Color Polarization Filter Array [vi](#), [25](#), [78](#)
- DCP** Dark Channel Prior [vi](#), [83](#), [85](#)
- DFA** Density Filter Array [vi](#)
- DoFP** Division of Focal Plane Polarimeter [vi](#), [58](#)
- DoLP** Degree of Linear Polarization [vi](#), [xi](#), [68](#)
- EARI** Edge-Aware Residual Interpolation [vi](#), [66](#), [78](#)
- ENSISA** École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud-Alsace [vi](#), [3](#)
- FA** Filter Array [vi](#), [48](#)
- FOTI** Fonctions Optiques et Traitement de l'Information [vi](#), [11](#)
- FPGA** Field-Programmable Gate Array [vi](#), [3](#), [6](#)
- HDR** High Dynamic Range [vi](#), [29](#), [35](#), [49](#), [78](#)
- LMMSE** Linear Minimum Mean Square Error [vi](#), [xiii](#), [62](#), [63](#), [67](#)
- NDVI** Normalized Difference Vegetation Index [vi](#), [8](#)
- NIR** Near-InfraRed [vi](#), [25](#), [49](#)
- PFA** Polarization Filter Array [vi](#), [25](#), [78](#)
- SFA** Spectral Filter Array [vi](#), [25](#)
- SPD** Spectral Power Distribution [vi](#), [40](#)
- SPFA** Spectral Polarization Filter Array [vi](#), [xii](#), [90](#), [91](#)
- SPI** Spectral and Polarization Imaging [vi](#), [69](#)
- VHDL** Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language [vi](#), [4](#)

Liste des Figures

1.1	Volume horaire par an. Le volume total Eq. TD est au-dessus de chaque barre.	5
1.2	Diagramme de Gantt qui résume les projets, les co-encadrements et les dates de publication. Les encadrements sont en bleu clair, les projets en orange et les publications en rouge.	16
2.1	Nombre de citations et indicateurs statistiques de Google Scholar au 20/07/2023.	23
2.2	Nombre de citations et indicateurs statistiques de Web of Science au 20/07/2023.	23
2.3	Répartition des citations par zones géographiques.	24
3.1	(a) Structure d'un capteur à base de micro-filtres RGB et utilisant l'arrangement de Bayer RGGB [5]. Référence : Hamamatsu. (b) Vue en coupe d'un pixel [64]. Pour minimiser l'apparition d'effets indésirables tels que le "cross-talk", le micro-filtre couleur est disposé en dessous de la micro-lentille.	30
3.2	Les dimensions de l'imagerie. Pour un nombre fini de pixels/capteurs, comment définir un assortiment judicieux de la ressource par rapport aux dimensions d'imagerie à considérer ?	33
3.3	Schéma montrant les liens entre les thématiques de recherche depuis 2010. Mes travaux de thèse portant sur l'HDR ("High Dynamic Range") ont été mis en relation avec les travaux effectués en post-doc en 2014 sur l'imagerie multispectrale. De même, en tant que maître de conférence, mes travaux sur la polarisation ont bénéficié de travaux antérieurs portant sur l'imagerie multispectrale et HDR.	34
3.4	Un signal lumineux (ayant une plage dynamique fixée) peut être converti en signal numérique avec différentes profondeurs de bits. L'opération de conversion se fait à l'aide d'ADC. Référence : Lien.	35

- 3.5 Principe de l'imagerie HDR. Une scène montrant une grande dynamique d'intensités. Une image prise avec un seul temps d'exposition ne représente qu'une plage limitée des valeurs d'intensités. En combinant 3 expositions (a)-(c), nous pouvons reconstruire une image avec une grande plage dynamique. (d) est inspiré de Vinegoni *et al.* [135]. 36
- 3.6 (a-i) Images couleurs d'une scène à grande dynamique prises avec un bracketing d'exposition (par variation de temps de pose avec un intervalle d'1 stop). La scène présente à la fois des zones très fortement éclairées et des zones très faiblement éclairées. La plage dynamique du capteur étant fixe, chaque image individuelle ne restitue qu'une partie limitée de l'information totale de la scène. 37
- 3.7 (a) Image HDR générée à partir des images de la Figure 3.6 sans objet en mouvement. (a) image HDR représentée en fausses couleurs, (b) image reproduite (après "tone mapping") avec la méthode de Drago *et al.* [44], (c) image reproduite avec la méthode de Reinhard *et al.* [41], (d) image reproduite avec la méthode de Durand *et al.* [39]. 38
- 3.8 Modèle d'imagerie spectrale supposant une réflexion purement diffuse du matériau. La caractéristique spectrale des éléments qui composent l'objectif est supposée constante et donc non représentée. 41
- 3.9 Images d'intensité, de degrés et d'angles de polarisation en réflexion. L'objet est une boule de billard éclairée à sa normale par une source ponctuelle non polarisée. Les images brutes sont capturées avec une caméra munie d'un capteur monochrome SONY IMX264 et un polariseur tournant en face de l'objectif. Les images brutes sont moyennées ($\times 200$) avant estimation de Stokes. On remarque que ρ semble être relié à l'angle zénithal, et que ϕ semble encoder l'angle azimutal [128]. 44
- 3.10 L'origine de la polarisation d'un rayonnement réfléchi (perpendiculairement au faisceau incident) [3]. 45
- 3.11 Les matériaux sont constitués de dipôles électriques qui oscillent et génèrent de la lumière réfléchi et réfracté. Les dipôles qui produisent le faisceau réfracté oscillent dans une direction perpendiculaire au faisceau réfracté (double flèche noire). Dans le cas d'une polarisation s (à gauche), le dipôle oscille perpendiculairement au faisceau réfléchi (ici, on est à l'angle d'incidence de Brewster). Dans le cas d'une polarisation p (à droite), les dipôles oscillent parallèlement au faisceau réfléchi. **Un dipôle ne rayonne aucune énergie dans la direction d'oscillation de son axe.** 46

3.12 Une lumière partiellement linéairement polarisée passe à travers un polariseur linéaire après une réflexion de surface. L'intensité de sortie décrit une sinusoïde avec des composantes constantes (diffuse et spéculaire) et variables (spéculaire).	47
3.13 Panorama de mes publications liées aux matrices de filtres. Les travaux sont classés par variantes de matrices.	48
3.14 Plusieurs structures de réseau de filtres : (a) une matrice de filtres de couleurs utilisant l'arrangement de Bayer [5], (b) un réseau de filtres à densité variable (DFA) pour l'imagerie instantanée High Dynamic Range, (c) une matrice de filtres spectraux (SFA), (d) une matrice de filtres de polarisation (PFA), et (e) une matrice de filtres de polarisation et RGB (CPFA).	50
3.15 Comment capturer, échantillonner et restaurer les dimensions d'imagerie ?	51
3.16 DoLP et AoLP calculés globalement pour tous les pixels et tous les canaux spectraux pour 40 images spectropolarimétriques issues des bases de données Lapray <i>et al.</i> [133] et Qiu <i>et al.</i> [142] (sans les scènes possédant des films polarisants en fond).	53
3.17 Chaîne de traitement pour l'expérimentation sur l'analyse de données spectropolarimétriques.	54
3.18 Scénarios de réflexion pour les objets. Les canaux sont regroupés par canal spectral.	57
3.19 Résultats de calibrage avec la méthode super-pixel pour deux types de caméras à base de matrice de micro-polariseurs. La caméra 4D possède un capteur CMOS Sony IMX174 couplé à un PFA fabriqué par la société Moxtek (technologie "on-glass", les micro-filtres étant par-dessus les microlentilles). La caméra Lucid Vision possède un capteur Sony IMX250 MZR (technologie "on-chip", les micro-filtres étant sous les microlentilles).	60
3.20 Visualisation des résultats de calibrage pour les 2 caméras sur un signal uniforme de degré de polarisation 100% et d'angle 20°. (a), (b), (e), (f) DoLP et AoLP avant et après calibrage pour la caméra 4D Technology (capteur avec micro-filtres "on-glass"). (c), (d), (g), (h) DoLP et AoLP avant et après calibrage pour la caméra Lucid Vision (capteur IMX250 MZR avec micro-filtres "on-chip"). La visualisation est faite sur la zone centrale du capteur de 300 × 300 pixels.	60
3.21 Exemple d'image capturée à partir d'une caméra CPFA. (a) image brute pleine définition et (b) version zoomée sur la zone rouge de la mire couleurs dans la scène.	62
3.22 Dématriçage d'un super-pixel.	65

3.23	PSNR en fonction du nombre d'images d'apprentissage. Un facteur de 0,05 est appliqué à l'écart type pour une meilleure lisibilité.	66
3.24	Visualisation des images de Stokes S_0 , de DoLP (Degree of Linear Polarization) pour la bande verte et d'AoLP (Angle of Linear Polarization) pour la bande verte. La scène est un zoom d'une image de la base de données de Morimatsu <i>et al.</i> [145]	68
3.25	(a) Les sensibilités spectrales des caméras CPFA. Seul le canal de polarisation 0° est représenté, car les quatre canaux de polarisation ont des sensibilités très similaires. La sensibilité est obtenue en caractérisant le capteur avec une résolution spectrale de $10nm$ de $370nm$ à $750nm$. (b) Transmission spectrale des filtres passe-bande. (c) Sensibilité spectrale totale du système après recombinaison. (d) Montage optique.	70
3.26	Chaîne de traitement des données spectropolarimétriques issues du montage de la Figure 3.25.	71
3.27	(a) ColorChecker Classic du X-Rite ColorChecker Passport utilisé pour l'étalonnage spectral. (b) Réflectances spectrales pour l'entraînement (issues du site Web de Chromaxion [164]). (c) Mire Creative Enhancement utilisé pour les tests. (d) Réflectances spectrales pour les tests. (e) Évaluation de l'estimation des réflectances.	72
3.28	Réflectance mesurée et estimée sur deux échantillons à partir de \mathbf{R} (Eq. 3.25) et \mathbf{R}' (Eq. 3.27). La région d'intérêt est un patch de taille 5×5 pixels où les courbes d'estimation spectrale sont moyennées.	74
3.29	(a) Les scènes de Lapray <i>et al.</i> [133] prises avec un capteur RGB standard. (b) Les images en version couleurs obtenues après application du pipeline spectropolarimétrique. On peut remarquer entre autres une diminution de l'effet de la composante spéculaire, dont l'intensité a été filtrée polarimétriquement.	75
3.30	Haut : transformation sRGB des images spectrales. Bas : Transformation sRGB des images spectrales après suppression de la composante polarisée spéculaire. Le système d'imagerie est fixe et positionné à 45° par rapport à la normale de la mire. L'angle d'incidence de l'éclairage est augmenté de $[0, 80]^\circ$ par pas de 20° . (a) et (f) sont prises avec l'éclairage à la normale de la mire.	77
3.31	Principe de l'acquisition. Les images issues des trois caméras filtrées sont alignées et recombinaison pour obtenir des données spectropolarimétriques.	79
3.32	Pipeline d'acquisition et de reconstruction spectrale. Les images brutes sont capturées à l'aide d'une caméra CPFA et des filtres passe-bande jaune et bleu. Le pipeline comporte les étapes de prétraitement (HDR, dématricage et alignement).	80

3.33	Sensibilités spectrales normalisées des animaux sélectionnés. U, V, S, M et L désignent respectivement les cônes à sensibilités ultraviolets (UV-A), violets (VS), aux courtes longueurs d'onde (SWS), aux longueurs d'onde moyennes (MWS) et aux grandes longueurs d'onde (LWS).	81
3.34	Pipeline pour l'expérimentation.	82
3.35	Visualisation sRGB de la scène avant et après débrumage pour deux capteurs bio-inspirés.	84
4.1	On peut imaginer des capteurs CPFA avec des arrangements spatiaux très différents. Quelques arrangements sont présentés, combinant les matrices RGB pseudo-périodiques d'Amba <i>et al.</i> [106], et les arrangements de microfiltres polarisants. Quel est l'impact de ces différents arrangements sur la chaîne de reconstruction d'image?	89
4.2	Le capteur (a) CPFA et (b) une conception SPFA (Spectral Polarization Filter Array) proposée comme perspective. Chaque pixel est couvert par un filtre spectral et un filtre de polarisation.	91
4.3	(a) Image microscopique d'un réseau de filtres PFA après leur fabrication et avant le montage (source : site web Moxtek). (b) Image microscopique d'un filtre SFA par Silios Technologies [95].	92

Liste des Tableaux

1.1	Tableau récapitulatif des modules d'enseignement. Les volumes horaires sont de base, le volume total évoluant chaque année en fonction des ATER/-doctorants en mission d'enseignement et participant aux encadrements de travaux pratiques. Il est à noter que deux modules ne sont plus enseignés par mes soins ou n'existent plus depuis 2018 ("Java" et "Modélisation de systèmes à événements discrets"). Les modules pour lesquels je suis responsable sont notés (R).	4
1.2	Co-encadrement de thèses de doctorat.	9
1.3	Encadrement de stages de Master.	10
1.4	Résumé des contrats de recherche obtenus (en tant que coordinateur).	10
1.5	Résumé des autres contrats de recherche auxquels je participe.	11
2.1	Détails des communications de type revue.	18
3.1	Résumé des méthodes d'acquisition pour l'imagerie de Stokes.	42
3.2	Résumé des bases de données d'images spectropolarimétriques utilisées pour l'analyse des données.	55
3.3	Moyennes des coefficients de corrélation pour chaque couple réflexion/matériau.	57
3.4	Moyenne μ et écart type σ du PSNR pour les algorithmes EARI [145] et LMMSE. Les meilleures valeurs moyennes par canal sont en caractères gras. Les résultats pour le LMMSE sont présentés relativement à deux modèles : un entraîné avec 12 images, et l'autre avec 55 images.	67
3.5	Résumé des systèmes visuels. Nous avons utilisé les sensibilités présentées dans la littérature à partir d'études physiologiques des systèmes visuels. Trois de ces animaux sont sensibles aux UVs et deux sont sensibles à la polarisation.	80
3.6	Evaluation results of dehazing for scene 1. The evaluation metric D (FADE [100]) is applied on sRGB images, whereas the metrics e and \bar{r} [76] are applied per spectral channel.	83

1 Curriculum Vitae

Sommaire

1.1	Affiliations et coordonnées	2
1.2	Diplômes	2
1.3	Emplois	3
1.4	Activités d'enseignement	3
1.4.1	Description et volume horaire	3
1.4.2	L'enseignement de la logique numérique appliquée aux FPGA	4
1.4.3	Encadrement de projets	7
1.4.4	Autres activités liées à l'enseignement	8
1.5	Encadrement	9
1.6	Projets et financements	9
1.7	Principales collaborations	11
1.8	Expertise et diffusion	12
1.8.1	Expertise	12
1.8.2	Activité éditoriale	13
1.8.3	Diffusion des connaissances, des responsabilités et des activités au sein des sociétés savantes	14
1.8.4	Organisation de colloques et conférences	14
1.8.5	Adhésions à des sociétés savantes	15
1.8.6	Responsabilités scientifiques	15
1.9	Résumé chronologique	15

1.1 Affiliations et coordonnées

<u>Nom :</u>	Lapray
<u>Prénom :</u>	Pierre-Jean
<u>Date/lieu de naissance :</u>	20 février 1987 à Saint-Vallier (71)
<u>Nationalité :</u>	Française
<u>Situation familiale :</u>	Pacsé, deux enfants
<u>Tél. :</u>	06.29.89.20.74
<u>Adresse personnelle :</u>	70 rue principale 68780 Le Haut-Soultzbach
<u>Adresse professionnelle :</u>	École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud- Alsace (ENSISA), 12 rue des frères Lumière, 68093 Mulhouse cedex
<u>Email :</u>	pierre-jean.lapray@uha.fr
<u>Institution :</u>	Université de Haute-Alsace, École Nationale Supé- rieure d'Ingénieurs Sud-Alsace
<u>Unité de recherche :</u>	Institut de Recherche en Informatique, Mathéma- tiques, Automatique et Signal (IRIMAS), EA7499

1.2 Diplômes

2013	Doctorat , Instrumentation et Informatique de l'Image, <i>Université de Bour-</i> <i>gogne.</i>
2010	Diplôme d'ingénieur , ESIREM, Informatique-Électronique, <i>Université de</i> <i>Bourgogne.</i>
2007	DUT , Mesures Physiques, IUT Le Creusot, <i>Université de Bourgogne.</i>

1.3 Emplois

Sep. 2016 –	Maître de conférence , <i>Université de Haute-Alsace - IRI-MAS (EA7499) - Section CNU 61. Titulaire de la PEDR depuis 2021.</i>
Mar. 2016 – Sep. 2016	Ingénieur de recherche , <i>Université de Bourgogne.</i>
Fév. 2015 – Fév. 2016	Volontariat International en Administration (VIA) , Ingénieur de conception/vérification matérielle, <i>Beam Instrumentation Group, CERN, Genève.</i>
Déc. 2013 – Sep. 2014	Ingénieur de recherche , <i>Université de Bourgogne.</i>

1.4 Activités d’enseignement

1.4.1 Description et volume horaire

Je réalise mes activités d’enseignement à Mulhouse au sein de l’école d’ingénieur ENSISA (École Nationale Supérieure d’Ingénieurs Sud-Alsace). L’enseignement y est dispensé sous forme de cours magistraux, travaux dirigés et travaux pratiques, de projets tutorés et de stages de fin d’études.

Voici les 3 formations dans lesquelles j’interviens :

- ENSISA, formation d’ingénieur, spécialité Automatique et Systèmes Embarqués (ASE),
- ENSISA/ENSCMU, cycle post-bac intégré,
- ENSISA, Master 2, Électronique, Énergie électrique, Automatique.

Les niveaux d’enseignement à l’école s’étendent du L1 au M2. Un récapitulatif des modules d’enseignement est visible sur le Tableau 1.1. Le volume horaire est à titre indicatif, le total de chaque année évoluant en fonction des ATER/doctorants participants aux encadrements de travaux pratiques et travaux dirigés. Le volume total CM/TD/TP par an depuis 2017 est visible sur la Figure 1.1.

J’interviens principalement dans la spécialité Automatique et Systèmes Embarqués de l’ENSISA. Dès la première année d’intégration à l’école d’ingénieur, j’enseigne l’électronique numérique. C’est un pré-requis pour pouvoir ensuite augmenter en compétences par rapport aux systèmes embarqués reconfigurables à bases de FPGA (Field-Programmable Gate Array), enseignés en 2^{ème} année 1^{er} semestre. Pour clore la série, la co-conception matérielle et logicielle est dispensée en 2^{ème} année 2^{ème} semestre. Ces trois modules d’enseignement sont complémentaires et sont inter-dépendants, c’est-à-dire que les compétences acquises en première année en électronique numérique de base sont réutilisées en

deuxième année pour la synthèse numérique automatique de circuits logiques. Je consacre la prochaine section à cette approche.

1.4.2 L'enseignement de la logique numérique appliquée aux FPGA

Dans le cadre de la formation d'ingénieurs en Automatique et Systèmes Embarqués à l'ENSISA de Mulhouse, j'ai conçu un groupement d'unités d'enseignement portant sur la conception de systèmes numériques sur FPGA. L'offre comprend les bases de l'électronique numérique, la synthèse de systèmes combinatoires et séquentiels, et la description matérielle en langage VHDL (Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language). Ces modules sont en forte relation avec la thématique des systèmes embarqués.

Niveau	Intitulé du module	CM	TD/TP	Années
Ingénieur	ASE			
L3	Java	0	36	2016-2018
L3	Outils mathématiques (R)	10	18	2022-2023
L3	Électronique numérique (R)	10	20	2016-2023
M1	Mod. Syst. Discrets (R)	12	56	2016-2018
M1	Systèmes embarqués reconfigurables (R)	12	56	2016-2023
M1	Systèmes embarqués reconfigurables II (R)	10	40	2019-2023
M1 & M2	Projet		-	2017-2023
Post-Bac	Cycle intégré ENSISA/ENSCMU			
L1	Systèmes linéaires (R)	10	10	2017-2023
L1	Projet		4	2020
Master	Électronique, Énergie élect., Autom.			
M2	Conception sur FPGA (R)	14	12	2018-2023
M2	Image avancée et ses applications	4	4	2018-2023
M2	Projet		-	2018-2023

TABLE 1.1 – Tableau récapitulatif des modules d'enseignement. Les volumes horaires sont de base, le volume total évoluant chaque année en fonction des ATER/doctorants en mission d'enseignement et participant aux encadrements de travaux pratiques. Il est à noter que deux modules ne sont plus enseignés par mes soins ou n'existent plus depuis 2018 ("Java" et "Modélisation de systèmes à événements discrets"). Les modules pour lesquels je suis responsable sont notés (R).

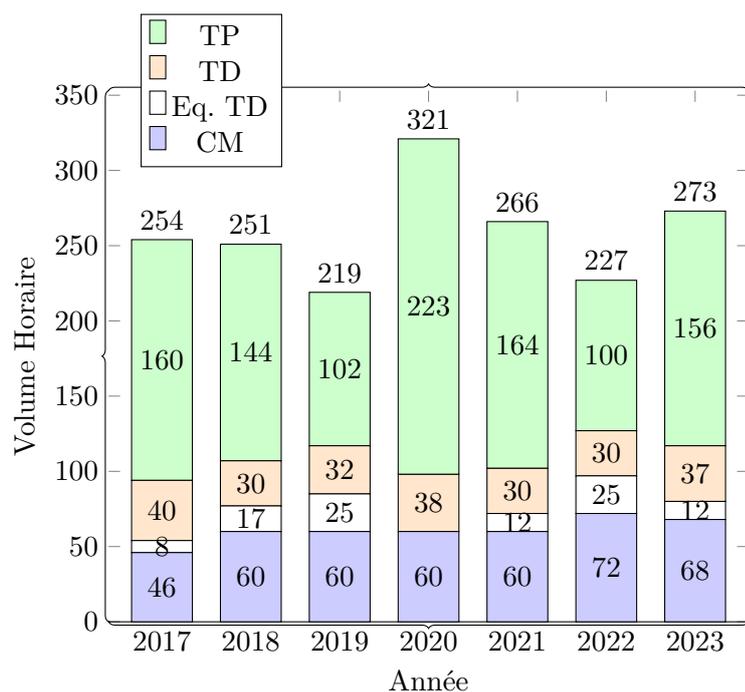


FIGURE 1.1 – Volume horaire par an. Le volume total Eq. TD est au-dessus de chaque barre.

Un système embarqué est une architecture matérielle et logicielle. Il est spécialisé, c'est-à-dire qu'il est dédié à une tâche spécifique se déroulant en permanence. Son objectif peut être aussi rudimentaire qu'un contrôleur pour un système d'arrosage de jardin, ou aussi complexe qu'un contrôleur dans un avion à réaction. Les principes sous-jacents sont pourtant les mêmes. La conception logicielle est étroitement liée à la conception matérielle, c.-à-d. qu'elle découle du concept d'adéquation algorithme-architecture. Comparé à un système non-embarqué, le système embarqué dispose de contraintes applicatives qui impactent directement la conception. En d'autres termes, le système embarqué peut se définir comme un support de l'application à forte(s) contrainte(s). Ces contraintes sont définies au moment de l'élaboration du cahier des charges du système. Elles peuvent être catégorisées comme suit :

- Contraintes **physiques** : encombrement, proximité des périphériques.
- Contraintes **énergétiques** : faible puissance électrique utilisée, autonomie, coût/-FLOPS (FLOating-Point operations Per Second).
- Contraintes d'**adaptabilité** : flexibilité de maintenance/reconfigurabilité, capacité de déploiement en masse.
- Contraintes **temporelles** : débit de données, déterminisme, latence, gigue, niveau de parallélisme.

- Contraintes de **sécurité** : vulnérabilité au piratage.

Le FPGA est une des architectures matérielles pouvant être utilisée pour répondre à une ou plusieurs des contraintes énoncées ci-dessus. Contrairement aux ASIC et aux GPU (processeurs graphiques), les circuits sur puces FPGA ne sont pas figés après fabrication, c.-à-d. que les connexions entre les éléments électroniques élémentaires (LUT, bascules, multiplexeurs, etc.) sont modifiables et peuvent être reprogrammées à souhait après sortie d'usine. C'est ce qui les différencie de la plupart des architectures de calcul connues du grand public. Ceci fait d'eux des outils ayant comme avantages le faible encombrement, la faible puissance utilisée pour certains types d'opérations, la flexibilité, l'efficacité, la reconfigurabilité et le prix.

Les FPGA sont très adaptés à la mise en oeuvre de tâches parallélisables, où chaque unité de calcul est indépendante et dispose de ses propres ressources matérielles. Chaque tâche est donc affectée à une section de la puce et peut fonctionner de manière autonome sans être influencées par d'autres fonctions logiques ajoutées au système. On peut imaginer la conception sur FPGA comme la création d'un itinéraire dédié à une tâche, en empruntant des routes reliant des villes (les routes étant les interconnexions logiques et les villes les blocs logiques du FPGA).

Les domaines d'application actuels sont multiples et vont de la communication radiofréquence (4G/5G) au contrôle-commande, en passant par l'accélération matérielle pour le "machine learning/big data". On pourra citer des exemples d'applications tels que l'imagerie temps-réel [97, 114, 132], le contrôle-commande de moteur (haute dynamique) [117], le déploiement de satellites astronomiques spatiaux, ou le "cloud computing" (parallélisme accru). De plus, l'intégration de FPGA dans certaines puces de processeurs multicœurs Xeon, ouvre des perspectives dans le contexte actuel du marché des microprocesseurs.

La multiplication des applications à fortes contraintes se traduit concrètement par l'évolution du marché du travail depuis les années 2010, c.-à-d. à une demande en compétences transversales pour les ingénieurs. Il y a donc un besoin grandissant de former les nouvelles générations d'ingénieurs et de scientifiques à une conception matérielle flexible de circuits de traitement numérique. Bien que demandant un investissement important en termes de temps de développement, l'utilisation des FPGA est en accord avec la conjoncture, qui tend à optimiser la puissance électrique utilisée pour le traitement numérique du signal (pour des opérations de conversion, accélération, encodage/décodage, diffusion, communication, etc.). L'essor du principe d'éco-conception, en lien avec une nécessité aujourd'hui accrue d'avoir des enseignements qui respectent les objectifs de Développement Durable et de Responsabilité Sociétale (DDRS), suggère de reconsidérer les architectures de calcul de type FPGA pour une utilisation efficace de l'énergie électrique. Les élèves ingénieurs doivent, en outre, être en mesure d'anticiper, lors de la modélisation,

la mise en oeuvre de leurs algorithmes de contrôle/commande au sein de systèmes électroniques spécifiques. C'est pour cela qu'un groupement d'unités d'enseignement, au sein de la spécialité ASE (Automatique et Systèmes Embarqués) de l'ENSISA à Mulhouse, a été déployé et portent sur la conception de systèmes numériques sur FPGA.

Le public concerné par ce groupement d'enseignements dispose d'une forte sensibilisation à la programmation séquentielle pour cibles de type processeurs. La plupart des architectures de calculs jusque-là utilisées par les étudiants sont des processeurs multicoeurs (PC fixes/portables, bien que souvent l'aspect multicoeur soit transparent), des cartes de développement de types micro-contrôleurs (Arduino) ou "System on Chip" (Raspberry Pi). Cela ne facilite généralement pas la tâche pédagogique lorsque l'on développe pour des architectures à logique reconfigurable, car les langages préalablement assimilés sont à haut niveau d'abstraction, tels que Python, Matlab/Simulink, Java, C++, etc. La nouveauté liée aux FPGA pose quelques difficultés d'appréhension de la part des étudiants (ce sentiment est partagé avec de nombreux collègues avec qui j'ai pu discuter). L'assimilation des pratiques de conception VHDL (entité/architecture, composants, signaux, etc.) peut donc être déroutante de prime abord. Il faut donc passer par une étape d'initiation importante, et acquérir un savoir-faire dédié spécifiquement à la description matérielle de fonctions logiques.

"Le fait de coder directement sur le matériel plutôt qu'en logiciel offre une nouvelle vision de la programmation des systèmes embarqués. En effet, cela nécessite un niveau d'abstraction différent et il est conseillé d'avoir un minimum de connaissances en électronique embarquée. C'est une programmation qui peut être difficile à comprendre au début, mais une fois cette étape franchie, cela devient une méthode de programmation très intéressante. On acquiert une meilleure compréhension et un meilleur contrôle des fonctions réalisées, ainsi qu'un aperçu de toutes les fonctions réalisables. Le seul défaut restant est la durée de compilation qui peut être longue, en fonction de la complexité du programme."

Anthony CHASSIGNET, étudiant 3^{ème} année ASE en 2021.

1.4.3 Encadrement de projets

J'ai eu plaisir à encadrer des projets à l'ENSISA, en 2^{ème} et 3^{ème} année. Les projets 2A sont réalisés à temps plein 5j/semaine pendant 1,5 mois, et les projets 3A sont réalisés 2j/semaine pendant 6 mois.

La proximité avec le binôme d'étudiants, et la confrontation avec une problématique, orientée recherche ou non, est quelque chose de très enrichissant. Voici une liste de noms de projets étudiants orientés recherche et réalisés sous ma supervision :

- "Le microphone visuel : Reconstruction du son par la vidéo rapide"
- "Développement d'un système caméra NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) pour la détection en temps-réel de végétation en extérieur"
- "Séparation des composantes de réflexion diffuse et spéculaire de la lumière"
- "Vibrométrie 2D par caméra rapide pour l'analyse modale" (co-supervisé par Thomas Weisser)
- "Conception et implémentation sur FPGA d'une pédale à effets pour guitare"
- "Traitement d'image embarqué : accélération d'un algorithme de suppression de brouillard"
- "Suppression de brouillard sur des images RGB à l'aide du proche-infrarouge"
- "Suppression de brouillard sur des images RGB à l'aide de la polarisation de la lumière"

Il est à noter que les travaux préliminaires effectués au travers du projet intitulé "Traitement d'image embarqué : accélération d'un algorithme de suppression de brouillard" ont donné lieu ensuite à une communication dans une conférence internationale [153] (les noms des étudiants sont dans les remerciements de l'acte).

Un exemple de réalisation de poster est visible sur l'Annexe 1. Il a été réalisé par des étudiants ASE qui ont travaillé sur une problématique de recherche en rapport avec l'imagerie en 2017.

1.4.4 Autres activités liées à l'enseignement

Je participe aux activités connexes à l'enseignement suivantes :

- Responsable de la salle intitulée "TP SN (Signal Numérique)" à l'ENSISA,
- Membre du conseil de perfectionnement de la spécialité Automatique et Systèmes Embarqués (2022, 2023),
- Audit avec les membres de la Commission des Titres de l'Ingénieur (CTI) lors des auditions en 2023,
- Administration sur Moodle des différents modules d'enseignement qui me sont attribués : diffusion des supports CM/TD/TP, matériels, espaces pour les devoirs à rendre et espaces de discussion,

- Membre de jurys d'admission à l'école ENSISA,
- Membre de jurys de stage de fin d'étude ENSISA,
- Propositions de projets de fin d'étude,
- Gestion du matériel des salles de TP, rédaction de sujet, renouvellement de TPs.

1.5 Encadrement

Nom	Début Fin	% Enc.	Sujet / Co-encadrement	Fonds	Pub.
Ronan Dumoulin	1 ^{er} Oct. 2023 -	30%	Imagerie multimodale à l'aide de capteurs microstructurés Alban Foulonneau (30%), Laurent Bigué (30%)	CDE UHA	[156]
Guillaume Courtier	1 ^{er} Oct. 2020 Dec. 2023 (prev.)	30%	"Système de navigation basé sur la polarisation de la lumière solaire", J.-P. Lauffenburger (20%), R. Adam, ISL (30%), S. Changey (20%)	Privé (ISL)	[154, 155] [149, 162]
Sumera Sattar	16 Avr. 2019 Dec. 2022	60%	"Spectral and polarization imaging for surface inspection" Alban Foulonneau (30%), Laurent Bigué (10%)	ANR SPIASI	[147, 160]
Yilbert Gimenez	1 ^{er} Oct. 2018 Mar. 2022	60%	"Computational imaging for Polarization Filter Array (PFA)" Alban Foulonneau (30%), Laurent Bigué (10%)	CDE UHA	[143, 148]

TABLE 1.2 – Co-encadrement de thèses de doctorat.

J'ai co-encadré ou co-encadre 4 doctorants. Deux ont soutenu à ce moment. Une thèse a été financée par un contrat doctoral d'établissement obtenu en 2018, une thèse a été financée sur une ANR JCJC (Jeunes Chercheuses et Jeunes Chercheurs) "SPIASI" obtenue en 2018, et un doctorant est salarié dans le secteur privé (ISL Saint-Louis). Le Tableau 1.2 résume ces co-encadrements.

Par ailleurs, j'ai encadré ou co-encadré 10 mémoires de Master (voir le Tableau 1.3). À noter que l'encadrement du mémoire M2 de Guillaume Courtier a donné lieu à la publication d'une revue de rang A [149]. Deux autres encadrements ont donné lieu à des actes de communications internationales avec comité de lecture [151, 156].

1.6 Projets et financements

Le Tableau 1.4 résume les contrats de recherche obtenus depuis 2016. De plus, le Tableau 1.5 présente deux projets auxquels j'ai participé.

Dès mon arrivée en 2016, j'ai obtenu un financement local BQR, maintenant appelé Projet

Nom	Début Durée	% Enc.	Lieu	Sujet / Co-encadrement	Fonds	Pub.
Ronan Dumoulin	Mar. 2023 6 mois	50%	IRIMAS (Mulhouse)	"LMMSE and anisotropic diffusion for demosaicing" applied to CPFA", J.-B. Thomas/Ivar Farup (50%)	ANR SPIASI	
Jian Gao	Fév. 2022 6 mois	50%	IRIMAS (Mulhouse)	"Impact of mosaic arrangement on bilinear demosaicing" applied to CPFA", J.-B. Thomas/Ivar Farup (50%)	ANR SPIASI	
Ronan Dumoulin	Fév. 2022 6 mois	50%	IRIMAS (Mulhouse)	"Impact of training data on LMMSE demosaicing" applied to CPFA", J.-B. Thomas/Ivar Farup (50%)	ANR SPIASI	[156]
Hugo Vatine	Fév. 2021 6 mois	100%	IRIMAS (Mulhouse)	"Shape from polarization"	ANR SPIASI	
Alexandra Spote	Fév. 2021 6 mois	50%	IRIMAS (Mulhouse)	"LMMSE demosaicing for CPFA" J.-B. Thomas/Ivar Farup (50%)	ANR SPIASI	[151]
Anthony Chassignet	Fév. 2020 6 mois	50%	IRIMAS (Mulhouse)	"Développement d'un système d'imagerie pour la mesure de la longueur de fibres de verre", A. Foulonneau (50%)	SINPTA 2020	
Guillaume Courtier	Fév. 2020 6 mois	50%	IRIMAS (Mulhouse)	"Data analysis for spectral and polarization imaging", Thomas/Ivar Farup (50%)	ANR SPIASI	[149]
Kamel Yousfi	Mar. 2017 6 mois	100%	MIPS (Mulhouse)	"Study of multimodal image acquisition using RGB/NIR and polarimetry"	BQR UHA	
Nathan Miot-Battu	Mar. 2017 6 mois	50%	NTNU (Gjøvik)	"Evaluation of demosaicing algorithms dedicated to spectral filter array", J.-B. Thomas (50%)	ColorLab NTNU	
Hazim Suffian	Nov. 2012 6 mois	50%	Le2i (Le Creusot)	"Development of tools dedicated to HDR imaging"	Le2i/UTP (PETRONAS)	

TABLE 1.3 – Encadrement de stages de Master.

Année	Partenaire	Titre	Montant
2017	UHA	BQR UHA - P.-J. Lapray (coordinateur) "Conception d'un système de vision polarimétrique embarquée pour une application d'aide à la conduite".	7 k€
2018 - 2022	UHA	ANR JCJC APP 2018 (ANR-18-CE10-0005) - P.-J. Lapray (coordinateur) "SPIASI - Spectral Polarization Imaging Applied to Surface Inspection", CES 10, Usine du futur.	227 k€
2022 - 2024	UHA- NTNU	PHC AURORA - P.-J. Lapray (coordinateur) "Spectral and Polarization Imaging of Specular Cultural Heritage Artifacts".	7 k€

TABLE 1.4 – Résumé des contrats de recherche obtenus (en tant que coordinateur).

Innovant et Risqué (PIR), portant sur l'étude de l'imagerie polarimétrique et spectrale.

Année	Partenaire	Titre	Montant
2020	<i>UHA</i>	SINPTA 2020 - “Selfib : Mesure des fibres émergentes à l’issue du détournage d’un composite”, coordinateur : Alban Foulonneau.	11 k€
2022-2023	<i>UHA</i>	SAPS-CSTI-Générique AAPG2018 – AAPG2019 (ANR-21-SS19-0005) - “QuarCamp : Quartier du Campus”, coordinateur : Bénédicte LEBEAU. C’est un projet de médiation scientifique.	16 k€

TABLE 1.5 – Résumé des autres contrats de recherche auxquels je participe.

Ce financement m’a permis de lancer une nouvelle thématique de recherche jusque-là non abordée dans l’équipe FOTI (Fonctions Optiques et Traitement de l’Information), mêlant imagerie spectrale et polarimétrique.

En 2018, sur la base des premiers résultats obtenus grâce au BQR, j’ai déposé un projet ANR JCJC en tant que porteur de projet dans la thématique "usine du futur". Le projet a été accepté en 2018, et a démarré le 10/10/18 pour une durée de 36 mois (et prolongé jusqu’au 31/12/2023). Le titre est "SPIASI - Spectral Polarization Imaging Applied to Surface Inspection". Les ressources humaines financées pendant la durée du projet sont une thèse de doctorat complète et plusieurs stages de master. Trois autres personnes participent au projet (1 PU + 1 MCF + 1 IGE). Le lien du projet ici : <https://anr.fr/Project-ANR-18-CE10-0005>. A ce jour, 5 articles dans des revues internationales indexées et 6 conférences (dont une nationale) ont été labellisées et financées par le projet ANR JCJC SPIASI depuis 2018. Le lien de la liste des communications relatives au projet ici : [Lien](#).

L’ANR JCJC a donné suite à une collaboration avec le NTNU (Norwegian University of Science and Technology), où un dépôt en commun d’un projet Partenariats Hubert Curien (PHC) a été réalisé sur l’imagerie hyperspectrale et polarimétrique appliquée au patrimoine culturel. Le projet s’intitule "Spectral and Polarization Imaging of Specular Cultural Heritage Artifacts" a été accepté et a démarré en janvier 2022 pour une durée de 2 ans (enveloppe de 6600€). À ce jour, un article de journal a été soumis à la revue *Optica Optics Express*.

1.7 Principales collaborations

- **NTNU, Norvège.** J’ai publié avec des membres du ColorLab lors du co-encadrement du stage de Master de Guillaume Courtier, de Ronan Dumoulin, et d’Alexandra Spote.

- **ISL Saint-Louis.** Je co-encadre une thèse en collaboration avec l'ISL sur la problématique de la navigation par l'imagerie de polarisation du ciel. Le doctorant est Guillaume Courtier, dont j'ai encadré le stage de Master. La soutenance de la thèse est prévue fin 2023.
- **Tokyo Institute of Technology.** J'ai collaboré avec Yusuke Monno et Jean-Baptiste Thomas (NTNU) pour écrire un "Short course" intitulé "Spectral Filter Arrays Technology", et présenté à la conférence CIC (Color Imaging Conference) le 11 septembre 2017 à Lillehammer. Je suis également co-éditeur du numéro spécial "Advances in Spectroscopy and Spectral Imaging", devenu collection thématique.
- **CERN, Genève.** À la suite d'un VIA fait en 2015, j'ai collaboré avec le CERN pour rédiger une communication avec acte à "American Control Conference" sur le traitement du signal dans un système embarqué. La publication porte notamment sur un prototype automatisé de sécurité du faisceau, dispositif qui est depuis passé en production sur plusieurs accélérateurs de particules.
- **Université de Belfort-Montbéliard.** J'ai collaboré avec l'UTBM pour écrire un article de revue sur l'optimisation de la sensibilité spectrale des caméras multispectrales à base de filtres.
- **Université de Bourgogne.** J'ai collaboré avec l'UBFC dans le cadre de l'imagerie multispectrale (2 articles de revues et 2 actes de conférence).
- **Université de Lille.** J'ai collaboré avec Sofiane Mihoubi du laboratoire CRISAL, UMR 9189, dans le cadre du dématricage de capteurs polarimétriques filtrés (1 article de revue).
- **Aix-Marseille Université (AMU).** Je collabore avec Julien Serres dans le cadre de la co-édition d'un numéro spécial chez MDPI Sensors, intitulé "[Multispectral, Polarized and Unconventional Vision in Robotics](#)".

1.8 Expertise et diffusion

1.8.1 Expertise

- Membre du forum de recherche de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), RF-01 Spectral Imaging (<https://cie.co.at/researchforum/rf-01>).
- Rapporteur disciplinaire - Campagne 2023 d'attribution de la prime individuelle (RIPEC)
- Membre de jury de CoSel MCF n°4084 (campagne UTBM 2022)
- Membre de jury de CoSel MCF n°0395 (campagne UHA 2022)
- Membre de jury de CoSel MCF n°0395 (campagne UHA 2023)

- Membre du comité de suivi de thèse de Mr Lucas Bahin pour la thèse intitulée “Instrumentation de textiles par fibres optiques pour mesure in-situ de frottement, compression et déformation” (laboratoires EMpa/LPMT).

Je suis régulièrement examinateur pour des revues internationales. Web Of Science annonce 57 révisions faites. Quelques revues avec lesquelles je collabore :

- OSA, Journal of the Optical Society of America A (ISSN 1084-7529), **2 articles**,
- OSA, Optics Express (ISSN 1094-4087), **3 articles**,
- OSA, Applied Optics (ISSN 1559-128X), **3 articles**,
- Nature, Scientific Reports (ISSN 2045-2322), **1 article**,
- IEEE Sensor Journal (ISSN 1558-1748), **1 article**,
- IEEE Transactions on Image Processing (ISSN 1057-7149), **2 articles**,
- IEEE Transactions on Industrial Electronics (ISSN 0278-0046), **1 article**,
- IEEE Transactions on Multimedia (ISSN 1520-9210), **1 article**,
- IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology (ISSN 1051-8215), **3 articles**,
- IEEE Transactions on Computational Imaging (ISSN 2333-9403), **1 article**,
- Springer Journal of Real-Time Image Processing (ISSN 1861-8219), **2 articles**,
- MDPI Sensors (ISSN 1424-8220), **7 articles**
- MDPI Journal of Low Power Electronics and Applications (ISSN 2079-9268), **2 articles**,
- MDPI Applied Sciences (ISSN 2076-3417), **4 articles**,
- MDPI Computers (ISSN 2073-431X), **1 article**,
- MDPI Electronics (ISSN 2079-9292)s, **4 articles**,
- MDPI Journal of Imaging (ISSN 2313-433X), **4 articles**,
- MDPI Algorithms (ISSN 1999-4893), **2 articles**,
- MDPI Remote sensing (ISSN 2072-4292), **1 article** ,
- Journal of imaging science and technology (ISSN 1943-3522), **1 article**,
- Journal of the European Optical Society-Rapid Publications (ISSN 1990-2573), **1 article**.

1.8.2 Activité éditoriale

- **Topic Editor** for MDPI Sensors Journal (IF 3.9, ISSN 1424-8220).
- **Guest Editor** for MDPI Sensors Journal, Special Issue "Multispectral, Polarized and Unconventional Vision in Robotics" ([Lien web](#)).
- **Guest Editor** for MDPI Sensors Journal, Special Issue "Advances in Spectroscopy and Spectral Imaging".

1.8.3 Diffusion des connaissances, des responsabilités et des activités au sein des sociétés savantes

- Participation à la fête de la science, stand et animation, octobre 2017.
- Participation à la fête de la science, stand et animation, octobre 2019.
- Participation et organisation d'un atelier sur la polarisation à la journée des cordées de la réussite le vendredi 17 janvier 2020 à Mulhouse : stand présenté aux collégiens/lycéens.
- J'ai été invité à présenter le métier d'enseignant-chercheur lors de la "Journée de vulgarisation de la recherche" à l'école d'ingénieurs ESIREM de Dijon le 5 mars 2020.
- Membre élu du conseil d'administration de la société savante *EEA*, section signal-image, 2017 - 2022.
- Membre du comité d'organisation du prix de thèse GDR ISIS via le club *EEA* (2017 - 2022).

1.8.4 Organisation de colloques et conférences

- **Membre du comité d'organisation local & membre du comité technique** de la conférence internationale sur le contrôle qualité par vision artificielle (QCAV), Mulhouse, France, 2019.
- **Président** de la session intitulée "Multi-view & Tracking" à la Conférence Internationale sur le Contrôle Qualité par Vision Artificielle (QCAV), Mulhouse, France, 2019.
- Dans le cadre du cycle de conférences d'IRIMAS, organisation et invitation d'un chercheur extérieur du privé Bruno Albert, qui a présenté ses travaux portant sur la "Modélisation des connaissances pour la maîtrise du contrôle sensoriel des produits", Mulhouse, 05 décembre 2019.
- **Membre du comité de programmation (PC)** du Colour and Visual Computing Symposium, CVCS'2020, qui s'est tenu à Gjøvik, en Norvège, les 16 et 17 septembre 2020.
- **Membre du PC** de la 14e Conférence internationale IEEE sur la technologie des images de signal et les systèmes basés sur Internet (SITIS), qui s'est tenue à Las Palmas de Gran Canarias, en Espagne, du 26 au 29 novembre 2018.
- **Membre du PC** de la 13e Conférence internationale IEEE sur la technologie des images de signal et les systèmes basés sur Internet (SITIS), qui s'est tenue à Jaipur, en Inde, du 4 au 7 décembre 2017.
- **Membre du PC** de la 12ème IEEE Internationale Conférence sur la technologie des images de signal et les systèmes basés sur Internet (SITIS), tenue à Naples, en

Italie, du 28 novembre au 1^{er} décembre 2016.

- **Membre du PC** du Symposium international IEEE sur les circuits & systèmes (ISCAS), tenu à Montréal, Canada, du 22 au 25 mai 2016.

1.8.5 Adhésions à des sociétés savantes

- Membre de la *Société Française d'Optique (SFO)* (2016 -).
- Membre du *GdR-ISIS* (2016 -).
- Membre du *GdR-APPAMAT* (2019 -).

1.8.6 Responsabilités scientifiques

- J'ai été membre élu du conseil de l'institut IRIMAS, collège B du département ASI ("Automatique Signal et Image"), pour la période 2018-2023.

1.9 Résumé chronologique

Un diagramme chronologique résume les échéanciers de mes différents projets, co-encadrements et publications depuis ma nomination en tant que maître de conférences des universités. Il est visible sur la Figure 1.2.

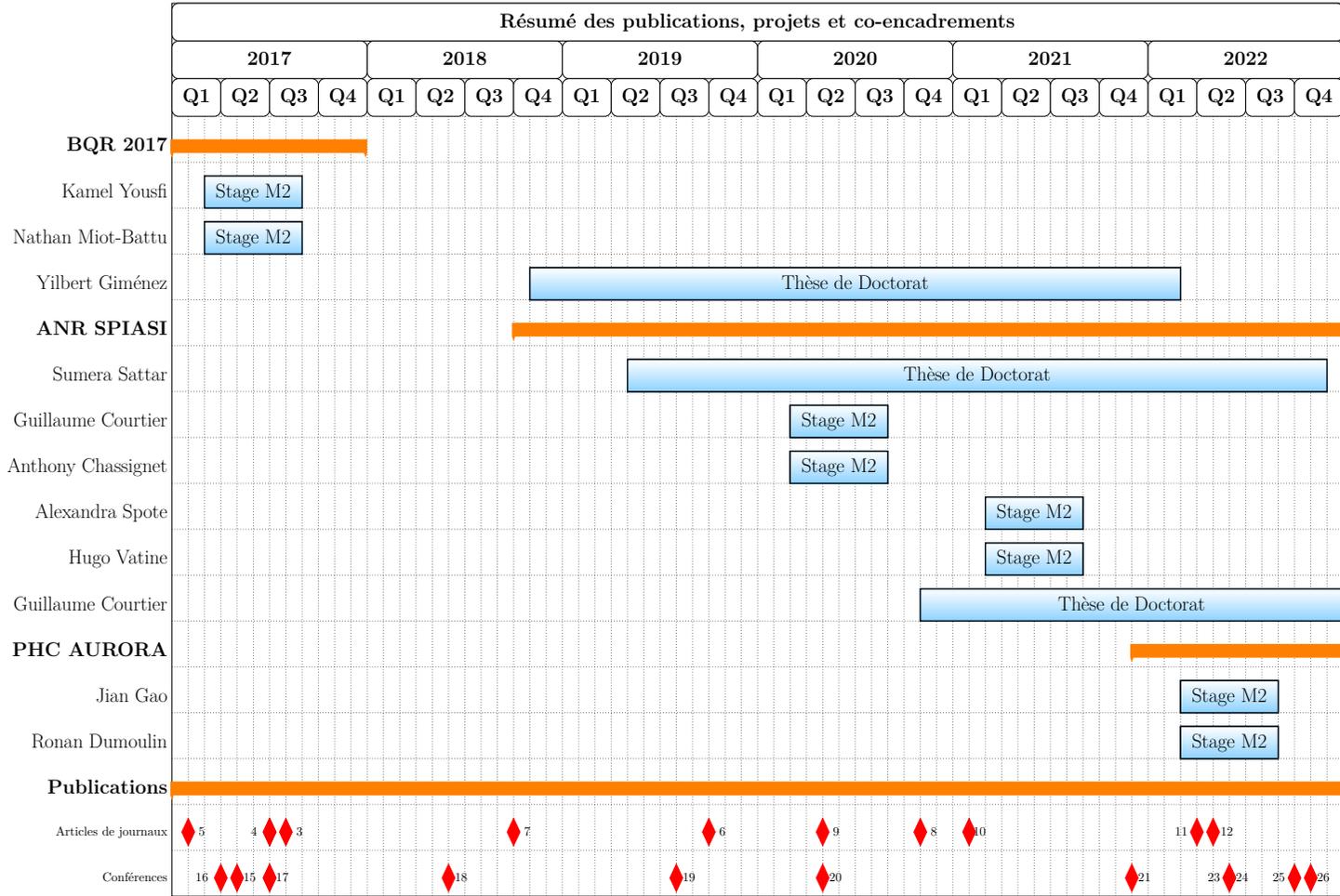


FIGURE 1.2 – Diagramme de Gantt qui résume les projets, les co-encadrements et les dates de publication. Les encadrements sont en bleu clair, les projets en orange et les publications en rouge.

2 Publications

Sommaire

2.1	Liste des publications	17
2.2	Référencement de la recherche	22
2.2.1	Citations	22
2.2.2	Sites web	24
2.3	Bases de données et code Matlab	25

2.1 Liste des publications

La liste des publications est présente dans cette partie.

Au total, sont référencés :

- 13 articles de revues,
- 29 communications/actes de conférences,
- 1 "short course",

Dans la liste ci-après, mon nom est en caractères gras et les noms des étudiants (Master ou doctorat) sous mon co-encadrement sont soulignés. Le Tableau 2.1 montre les détails des revues dans lesquelles j'ai publié, ma position parmi les co-auteurs, et les indicateurs associés aux revues. Mes publications sont également accessibles sur ma page personnelle^I. Je n'ai pas utilisé de pré-impressions ("pre-prints").

I. <http://pierrejean.lapray.free.fr/>

Publication	Titre Revue	Éditeur	Fact. Imp.	Rang (Scimago)	Pos. Auth.
[93, 123] [115, 131] [149]	Sensors	Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)	3.9	Q1 (Instrumentation)	2 × 1 ^{er} 3 × 2 ^{ème}
[95, 160]	Optical Engineering	Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)	1.3	Q2 (Engineering)	1 × 1 ^{er} 1 × 2 ^{ème}
[96]	Journal of Real-Time Image Processing	Springer	3	Q2 (Information Syst.)	1 × 1 ^{er}
[124]	Journal of the European Optical Society-Rapid Publications	Springer	2.021	Q2	1 × 1 ^{er}
[132]	International Journal of Circuit Theory and Applications	Wiley	2.378	Q2 (Electronic Engin.)	1 × 1 ^{er}
[146]	Optics Letters	Optica Publishing Group (OSA)	3.560	Q1 (Optics)	1 × 1 ^{er}
[148]	Journal of Electronic Imaging	Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)	1.1	Q3 (Electronic Engin.)	1 × 2 ^{ème}
[159]	Frontiers in Computer Science	Frontiers	2.6	Q2 (Comp. Vision)	1 × 1 ^{er}

TABLE 2.1 – Détails des communications de type revue.

Articles de revue

1. **P.-J. Lapray**, B. HEYRMAN et D. GINHAC. Hardware-based smart camera for recovering high dynamic range video from multiple exposures. *Optical Engineering* **53**(10) (2014), 102110.
2. **P.-J. Lapray**, B. HEYRMAN et D. GINHAC. HDR-ARtiSt : an adaptive real-time smart camera for high dynamic range imaging. *Journal of Real-Time Image Processing* (2014), 1-16.
3. **P.-J. Lapray**, X. WANG, J.-B. THOMAS et P. GOUTON. Multispectral Filter Arrays : Recent Advances and Practical Implementation. *Sensors* **14**(11) (2014), 21626.
4. J.-B. THOMAS, **P.-J. Lapray**, P. GOUTON et C. CLERC. Spectral Characterization of a Prototype SFA Camera for Joint Visible and NIR Acquisition. *Sensors* **16**(7) (2016), 993.

5. **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et P. GOUTON. High Dynamic Range Spectral Imaging Pipeline For Multispectral Filter Array Cameras. *Sensors* **17**(6) (2017).
6. **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS, P. GOUTON et Y. RUICHEK. Energy balance in Spectral Filter Array camera design. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications* **13**(1) (2017), 1.
7. S. MIHOUBI, **P.-J. Lapray** et L. BIGUÉ. Survey of Demosaicking Methods for Polarization Filter Array Images. *Sensors* **18**(11) (2018).
8. **P.-J. Lapray**, L. GENDRE, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. An FPGA-based pipeline for micropolarizer array imaging. *International Journal of Circuit Theory and Applications* **46**(9) (2018), 1675-1689. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cta.2477>.
9. **P.-J. Lapray**. Exploiting redundancy in color-polarization filter array images for dynamic range enhancement. *Opt. Lett.* **45**(19) (2020), 5530-5533.
10. Y. GIMÉNEZ, **P.-J. Lapray**, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Calibration algorithms for polarization filter array camera : survey and evaluation. *Journal of Electronic Imaging* **29**(4) (2020), 1-13.
11. G. COURTIER, **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et I. FARUP. Correlations in Joint Spectral and Polarization Imaging. *Sensors* **21**(1) (2021).
12. **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et I. FARUP. Bio-Inspired Multimodal Imaging in Reduced Visibility. *Frontiers in Computer Science* **3** (2022).
13. SATTAR S., **P.-J. Lapray**, L. AKSAS, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Snapshot spectropolarimetric imaging using a pair of filter array cameras. *Optical Engineering* **61**(4) (2022), 1-14.

Communications dans un congrès international ou national

1. **Lapray, P.-J.**, B. HEYRMAN, M. ROSSE et D. GINHAC. Smart camera design for realtime high dynamic range imaging. Anglais. In : *Distributed Smart Cameras (ICDSC), 2011 Fifth ACM/IEEE International Conference on*. Eureka. Belgique, août 2011, pp.1-7. <http://hal-univ-bourgogne.archives-ouvertes.fr/hal-00675804>.
2. **Lapray, P.-J.**, B. HEYRMAN, M. ROSSE et D. GINHAC. HDR-ARtiSt : High Dynamic Range Advanced Real-Time Imaging System. Anglais. In : *Circuits and Systems (ISCAS), Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on*. eureka. Seoul, Corée, République De, mai 2012, pp.1428-1431. <http://hal-univ-bourgogne.archives-ouvertes.fr/hal-00675805>.
3. **Lapray, P.-J.**, B. HEYRMAN, M. ROSSE et D. GINHAC. High Dynamic Range Real-time Vision System for Robotic Applications. In : *IEEE Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Villamoura, Portugal, oct. 2012, pp.1-5. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00785908>.

4. **Lapray, P.-J.**, B. HEYRMAN, M. ROSSE et D. GINHAC. Smart camera design for realtime High Dynamic Range imaging. Anglais. In : *Proceedings of the First Workshop on Architecture of Smart Camera (WASC)*. Clermont ferrand, France, avr. 2012, pp.1. <http://hal-univ-bourgogne.archives-ouvertes.fr/hal-00785912>.
5. **P.-J. Lapray**, B. HEYRMAN, M. ROSSE et G. DOMINIQUE. High Dynamic Range Real-time Vision System for Robotic Applications. Anglais. In : *Proceedings of 1st Workshop on Smart Camera for Robotic Application (SCABOT)*. Villamoura, Portugal, oct. 2012, pp.1-5. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00785908>.
6. **P.-J. Lapray**, D. GINHAC et B. HEYRMAN. HDR-ARtiSt : une caméra intelligente dédiée à la vidéo à grande dynamique en temps réel. In : *24ème colloque Gretsi*. Brest, France, sept. 2013, pp.1-4. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00932607>.
7. **P.-J. Lapray**, B. HEYRMAN et D. GINHAC. A smart camera for High Dynamic Range imaging. In : *Second Workshop on Architecture of Smart Camera (WASC)*. Seville, Spain, juin 2013, pp.1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00932601>.
8. **P.-J. Lapray**, B. HEYRMAN, M. ROSSE et D. GINHAC. A 1.3 megapixel FPGA-based smart camera for High Dynamic Range real-time video. In : *Distributed Smart Cameras (ICDSC), 2013 ACM/IEEE International Conference on*. 2013.
9. **Lapray, P.-J.**, J.-B. THOMAS et P. GOUTON. A Multispectral Acquisition System using MSFAs. In : *Color and Imaging Conference*. T. 2014. 2014. 2014, pp.97-102.
10. **P.-J. Lapray**, B. HEYRMAN et D. GINHAC. HDR-ARtiSt : A 1280x1024-pixel Adaptive Real-time Smart camera for High Dynamic Range video. In : *SPIE Photonics Europe*. Brussels, Belgium, avr. 2014. <https://hal-univ-bourgogne.archives-ouvertes.fr/hal-01196636>.
11. M. BOUDERBANE, **P.-J. Lapray**, J. DUBOIS, B. HEYRMAN et D. GINHAC. Overview of ghost correction for HDR video stream generation. In : *4th Workshop on the Architecture of Smart Cameras*. 2015.
12. **P.-J. Lapray**, B. HEYRMAN et D. GINHAC. High dynamic range adaptive real-time smart camera : an overview of the HDR-ARTiST project. In : *Proc. SPIE*. T. 9534. 2015, pp.953417-953417-11. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2182844>.
13. M. BOUDERBANE, J. DUBOIS, B. HEYRMAN, **P.-J. Lapray** et D. GINHAC. Ghost removing for HDR real-time video stream generation. In : *SPIE Photonics Europe*. T. 9897. 2016, pp.98970F-98970F-6.
14. M. BOUDERBANE, **P.-J. Lapray**, J. DUBOIS, B. HEYRMAN et D. GINHAC. Real-time Ghost Free HDR Video Stream Generation Using Weight Adaptation Based Method. In : *Proceedings of the 10th International Conference on Distributed Smart Camera*. ICDSC '16. Paris, France : ACM, 2016, pp.116-120. <httpdoi.acm.org10.11452967413.2967439>.
15. J. EMERY, A. BARJAU, B. DEHNING, J. H. ALVAREZ, **P.-J. Lapray** et M. MACCHINI. Design and validation methodology of the control system for a particle beam size measurement

- instrument at the CERN laboratory. In : *2017 American Control Conference (ACC)*. Mai 2017, pp.4221-4228.
16. **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et P. GOUTON. « A Database of Spectral Filter Array Images that Combine Visible and NIR ». In : *Computational Color Imaging : 6th International Workshop, CCIW 2017, Milan, Italy, March 29-31, 2017, Proceedings*. Sous la dir. de S. BIANCO, R. SCETTINI, A. TRÉMEAU et S. TOMINAGA. Cham : Springer International Publishing, 2017, p. 187-196. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-56010-6_16.
 17. J.-B. THOMAS, **P.-J. Lapray** et P. GOUTON. « HDR Imaging Pipeline for Spectral Filter Array Cameras ». In : *Image Analysis : 20th Scandinavian Conference, SCIA 2017, Tromsø, Norway, June 12-14, 2017, Proceedings, Part II*. Sous la dir. de P. SHARMA et F. M. BIANCHI. Cham : Springer International Publishing, 2017, p. 401-412.
 18. **P.-J. Lapray**, L. GENDRE, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Database of polarimetric and multispectral images in the visible and NIR regions. In : *Proc.SPIE*. T. 10677. 2018, pp.10677 - 10677 -14. <https://doi.org/10.1117/12.2306244>.
 19. Y. GIMÉNEZ, **P.-J. Lapray**, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Calibration for polarization filter array cameras : recent advances. In : *Fourteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision*. Sous la dir. de C. CUDEL, S. BAZEILLE et N. VERRIER. T. 11172. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2019, pp.1117216. <https://doi.org/10.1117/12.2521752>.
 20. S. SATTAR, **P.-J. Lapray**, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Review of spectral and polarization imaging systems. In : *Unconventional Optical Imaging II*. Sous la dir. de C. FOURNIER, M. P. GEORGES et G. POPESCU. T. 11351. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2020, pp.191-203. <https://doi.org/10.1117/12.2555745>.
 21. SPOTE, A., **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et I. FARUP. Joint demosaicing of colour and polarisation from filter arrays. *Color and Imaging Conference 2021*(29) (2021), 288-293.
 22. B. VIGNE et P.-J. LAPRAY. Les Systèmes Embarqués Reconfigurables enseignés à des automaticiens (2021).
 23. L. AKSAS, **P.-J. Lapray**, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Joint qualitative and quantitative evaluation of fast image dehazing based on dark channel prior. In : *Unconventional Optical Imaging III*. Sous la dir. de M. P. GEORGES, G. POPESCU et N. VERRIER. T. 12136. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2022, pp.295-303. <https://doi.org/10.1117/12.2621566>.
 24. COURTIER G., R. ADAM, **P.-J. Lapray**, E. PECHEUR, S. CHANGEY et J.-P. LAUFFENBURGER. Architecture matérielle et traitement d'images pour un système de navigation basé sur la polarisation de la lumière solaire. In : *28ème colloque Gretsi*. Nancy, France, sept. 2022, pp.1-4.
 25. COURTIER G., R. ADAM, **P.-J. Lapray**, E. PECHEUR, S. CHANGEY et J.-P. LAUFFENBURGER. Image-based navigation system using skylight polarization for an unmanned ground vehicle.

- In : *Unmanned Systems Technology XXIV*. Sous la dir. de H. G. NGUYEN, P. L. MUENCH et B. K. SKIBBA. T. 12124. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2022, pp.173-182. <https://doi.org/10.1117/12.2616833>.
26. DUMOULIN, R., **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et I. FARUP. Impact of training data on LMMSE demosaicing for Colour-Polarization Filter Array. In : *2022 16th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS)*. 2022, pp.275-280.
 27. L. BIGUÉ, A. FOULONNEAU et **P.-J. Lapray**. Production of high-resolution reference polarization images from real world scenes. In : *Polarization Science and Remote Sensing XI*. Sous la dir. de M. K. KUPINSKI, J. A. SHAW et F. SNIK. T. 12690. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2023, pp.126900B. <https://doi.org/10.1117/12.2677421>.
 28. COURTIER G., R. ADAM, **P.-J. Lapray**, S. CHANGEY et J.-P. LAUFFENBURGER. Ground Vehicle Navigation Based on the Skylight Polarization. In : *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. 2023, pp.1373-1379.
 29. **P.-J. Lapray** et L. BIGUÉ. Performance comparison of division of time and division of focal plan polarimeters. In : *Sixteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision*. Sous la dir. d'I. JOVANČEVIĆ et J.-J. ORTEU. T. 12749. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2023, pp.1274907. <https://doi.org/10.1117/12.2688566>.

Cours de courte durée ("Short Course")

1. J.-B. THOMAS, Y. MONNO et **P.-J. Lapray**. Spectral Filter Arrays Technology. In : *25th Color and Imaging Conference, Society for Imaging Science and Technology*. Adapted from the T2C short course, September 11-15, 2017, Lillehammer, Norway. Lillehammer, Norway, sept. 2017. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01612282>.

Autres contributions

1. B. VIGNE et **P.-J. Lapray**. Les Systèmes Embarqués Reconfigurables enseignés à des automaticiens. *J3eA* **21** (2022), 2050.

2.2 Référencement de la recherche

2.2.1 Citations

Les citations et quelques indicateurs Google Scholar et Web of Science sont présentés dans la Figure 2.1 et la Figure 2.2 respectivement. Le lecteur pourra se référer à mon

profil Google Scholar pour visualiser les citations à jour et obtenir des détails sur leur répartition parmi les différents articles ^{II}. La Figure 2.3 montre la répartition géographique des différentes citations de mes articles (référence : Web of Science).

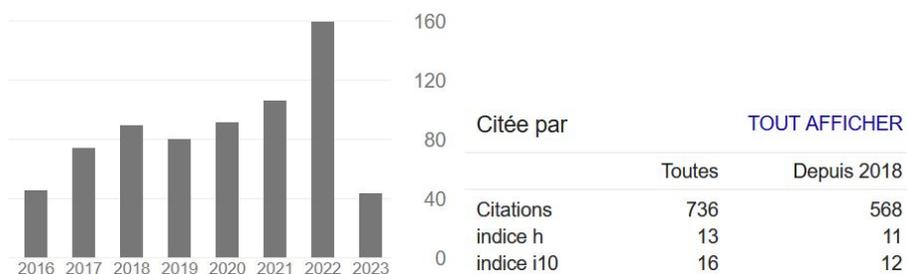


FIGURE 2.1 – Nombre de citations et indicateurs statistiques de Google Scholar au 20/07/2023.



FIGURE 2.2 – Nombre de citations et indicateurs statistiques de Web of Science au 20/07/2023.

II. <https://scholar.google.fr/citations?user=Nve-U2AAAAAJ>



FIGURE 2.3 – Répartition des citations par zones géographiques.

2.2.2 Sites web

Voici une liste non exhaustive de quelques référencements web de ma recherche, certains étant potentiellement incomplets. Je les ai classés par pertinence par rapport au nombre d'articles référencés, du plus complet au moins complet.

- [Mon site web personnel](#)
- [Google Scholar](#)
- [Research Gate](#)
- [Web Of Science](#)
- [SciProfiles](#)
- [Archives Ouvertes HAL](#)
- [UnivOAK](#)
- [IdRef](#)
- [ORCID](#)
- [Loop](#)
- [Semantic Scholar](#)
- [DBLP](#)
- [HAL ANR^{III}](#)

III. liste des publications labellisées par l'ANR SPIASI - JCJC APP 2018 (ANR-18-CE10-0005)

2.3 Bases de données et code Matlab

Voici la liste des bases de données et codes rendus disponibles à la communauté. Des liens sont fournis pour chaque élément (liens web vérifiés le 31/03/23).

- Bases de données :
 - Images SFA (Spectral Filter Array), combinant le visible et le NIR (Near-InfraRed) [122] : [Lien](#). Les images ont été capturées à l'aide du prototype mis en œuvre dans [97, 115].
 - Images polarimétriques et multispectrales dans le visible et le proche-infrarouge [133] : [Lien](#).
 - Images couleurs et multispectrales [133] : [Lien](#).
 - Coefficients de corrélation inter-bande calculés sur des bases de données spectropolarimétriques [155] : [Lien](#).
 - Deux scènes spectropolarimétriques prises en extérieur, et contenant du brouillard [159] : [Lien](#).
 - Images spectrales et polarimétriques capturées à partir d'un système d'acquisition stéréo dans le visible [160] : [Lien](#). Un calibrage spectral est fourni pour de la reconstruction de reflectance.
- Codes Matlab :
 - Dématriçage des images spectropolarimétriques issues d'un capteur filtré CPFA (Color Polarization Filter Array) [151, 156] : [Lien](#).
 - Dématriçage d'images de polarisation issues d'un capteur filtré PFA (Polarization Filter Array) [151, 156] : [Lien](#).
 - Processus d'optimisation des transmissions des filtres pour la conception de caméras filtrées SFA (Spectral Filter Array) [121] : [Lien](#).

3 Synthèse de la recherche

Sommaire

3.1 Introduction	28
3.1.1 Contexte	28
3.1.2 Le capteur d'image	29
3.1.3 La dimension d'imagerie	33
3.1.4 Le capteur à matrice de filtres	47
3.2 Analyser les données spectropolarimétriques	52
3.2.1 Imagerie spectrale et polarimétrique	52
3.2.2 Méthode pour l'analyse statistique	53
3.3 Pré-traiter les images filtrées	58
3.3.1 Calibrer les images de polarisation linéaire	58
3.3.2 Restauration des images	61
3.4 Mettre en œuvre les capteurs filtrés	69
3.4.1 Pipeline d'imagerie spectropolarimétrique	69
3.4.2 Pipeline d'imagerie bio-inspirée	77

Je fais ici la synthèse de mes activités de recherche. Une première partie est une introduction nécessaire à la bonne compréhension des travaux (et non un cours exhaustif). J'y présente le contexte scientifique, le capteur d'image, les dimensions d'imagerie et le principe de l'imagerie à base de matrice de filtres. Ensuite, je synthétiserai mes travaux au travers de trois sous-sections organisées suivant ces grands axes :

1. L'analyse de données à dimensions multiples,
2. Le pré-traitement appliqué aux capteurs filtrés,
3. La mise en œuvre des capteurs filtrés.

Une liste des publications et des contributions est encadrée au début de chacune des trois sous-sections.

3.1 Introduction

3.1.1 Contexte

- **Image** : 1. Ensemble de points ou d'éléments représentatifs de l'apparence d'un objet, formés à partir du rayonnement émis, réfléchi, diffusé ou transmis par l'objet. 2. Représentation d'un objet matériel donnée par un système optique. (Larousse)
- **Imagerie** : Technique permettant d'obtenir des images à partir de différents types de rayonnements ; images ainsi obtenues. (Larousse)

Le thème principal de mon travail de recherche porte sur l'imagerie en utilisant les capteurs à micro-filtres. Il s'agit de considérer de manière jointe la définition du capteur filtré et la chaîne algorithmique appliquée au signal issue de ces caméras filtrées. Les dispositifs optoélectroniques considérés, et réalisant l'opération de transduction, sont principalement des imageurs 2D opérants dans le domaine du visible et/ou dans le domaine du proche-infrarouge (NIR - "Near-Infrared"). Mes contributions dans ce domaine englobent, entre autres, la définition/conception du système d'acquisition d'images, la caractérisation et le calibrage spectral et/ou polarimétrique, la reconstruction spatiale de l'image et la restauration d'image. Le but au final est, une fois la capture et le traitement d'image accomplis, de disposer d'une image de qualité supérieure à l'image brute, et potentiellement interprétable par des algorithmes d'analyse de données à plus haut niveau (par exemple pour la vision par ordinateur). L'étude et la validation de la chaîne algorithmique se font soit sur des données synthétiques, soit sur des bases de données existantes, soit sur des bases de données produites au laboratoire.

Plusieurs domaines de recherche identifiés par la communauté sont en relation : Le "Computational Imaging", le "Computational Photography", et le "Computer Vision". Je structurerais et définirais ces domaines comme suit ^I :

1. Capteur vers Image : "Computational Imaging"

- Objectif : faire correspondre la conception optoélectronique du capteur avec le prétraitement associé afin de produire une image
- Exemples : imagerie à matrice de micro-filtres, imagerie plénoptique, masque

I. cette définition est personnelle, mais je l'ai déjà partiellement entendue quelque part. Je ne sais pas de la part de qui et je m'excuse de ne pouvoir citer l'auteur.

codé ("coded aperture"), correction de non-linéarité/d'uniformité spatiale, dématricage, débruitage, calibrage, etc.

2. Image vers Image : "Computational Photography"

- Objectif : dépasser les limites optiques et électroniques par le traitement numérique des images
- Exemples : amélioration d'image, restauration d'image, fusion d'images, imagerie à grande gamme dynamique HDR (High Dynamic Range), super-résolution, etc.

3. Image vers Scène : "Computer Vision"

- Objectif : dériver des informations de la scène à partir d'images numériques (réf : IBM)
- Exemples : détection, segmentation, analyse statistique, navigation, reconstruction 3D, suivi visuel, reconnaissance de formes, etc.

Tous ces domaines de recherche n'ont pas de frontières strictes et certains de mes travaux (présentés dans les Sections 3.2, 3.3, et 3) ont dans une certaine mesure une transversalité. À titre indicatif, la robotique, la microscopie ou la télédétection sont des domaines pour lesquels les branches de l'imagerie énoncées ci-dessus sont utilisées dans un cadre d'application global.

D'une manière similaire, une déclinaison de la classification ci-dessus aurait pu être faite, mais en considérant non plus le capteur d'imagerie comme transducteur, mais le système visuel humain. Cela inclurait l'imagerie couleur, l'apparence des matériaux, la perception visuelle, l'infographie, etc.

3.1.2 Le capteur d'image

L'image issue d'une caméra est le résultat du processus de transduction, qui fait correspondre, à chaque pixel ("picture element"), le flux de photons incident par unité de surface à une valeur numérique ($[0 - 255]$ pour un capteur doté de convertisseurs analogiques-numériques 8-bit). Autrement dit, la radiance de la scène devient une valeur de pixel dans l'image.

Les capteurs d'image récents utilisent le silicium pour la conversion dans les gammes de longueurs d'onde du visible et du proche-infrarouge. Lorsqu'un atome de silicium est frappé par un photon avec une fréquence adéquate, il libère un électron et crée une paire électron-trou. Dans un cristal de silicium, il y a une relation de proportionnalité entre le flux de photons incident et le flux d'électrons engendré. Deux principaux types de capteurs d'image existent : le capteur CCD ("Charged Coupled Device") et le capteur CMOS ("Complementary Metal-Oxide Semiconductor").

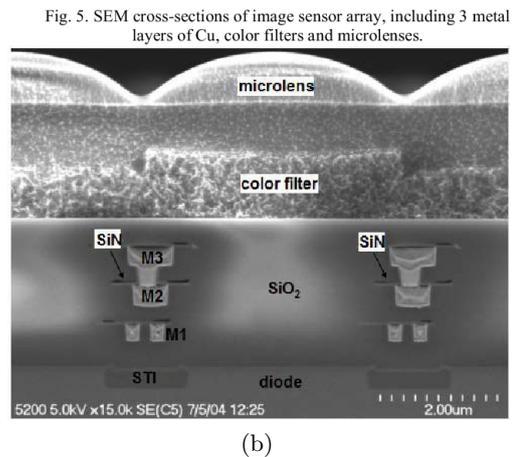
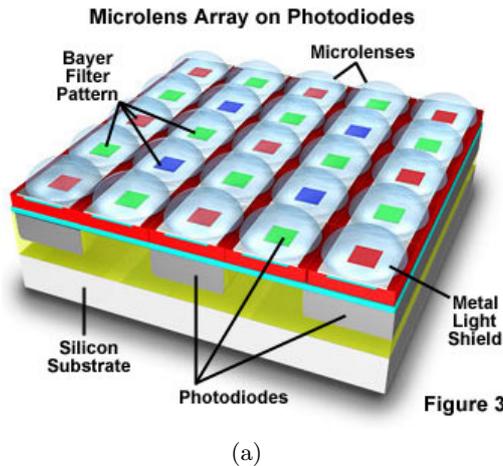


FIGURE 3.1 – (a) Structure d'un capteur à base de micro-filtres RGB et utilisant l'arrangement de Bayer RGGB [5]. Référence : [Hamamatsu](#). (b) Vue en coupe d'un pixel [64]. Pour minimiser l'apparition d'effets indésirables tels que le "cross-talk", le micro-filtre couleur est disposé en dessous de la micro-lentille.

Le CCD réalise une conversion photon/électron au sein de chaque pixel. Un circuit électronique permet à chaque ligne de pixels de transmettre ses électrons à la ligne suivante, et ce, de proche en proche, jusqu'à atteindre la dernière ligne. Une fois la dernière ligne atteinte, les électrons sont décalés horizontalement de gauche à droite. Lorsque les électrons atteignent le dernier pixel, ils sont convertis en tension, puis en valeur numérique via un seul ADC (convertisseur analogique-numérique) pour tout le capteur.

Le CMOS, quant à lui, dispose pour chaque pixel d'un circuit pour convertir les photons en électrons, puis les électrons en tension^{II}. En conséquence, la tension peut être lue directement pour chaque pixel. L'avantage est de pouvoir utiliser des ROI ("Regions Of Interest") dans l'image pour lire directement les zones sélectionnées par l'utilisateur. Il y a donc la possibilité de récupérer les données avec une fréquence d'images bien plus élevée par rapport à la capture d'une image complète. À titre d'exemple, un capteur SONY IMX455 de 61Mpixels (9568×6380 pixels), capable de transmettre un flux d'images à 21fps ("frame per second") en 10-bit , peut atteindre 558fps en 3188×234 pixels. Les caméras industrielles intègrent le plus souvent les capteurs CMOS en raison de cette flexibilité. Cependant, comme chaque pixel possède un circuit de conversion en tension disposé autour de la photodiode, la zone photosensible est plus petite comparée à celle d'un capteur CCD, et donc la sensibilité globale du capteur est moindre.

II. Il existe en réalité deux types de capteurs CMOS : les "global shutter" et les "rolling shutter", chacun ayant des avantages et des inconvénients. Nous ne détaillerons pas ces deux variantes.

La Figure 3.1 illustre un groupement de pixels, où chaque pixel est composé de plusieurs éléments :

- le substrat,
- la photodiode, la partie photosensible qui sert à capter le rayonnement électromagnétique, et à le transformer en signal électrique.
- le/les micro-filtre(s) (optionnel) : filtre polarisant, filtre spectral passe-bande, filtre de densité neutre, etc. Cette couche permet de filtrer le signal suivant une modalité particulière.
- la micro-lentille : elle concentre la lumière sur la photodiode, qui aurait autrement frappé une zone non sensible du capteur, voir un pixel voisin. Cela permet d'augmenter le "fill factor" (et donc la sensibilité du pixel) et de réduire le diaphonie ("cross-talk").

Les caméras intègrent un ou plusieurs capteurs d'image, et permettent l'interopérabilité avec un système tiers. En plus de la capture d'images à proprement parlé, la caméra peut intégrer d'autres fonctionnalités connexes (à la manière d'un système embarqué) :

- la gestion de l'alimentation du/des capteur(s) (généralement en 1.2, 1.8 et 3.3V) et des composants électroniques qui la composent,
- la gestion des bus de données (données parallélisées, LVDS) et des horloges (horloge de référence, horloge pixel, horloge système, etc.),
- la configuration des registres du capteur via un protocole de communication série basse vitesse (I²C, SPI, etc.),
- l'envoi du flux d'images vers l'extérieur de la caméra par l'intermédiaire d'une interface et d'un protocole de communication standardisés (GigE Vision, USB3 Vision, MIPI-CSI, Camera Link, etc.) ou non,
- le traitement plus ou moins complexe du flux d'images de manière embarquée (par ex. le dématricage, la correction des aberrations optiques, la réduction de bruit, etc.), avant l'envoi à un système tiers.

Certains constructeurs de caméras spécialisées offrent la possibilité au client de personnaliser leur caméra parmi une banque de fonctionnalités ou d'IP (par exemple l'entreprise française [NexVision](#)). Ceci augmente la flexibilité et les interopérabilités, afin d'intégrer les systèmes plus facilement à l'application existante.

Il est à noter qu'il est parfois difficile, pour certaines caméras, de connaître précisément quels sont les pré-traitements d'image réalisés au sein même de la caméra. Les algorithmes peuvent introduire une non-linéarité entre le flux de photons incident et la valeur du pixel, tels que la correction gamma par exemple. Cela peut poser des problèmes lorsque le traitement du signal appliqué aux images suppose la linéarité du système. Il y a alors la

nécessité de caractériser et de calibrer la réponse de la caméra [72, 82]. Ceci est souvent nécessaire pour les appareils photos de type reflex CANON/NIKON, où la quantité et la qualité des traitements internes ne sont pas toujours renseignées et dépendent du constructeur. Toutefois, les caméras industrielles offrent la possibilité de reconfigurer les registres du capteur à bas niveau afin d'obtenir une image brute.

Plusieurs sources de bruit, autre que la non-linéarité due aux pré-traitements, peuvent apparaître lors de la capture, la transmission et le traitement. Il est important de détailler les différents types de bruit ici, car ils sont souvent présents de manière sous-jacente dans les chaînes de traitement publiées dans mes travaux. Il existe deux principales catégories de bruit, à savoir :

- Le bruit temporel
 - le bruit de photon ("photon shot noise") : le bruit généré par l'incertitude du nombre de photons collectés sur une période de temps donnée. En d'autres termes, les photons arrivent à des intervalles aléatoires sur le pixel. Ceci est dû à la nature quantique de la lumière et n'a rien à voir avec la nature du capteur. Ce bruit est généralement modélisé statistiquement par une distribution de Poisson^{III}. Ce bruit est dépendant du signal.
 - le bruit de lecture ("readout noise" ou "read noise") : inclut plusieurs sources de bruit additif apparaissant lors du transfert charge-tension ou de l'amplification. Ceci est généralement modélisé statistiquement par une distribution Gaussienne. Ce bruit est indépendant du signal.
 - le courant d'obscurité ("dark current noise") : la variation statistique du nombre d'électrons générés thermiquement en raison de l'échauffement du capteur. Ceci est généralement modélisé statistiquement par une distribution de Poisson. Ceci apparaît principalement pour de longs temps d'exposition (par ex. en astrophotographie).
- Le bruit spatial (FPN - "Fixed Pattern Noise")
 - PRNU ("Photo-Response Non-Uniformity") : deux pixels sous la même intensité lumineuse produisent des valeurs numériques différentes.
 - DCNU ("Dark Current Non-Uniformity") : des différences de température font varier spatialement la réponse des pixels. Cela est corrigé par l'opération de "flat-field".

III. la moyenne et la variance sont identiques pour le bruit de Poisson. Lorsque le signal augmente, la variance augmente également. C'est pour cela que le bruit de photon est un bruit dépendant du signal.

D'autres types de phénomènes parasites peuvent aussi s'ajouter, et sont liés à la partie optique du système (objectif de la caméra, filtres, micro-lentilles, micro-filtres). Nous ne détaillerons pas ici ces bruits.

3.1.3 La dimension d'imagerie

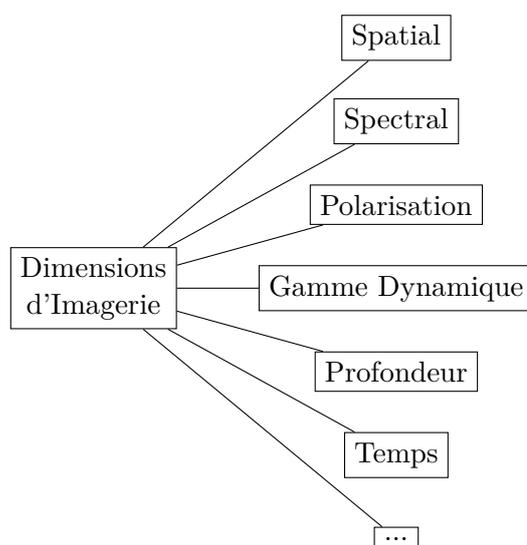


FIGURE 3.2 – Les dimensions de l'imagerie. Pour un nombre fini de pixels/capteurs, comment définir un assortiment judicieux de la ressource par rapport aux dimensions d'imagerie à considérer ?

La majorité des caméras numériques produisent des images 8-bit, 10-bit, 12-bit ou plus rarement 14-bit en monochrome ou en RGB. La définition spatiale des capteurs a fortement augmentée ces vingt dernières années (la "course aux mégapixels" imposée par la logique du marché du numérique), mais les images issues des caméras sont souvent insuffisantes pour de nombreuses applications industrielles nécessitant de l'information dans des dimensions d'imagerie autres que le spatial. La Figure 3.2 montre des exemples de ce que l'on définit ici par "dimension d'imagerie". Des travaux de recherches académiques et industriels ont permis d'exploiter d'autres dimensions d'imagerie, telles que l'imagerie multispectrale, l'imagerie à grande gamme dynamique, l'imagerie polarimétrique, l'imagerie 3D, l'imagerie ultra-rapide, l'imagerie super-résolue, etc. Il est donc nécessaire de sélectionner judicieusement les dimensions associées aux pixels tout en ayant à l'esprit que le système d'imagerie dispose d'un nombre fini d'éléments de mesure.

La Figure 3.3 montre les dimensions d'imagerie traitées au travers de mes travaux de recherche depuis 2010. Après avoir considéré l'imagerie HDR ("High Dynamic Range") en thèse, j'ai pu revaloriser ces travaux en les combinant d'abord à la modalité spectrale [120,

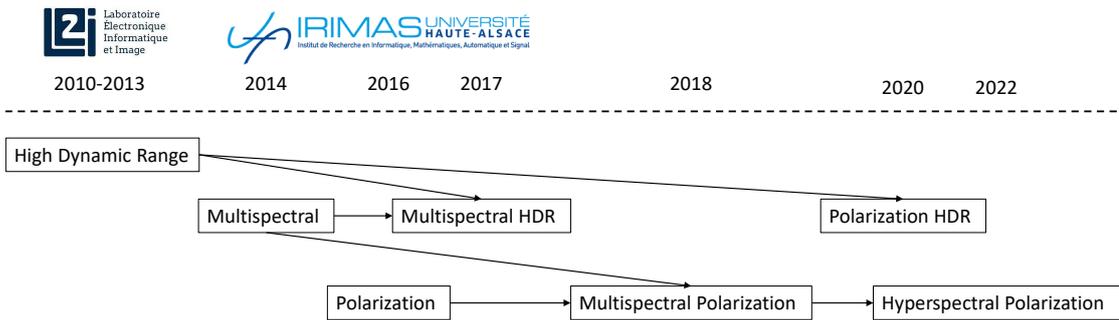


FIGURE 3.3 – Schéma montrant les liens entre les thématiques de recherche depuis 2010. Mes travaux de thèse portant sur l’HDR ("High Dynamic Range") ont été mis en relation avec les travaux effectués en post-doc en 2014 sur l’imagerie multispectrale. De même, en tant que maître de conférence, mes travaux sur la polarisation ont bénéficié de travaux antérieurs portant sur l’imagerie multispectrale et HDR.

[126], puis à la modalité de polarisation [146]. De même, ayant travaillé sur l’imagerie multispectrale pendant mon séjour post-doctoral en 2014, j’ai pu envisager une nouvelle thématique de recherche en tant qu’enseignant-chercheur en 2018, et qui porte sur l’imagerie spectropolarimétrique [133, 160]. La dimension temporelle, c.-à-d. le fait de considérer un signal vidéo plutôt qu’une image, n’est pas incluse dans la Figure 3.3. Cependant, elle a également été traitée de manière matérielle au travers de travaux sur la fusion d’images pour la modalité HDR [98, 107-109].

Nous nous attacherons maintenant à décrire un peu plus en détail une sélection de dimensions d’imagerie abordées dans mes travaux.

Intensité & HDR

La réponse du capteur est fonction de l’exposition, c’est l’intégrale de l’irradiance^{IV} en un point (x, y) sur le plan focal du capteur pendant que l’obturateur est ouvert. L’exposition du pixel est elle-même fonction des paramètres opto-électroniques du système (objectif, sensibilités spectrales/en polarisation, temps d’exposition Δt , ouverture de l’objectif, etc.). Bien que la charge collectée par un élément CCD/CMOS soit proportionnelle à son irradiance, certaines caméras peuvent avoir une non-linéarité en sortie, par exemple pour anticiper la réponse non linéaire du dispositif d’affichage, ou pour convertir une sortie d’ADC sur 12-bit en valeurs 8-bit. La caméra dispose d’une fonction de réponse f qui

IV. la radiance de la scène et l’irradiance du capteur sont supposées proportionnelles dans la majorité des travaux.

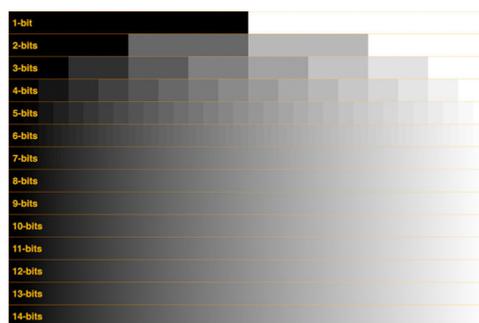


FIGURE 3.4 – Un signal lumineux (ayant une plage dynamique fixée) peut être converti en signal numérique avec différentes profondeurs de bits. L'opération de conversion se fait à l'aide d'ADC. Référence : [Lien](#).

fait correspondre la portion de lumière collectée (irradiance relative E^V) à l'intensité de pixel I dans l'image :

$$I = f(E\Delta_t) . \quad (3.1)$$

Lorsque la fonction f est connue, toutes les intensités mesurées peuvent être converties (ou linéarisées) en irradiance relative de la scène.

Toutefois, la non-linéarité la plus contraignante pour certaines applications aux conditions lumineuses difficiles est celle engendrée par le manque de dynamique du capteur. Cette dynamique est la capacité qu'a un système à capturer simultanément des signaux lumineux très faibles et des signaux lumineux très forts. Par définition, c'est le rapport entre la luminosité maximale mesurable et la luminosité minimale détectable. Électroniquement parlant, il s'agit en réalité de la capacité du puits ("full-well capacity") divisée par le bruit de la caméra. Attention toutefois à ne pas confondre la plage dynamique du capteur avec la profondeur de bits ("bitdepth"), le "bitdepth" correspondant au nombre de niveaux de gris utilisés pour coder la plage dynamique du signal lors de la quantification. La Figure 3.4 illustre ce concept, avec une plage dynamique d'intensités visualisée à l'aide de profondeurs de bits différentes.

Avec un capteur conventionnel, une scène à grande dynamique d'intensités (dite HDR) ne peut pas être capturée de manière complète en une seule prise de vue, car la plage dynamique de la scène dépasse la plage dynamique du capteur (voir une illustration du phénomène sur la Figure 3.5). En jouant sur le temps de pose (ou temps d'exposition du capteur), on peut sélectionner la plage d'intensités de la scène à capturer (voir Figure 3.6). Si l'on prend plusieurs images avec différents temps d'exposition, il est possible de

V. Nous appelons cette quantité irradiance relative, car pour obtenir une irradiance absolue, la caméra doit être calibrée en unités SI.

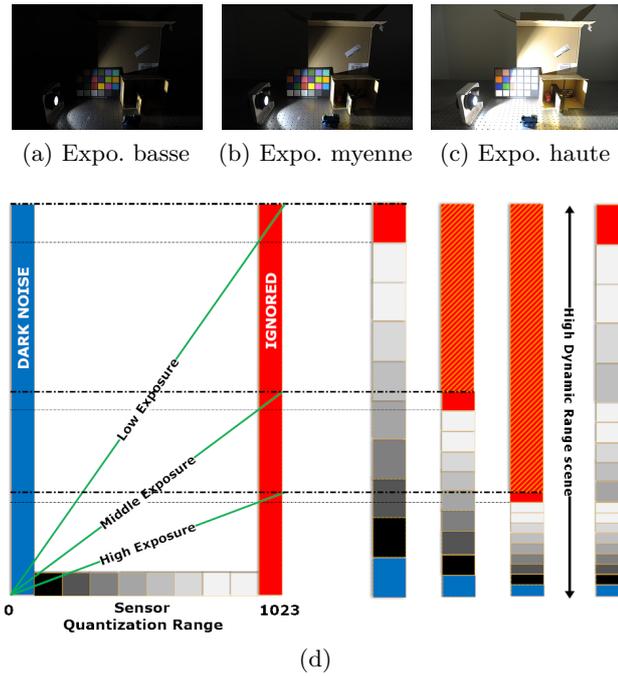


FIGURE 3.5 – Principe de l'imagerie HDR. Une scène montrant une grande dynamique d'intensités. Une image prise avec un seul temps d'exposition ne représente qu'une plage limitée des valeurs d'intensités. En combinant 3 expositions (a)-(c), nous pouvons reconstruire une image avec une grande plage dynamique. (d) est inspiré de Vinegoni *et al.* [135].

reconstruire une image contenant une information augmentée de la scène, c'est-à-dire une plage dynamique étendue par rapport à la plage dynamique obtenue en une seule prise de vue : c'est l'image HDR. De multiples algorithmes d'imagerie computationnelle dédiés HDR ont été développés, tels que pour la création des images HDR ou le mappage des tons ("tone mapping"). Un livre de Reinhard *et al.* [57] récapitule toutes ces méthodes.

Dans la plupart des cas, il s'agit d'une somme pondérée de N intensités I capturées pour un même point dans la scène, avec différents temps d'exposition Δt :

$$E = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{1}{\Delta t_n} \cdot f^{-1}(I_n) \cdot \omega(I_n)}{\sum_{n=1}^N \omega(I_n)}, \quad (3.2)$$

où n indique le $n^{\text{ième}}$ temps d'exposition et ω est une fonction de pondération sur les intensités. Le nombre d'images nécessaires et les valeurs de temps d'exposition doivent être choisis en fonction de la dynamique de la scène à capturer. Il est à noter que les intensités à fusionner doivent correspondre au même point de la scène. En d'autres termes,

les images prises avec des temps d'exposition différents doivent être parfaitement alignées (ce qui est particulièrement difficile si la scène observée est dynamique).

Les pixels sur-exposés ou sous-exposés doivent être exclus de la fusion. Ceci est réalisé en appliquant la fonction de pondération ω aux pixels de chaque image individuelle. Différentes stratégies de pondération ont été proposées dans la littérature [62], la plus courante étant la fonction "hat" (fonction en forme de chapeau), qui considère que les pixels les plus "fiables" sont en milieu de gamme (autour des valeurs 127 pour des intensités

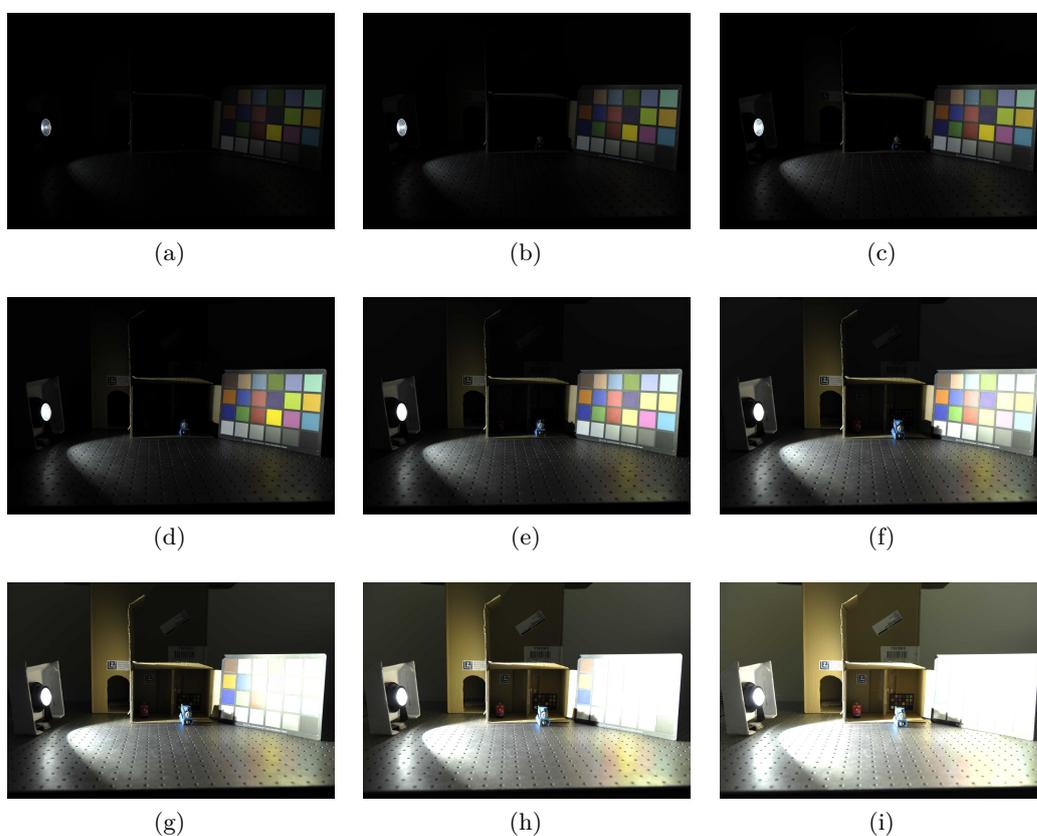


FIGURE 3.6 – (a-i) Images couleurs d'une scène à grande dynamique prises avec un bracketing d'exposition (par variation de temps de pose avec un intervalle d'1 stop). La scène présente à la fois des zones très fortement éclairées et des zones très faiblement éclairées. La plage dynamique du capteur étant fixe, chaque image individuelle ne restitue qu'une partie limitée de l'information totale de la scène.

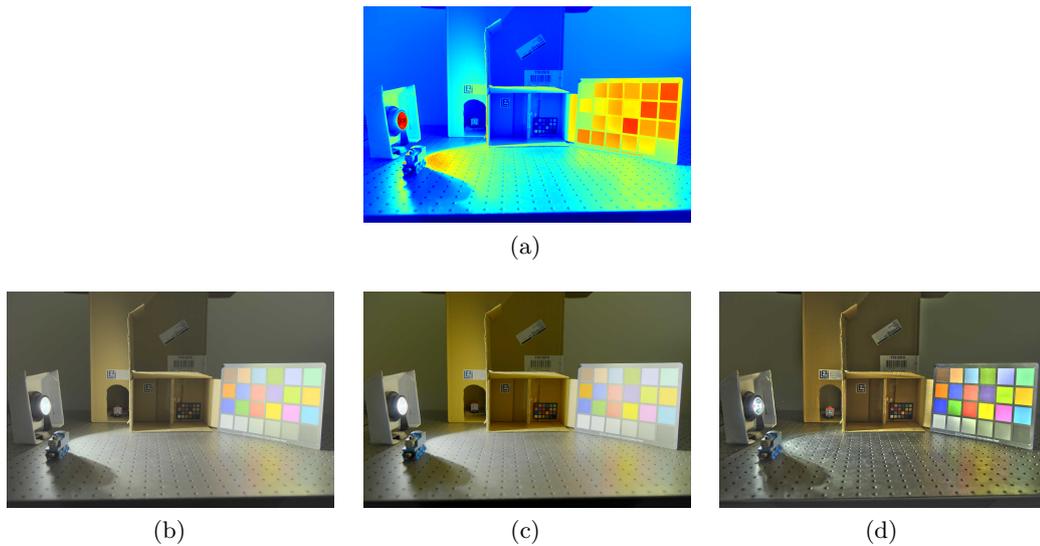


FIGURE 3.7 – (a) Image HDR générée à partir des images de la Figure 3.6 sans objet en mouvement. (a) image HDR représentée en fausses couleurs, (b) image reproduite (après "tone mapping") avec la méthode de Drago *et al.* [44], (c) image reproduite avec la méthode de Reinhard *et al.* [41], (d) image reproduite avec la méthode de Durand *et al.* [39].

codées entre $[0, 255]$) :

$$\omega(I) = \begin{cases} I & \text{pour } I \leq 127 \\ 255 - I & \text{pour } I > 127 \end{cases}$$

D'autres stratégies de pondération privilégieront par exemple les pixels avec des valeurs numériques élevées [29] (donc potentiellement moins bruités). La Figure 3.7a montre un exemple de reconstruction HDR avec la méthode de Debevec et Malik [67] et une pondération avec la fonction "hat". Elle est créée à partir des images de la Figure 3.6. La visualisation est faite en fausses couleurs et après "tone mapping". L'algorithme de "tone mapping" permet de faire correspondre la valeur de radiance relative dans l'image HDR aux valeurs de plage dynamique du dispositif d'affichage. Il vise donc à visualiser les images HDR sur des écrans à plage dynamique faible (ou LDR-"Low Dynamic Range"), qui constituent la majorité des écrans disponibles.

L'étape de pondération pour la création de l'image HDR implique l'utilisation de flottants ou de données en virgule fixe. Ceci a rendu compliqué le stockage, la gestion, la transmission et la visualisation des images HDR, et donc par là même sa standardisation. Jusqu'à récemment, aucune norme de codage d'image HDR n'a été adoptée par le marché. Uniquement des formats propriétaires et spécifiques au fournisseur de matériel existent, mais

ceux-ci ne conviennent pas au stockage ou à la transmission. Néanmoins, certains travaux tentent d'adapter les standards LDR 8-bit, tels que le JPEG pour l'image HDR [137]. Ceci permet d'utiliser directement les encodeurs matériels ou logiciels existants (présents sur les DSP, processeurs embarqués, GPU, etc.) sans surcoûts. Cette problématique est aussi présente pour l'imagerie spectrale, où la définition des standards de transmission, stockage et visualisation des données en est encore à ses débuts [165].

La méthode HDR initialement proposée étant basée sur la fusion d'images prises séquentiellement, tout mouvement entre deux poses entraîne un artefact visuel dans la scène appelé "ghost artifacts". Ceci est l'un des plus gros problèmes liés à l'HDR, surtout pour les applications en environnement dynamique. Dans le cas d'objets en mouvement, les techniques de "deghosting" permettent la correction des artefacts dus aux mouvements relatifs de la caméra ou des objets dans la scène. Aujourd'hui, les nouveaux systèmes de vision HDR tendent à implémenter des versions embarquées temps réel et/ou matérielles de ces algorithmes [109]. Parallèlement à cela, une nouvelle technologie de capture d'images HDR 24-bit (par canal spectral) en une seule prise de vue est apparue en 2019, avec le capteur SONY IMX490. Un agencement de plusieurs tailles de pixels (et donc plusieurs sensibilités) sur le capteur permet de récupérer simultanément des images exposées différemment [150]. Ceci élimine l'apparition d'artefacts en cas de mouvement. À ma connaissance, il n'y a pas de travaux de recherche définissant une chaîne de contrôle/traitement dédiée à ce type de capteur.

Spectral

La nécessité d'obtenir une information spectrale bien résolue devient de plus en plus importante dans divers scénarios d'application tels que la discrimination des matériaux, l'inspection industrielle ou la reproduction des couleurs.

L'imagerie monochrome traditionnelle intègre toute la contribution du spectre lumineux incident en une seule mesure d'intensité. Dans le cas de l'imagerie spectrale, l'intégration est pondérée par la sensibilité spectrale du système. La sélection spectrale du signal peut se faire en utilisant des filtres spectraux passe-bande, de telle sorte que leur transmittance permette de filtrer une gamme de longueurs d'onde par canal. Cependant, la sensibilité spectrale globale dépend également des contributions de l'ensemble des éléments qui composent le système, c'est-à-dire de l'objectif, des filtres spectraux/polarimétriques et de la réponse du silicium.

Les technologies permettant de faire de l'imagerie multispectrale sont énumérées et détaillées dans une de mes publications de 2014 [97]. L'exemple le plus connu est celui de la caméra RGB, munie de $N = 3$ filtres passe-bande R, G et B. Des systèmes spectralement

plus résolus, avec $N > 3$, peuvent être utilisés pour améliorer la reproduction des couleurs sous différents environnements d'éclairage, ou mieux discriminer les matériaux.

En supposant un capteur dépourvu de bruit (ou déjà corrigé), le modèle de réponse d'une caméra spectrale peut s'écrire par :

$$I_s = \int E(\lambda)O(\lambda)T_s(\lambda)\Omega(\lambda)d\lambda, \quad (3.3)$$

où I_s est la réponse de la caméra du $s^{\text{ième}}$ canal, $E(\lambda)$ est la radiance, $O(\lambda)$ est la transmission globale des éléments qui composent l'objectif, $T_s(\lambda)$ est la transmission du $s^{\text{ième}}$ canal et Ω est la sensibilité du capteur (silicium si le capteur est dédié au visible).

La luminosité apparente d'un point dépend de sa capacité à réfléchir la lumière incidente vers le capteur, communément appelée sa propriété de réflectance. Prédire ou interpréter l'intensité de l'image nécessite donc une bonne compréhension des différents mécanismes impliqués dans le processus. Il est possible de faire des hypothèses de réflexion appropriées pour une application particulière [16]. Lorsque l'hypothèse d'un matériau purement diffus est faite (et qu'il n'y a pas de réflexion spéculaire ^{VI}), le modèle peut être réécrit par :

$$I_s = \int R(\lambda)L(\lambda)O(\lambda)T_s(\lambda)\Omega(\lambda)d\lambda, \quad (3.4)$$

où $R(\lambda)$ est la réflectance et $L(\lambda)$ est la distribution spectrale de l'éclairage, aussi appelée SPD (Spectral Power Distribution). Une illustration est visible sur la Figure 3.8.

Cette équation est la base de nombreuses méthodes de problèmes inverses en imagerie spectrale [68], tels que :

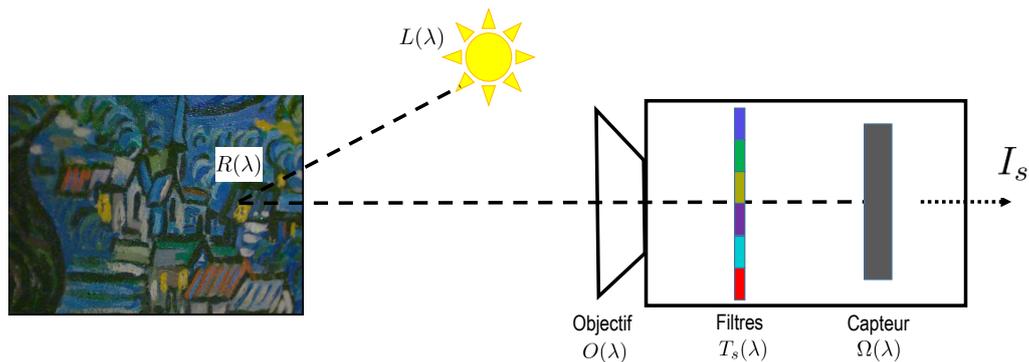
- La reconstruction spectrale de réflectances [10, 28, 50],
- L'estimation de SPD [24, 104, 119],
- La caractérisation des sensibilités spectrales d'un système [6, 19, 27, 60], etc.

L'hypothèse de réflexion diffuse peut permettre d'obtenir une précision suffisante dans certains cas applicatifs où l'éclairage et la configuration d'imagerie sont contrôlés. Cependant, lorsque des reflets spéculaires sont observés dans une image, il est très clair que les hypothèses lambertiennes ne sont plus respectées, et un modèle plus complet doit être utilisé pour la réflectance. Le modèle dichromatique [9, 12] par exemple, permet de tenir compte de cet effet. Il suppose que la fonction de réflectance est décrite comme la somme pondérée de deux fonctions : la réflectance spéculaire (dite de surface ou d'interface)

VI. Le modèle Lambertien décrit raisonnablement bien les réflexions diffuses, où la surface apparaît brillante de la même façon dans toutes les directions, quelle que soit la manière dont elle est éclairée.

et la réflectance diffuse (sous-surfacique). L'intensité totale I_s capturée par une caméra spectrale après une réflexion de surface peut donc être modélisée par la somme de deux composantes d'intensité.

La réflexion spéculaire se produit à l'interface entre l'objet et l'air, par réflexion directe (un seul angle). La surface peut être composée de plusieurs éléments plans, ou facettes, où chaque facette a sa propre orientation qui peut différer de l'orientation globale à plus grande échelle. Le résultat est une composante spéculaire qui se "répand" autour de la direction spéculaire principale, la largeur de cette distribution dépendant de la rugosité de la surface [4]. La réflexion sur des métaux ou du verre est principalement due à la réflexion spéculaire. Le modèle de réflexion dichromatique suggère que pour les diélectriques, la distribution spectrale de la composante diffuse est induite par le matériau (colorant de surface), tandis que la composante spéculaire préserve la distribution spectrale de la lumière incidente. En d'autres termes, la réflexion spéculaire semble avoir la même "couleur" que l'éclairage. De plus, Cette composante spéculaire a tendance à être partiellement polarisée après la réflexion d'une lumière non polarisée. Nous expliquerons ce phénomène dans la partie ci-après.



$$I_s = \int R(\lambda)L(\lambda)O(\lambda)T_s(\lambda)\Omega(\lambda)d\lambda,$$

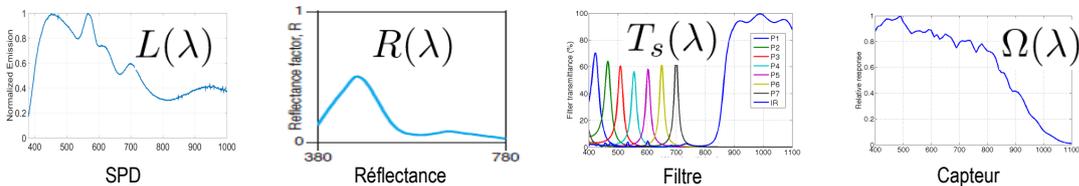


FIGURE 3.8 – Modèle d'imagerie spectrale supposant une réflexion purement diffuse du matériau. La caractéristique spectrale des éléments qui composent l'objectif est supposée constante et donc non représentée.

Polarisation

La polarisation est une des propriétés fondamentales d'une onde électromagnétique qui décrit la direction d'oscillation du champ électrique perpendiculairement à la direction de propagation ^{VII}. La lumière peut être non polarisée ou polarisée (totalement ou partiellement) dans une direction donnée. Plusieurs animaux comme les poissons, les insectes, les reptiles ou les oiseaux sont capables de percevoir la lumière polarisée [85]. Les humains, comme tous les autres mammifères, ne sont pas sensibles la polarisation de la lumière.

Le formalisme de Stokes permet la description complète et efficace de l'état de polarisation de la lumière avec un vecteur à quatre composantes [59, 70] : le vecteur de Stokes. Un polarimètre de Stokes est généralement la combinaison d'une caméra et d'un élément polarisant, formant un analyseur d'état de polarisation (PSA - "Polarisation State Analyser"). L'estimation spatiale de la polarisation est appelée imagerie polarimétrique. Elle est utile pour révéler des informations qui n'apparaissent pas dans l'imagerie d'intensité classique. Une vaste gamme de technologies a été déployée pour l'imagerie polarimétrique. Le Tableau 3.1 résume ces méthodes suivant deux grandes catégories : les méthodes à une seule prise de vue, et les méthodes à division temporelle. Une déclinaison de ce tableau a été publiée par nos soins [147] en 2020, et concerne la capture de la polarisation pour différentes bandes spectrales.

TABLE 3.1 – Résumé des méthodes d'acquisition pour l'imagerie de Stokes.

Méthode	Travaux	Compacte ?
Scan (division-of-time)		
Rotatable Retarder & Fixed Polarizer (RRFP)	[18]	[X]
One Liquid-Crystal Variable Retarder & fixed linear polarizer (LCVR)	[75, 87, 105, 111]	[✓]
Two Liquid-Crystal Variable Retarders & fixed linear polarizer (LCVRs)	[32, 48, 71, 79]	[Depend]
Liquid-crystal variable retarder	[75, 105, 111]	[✓]
Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF)	[63]	[X]
Snapshot		
Division-of-Amplitude (DoAmP)	[26]	[X]
Division-of-Aperture (DoAP)	[102]	[✓]
Division-of-Focal-Plane and Polarizer Filter Array (DoFP & MPA)	[58, 74, 80, 81, 91]	[✓]
Canonical Refraction (CR) / Biaxial Crystal (BC)	[103, 110]	[X]
Channeled Imaging Polarimeters (CIP)	[30, 46]	[X]

Un PSA linéaire est capable d'estimer les trois premiers éléments du vecteur de Stokes $\mathbf{S} = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ 0]^t$, correspondant à l'état de polarisation linéaire de la lumière incidente. L'état de polarisation peut être représenté dans la sphère de Poincaré [1]. La

VII. Je renvoie le lecteur à une description particulièrement pédagogique du phénomène de polarisation dans le livre de Feynman [3].

réponse d'un pixel à une orientation azimutale particulière du polariseur θ ($\theta \in [0, 180^\circ]$) et à un vecteur de Stokes \mathbf{S} , est modélisée par :

$$I_\theta = \mathbf{A}_\theta \mathbf{S} , \quad (3.5)$$

où I_θ est la réponse du pixel pour une orientation de polariseur θ , \mathbf{S} est l'état de polarisation de la lumière et $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & 0 \end{bmatrix}$ est le vecteur d'analyse qui intègre les caractéristiques de l'analyseur (le polariseur), c'est-à-dire la transmission, l'angle azimutal et le coefficient d'extinction. Si l'on suppose un polariseur avec des caractéristiques spatialement uniformes, et avec une transmission idéale et un coefficient d'extinction idéal, le vecteur d'analyse n'est fonction que de l'angle du polariseur θ . L'équation 3.5 peut donc être réécrite par :

$$I_\theta = 0,5 \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \end{bmatrix} \mathbf{S} , \quad (3.6)$$

Contrairement au cas spectral où il n'y a pas de nombre de canaux minimum pour obtenir une donnée exploitable, la polarisation linéaire nécessite au moins trois canaux d'intensité (correspondant à trois orientations différentes). Pour des raisons pratiques dans la conception des polarimètres, on considère très souvent un PSA avec $M = 4$ orientations discrètes de polariseur, donnant quatre mesures d'intensité différentes. Le modèle combinant ces intensités conduit à un vecteur d'intensités \mathbf{I} défini par :

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{\theta_1} \\ I_{\theta_2} \\ I_{\theta_3} \\ I_{\theta_4} \end{bmatrix} = \mathbf{W} \mathbf{S} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\theta_1) & \sin(2\theta_1) & 0 \\ 1 & \cos(2\theta_2) & \sin(2\theta_2) & 0 \\ 1 & \cos(2\theta_3) & \sin(2\theta_3) & 0 \\ 1 & \cos(2\theta_4) & \sin(2\theta_4) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

où \mathbf{W} est la matrice d'analyse qui combine les quatre vecteurs d'analyse \mathbf{A} et θ_{1-4} sont les angles de polarisation des quatre configurations du PSA. Une procédure d'étalonnage est souvent nécessaire pour estimer précisément les quatre angles lorsque ceux-ci sont inconnus. Toutefois, lorsque cela est possible, ces quatre angles sont choisis pour être équidistants entre $[0, 180]^\circ$, c.-à-d. $\theta_{1-4} = \{0, 45, 90, 135\}^\circ$ de manière à minimiser le bruit dans le processus d'inversion [43].

Une fois la matrice \mathbf{W} estimée, le vecteur de Stokes $\hat{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} \hat{S}_0 & \hat{S}_1 & \hat{S}_2 & 0 \end{bmatrix}^t$ peut être reconstruit à partir de \mathbf{I} , et ce pour chaque pixel dans l'image :

$$\hat{\mathbf{S}} = \hat{\mathbf{W}}^+ \mathbf{I}. \quad (3.8)$$

où $\hat{\mathbf{W}}^+$ est la pseudo-inverse de $\hat{\mathbf{W}}$. Pour un polarimètre qui possède K bandes spectrales, le vecteur de Stokes est estimé par bande spectrale k comme suit :

$$\hat{\mathbf{S}}_s = \hat{\mathbf{W}}^+ \mathbf{I}_s. \quad (3.9)$$

Un ensemble plus intuitif de paramètres polarimétriques peut être calculé à partir des vecteurs de Stokes, à savoir le degré de polarisation linéaire ρ_s (aussi noté *DoLP*) et l'angle de polarisation linéaire ϕ_s (aussi noté *AoLP*) :

$$\rho_s = \frac{\sqrt{\hat{S}_{1,s}^2 + \hat{S}_{2,s}^2}}{\hat{S}_{0,s}} \quad \phi_s = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{\hat{S}_{2,s}}{\hat{S}_{1,s}} \right) \quad (3.10)$$

Un exemple de reconstruction des images de degré et d'angle de polarisation obtenues après réflexion est visible sur la Figure 3.9.

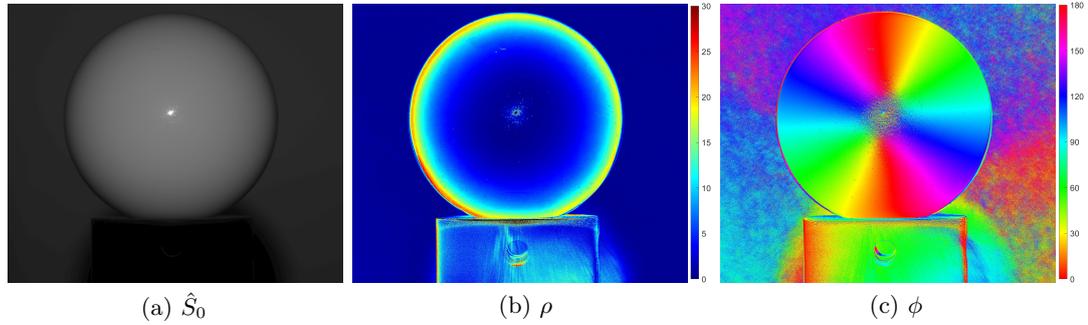


FIGURE 3.9 – Images d'intensité, de degrés et d'angles de polarisation en réflexion. L'objet est une boule de billard éclairée à sa normale par une source ponctuelle non polarisée. Les images brutes sont capturées avec une caméra munie d'un capteur monochrome SONY IMX264 et un polariseur tournant en face de l'objectif. Les images brutes sont moyennées ($\times 200$) avant estimation de Stokes. On remarque que ρ semble être relié à l'angle zénithal, et que ϕ semble encoder l'angle azimutal [128].

Polarisation par réflexion de la lumière

Le champ électrique de la lumière réfléchi en surface (appelée "surface scattering", par opposition à "volume scattering") a tendance à vibrer dans une direction particulière. Les dipôles qui composent le matériau (noyau : charge positive, électrons : charge négative) interagissent avec la lumière et peuvent vibrer dans n'importe quelle direction perpendiculairement à la direction du faisceau incident. Cependant, la "perspective" fait que nous ne pouvons pas "voir" certaines oscillations (vers nous par exemple). La Figure 3.10 illustre un exemple : une lumière incidente non polarisée, est réfléchi à 90° et vibre dans une seule direction. C'est le phénomène de polarisation par réflexion.

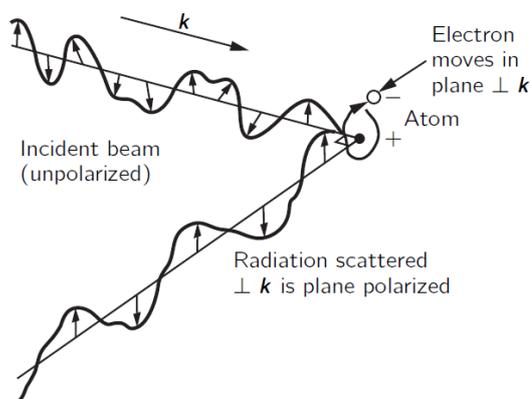


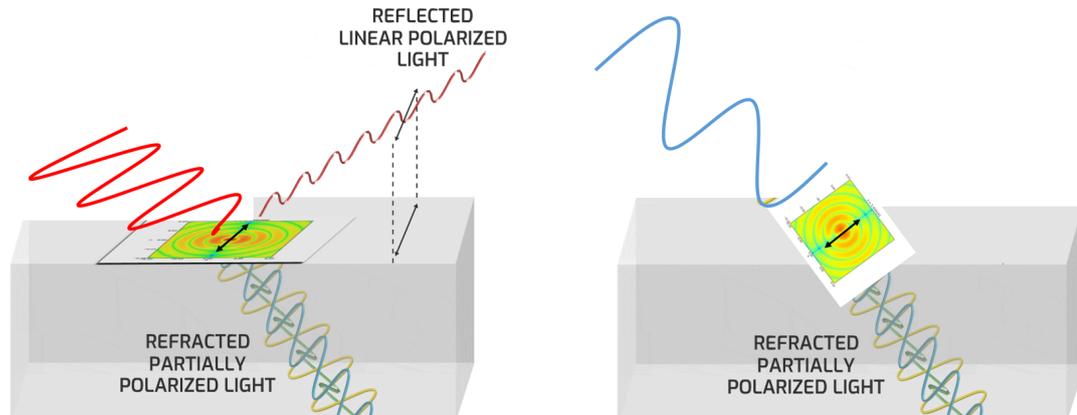
FIGURE 3.10 – L'origine de la polarisation d'un rayonnement réfléchi (perpendiculairement au faisceau incident) [3].

Dans le cas d'une lumière polarisée se réfléchissant à la surface, nous pouvons définir des cas particuliers. Il existe deux types d'états de polarisation par rapport au plan d'incidence :

- s-polarized : le champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence,
- p-polarized : le champ électrique est parallèle au plan d'incidence.

Comme indiqué auparavant, nous savons qu'un faisceau réfléchi est généré par le mouvement des charges dans le matériau. Si le faisceau incident est polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, alors il sera réfléchi (voir Figure 3.11(a)) et éventuellement réfracté. Si le faisceau incident est polarisé dans le plan d'incidence, il n'y aura aucune réflexion (voir Figure 3.11(b)). La polarisation du faisceau réfléchi résulte donc d'un phénomène indirect : le faisceau incident entraîne une oscillation des charges dans le matériau, qui à leur tour génèrent le faisceau réfléchi.

Dans le cas d'une réflexion dite "volume scattering", il faut faire appel à la théorie du transfert radiatif pour la diffusion sous la surface [21]. La réflexion diffuse se produit à



(a) Les dipôles oscillent dans la direction "s-polarized" (perpendiculairement au plan d'incidence)

(b) Les dipôles oscillent dans la direction "p-polarized" (parallèle au plan d'incidence)

FIGURE 3.11 – Les matériaux sont constitués de dipôles électriques qui oscillent et génèrent de la lumière réfléchi et réfractée. Les dipôles qui produisent le faisceau réfracté oscillent dans une direction perpendiculaire au faisceau réfracté (double flèche noire). Dans le cas d'une polarisation s (à gauche), le dipôle oscille perpendiculairement au faisceau réfléchi (ici, on est à l'angle d'incidence de Brewster). Dans le cas d'une polarisation p (à droite), les dipôles oscillent parallèlement au faisceau réfléchi. **Un dipôle ne rayonne aucune énergie dans la direction d'oscillation de son axe.**

partir de la diffusion de la lumière dans la sous-couche de surface, où les rayons lumineux pénètrent et subissent de multiples réflexions et réfractions dues aux inhomogénéités du milieu. Wolff [21] propose un modèle de réflectance de polarisation impliquant la composante de réflexion diffuse pour les diélectriques inhomogènes. La lumière diffuse est causée par l'absorption sélective et la réémission de lumière depuis l'intérieur du matériau de l'objet.

La proportion de lumière polarisée réfléchi dépend des propriétés optiques de l'interface de surface, c'est-à-dire des coefficients de Fresnel qui sont fonctions des indices de réfraction, de la longueur d'onde et des angles d'incidence/réflexion. En raison des multiples interactions sous la surface, il est souvent supposé que la composante diffuse n'est pas polarisée VIII, et que seule la composante spéculaire est partiellement polarisée. Ce phénomène a permis, entre autres, la différenciation des reflets directs et des inter-réflexions spéculaires sur les matériaux en utilisant la polarisation [31, 128].

VIII. Des travaux ne font pas cette hypothèse et utilisent la mesure de polarisation de la composante diffuse dans des cas très particuliers où la composante de réflexion spéculaire peut être très fortement diminuée.

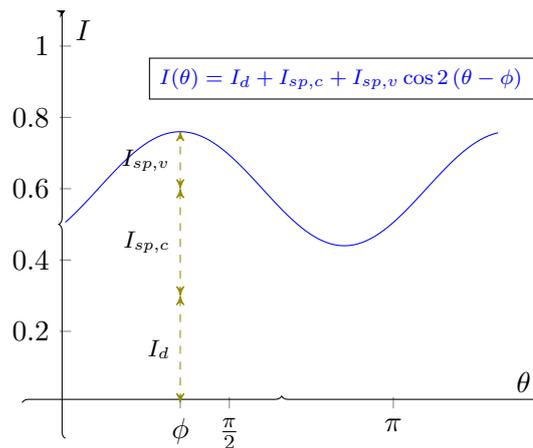


FIGURE 3.12 – Une lumière partiellement linéairement polarisée passe à travers un polariseur linéaire après une réflexion de surface. L'intensité de sortie décrit une sinusoïde avec des composantes constantes (diffuse et spéculaire) et variables (spéculaire).

La rotation d'un polariseur linéaire d'angle θ devant une caméra conduit à une mesure d'intensité telle que :

$$I_\theta = I_d + I_{sp,c} + I_{sp,v} \cos 2(\theta - \phi) , \quad (3.11)$$

où $I_{sp,c}$ est la composante spéculaire constante par rapport à l'angle du filtre de polarisation θ , $I_{sp,v}$ est la composante spéculaire variable, et ϕ est la phase de la sinusoïde (c'est-à-dire l'angle de polarisation linéaire de la lumière). Une visualisation de la variation d'intensité est montrée dans la Figure 3.12. Cette équation a été la base, par exemple, d'algorithmes de séparation de composantes diffuses/spéculaires en imagerie de polarisation [25].

3.1.4 Le capteur à matrice de filtres

La mosaïque de filtres est une manière d'échantillonner spatialement les dimensions d'imagerie. Une matrice de filtres qui a obtenu un succès commercial important est la mosaïque de Bayer [5], composée de trois types de filtres passe-bande : le rouge, le bleu et le vert. Le plan focal du capteur est divisé, c'est-à-dire que chaque pixel ne capture qu'une seule intensité relative à une seule des trois composantes RGB. Ceci forme un moyen compact et économique de capturer l'information couleur en une seule prise de vue.

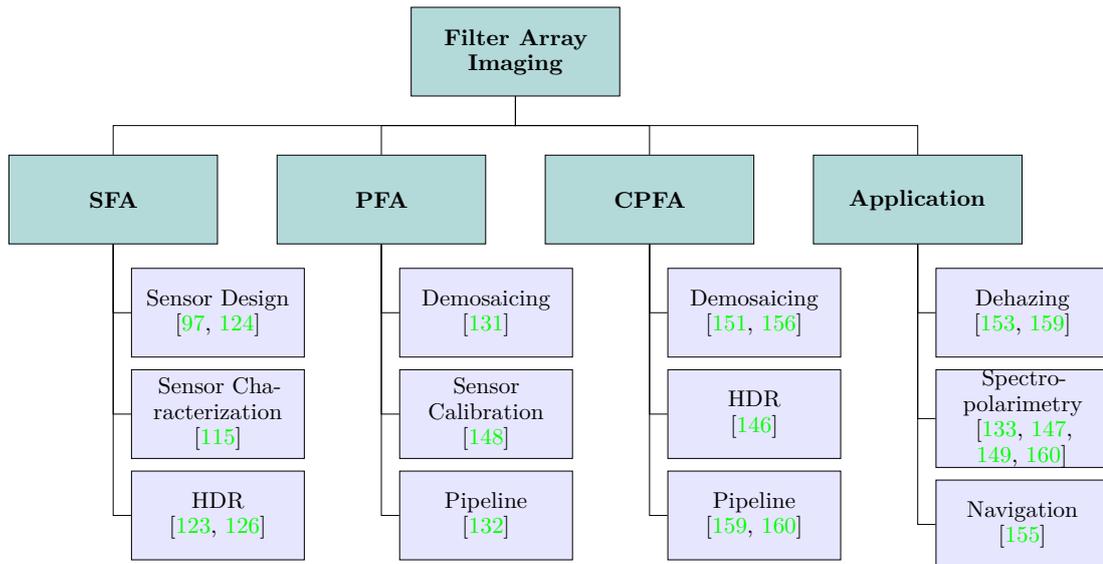


FIGURE 3.13 – Panorama de mes publications liées aux matrices de filtres. Les travaux sont classés par variantes de matrices.

Un FA (Filter Array) peut être défini par son super-pixel (ou moxel ou élément mosaïque, introduit par Taubman [35]), qui correspond à un motif prédéfini composé d'un ensemble de filtres disposés géométriquement. Ce motif est répété sur toute la surface qui compose le plan focal du capteur.

Des évolutions technologiques majeures sont apparues au niveau de la fabrication de micro-filtres, et ont rendu possible l'intégration de nouveaux assortiments de filtres, comme par exemples les filtres spectraux pour des bandes de longueurs d'onde étroites ou en dehors du domaine du visible, ou les filtres polarisants pour l'analyse de la polarisation linéaire. Toutes ces évolutions tendent à améliorer la polyvalence des instruments et permettent dorénavant la capture de modalités diverses, et ce, à un taux de rafraîchissement d'images relativement élevé compatible avec les exigences applicatives au niveau industriel. En parallèle de cela, la fabrication de capteurs standards tend à favoriser un nombre toujours croissant de pixels pour une même surface, ces pixels étant de plus en plus petits. Cette tendance est particulièrement compatible avec l'augmentation du nombre de dimensions capturées par un seul capteur. Comme chaque pixel est attribué à une dimension spécifique, il y a une réduction de la définition (et donc de la qualité d'image) lorsque le nombre de dimensions uniques augmente. Si le critère de Nyquist n'est pas respecté pour une bande donnée^{IX}, un phénomène d'"aliasing" peut apparaître dans l'image de la bande

IX. L'image optique est échantillonnée à une fréquence déterminée par la taille du détecteur et le nombre de pixels présents sur celui-ci. La fréquence d'échantillonnage doit être au moins deux fois plus grande que la fréquence du signal.

considérée.

Le prototypage de ce type de nouveaux capteurs reste très coûteux, puisque la fabrication et la dépose des filtres doivent être adaptées au format et aux spécificités du capteur. Nous avons expérimenté l'intégration d'un tel capteur lors mon post-doctorat en 2014, où la conception et la fabrication d'un prototype de capteur SFA ont été réalisées (une mosaïque de 8 filtres spectraux, sept filtres dans le visible et un NIR) [97, 114].

Voici une liste non exhaustive de matrices de filtres, avec les références à divers arrangements spatiaux commercialisées, étudiées ou prototypées dans la littérature :

- **Colour Filter Array (CFA)**
 - Bayer [5],
 - Quad-Bayer [141, 157],
 - Lukac *et al.* [53],
 - Yamanaka *et al.* [7],
 - Random,
 - Pseudo-random [106], etc.
- **Spectral/MultiSpectral Filter Array (SFA/MSFA)**
 - Sony RGBE,
 - Ramanath and Westley [38],
 - Miao *et al.* [49], etc.
- **Polarization Filter Array (PFA)**
 - Rust *et al.* [22],
 - LeMaster and Hirakawa [94], etc.
- **Neutral Density Filter Array (DFA)**
 - Nayar *et al.* [34].
- **Colour-Polarization Filter Array (CPFA)**
 - Sony IMX250 MYR [134],
 - Tu *et al.* [127].

Quelques-unes de ces matrices de filtres sont illustrées sur la Figure 3.14.

Il est à noter que la mosaïque DFA [33] est dédiée à l'imagerie HDR (High Dynamic Range), où un assortiment de plusieurs filtres de densités neutres différentes permettent de bloquer une partie plus ou moins importante du flux lumineux, c.-à-d. d'exposer de manière spatialement non homogène les pixels. Une procédure de fusion des pixels est ensuite utilisée pour obtenir une image HDR. Il faut aussi mentionner que la matrice

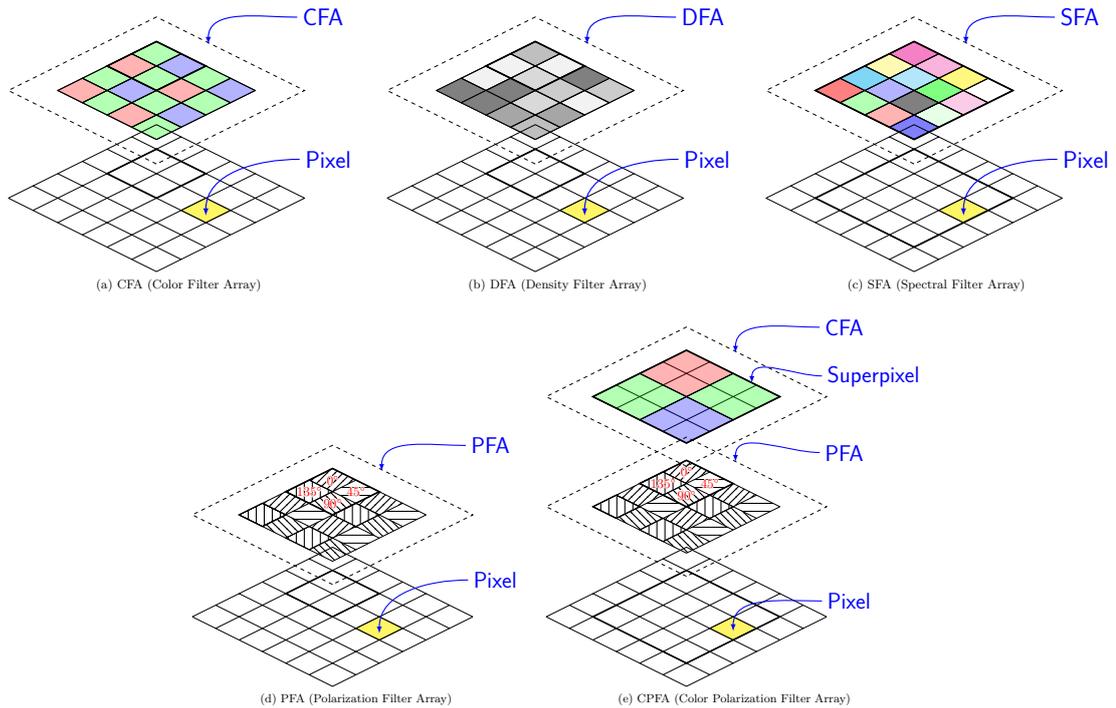


FIGURE 3.14 – Plusieurs structures de réseau de filtres : (a) une matrice de filtres de couleurs utilisant l’arrangement de Bayer [5], (b) un réseau de filtres à densité variable (DFA) pour l’imagerie instantanée High Dynamic Range, (c) une matrice de filtres spectraux (SFA), (d) une matrice de filtres de polarisation (PFA), et (e) une matrice de filtres de polarisation et RGB (CPFA).

SFA n’est pas conceptuellement différente du CFA. Cependant, elle est simplement une technique de capture d’image multispectrale où $s > 3$, et où le domaine de sensibilité peut être différent du visible.

Concernant les caméras à matrice de filtres, les questions et problématiques suivantes sont envisagées au sein de mes travaux :

1. Les champs lumineux de scènes réelles peuvent contenir des régularités, ce qui entraîne de fortes corrélations entre les différentes dimensions. Comment définir une méthode d’analyse statistique permettant d’observer ces régularités sur des données spectropolarimétriques ?
2. Nous avons un nombre limité de pixels pour capturer plusieurs dimensions. Comment définir une affectation judicieuse des ressources pixels ?
3. Pour des raisons pratiques, un imageur à matrice de filtres avec plusieurs di-

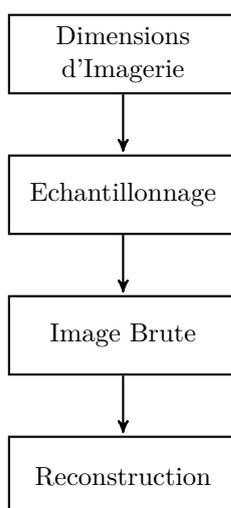


FIGURE 3.15 – Comment capturer, échantillonner et restaurer les dimensions d'imagerie ?

mensions peut être surdéterminé (par ex. pour un polarimètre linéaire à quatre mesures d'intensité, ou pour la reproduction d'image couleurs à partir de données multispectrales). Comment tirer un bénéfice de cette surdétermination ?

4. Partant des données brutes d'un ou plusieurs capteurs FA, il est nécessaire de reconstruire une image selon les dimensions individuelles (définition spatiale, résolution spectrale, précision polarimétrique, gamme d'intensité, etc.). Comment définir un "pipeline" d'imagerie permettant la reconstruction d'image dans le cas où la multiplication des modalités rend la disponibilité de l'information parcimonieuse ?

La Figure 3.15 illustre les questions précédentes dans le contexte de la capture et la reconstruction d'images à plusieurs dimensions à partir de capteurs filtrés.

Les trois sections qui vont suivre présentent les travaux relatifs à trois sous-thèmes sélectionnés. Il est à noter que les travaux sur la conception de capteurs multispectraux et la définition de chaîne de traitement HDR, qui sont antérieurs à mon affectation en tant que maître de conférence en 2016, ne sont pas décrits ici, mon souhait étant de mettre en avant les travaux réalisés en tant que coordinateur et/ou coencadrant.

3.2 Analyser les données spectropolarimétriques

Travaux publiés :

- G. COURTIER, P.-J. Lapray, J.-B. THOMAS et I. FARUP. Correlations in Joint Spectral and Polarization Imaging. *Sensors* **21**(1) (2021).

Contributions principales :

- Analyse de corrélation entre les canaux relativement aux types de réflexion/matériaux et sur deux bases de données d'images RGB-polarisation.

3.2.1 Imagerie spectrale et polarimétrique

La lumière est composée de plusieurs longueurs d'onde et de plusieurs états de polarisation, de sorte qu'un signal résulte d'une infinité de combinaisons de fréquences et d'états de polarisation. La spectroscopie est l'analyse de la propriété spectrale de la lumière et la polarimétrie est l'analyse de l'état de polarisation. Le mélange d'imagerie spectrale et de polarisation est un domaine de recherche émergent [147] développé au cours des dernières décennies, et fait partie de l'imagerie non conventionnelle. Ces deux approches sont généralement considérées indépendamment. Lorsqu'elles sont considérées ensemble, c'est souvent parce qu'une modalité est un bruit pour l'autre, telles que la compensation d'effet de polarisation pour la spectroscopie [45], ou la correction en décalage de longueur d'onde pour l'optique de polarisation [54]. L'acquisition jointe des deux propriétés permet une analyse plus détaillée de la scène par rapport à l'imagerie couleur/spectrale ou polarimétrique à large bande. Des travaux récents démontrent les avantages d'unifier ces deux modalités au sein d'applications, telles que la vision par ordinateur [25, 112], ou l'infographie [101, 125].

La sélection des longueurs d'onde particulières λ et d'un angle de polarisation particulier ϕ est effectuée au sein du détecteur à l'aide par exemple d'un/des polariseurs linéaires pour la sélection polarimétrique, et d'un/des filtres passe-bande pour la sélection spectrale. Les champs lumineux de scènes réelles peuvent contenir beaucoup de régularités, ce qui entraîne de fortes corrélations entre les deux dimensions. Nous pensons que les scènes peuvent présenter des corrélations spécifiques par rapport au type de matériau ou au type de réflexion impliquées (diffuse ou spéculaire).

Comme énoncé dans la Section 3.1, le modèle de réflectance dichromatique [9] suppose que la réflexion de la lumière est composée d'une composante diffuse (diffusions multiples sous la surface) et d'une composante spéculaire (réflexion directe de surface). La composante diffuse est souvent supposée non polarisée, alors que la composante spéculaire est partiellement polarisée. Cet effet est différent au sein de deux principales classes de matériaux :

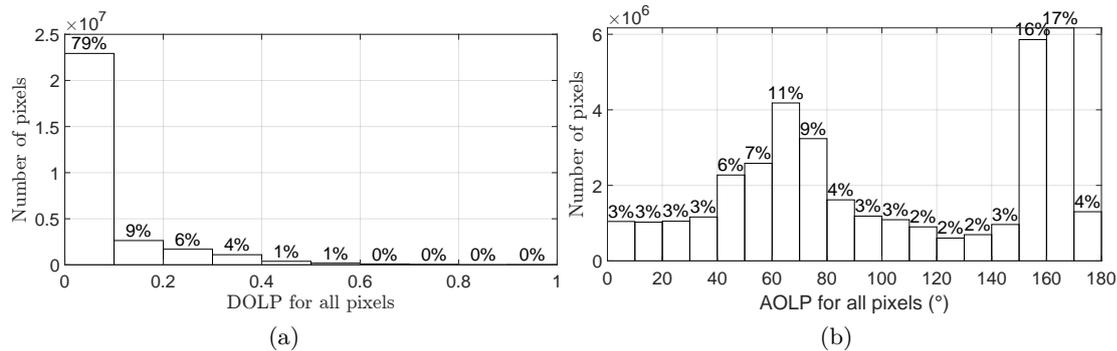


FIGURE 3.16 – DoLP et AoLP calculés globalement pour tous les pixels et tous les canaux spectraux pour 40 images spectropolarimétriques issues des bases de données Lapray *et al.* [133] et Qiu *et al.* [142] (sans les scènes possédant des films polarisants en fond).

les métaux et les isolants [15, 69]. Les tracés des coefficients de Fresnel typiques sont illustrés dans la Figure 5 de l'article de Nayar *et al.* [25]. Ces coefficients permettent de prédire le degré de polarisation la lumière réfléchi de manière spéculaire par un matériau, en fonction de l'angle d'incidence (et donc de réflexion pour une réflexion purement spéculaire) et des propriétés du milieu. Pour une scène avec des objets à géométrie complexe et avec un environnement lumineux non contrôlé, il est difficile de prédire quel sera l'état de polarisation pour une bande spectrale donnée. Nous pouvons néanmoins faire des macro-observations sur les données, en l'occurrence l'analyse de corrélations inter-canaux.

Nous avons donc proposé une étude des corrélations entre les différents canaux spectropolarimétriques d'images issues de bases de données existantes [149]. Une analyse statistique est faite sur un nombre relativement grand d'observations (50 scènes, $\approx 1.8Go$ de données), et ce pour différents modes de réflexion et différents types de matériaux. Nous détaillerons ci-après la méthode d'analyse.

3.2.2 Méthode pour l'analyse statistique

De prime abord, nous pouvons effectuer une simple analyse statistique globale sur le jeu de données. La Figure 3.16 montre les histogrammes des degrés de polarisation et les angles de polarisation calculés pour tous les canaux et sur 40 images spectropolarimétriques^X issues de deux bases de données, une réalisée par nos sois [133], et une de la littérature [142]

X. il est à noter que les scènes contenant des films polarisants en fond ont été écartés de cette première analyse.

(les bases de données sont décrites dans la Table 3.2). Cela montre que, pour des scènes réelles et pour un jeu de données pris dans des conditions d'éclairage non contrôlées :

1. le degré de polarisation est dans la plupart des cas très faible. Il y a par exemple 88% des pixels qui ont un degré de polarisation inférieur à 20%.
2. il peut exister certains angles de polarisation prédominants.

Pour aller plus loin dans l'observation, il est nécessaire d'effectuer l'analyse sur des données classées. Nous avons choisi de créer des catégories par type de matériaux et type de réflexion, et de faire une mesure de corrélation entre toutes les bandes. La Figure 3.17 montre la chaîne de traitement réalisée pour l'analyse des corrélations sur les bases de données spectropolarimétriques. Il est à noter que la méthode d'analyse pourrait également être valide pour d'autres dimensions d'imagerie.

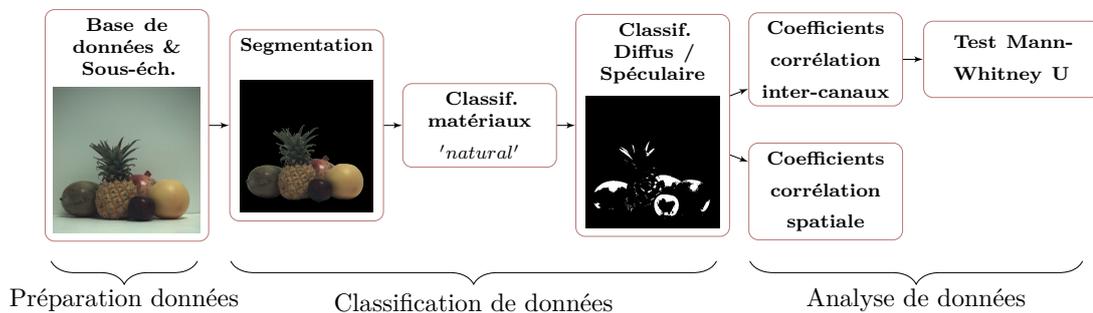


FIGURE 3.17 – Chaîne de traitement pour l'expérimentation sur l'analyse de données spectropolarimétriques.

La première étape de l'expérience concerne la préparation des bases de données. Deux bases de données d'images spectrales et de polarisation de la littérature [133, 142] ont été utilisées pour l'étude. Les caractéristiques des bases de données disponibles sont dans la Table 3.2. Les états de polarisation sont stockés dans des images prises avec quatre angles d'analyse $\theta \in \{0, 45, 90, 135\}^\circ$ et trois bandes spectrales $s \in \{R, G, B\}$, en faisant tourner un filtre de polarisation linéaire devant la caméra.

Après la segmentation des objets, nous avons ensuite classé visuellement les objets par groupes de matériaux, avec une quantité relativement bien équilibrée de pixels appartenant à chaque matériau. Il y a 8 groupes de matériaux :

- **Total** (tous les objets - 100 % du nombre total de pixels de l'objet),
- **Total** \ {**Actif**} (82,5 % - **Total** sans le **Active** cluster),
- **Métallique** (7 %),
- **Naturel** (17.5 %),
- **Actif** (c'est-à-dire un objet transparent, en verre ou en plastique, avec un éclairage polarisé en fond - 17,5 %),

Base de données	Nbr. Img	Définition	Pré-traitement	Spectrale	Polarisation
Qiu et al. [142]	40	1024 × 1024	Moyenne de 100 images, 2 × 2 "binning"	$c \in \{r, g, b\}$ - Bayer RGB (CMOSIS CMV4000-3E5)	$p \in \{0, 45, 90, 135\}$ - Polariseur linéaire (Thorlabs WP25M-VIS)
Lapray et al. [133]	10	994 × 738	Linéarisation, FPN, PRNU	6-band - filtres passe-bande et Bayer RGB (JAI AD-080GE camera)	$p \in \{0, 45, 90, 135\}$ - polariseur linéaire (Newport 10LP-VIS-B)

TABLE 3.2 – Résumé des bases de données d’images spectropolarimétriques utilisées pour l’analyse des données.

- **Plastique** (26,3 %),
- **Verre** (5,4 %),
- **Autre** objets manufacturés (26,3 %).

En plus du regroupement de matériaux, chaque pixel est classé comme faisant partie d’une scène ou d’un objet, mais aussi s’il s’agit d’une zone de réflexion plutôt spéculaire ou diffuse. Ainsi, nous obtenons quatre zones de réflexion :

- **Scène** (tous les pixels disponibles, arrière-plan inclus),
- **Objet** (arrière-plan exclu),
- **Diffus**,
- **Spéculaire**.

La classification en réflexion spéculaire ou diffuse se fait en utilisant la méthode de Nayar *et al.* [25], où les reflets spéculaires sont supposés partiellement polarisés [83], alors que la composante diffuse est non polarisée. Un seuil par pixel sur le degré de polarisation linéaire $DoLP$ est appliqué pour déterminer si l’intensité du pixel provient ou non d’une réflexion spéculaire :

$$\begin{cases} \text{Spec} = 1 & \text{for } \max_{s \in R, G, B} (DoLP_s) \geq T \text{ else } 0, \\ \text{Diff} = 1 & \text{for } \max_{s \in R, G, B} (DoLP_s) < T \text{ else } 0, \end{cases} \quad (3.12)$$

où T est un seuil variable décrit dans [25].

Un exemple de visualisation des corrélations intercanaux sur les différents matériaux qui composent les objets est représenté sur la Figure 3.18^{XI}. De plus, un résumé des

XI. Plus de visualisation des corrélations [ici](#).

résultats de corrélation est présenté dans la Table 3.3, où les moyennes des coefficients sont classées. Pour visualiser indépendamment la corrélation spectrale et de polarisation, chaque table est réarrangée de deux manières : en regroupant les bandes de polarisation d'une part, et en regroupant les bandes spectrales d'autre part.

À partir de l'analyse des coefficients, plusieurs régularités apparaissent :

- Plus les bandes spectrales sont éloignées, moins la corrélation est importante pour une même bande de polarisation. En effet, il existe une corrélation naturelle entre les bandes R, G, et B, car les courbes de sensibilité ont des zones de recouvrement non négligeables. En outre, les spectres de radiances des objets naturels et manufacturés sont généralement lisses.
- Plus les bandes de polarisation sont éloignées en termes d'angles (modulo π), moins la corrélation est grande pour une même bande spectrale. Ceci est attendu, puisque la variation d'intensité possède une composante suivant la loi de Malus (voir Figure 3.12). Par conséquent, les canaux de polarisation sont interdépendants : dans la même bande spectrale, la bande 0° sera toujours plus corrélée avec la bande 45° qu'avec la bande 90° .
- Les corrélations intra-canal (ou spatiales) existent également, dans la mesure où les matériaux possèdent des caractéristiques spatialement uniformes, et que la PSF du système optique n'est pas parfaite.
- Les canaux de polarisation sont fortement corrélés dans les zones **Diffuse**. Ceci est attendu puisque les pixels diffus ont été segmentés en fonction du degré de polarisation. La corrélation spectrale est toujours plus élevée en réflexion diffuse qu'en réflexion spéculaire, sauf pour le matériau **Verre**.
- Le scénario **Specular** présente les valeurs de corrélation les plus faibles pour les domaines de polarisation et de spectre.
- Dans tous les cas, sauf pour les matériaux **Active** et **Metallic**, les corrélations inter-canaux sont plus fortes en polarisation, aussi bien en zone diffuse qu'en zone spéculaire.

Toutes ces observations sont sujettes à vérification lorsque des bases de données plus conséquentes seront disponibles. La méthode d'analyse présentée dans ce travail reste valide, et pourrait donc être réutilisée pour de futures bases de données spectropolarimétriques, ou pour d'autres modalités. Les corrélations pourraient également servir de données de référence pour renseigner sur la diversité des matériaux/réflexions à l'intérieur d'autres jeux de données non annotés.

De plus, ces travaux préliminaires pourraient orienter la définition de nouveaux algorithmes de vision par ordinateur (détection, segmentation, suivi, *inpainting*, etc.) utilisant les données spectropolarimétriques et les statistiques de corrélations. La co-conception

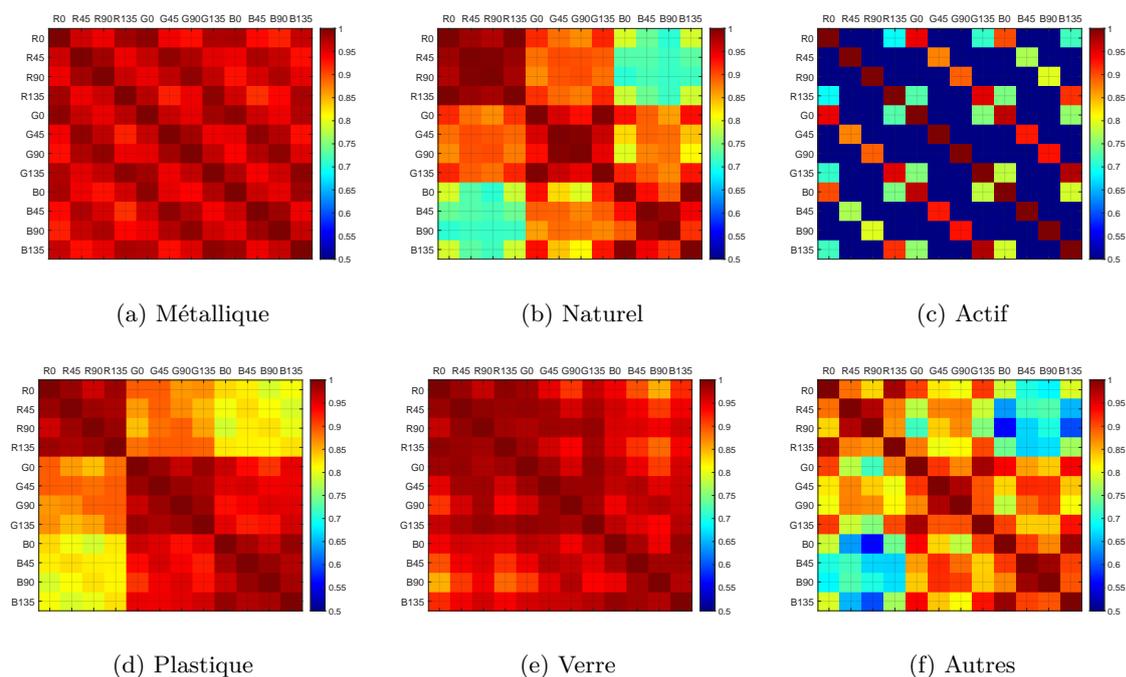


FIGURE 3.18 – Scénarios de réflexion pour les objets. Les canaux sont regroupés par canal spectral.

capteur/algorithmes pourrait également bénéficier de l'analyse. Par exemple, nous avons montré que les bandes de polarisation sont plus corrélées que les bandes spectrales. Ainsi, les canaux de polarisation devraient être utilisés en priorité pour piloter le processus de dématricage.

Réflexion Matériau	Scène		Objet		Diff		Spéc	
	S	P	S	P	S	P	S	P
Total	0.91	0.81	0.86	0.89	0.92	1.00	0.80	0.81
Total \ {Actif}	0.92	0.97	0.86	0.95	0.92	1.00	0.80	0.91
Métallique	-	-	0.99	0.96	0.98	0.99	0.98	0.92
Naturel	-	-	0.86	0.96	0.91	1.00	0.84	0.97
Actif	-	-	0.90	0.22	0.97	0.99	0.88	0.05
Plastique	-	-	0.89	0.98	0.88	1.00	0.88	0.93
Verre	-	-	0.97	0.98	0.89	0.98	0.98	0.98
Autres	-	-	0.85	0.92	0.95	1.00	0.75	0.83

TABLE 3.3 – Moyennes des coefficients de corrélation pour chaque couple réflexion/matériau.

3.3 Pré-traiter les images filtrées

Travaux publiés :

- Y. GIMÉNEZ, **P.-J. Lapray**, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Calibration algorithms for polarization filter array camera : survey and evaluation. *Journal of Electronic Imaging* **29**(4) (2020), 1-13.
- SPOTE, A., **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et I. FARUP. Joint demosaicing of colour and polarisation from filter arrays. *Color and Imaging Conference 2021*(29) (2021), 288-293.
- DUMOULIN, R., **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et I. FARUP. Impact of training data on LMMSE demosaicing for Colour-Polarization Filter Array. In : *2022 16th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS)*. 2022, pp.275-280

Contributions principales :

- Une simplification et une optimisation expérimentale d'une méthode de calibrage de DoFP.
- L'adaptation d'un algorithme de dématricage pour les images issues de caméras PFA/CPFA.

3.3.1 Calibrer les images de polarisation linéaire

Les capteurs PFA et CPFA utilisent des microfiltres polarisants pixelisés agencés en super-pixels (souvent avec un arrangement 2×2 ou 4×4 pixels). Une des entreprises fabriquant ces microfiltres est Moxtek ([lien site web](#)). La fabrication imparfaite et le dépôt de ces microfiltres peuvent être une nouvelle source de bruit pour les capteurs, et peuvent engendrer des imprécisions et des non-uniformités de mesure dans les images de Stokes. Des phénomènes de bruit dû aux imperfections optiques sont étudiés de manière analogue dans le cadre de l'imagerie de Mueller [61].

Des algorithmes d'étalonnage ont été récemment développés et adaptés aux instruments à DoFP (Division of Focal Plane Polarimeter) de types PFA et CPFA. Lors de nos travaux en 2020, nous avons réimplémenté plusieurs de ces techniques [148], en l'occurrence les algorithmes les plus populaires pour calibrer polarimétriquement les images PFA :

- Calibrage par pixel unique [88], où chaque pixel est calibré indépendamment des autres pixels,
- Calibrage par super pixel [88], où chaque super-pixel est calibré relativement à la réponse d'un voisinage de 2×2 pixels.

Nous ne présentons ici que la méthode super-pixel, qui compense les écarts de transmission, de diatténuation et d'orientation des micro-polariseurs. Le calibrage super-pixel utilise un voisinage de quatre pixels pour former le bloc de données utilisé pour l'étalonnage. L'AoLP et le DoLP calculés à partir des super-pixels calibrés sont alors beaucoup plus

précis avec cette technique grâce à une correction par groupe de pixels au lieu d'une correction par pixel individuelle.

Le modèle de Powell et Gruev [88] suppose une non-uniformité des vecteurs d'analyse, et inclut le bruit additif :

$$\mathbf{I}_j = \mathbf{W}_j \mathbf{S} + \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{j,0^\circ} \\ \mathbf{d}_{j,45^\circ} \\ \mathbf{d}_{j,90^\circ} \\ \mathbf{d}_{j,135^\circ} \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

où \mathbf{I}_j est le vecteur des quatre intensités mesurées dans le super-pixel, \mathbf{W}_j regroupe les quatre vecteurs d'analyse \mathbf{A}_i pour former la matrice de mesure, et j indique la position spatiale du super-pixel.

La première étape consiste d'abord à caractériser les pixels du PFA en faisant une estimation des paramètres des vecteurs d'analyse $\mathbf{A}_i = [a_{0,i} \ a_{1,i} \ a_{2,i} \ 0]$ et des bruits additifs d_i pour chaque pixel à la position i . Un solveur des moindres carrés impliquant N intensités capturées à partir de 9 angles de polarisation de référence équidistants est alors utilisé :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_i & d_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{i,1} & \dots & I_{i,N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{S}_1 & \dots & \mathbf{S}_N \\ 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}^+ \quad (3.14)$$

Où $^+$ désigne la pseudo-inverse et \mathbf{S} est le vecteur de Stokes d'entrée (de référence), supposé spatialement uniforme sur tout le capteur.

Une fois les matrices \mathbf{W} estimées, la fonction de calibrage est ensuite appliquée par super-pixel comme suit :

$$\mathbf{I}'_j = \mathbf{g}_j (\mathbf{I}_j - \mathbf{d}_j) \quad (3.15)$$

où $\mathbf{g}_j = \mathbf{W}_{ideal} \mathbf{W}_j^+$ regroupe les quatre gains normalisés à appliquer aux 4 intensités du super-pixel.

Il est apparu, au travers de nos travaux, que les résultats d'étalonnage des différentes caméras PFA différaient grandement relativement à la technologie employée pour le dépôt des micro-polariseurs. L'une des caméras calibrées était une caméra de chez 4D Technology (PolarCam G2) achetée en 2017, dite "on-glass" c.-à-d. que la matrice de micro-polariseurs

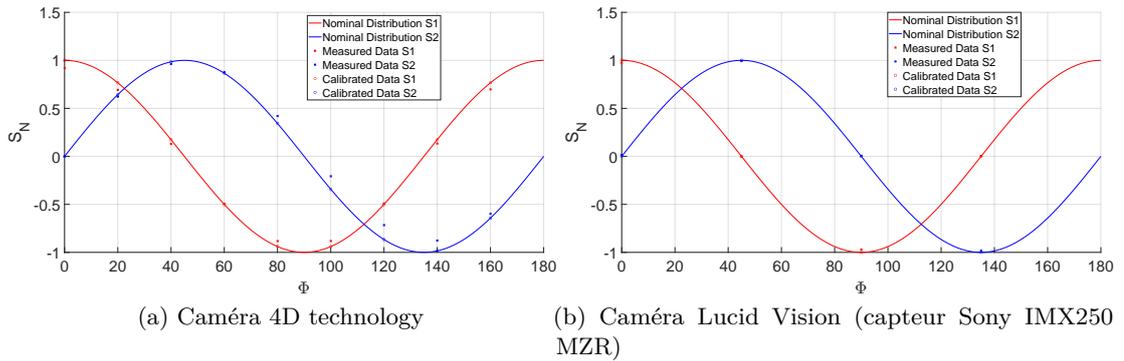


FIGURE 3.19 – Résultats de calibrage avec la méthode super-pixel pour deux types de caméras à base de matrice de micro-polariseurs. La caméra 4D possède un capteur CMOS Sony IMX174 couplé à un PFA fabriqué par la société Moxtek (technologie "on-glass", les micro-filtres étant par-dessus les micro-lentilles). La caméra Lucid Vision possède un capteur Sony IMX250 MZR (technologie "on-chip", les micro-filtres étant sous les microlentilles).

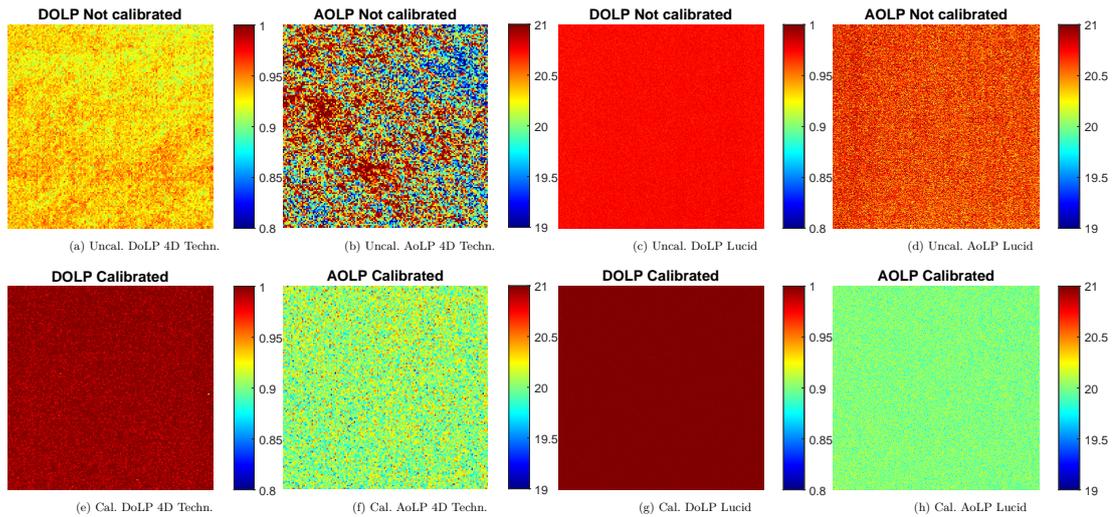


FIGURE 3.20 – Visualisation des résultats de calibrage pour les 2 caméras sur un signal uniforme de degré de polarisation 100% et d'angle 20°. (a), (b), (e), (f) DoLP et AoLP avant et après calibrage pour la caméra 4D Technology (capteur avec micro-filtres "on-glass"). (c), (d), (g), (h) DoLP et AoLP avant et après calibrage pour la caméra Lucid Vision (capteur IMX250 MZR avec micro-filtres "on-chip"). La visualisation est faite sur la zone centrale du capteur de 300 × 300 pixels.

se situe au-dessus des micro-lentilles. L'autre caméra calibrée possède le capteur Sony IMX250 MZR, achetée en 2020 et où la matrice de micro-polariseurs est localisée en

dessous des micro-lentilles ("on-chip"). Cette différence de technologie est visiblement très importante sur la qualité de la mesure en utilisant les données brutes. Une explication serait un diaphonie ("cross-talk") plus important pour les micro-filtres "on-glass".

Les résultats de calibrage pour les deux types de caméras sont visibles sur la Figure 3.19. Neuf points de mesure sont comparés avec la référence en S_1 et S_2 pour la caméra "on-glass", et quatre pour le capteur "on-chip". On remarque que le capteur Sony IMX250 MZR offre de relativement bonnes performances même sans calibrage, en comparaison avec la caméra 4D Technology. Cela veut dire que la technologie des micro-filtres a atteint une maturité suffisante pour garantir une bonne qualité et une bonne répétabilité dans la fabrication des micro-polariseurs (transmission, taux d'extinction et régularité des angles des polariseurs)^{XII}. Il apparaît également que l'uniformité des caractéristiques des micro-polariseurs sur l'ensemble des pixels est également très bonne (variance des caractéristiques des polariseurs) [148].

Dans les travaux de calibrage, l'erreur polarimétrique avant et après étalonnage est évaluée à l'aide d'un éclairage spatialement uniforme généré à partir d'une sphère intégratrice, et complètement polarisé à l'aide d'un polariseur supposé parfait. Très peu de travaux appliquent ce calibrage pour des scènes réelles ou évaluent les apports du calibrage pour des applications d'inspection ou de vision par ordinateur [88, 139, 158]. Il serait intéressant de voir l'impact qu'aurait le calibrage sur des images faites à partir d'objets texturés, de signaux peu polarisés, ou de réflexions spéculaires.

Le travail récemment réalisé au laboratoire en 2023 [163] a eu en partie pour objectif d'appliquer le calibrage sur des images contenant un objet dont la géométrie est connue (une boule de billard), et réfléchissant la lumière avec une grande variété de signatures polarimétriques. Il est apparu que le calibrage du capteur Sony n'apporte que très peu d'amélioration quant à la précision de mesure, comparé à l'apport qu'ont d'autres pré-traitements effectués sur les images brutes (moyennage et dématricage).

3.3.2 Restauration des images

La Figure 3.21 montre un exemple d'image brute prise à partir d'un capteur CPFA. Un zoom sur une zone uniforme met en évidence une répétition d'un motif de 4×4 pixels, où chaque pixel capte un signal d'intensité lumineuse filtrée par rapport à une bande spectrale et un canal de polarisation. Le motif étant relativement gros, un sous-échantillonnage simple pour obtenir une image à 12 canaux entraînerait inévitablement la division de la définition des images par 16 (canaux rouge et bleu) ou 8 (canal vert). C'est

XII. Il en a été de même auparavant pour les caméras CFA.

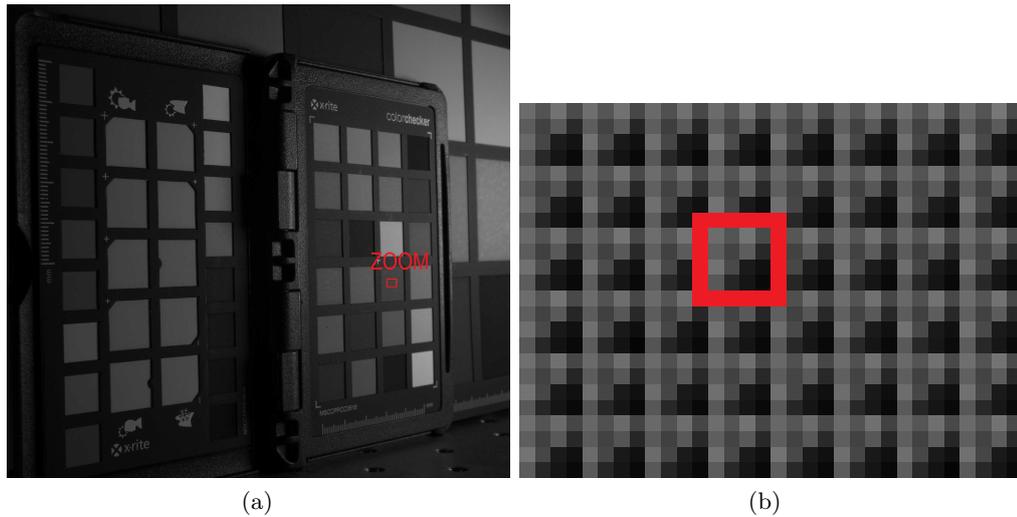


FIGURE 3.21 – Exemple d’image capturée à partir d’une caméra CPFA. (a) image brute pleine définition et (b) version zoomée sur la zone rouge de la mire couleurs dans la scène.

pourquoi, il est important d’utiliser un algorithme de reconstruction spatiale (dematriçage ou "demosaicing") dédié afin d’obtenir une image à 12 bandes à la définition du capteur. La méthode la plus rudimentaire est la méthode bilinéaire.

Nous avons vu plus haut que, dans le cas de l’acquisition conjointe de la couleur et de la polarisation, nous observons des corrélations entre les bandes [149]. Cela veut dire que les algorithmes de dematriçage peuvent potentiellement bénéficier de ces corrélations inter-canaux pour inclure les pixels voisins appartenant à d’autres bandes lors de l’estimation du pixel manquant. En d’autres termes, le schéma de restauration peut se baser sur l’hypothèse que l’autocorrélation du signal, décrivant les relations inter-canal (spectrale/polarisation) et intra-canal (spatiale), est séparable. On peut donc voir le dematriçage comme un problème inverse généralisé, où les valeurs manquantes dans une mosaïque peuvent être reconstruites par une combinaison linéaire des valeurs de pixels voisins (c.-à-d. avec une fonction de transfert linéaire).

Nous présentons ici une méthode de dematriçage linéaire appelée LMMSE (Linear Minimum Mean Square Error) adaptée aux CPFA. À l’origine, cette méthode a été développée pour la reconstruction de signal 1-D, puis la correction de dégradations dans une image (comme le bruit ou le flou optique) [13, 17], puis pour la restauration des images de type Bayer [13, 17, 23, 35, 42, 106], et enfin pour les SFA [116] et CPFA [151, 156]. En plus de montrer des performances qui rivalisent avec celles de l’état de l’art, l’algorithme a l’avantage de pouvoir être ré-entraîné avec un nombre restreint d’images (contrairement aux méthodes par apprentissage profond), et d’être potentiellement parallélisable pour

une implémentation compatible avec les flux vidéos. Nous détaillerons ici cet algorithme.

Le problème de restauration d'images utilise depuis longtemps une notation des images 2D en version 1D, c.-à-d. que les données sont "vectorisées" ou "empilées" (passage 2D→1D) pour faciliter tout calcul. Une image 2D \mathbf{Y} à une seule bande et de dimensions $P \times P$ est définie par [42] :

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 & \mathbf{y}_2 & \dots & \mathbf{y}_P \end{bmatrix} , \quad (3.16)$$

où les \mathbf{y}_k sont des vecteurs colonne de longueur P . La version vectorisée \mathbf{y} de dimension $P^2 \times 1$ peut donc s'écrire :

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1^t & \mathbf{y}_2^t & \dots & \mathbf{y}_P^t \end{bmatrix}^t . \quad (3.17)$$

Si l'image \mathbf{Y} possède N bandes (spectrales, de polarisation ou spectropolarimétriques), les bandes peuvent être empilées de la même manière que les colonnes de l'image 2D.

Le modèle de formation d'image linéaire (mosaïquage) peut être écrit algébriquement par :

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}\mathbf{y} , \quad (3.18)$$

où les vecteurs \mathbf{x} et \mathbf{y} sont les versions vectorisées des images matricées et originales respectivement, et \mathbf{H} représente l'opérateur de matricage^{XIII} qui sélectionne des pixels de \mathbf{y} pour former chaque colonne de \mathbf{x} . Comme l'opération de mosaïquage est un processus linéaire, il est naturel de considérer une solution inverse linéaire pour le dématricage. L'estimation de \mathbf{y} à partir de l'erreur quadratique moyenne minimale linéaire LMMSE (Linear Minimum Mean Square Error) peut être faite par [17] :

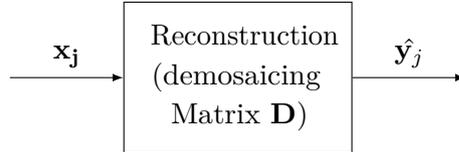
$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{R}_y \mathbf{H}^t [\mathbf{H} \mathbf{R}_y \mathbf{H}^t]^{-1} \mathbf{x} , \quad (3.19)$$

où \mathbf{R}_y est la matrice d'autocorrélation de \mathbf{y} . Elle est en général calculée sur un jeu de données (ou d'images), et est donc l'espérance de la corrélation pour plusieurs observations du signal.

Le modèle énoncé ci-dessus implique la manipulation de matrices de la taille du nombre de pixels dans les images. Ceci devient impraticable lorsque la taille des images avoisine le MégaPixel. L'intérêt de la méthode de dématricage ici est que la restauration peut se faire indépendamment par bloc de super-pixel (et non par image), et ce, grâce à la propriété de la mosaïque : l'invariance par décalage de bloc ou "block shift invariance". Les

XIII. Il peut être également vu comme une fonction de dégradation de l'image \mathbf{y} .

équations précédentes restent valides, mais sont appliquées aux données d'un super-pixel (et son voisinage) et non d'une image entière. Cet avantage permet à l'algorithme, d'une part, de pouvoir être utilisable pour n'importe quelle définition d'image, et d'autre part, d'être massivement parallélisable, idéal pour des implémentations sur GPU/FPGA donc.



La restauration d'un super-pixel dans l'image peut donc se faire grâce à une relation linéaire qui est :

$$\hat{\mathbf{y}}_j = \mathbf{D}\mathbf{x}_j , \quad (3.20)$$

où j indique la position du super-pixel et \mathbf{D} la matrice qui effectue l'opération de dématricage d'un super-pixel. Cette matrice est la même pour tous les super-pixels de l'image. Les vecteurs $\hat{\mathbf{y}}_j$ et \mathbf{x}_j , c.-à-d. le super-pixel matricé et dématricé, sont en version "vectorisées". Pour stabiliser l'estimation, un voisinage de 10×10 pixels autour du super-pixel \mathbf{x}_j est considéré (et il en va de même pour l'obtention de la matrice \mathbf{D} , voir ci-après). Dans le cas du CPFPA avec un super-pixel de 4×4 à dématricer en 12 bandes, \mathbf{D} est de taille 192×100 , \mathbf{x}_j est de taille 100×1 et $\hat{\mathbf{y}}_j$ est de taille 192×1 . La Figure 3.22 montre l'opération de dématricage d'un super-pixel.

Pour obtenir le modèle \mathbf{D} , comme pour l'équation 3.19, l'algorithme utilise un apprentissage sur un jeu de données, qui détermine l'opérateur inverse qui minimise l'erreur quadratique moyenne entre les données matricées et les données de référence^{XIV}. Cependant, comme pour le dématricage, l'apprentissage utilise des données super-pixel avec un voisinage de 10×10 pixels. L'équation 3.21 montre comment la matrice \mathbf{D} est calculée à partir d'un jeu d'entraînement :

$$\mathbf{D} = \mathbf{V}_1 \mathbf{R}_{\mathbf{y}_1} \mathbf{H}_1^t [\mathbf{H}_1 \mathbf{R}_{\mathbf{y}_1} \mathbf{H}_1^t]^{-1} , \quad (3.21)$$

où l'indice $_1$ signifie qu'un voisinage est considéré pour tous les super-pixels, c.-à-d. que \mathbf{y}_1 contient tous les super-pixels (vectorisés et avec voisinage) des images de référence. La matrice \mathbf{V}_1 est une matrice constante permettant de supprimer le voisinage ($\mathbf{y} = \mathbf{V}_1 \mathbf{y}_1$).

XIV. Il est à noter que la connaissance du modèle de bruit ou du moins de sa matrice de covariance peut être intégrée dans la solution afin de la stabiliser. Cette solution est appelée estimation de Wiener.

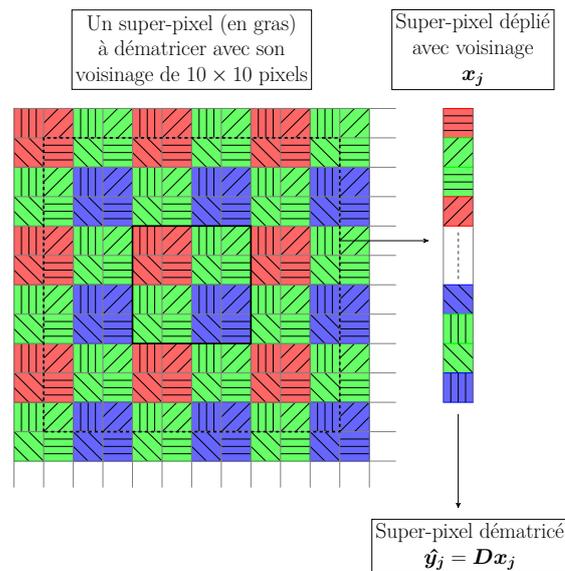


FIGURE 3.22 – Dématricage d'un super-pixel.

On peut se demander alors quelle est la performance par rapport à la quantité d'images utilisées pour l'entraînement. Une méthode a été définie pour aider à la sélection de modèle pour un nombre relativement faible d'images. Tout d'abord, on sélectionne i images pour entraîner l'algorithme, puis on prend au hasard 50 images pour tester l'algorithme. Les images d'entraînement doivent être différentes de celles de test pour éviter les éventuels biais. Pour la première itération, l'apprentissage se fait avec 1 image, puis les 50 images de test sont dématricées. À chaque itération, le nombre d'images d'apprentissage augmente de 1. Les 50 mêmes images sont utilisées pour chaque itération. L'algorithme 1 ci-après montre les différentes étapes.

Algorithm 1 Qualité de reconstruction en fonction du nombre d'images pour l'apprentissage du LMMSE

INPUT : Base de données

OUTPUT : PSNR (μ, σ)

Sélectionner 12 images pour l'apprentissage

Sélectionner 50 images au hasard pour le test

for $i = 1 : 12$ **do**

 Apprendre D avec i images

 Dématricer les 50 images test

 Calculer le PSNR (μ, σ)

end for

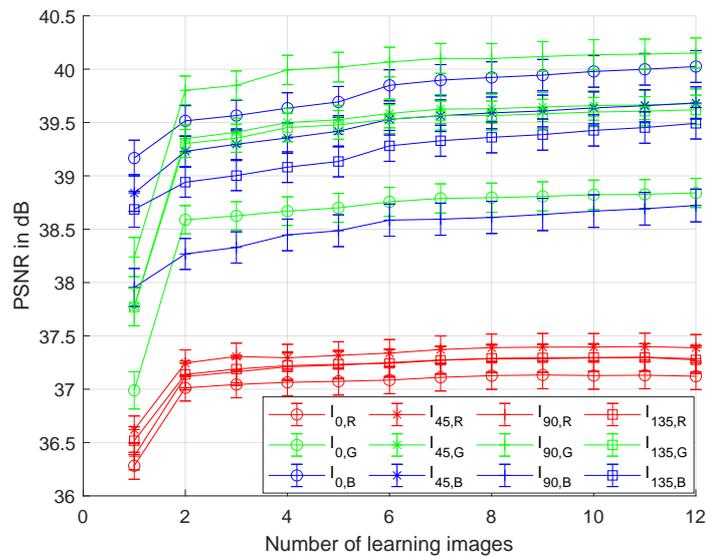


FIGURE 3.23 – PSNR en fonction du nombre d’images d’apprentissage. Un facteur de 0,05 est appliqué à l’écart type pour une meilleure lisibilité.

La Figure 3.23 montre les valeurs de PSNR moyens et les écarts-types obtenus avec la méthode décrite au-dessus. On peut voir que les valeurs de PSNR augmentent de manière monotone pour un nombre croissant d’images d’apprentissage. Les valeurs de PSNR se stabilisent avec un nombre d’images relativement faible. Cela signifie que l’algorithme converge rapidement et n’a donc pas besoin d’une grande quantité d’images pour bien fonctionner. Cependant, si les images sont de plus basse définition, il faudra plus d’images pour que l’algorithme converge. Il y a donc une dépendance de l’algorithme à la quantité de données. Il est à noter que les valeurs de PSNR des canaux bleus sont relativement élevées (proches des canaux verts alors que ceux-ci sont sur-échantillonnés). Cela est dû au flou présent dans les canaux bleus pour la base de données utilisées [152]. Pour un nombre d’images plus grand, nous avons vérifié que le PSNR n’augmentait pas significativement après 12 images de définition 1456×1088 pixels en utilisant un procédé de validation croisée de type k-fold [156].

Les résultats de dématricage sont visibles sur la Figure 3.4, où une comparaison est faite avec un algorithme de l’état de l’art dédié au CPFPA et basé sur le filtrage EARI (Edge-Aware Residual Interpolation) [145]. Une visualisation des résultats est aussi présente sur la Figure 3.24. Voir [151, 156] pour une analyse approfondie des résultats.

Il est à noter que la méthode de dématricage énoncée ci-dessus peut s’appliquer à n’importe quel type de capteur filtré, avec n’importe quelles dimensions ou nombre de canaux. Ceci permettrait par exemple aux fabricants de caméras industrielles d’avoir la

	EARI		LMMSE $i = 12$		LMMSE $i = 55$	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
$I_{0,R}$	35.96	2.42	37.12	2.50	37.02	2.53
$I_{0,G}$	38.02	2.95	38.84	2.74	38.76	2.71
$I_{0,B}$	38.87	3.02	40.02	2.97	40.00	2.94
$I_{45,R}$	36.02	2.43	37.39	2.49	37.37	2.51
$I_{45,G}$	38.61	2.96	39.68	2.74	39.64	2.71
$I_{45,B}$	38.51	3.00	39.68	3.02	39.65	2.95
$I_{90,R}$	36.03	2.48	37.29	2.50	37.30	2.51
$I_{90,G}$	39.10	3.07	40.15	2.82	40.13	2.79
$I_{90,B}$	37.87	3.07	38.72	3.07	38.70	3.02
$I_{135,R}$	36.10	2.49	37.27	2.56	37.28	2.56
$I_{135,G}$	38.70	2.97	39.62	2.74	39.56	2.71
$I_{135,B}$	38.43	2.95	39.49	2.94	39.47	2.91

TABLE 3.4 – Moyenne μ et écart type σ du PSNR pour les algorithmes EARI [145] et LMMSE. Les meilleures valeurs moyennes par canal sont en caractères gras. Les résultats pour le LMMSE sont présentés relativement à deux modèles : un entraîné avec 12 images, et l'autre avec 55 images.

liberté dans le choix de la disposition du motif FA, en garantissant une qualité notable de l'image après reconstruction. Une version du code générique est en cours de finalisation, où l'utilisateur pourra générer le modèle linéaire de dématricage à partir de n'importe quel arrangement spatial de filtres associé à un jeu d'images de référence. Le plus difficile sera de disposer de telles images.

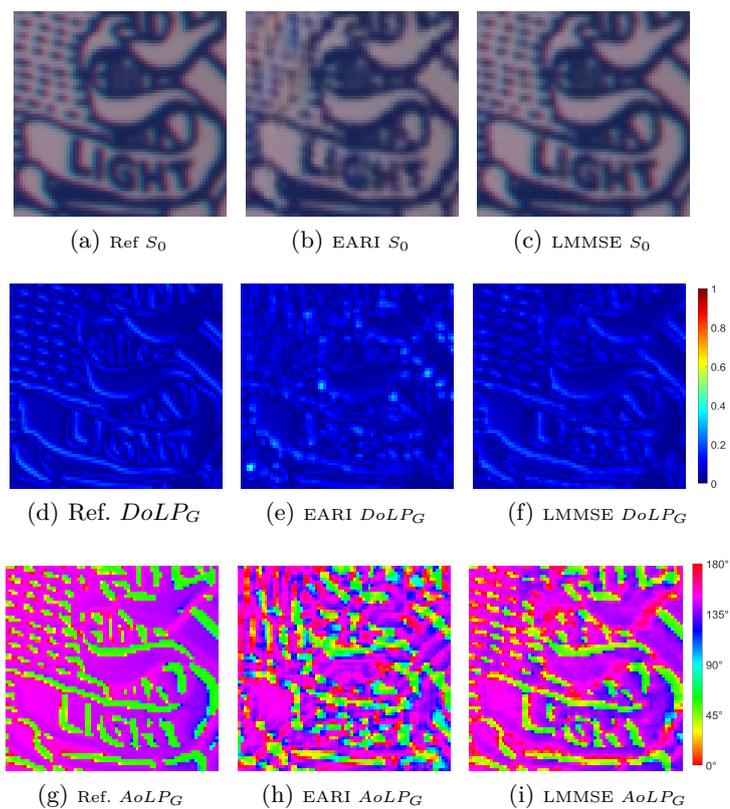


FIGURE 3.24 – Visualisation des images de Stokes S_0 , de DoLP (Degree of Linear Polarization) pour la bande verte et d’AoLP (Angle of Linear Polarization) (Angle Of Linear Polarization) pour la bande verte. La scène est un zoom d’une image de la base de données de Morimatsu *et al.* [145]

3.4 Mettre en œuvre les capteurs filtrés

Travaux publiés :

- SATTAR S., P.-J. Lapray, L. AKSAS, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Snapshot spectropolarimetric imaging using a pair of filter array cameras. *Optical Engineering* **61**(4) (2022), 1-14.
- P.-J. Lapray, J.-B. THOMAS et I. FARUP. Bio-Inspired Multimodal Imaging in Reduced Visibility. *Frontiers in Computer Science* **3** (2022).

Contributions principales :

- Système d'acquisition spectropolarimétrique à 6 bandes dans le visible,
- Base de données de 28 scènes spectropolarimétriques et le code pour la transformation des données brutes en données sRGB/réflectances/Stokes.
- Simulation de données capturées à partir de 6 capteurs bio-inspirés, ayant les sensibilités spectrales et de polarisation d'animaux. Processus de restauration (suppression de brouillard) et de visualisation des images en couleurs.

3.4.1 Pipeline d'imagerie spectropolarimétrique

Ce travail [160] propose un système d'acquisition SPI (Spectral and Polarization Imaging) à haute définition spatiale, qui combine six canaux spectraux et quatre canaux de polarisation. La configuration optique rend possible la capture en instantané de 24 canaux spectropolarimétriques. Nous détaillerons ici le système matériel d'acquisition ainsi que le pipeline de traitement d'images associé. Nous fournissons également une base de données de 28 scènes spectropolarimétriques avec différents matériaux, pour de futures simulations et analyses par la communauté de recherche.

Configuration optique

La configuration SPI proposée se compose de deux caméras de polarisation couleur Triton TRI050S-QC 5.0MP, fabriquées par Lucid Vision Lab. Ces caméras embarquent le capteur SONY IMX250 MYR [134]. Comme dit précédemment, il s'agit d'un capteur à division de plan focal, où chaque pixel détecte un canal spectral et un canal de polarisation. Les matrices de filtres sont composées de trois canaux spectraux ($s \in \{R, G, B\}$) organisés spatialement dans un arrangement Quad-Bayer [140], et de quatre canaux de polarisation ($\theta \in \{0, 45, 90, 135\}^\circ$) disposés selon un motif Chun [20].

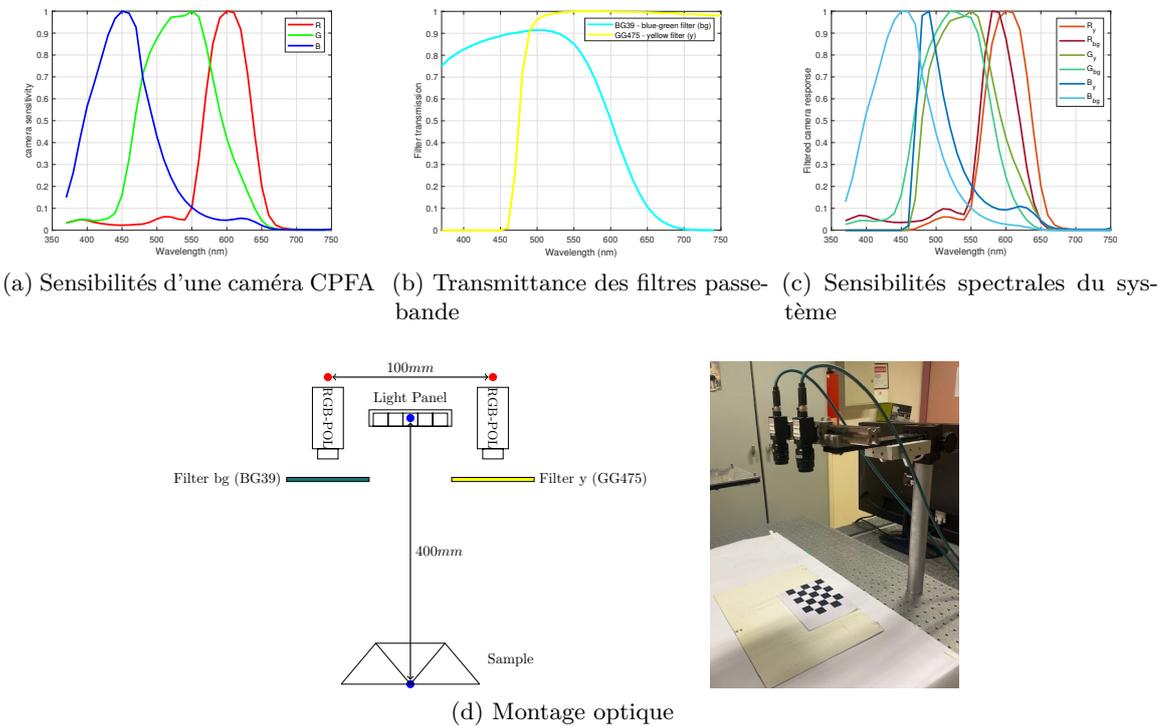


FIGURE 3.25 – (a) Les sensibilités spectrales des caméras CPFA. Seul le canal de polarisation 0° est représenté, car les quatre canaux de polarisation ont des sensibilités très similaires. La sensibilité est obtenue en caractérisant le capteur avec une résolution spectrale de 10nm de 370nm à 750nm . (b) Transmission spectrale des filtres passe-bande. (c) Sensibilité spectrale totale du système après recombinaison. (d) Montage optique.

Comme le montre la Figure 3.25d, les deux caméras sont dans une configuration stéréoscopique. Devant chaque caméra, un objectif à focale fixe de 12mm est ajouté, ainsi qu'un filtre passe bande de 1 pouce (différent pour chaque caméra). L'emploi de ces deux filtres est une méthode pratique pour obtenir des images multispectrales à partir de caméras RVB conventionnelles [56, 78, 130], de sorte qu'il modifie les sensibilités initiales des caméras. Le premier filtre passe-bande est un filtre bleu-vert BG39 (noté *bg*), et le second est un filtre jaune GG475 (noté *y*), tous deux fabriqués par Schott Glass Technologies [56]. À partir de ces combinaisons, on obtient six bandes spectrales dans le visible. La Figure 3.25c montre les sensibilités du système global. Les caméras sont configurées pour n'effectuer aucune correction de gain analogique/numérique ou de balance des blancs, afin de garantir des données brutes linéaires et non corrompues par un prétraitement. Une source de lumière uniforme non polarisée est positionnée dans l'axe des caméras.

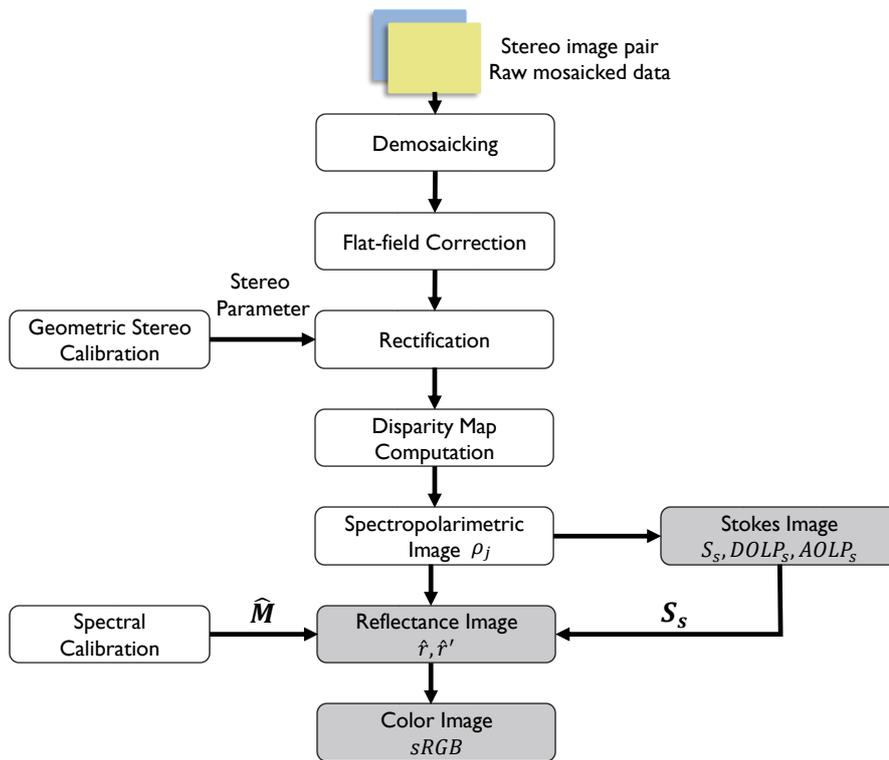


FIGURE 3.26 – Chaîne de traitement des données spectropolarimétriques issues du montage de la Figure 3.25.

Calibrage

Deux calibrages sont effectués : i-un calibrage stéréo géométrique pour établir la correspondance entre le couple d'images des deux caméras, et ii-un calibrage spectral pour estimer la réflectance de la scène.

L'étalonnage géométrique vise à estimer la matrice de projection (matrices intrinsèques et extrinsèques), relative à la position de la caméra, à son orientation, et à la distance focale et aux coefficients de distorsion de l'objectif. La détermination de ces paramètres se fait en prenant plusieurs couples d'images d'un damier de dimensions connues et orientées selon des angles différents. Ensuite, une étape de rectification projette les images sur un plan image commun [66]. Ceci est suivi par le calcul de la carte de disparité en utilisant une méthode semi-globale [52]. Ces étapes utilisent les algorithmes existants de Matlab dédiés à l'étalonnage de caméra stéréo [36].

Une fois l'opération de correction géométrique effectuée, nous pouvons recombinaison les 12 canaux des caméras gauche et droite, la définition spatiale utilisable étant de

1330 × 1920 pixels. On note les intensités $I_{s,\theta}$, où $s \in \{R_{bg}, R_y, G_{bg}, G_y, B_{bg}, B_y\}$ et $\theta \in \{0, 45, 90, 135\}^\circ$.

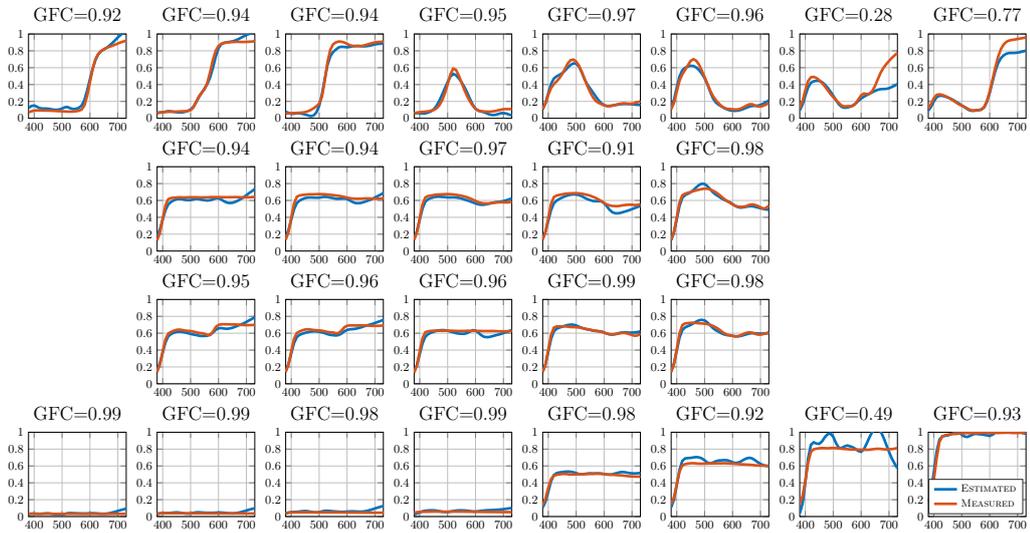
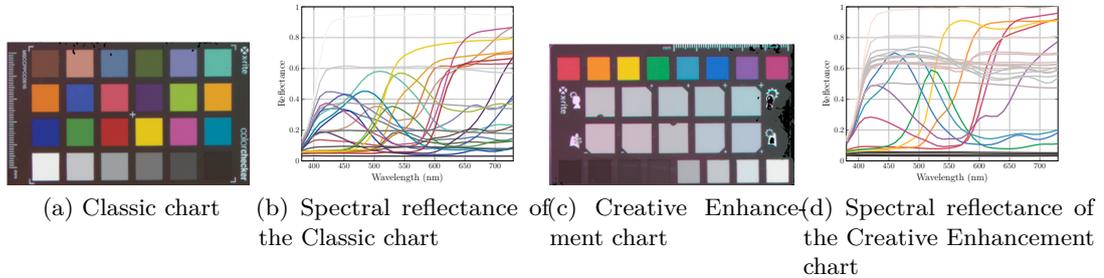


FIGURE 3.27 – (a) ColorChecker Classic du X-Rite ColorChecker Passport utilisé pour l’étalonnage spectral. (b) Réflectances spectrales pour l’entraînement (issues du site Web de Chromaxion [164]). (c) Mire Creative Enhancement utilisé pour les tests. (d) Réflectances spectrales pour les tests. (e) Évaluation de l’estimation des réflectances.

Le calibrage spectral a pour but de pouvoir estimer les données de réflectance \mathbf{R} d’un pixel. Nous utilisons une méthode linéaire qui relie la réflectance spectrale \mathbf{R} aux réponses de la caméra \mathbf{I}_{tot} :

$$\mathbf{R} = \mathbf{M}\mathbf{I}_{tot} , \tag{3.22}$$

où la matrice \mathbf{M} est un opérateur de reconstruction, et \mathbf{I}_{tot} est un vecteur contenant les

intensités mesurées par le système. Dans notre cas, \mathbf{I}_{tot} est de taille $[1 \times 6]$ et contient les intensités totales $I_{s,tot}$. Puisque chaque bande spectrale est capturée suivant un angle de polarisation, il faut reconstruire l'intensité totale par bande. Cela équivaut à calculer la première composante de Stokes [70] par bande $s \in \{R_{bg}, R_y, G_{bg}, G_y, B_{bg}, B_y\}$ telle que :

$$I_{s,tot} = \frac{I_{s,0} + I_{s,45} + I_{s,90} + I_{s,135}}{2} . \quad (3.23)$$

\mathbf{M} est estimé à l'aide d'un ensemble de spectres de référence, qui sont préalablement connus. Nous avons sélectionné le Xrite Macbeth ColorChecker PassPort (MCCPP) pour l'apprentissage (24 patches, voir Figure 3.27a), et la Creative Enhancement chart pour les tests (26 patches, voir Figure 3.27c). Nous supposons que l'ensemble d'apprentissage est suffisamment représentatif des réflectances de surface qui seront estimées a posteriori par le système. Une autre hypothèse est que la réflexion de la lumière par les patches est purement diffuse, de sorte qu'elles ne reflètent aucune composante spéculaire. Nous appelons \mathbf{R}_{train} et \mathbf{R}_{test} l'ensemble des données de réflectance d'entraînement et de test connues qui sont obtenues sur le site Web de la bibliothèque spectrale de Chromaxion [164].

Le calibrage de \mathbf{M} est effectué à l'aide de la régression linéaire comme suit :

$$\hat{\mathbf{M}} = \mathbf{R}_{train} \mathbf{I}_{tot,train}^+ , \quad (3.24)$$

où l'opérateur $+$ est l'opérateur pseudo-inverse de Moore-Penrose droit, $\mathbf{I}_{tot,train}$ est une matrice $[6 \times 24]$ formée par des vecteurs colonnes contenant des signaux de caméra moyennés (sur une zone de 10×10 pixels) des 24 patches, \mathbf{R}_{train} est une matrice $[36 \times 24]$ avec les facteurs de réflectance de référence des patches de $380nm$ à $730nm$ avec une pas de $10nm$, et $\hat{\mathbf{M}}$ est une matrice $[36 \times 6]$ qui est une estimation de \mathbf{M} .

Pour évaluer les performances de l'estimation spectrale, nous appliquons ce modèle linéaire à un ensemble de réponses de caméras (voir Figure 3.27c). Le calcul est effectué sur $\mathbf{I}_{tot,test}$, qui est une matrice $[6 \times 26]$, telles que :

$$\hat{\mathbf{R}}_{test} = \hat{\mathbf{M}} \mathbf{I}_{tot,test} . \quad (3.25)$$

Pour quantifier l'erreur de reconstruction, nous calculons le "Goodness of Fit Coefficient" (GFC) pour chaque patch estimé $\hat{\mathbf{R}}_{test}$. La Figure 3.27e montre la comparaison entre

les spectres de réflectance estimés et mesurés (de référence) pour les 26 patches de test. On voit que les spectres estimés sont proches des données de référence. Des valeurs de GFC faibles sont surtout attribuées pour des réflectances élevées (patch 1, 7 et 8 de la première ligne). Cela peut être dû aux sensibilités relativement faibles (et donc à un SNR faible) de notre système dans cette gamme de longueurs d'onde (voir Figure 3.25c).

Estimation spectrale et composante polarisée

Les méthodes de calibrage et de reconstruction spectrale existantes s'appuient principalement sur l'hypothèse de surfaces diffuses. Nous savons que la composante spéculaire est très souvent partiellement polarisée. Dans le cadre d'une estimation de la réflectance diffuse, nous proposons ici une première méthode rudimentaire de filtrage de l'intensité polarisée avant l'estimation spectrale.

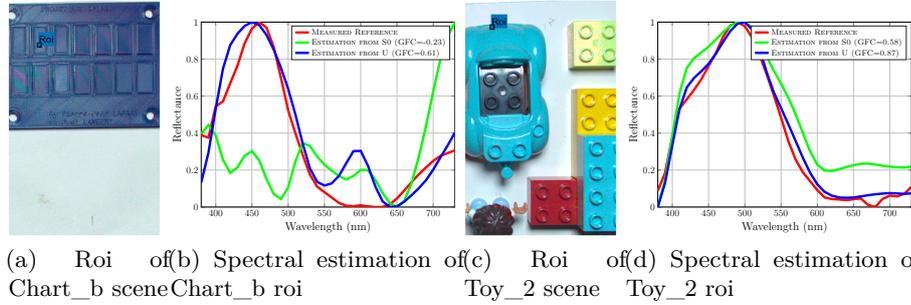


FIGURE 3.28 – Réflectance mesurée et estimée sur deux échantillons à partir de \mathbf{R} (Eq. 3.25) et \mathbf{R}' (Eq. 3.27). La région d'intérêt est un patch de taille 5×5 pixels où les courbes d'estimation spectrale sont moyennées.

Avec les 24 bandes dont dispose le système, nous pouvons filtrer la composante d'intensité polarisée par bande spectrale, et que nous appelons U_s :

$$U_{tot,s} = I_{tot,s} - \sqrt{(S_{1,s})^2 + (S_{2,s})^2} . \quad (3.26)$$

Cette opération a pour effet de supprimer la composante de polarisation de l'intensité totale $I_{tot,s}$. Ainsi, nous pouvons calculer la réflectance spectrale pour n'importe quelle position de pixel à partir du vecteur \mathbf{U}_{tot} au lieu du vecteur \mathbf{I}_{tot} (comme dans Eq. 3.25) :

$$\hat{\mathbf{R}}' = \hat{\mathbf{M}}\mathbf{U}_{tot} . \quad (3.27)$$

Pour vérifier l'effet de la suppression de la composante d'intensité polarisée, nous calculons

la réflectance en utilisant indépendamment I_{tot} ou U_{tot} . Nous appliquons cela sur deux scènes issues de la base de données spectropolarimétriques (en appliquant également les pré-traitements énoncés précédemment). Les résultats sont présentés dans la Figure 3.28 pour deux régions d'intérêt. Nous avons sélectionné des régions de 5×5 pixels près des limites d'occlusion des objets, où la réflexion spéculaire est supposée importante. Nous obtenons pour les deux cas une meilleure estimation de la réflectance à partir des intensités filtrées en polarisation.

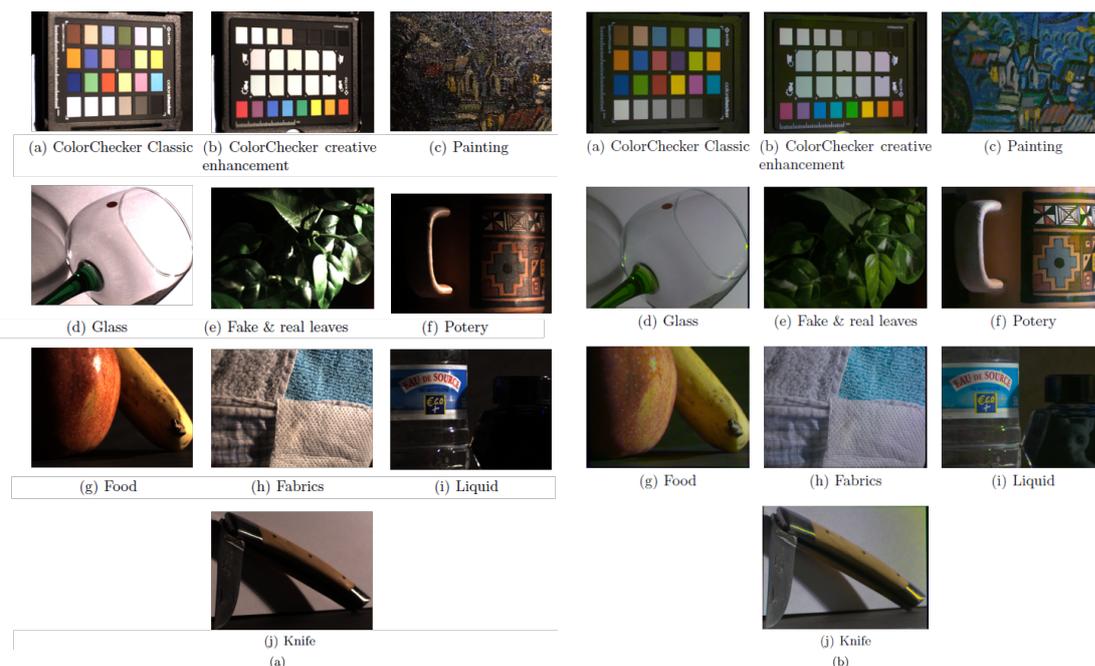


FIGURE 3.29 – (a) Les scènes de Lapray *et al.* [133] prises avec un capteur RGB standard. (b) Les images en version couleurs obtenues après application du pipeline spectropolarimétrique. On peut remarquer entre autres une diminution de l'effet de la composante spéculaire, dont l'intensité a été filtrée polarimétriquement.

Nous pouvons également faire une analyse visuelle de ces résultats. À titre d'exemple, sur la Figure 3.29, on montre une visualisation sRGB de la base de données complète de Lapray *et al.* [133] en utilisant l'estimation de la réflectance après suppression de la composante de polarisation, et après transformation en images couleurs avec le pipeline de traitement décrit dans [133]. Nous pouvons voir que de nombreux reflets spéculaires sont atténués. La scène (c) avec la peinture montre bien l'effet de l'application de la chaîne de traitement sur l'image couleur : les reflets spéculaires engendrés par la structure complexe de la surface (coups de pinceaux) sont atténués et le contraste de l'image est amélioré. On distingue également une meilleure restitution de la dynamique des images, notamment pour (f), où les détails dans les zones sombres deviennent visibles. L'application d'une

telle chaîne de traitement pourrait aider les algorithmes de vision par ordinateur dans des conditions d'éclairage difficiles.

Sur la Figure 3.30, une expérience sur la variation de l'angle d'incidence de la lumière est visible. Le système spectropolarimétrique est positionné au départ de telle sorte que l'angle d'observation de la mire est 45° et l'angle d'incidence de l'éclairage est 0° , c'est-à-dire que la lumière est positionnée à la normale de la mire. L'angle d'incidence est progressivement augmenté (par pas de 20°) pour générer de la réflexion spéculaire. Les images sont soit transformées à partir de $\hat{\mathbf{R}}$ (haut), soit transformée à partir de $\hat{\mathbf{R}}'$ (bas). On remarque que la composante spéculaire augmente avec l'angle d'incidence pour les images transformées à partir de $\hat{\mathbf{R}}$, notamment sur les patches qui sont supposés être diffus. On voit également l'effet de la suppression de la composante polarisée sur les images couleur (images du bas), où les patches de la mire ont une homogénéité plus importante par rapport à l'angle d'incidence de l'éclairage.

Pour des travaux futurs, nous pourrions définir une méthode de calibrage en utilisant conjointement l'information spectrale et polarimétrique, qui permettrait de reconstruire la réflectance des objets avec une dépendance moindre par rapport au chemin optique de la lumière. Comme la polarisation permet, entre autres, d'avoir une information sur les normales de surfaces et la direction de l'illuminant, d'éventuelles méthodes de reconstruction spectrales plus évoluées pourraient être considérées dans le futur. À la vue du nombre de paramètres important faisant fluctuer la polarisation de la lumière après réflexion (indice de réfraction, angles d'incidence/de réflexion, topologie du matériau), les méthodes de type apprentissage par la donnée (ou "Machine Learning") pourraient être envisagée dans un premier temps.



FIGURE 3.30 – Haut : transformation sRGB des images spectrales. Bas : Transformation sRGB des images spectrales après suppression de la composante polarisée spéculaire. Le système d'imagerie est fixe et positionné à 45° par rapport à la normale de la mire. L'angle d'incidence de l'éclairage est augmenté de $[0, 80]^\circ$ par pas de 20° . (a) et (f) sont prises avec l'éclairage à la normale de la mire.

3.4.2 Pipeline d'imagerie bio-inspirée

Ce travail a été publié dans le cadre d'un appel à communication d'un numéro spécial sur le sujet de recherche suivant : "[Vision in Limited Visibility: Optical Properties, Image Formation, and Evolutionary Adaptations in Attenuating Media](#)". Avec ce sujet de recherche, l'objectif des éditeurs était de créer un ensemble de connaissances concernant l'écologie et l'évolution de la vision animale dans des conditions de visibilité limitée. Nous avons été invités à soumettre. Nous expérimentons pour la première fois le processus de forum de révision interactive, où les auteurs et les réviseurs peuvent interagir les uns avec les autres via des commentaires en temps réel sur un forum de discussion, dans le but de répondre à toutes les préoccupations concernant le manuscrit.

Les systèmes visuels dans la nature impliquent différentes dimensions, en termes de sensibilités spectrales et de sensibilités de polarisation. De nombreuses techniques d'imagerie s'inspirent de systèmes visuels, la plus connue étant l'imagerie couleur inspirée de la théorie de la trichromie du système visuel humain. Certains animaux développent des sensibilités spécifiques pour permettre, par exemple, la navigation ou la détection de proies [90]. Il est également connu que certains animaux peuvent potentiellement utiliser des informations spectrales ou de polarisation pour augmenter la visibilité à travers des

milieux opaques [90]. Cette opacité plus ou moins marquée survient lorsque les particules, par exemple les gouttelettes d'eau, les cristaux de glace, la poussière ou la fumée, sont éclairées directement ou indirectement par le soleil. La diffusion de la lumière provoque une modification du signal (selon la théorie du transfert radiatif) qui provoque une diminution du contraste et une perte de la fidélité des couleurs avec la distance [92, 129].

Les travaux présentés ici sont basés sur des modalités inspirées de plusieurs systèmes visuels. Nous générons des données issues de capteurs simulées à partir de données réelles de dimensions supérieures, et nous adaptons des algorithmes de restauration d'images à ces modalités. Nous présenterons les travaux en trois phases : 1-le système d'acquisition spectropolarimétrique et les pré-traitements associés, 2-la simulation de données bio inspirées et 3-la restauration et la transformation couleur.

Acquisition et chaîne de traitement

Le but de cette étape est de capturer expérimentalement des données spectropolarimétriques dans le domaine du UV-A et du visible. Dans un premier temps, nous générons des données spectrales d'une résolution suffisante pour nous permettre, dans un second temps, de simuler les réponses de capteurs bio-inspirés.

Nous combinons trois caméras pour la capture de données réelles. Deux d'entre elles sont des caméras CPFA (Color Polarization Filter Array) avec le capteur IMX250 MYR de SONY. Les deux caméras sont associées aux mêmes filtres passe-bande que ceux de la section précédente : la première avec un filtre bleu-vert BG39, et la seconde avec le filtre jaune GG475 (tous deux fabriqués par Schott). L'autre caméra intègre le capteur SONY IMX250 MZR qui est à base de PFA (Polarization Filter Array). Pour capter la gamme UV-A, la troisième caméra est équipée d'un filtre passe-bande UG1 (fabriqué par Schott) et un filtre BG39 pour filtrer la transmission dans le rouge du filtre UG1. Le système complet dispose de 28 canaux : 7 canaux spectraux, chacun ayant 4 canaux de polarisation. Le système d'acquisition et les sensibilités sont représentés sur la Figure 3.31.

Une capture HDR est réalisée sur une scène extérieure avec trois temps d'exposition différents. Nous appliquons la méthode de fusion HDR (High Dynamic Range) proposée par Debevec et Malik [67], directement sur les images brutes et par pixel [121]. Ceci évite la saturation et équilibre le bruit entre tous les canaux spectropolarimétriques. Nous appliquons ensuite le dématricage EARI (Edge-Aware Residual Interpolation) [144] sur les images HDR. Enfin, nous alignons toutes les bandes avec l'algorithme (SURF) [55] pour compenser tout désalignement induit par l'assemblage optique.

À partir des données du système, nous voulons simuler n'importe quel système sensoriel

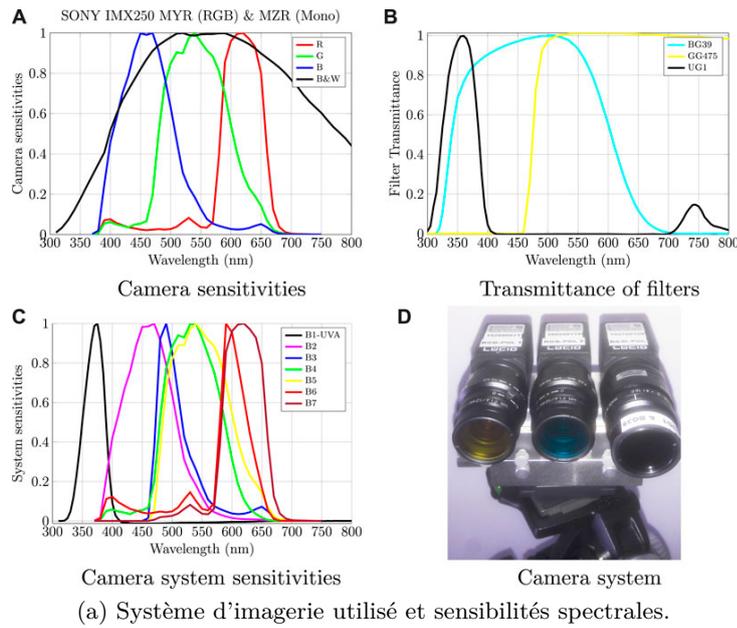


FIGURE 3.31 – Principe de l'acquisition. Les images issues des trois caméras filtrées sont alignées et recombinaées pour obtenir des données spectropolarimétriques.

physiologique. Donc il nous faut des données spectrales d'entrée de résolution spectrale suffisante. Nous appliquons donc une méthode de calibrage spectral de type pseudo-inverse [11] pour permettre l'estimation de spectres à partir des intensités du système. Le calibrage utilise la mire Xrite Macbeth ColorChecker (MCC) avec 24 patchs. La résolution spectrale choisie est de $5nm$ entre 380 et $780nm$, c.-à-d. 81 longueurs d'onde équidistantes. Le calibrage est effectué de la même manière que dans la section précédente (avec la méthode de Moore-Penrose). Les résultats d'étalonnage et les erreurs RMSE entre les spectres estimés et de références sont également très similaires. Nous obtenons une matrice de transformation \mathbf{W} de taille 81×6 .

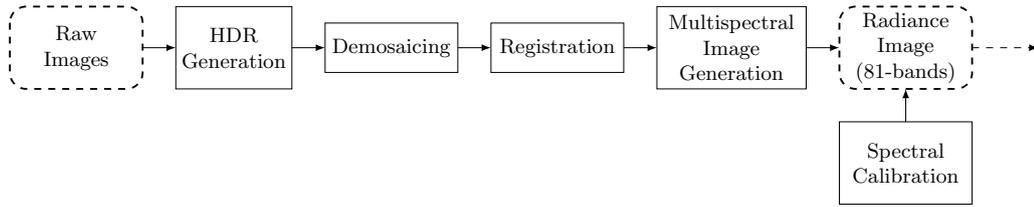


FIGURE 3.32 – Pipeline d’acquisition et de reconstruction spectrale. Les images brutes sont capturées à l’aide d’une caméra CPFA et des filtres passe-bande jaune et bleu. Le pipeline comporte les étapes de prétraitement (HDR, dématricage et alignement).

Une fois que la matrice de transformation \mathbf{W} est connue, nous pouvons faire une estimation spectrale \mathbf{p} (81×1) à partir des intensités pour chaque position de pixel :

$$\mathbf{p} = \mathbf{W}\mathbf{I} , \quad (3.28)$$

où \mathbf{I} est un vecteur 6×1 contenant les réponses du système.

Les images de radiance ainsi générées par le pipeline (de la Figure 3.32) serviront de point de départ à la simulation de données de capteurs bio-inspirés.

Simulation de capteurs bio-inspirés

N°	Système visuel	Référence	Canaux spectraux	Sensibilité UV-A	Canaux de polar. (linéaire)
1	Chien & Porc	[86, 89]	2	-	0
2	Primate	[8]	3	-	0
3	Papillon Papilio	[40]	3	-	4
4	Criquet	[14]	3	+	2
5	Poisson zèbre	[84]	4	+	0
6	Oiseau	[51]	5	+	0

TABLE 3.5 – Résumé des systèmes visuels. Nous avons utilisé les sensibilités présentées dans la littérature à partir d’études physiologiques des systèmes visuels. Trois de ces animaux sont sensibles aux UVs et deux sont sensibles à la polarisation.

L’ensemble des systèmes visuels sélectionnés est résumé dans le Tableau 3.5 : (1) les chiens ou les porcs sont des dichromates, (2) les primates sont des trichromates (équivalent au système de vision humain) ; (3) Les papillons Papilio ont des sensibilités de polarisation

pour chacune des trois bandes spectrales, (4) Les criquets ont 3 bandes spectrales et 2 orientations de polarisation dans les courtes longueurs d’onde, (5) Le poisson zèbre à 4 bandes spectrales couvrant les UV et le visible, (6) les oiseaux possède 5 canaux spectraux.

Il est à noter que le criquet possède un canal sensible aux UV-A qui combine une sensibilité de polarisation dans la zone dorsale de l’œil. Ceci lui permet de naviguer grâce au motif spatial de polarisation du ciel (généré par la diffusion). Bien que cette partie de son système visuel ne génère probablement pas une image très résolue, nous supposons que le criquet peut faire une estimation discrète basée sur des observations partielles.

Les sensibilités spectrales \mathbf{S} sont représentées sur la Figure 3.33. L’objectif de l’expérimentation (dont la méthode est montrée sur la Figure 3.34) est de déterminer si la visibilité est améliorée avec un nombre croissant de canaux ou de modalités, et potentiellement d’identifier les tendances susceptibles de donner de meilleurs résultats.

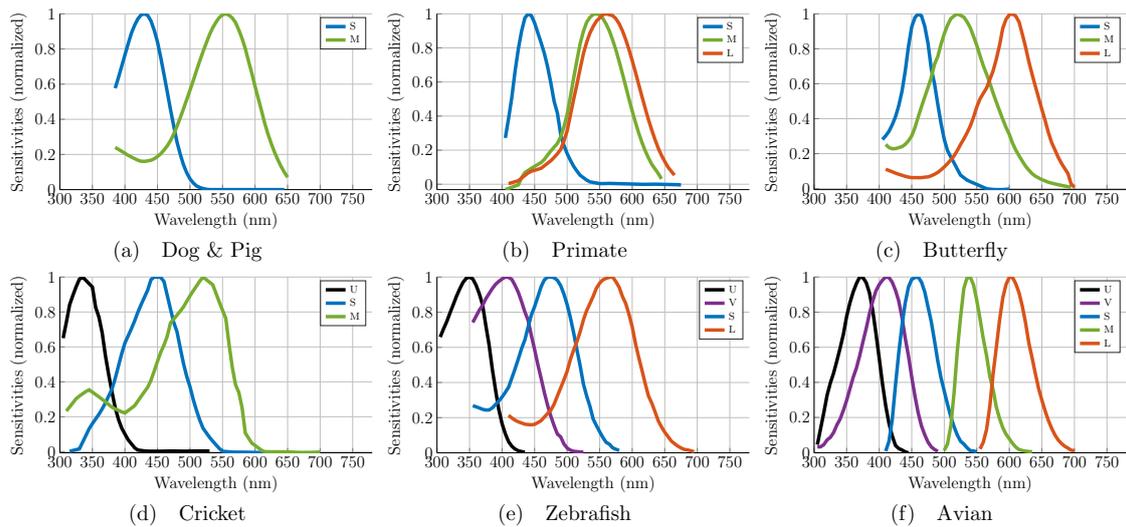


FIGURE 3.33 – Sensibilités spectrales normalisées des animaux sélectionnés. U, V, S, M et L désignent respectivement les cônes à sensibilités ultraviolets (UV-A), violets (VS), aux courtes longueurs d’onde (SWS), aux longueurs d’onde moyennes (MWS) et aux grandes longueurs d’onde (LWS).

Nous simulons les images d’intensités bio-inspirées \mathbf{I}' ($N \times 1$) relatives à chaque capteur bio-inspiré (avec les sensibilités illustrées dans la Figure 3.33). Celles-ci sont calculées à partir des données spectrales \mathbf{p} de l’équation (3.28) :

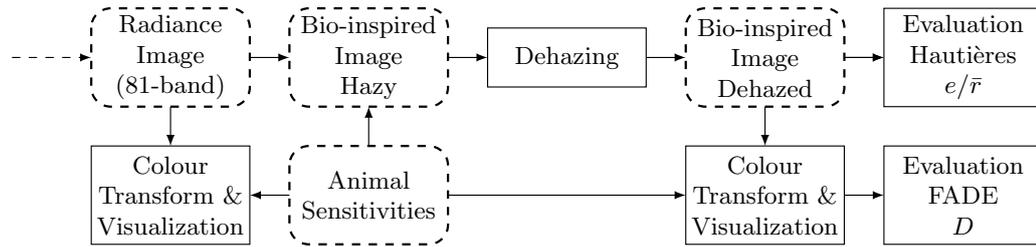


FIGURE 3.34 – Pipeline pour l’expérimentation.

$$\mathbf{I}' = \mathbf{G}\mathbf{S}^t\mathbf{p} , \quad (3.29)$$

où $\mathbf{G} = \text{diag}\left(\frac{1}{\max(\mathbf{S}^t\mathbf{p})_i}\right)$ est une matrice de normalisation des valeurs où i balaye toutes les bandes N . Ces données simulées sont utilisées ci-après comme entrées pour les algorithmes de débrumage.

Expérimentation et analyse

Le schéma de l’expérimentation est visible sur la Figure 3.34.

L’intensité totale arrivant au système imageant résulte d’une contribution de l’objet dans la scène, J , et de la lumière atmosphérique, A , comme défini par le modèle additif de Koschmieder [2] :

$$I = \alpha J + \gamma A , \quad (3.30)$$

Pour inverser le modèle de Koschmieder, nous devons estimer les paramètres de transmittance α (comment la lumière traverse l’air), et l’atténuation $\gamma = (1 - \alpha)$ de l’atmosphère. Sans particules atmosphériques, la transmittance est proche de 1. La communauté de la vision par ordinateur propose des méthodes pour récupérer ces paramètres [136]. L’une d’elles est basée sur les statistiques des images [77], et l’autre sur la polarisation [47]. Dans les deux cas, on suppose une densité de particules uniforme dans la scène.

Pour le criquet, nous appliquons la méthode basée sur la polarisation [47], en prenant l’estimation de la lumière aérienne du canal UV-A pour désembuer toutes les autres

bandes spectrales. Pour le papillon, qui possède une sensibilité de polarisation s'appliquant à tous les canaux spectraux, nous appliquons la méthode basée sur la polarisation [47] initialement proposée par les auteurs sans modification. Pour tous les autres animaux, nous utilisons la méthode DCP (Dark Channel Prior) [77]^{XV}.

Une méthode de transformation des données bio-inspirées en image couleurs est détaillée dans la publication [159]. Il s'agit d'une projection des données dans l'espace du capteur bio-inspirée vers un espace colorimétrique. Nous ne détaillerons pas cette méthode ici.

Pour évaluer la restauration, la première métrique choisie est FADE (D) par Choi *et al.* [100]. Cette métrique est appliquée aux images couleur et est basée sur les statistiques des scènes naturelles (métrique sans références). Plus la valeur de D est faible, plus faible sera la perception du brouillard dans l'image restaurée. La deuxième métrique est celle de Hautiere *et al.* [76], qui mesure l'amélioration de la visibilité des objets présents dans une scène avant et après traitement (métrique avec référence). Des valeurs e/\bar{r} plus élevées signifient une meilleure restauration des contrastes. Les scores calculés par les métriques sont présentés dans le Tableau 3.6.

	D (FADE)			e/\bar{r} (Hautière <i>et al.</i>)				
	Foggy	Dehazed	$\frac{\Delta D}{D_{\text{Foggy}}}$	U	V	S	M	L
Avian	1.68	0.96	42.9%	3.54/1.16	0.14/1.01	0.17/0.95	0.23/1.01	0.23/1.02
Butterfly w/o pol.	1.65	0.71	57.0%	-	-	0.20/0.87	0.20/0.94	0.25/0.96
Butterfly w/ pol.	1.65	0.95	42.4%	-	-	0.07/1.11	0.13/1.095	0.09/1.09
Dog & Pig	1.45	0.80	44.8%	-	-	0.18/0.91	0.22/0.98	-
Cricket w/o pol.	1.51	0.88	41.7%	3.65/1.12	-	0.26/0.98	0.27/1.01	-
Cricket w/ pol.	1.51	0.95	37.1%	3.02/1.28	-	0.20/1.12	0.17/1.07	-
Primate	1.50	0.69	54.0%	-	-	0.22/0.92	0.23/0.96	0.25/0.97
Zebrafish	1.42	0.82	42.2%	3.76/1.15	0.16/0.99	0.18/0.97	-	0.20/1.01

TABLE 3.6 – Evaluation results of dehazing for scene 1. The evaluation metric D (FADE [100]) is applied on sRGB images, whereas the metrics e and \bar{r} [76] are applied per spectral channel.

D'après nos observations, il semble que l'augmentation en nombre de canaux spectraux ou la sensibilité à la polarisation n'améliore pas significativement le débrumage. Deux possibilités : les i-les animaux utilisent des modèles cognitifs très différents des modèles physiques de restauration, ii-les animaux considérés ont des capacités similaires à évoluer dans une visibilité limitée, ce qui n'est pas facile à démontrer.

XV. L'adaptation de la méthode aux images multispectrales est détaillée dans [159]



FIGURE 3.35 – Visualisation sRGB de la scène avant et après débrumage pour deux capteurs bio-inspirés.

Le poisson zèbre et le papillon, qui ont des sensibilités spectrales dans des longueurs d'onde plus courtes, obtiennent globalement de meilleurs résultats. Néanmoins, Le poisson zèbre et le papillon pourrait ne pas fournir les meilleurs résultats visuels. Il est à noter que la manipulation des canaux UV n'est pas aisée, et que la capture de courtes longueurs d'onde augmenterait la complexité des systèmes d'imagerie (bruit, temps d'intégration, optique spécifique, etc.). On note également que les systèmes dichromates (cochon et chien) fournissent d'assez bonnes images couleur et un débrumage satisfaisant.

Nous devons tout de même nuancer ces résultats. En effet, nos observations sont limitées par la quantité de données utilisées par l'évaluation. De plus, l'évaluation est liée à l'utilisation d'un nombre limité de métriques, dont nous savons qu'elles ne sont pas sans défaut [129].

Pour conclure, nous avons comparé, pour des données simulées de capteurs bio-inspirés,

deux méthodes de débrumage basées sur des hypothèses différentes. Pour la polarisation, la lumière atmosphérique est estimée par bande, alors que pour la méthode DCP (Dark Channel Prior), la lumière atmosphérique est la même pour chaque canal. La manière d'estimer ce paramètre est un facteur limitant pour les algorithmes de débrumage. En outre, l'utilisation de méthodes de débrumage basées sur des modèles physiques pourrait ne pas fournir les meilleures performances. Néanmoins, cette étude préliminaire pourrait fournir une méthode d'évaluation (banc de test) générique et adaptable pour d'autres algorithmes de restauration (voire de vision par ordinateur) pour de futures solutions alternatives.

4 Perspectives

Sommaire

4.1 Recherche	87
4.1.1 Dimension temporelle et accélération d'algorithmes	87
4.1.2 Étude de l'impact des arrangements spatiaux pour les capteurs spectropolarimétriques filtrés	89
4.1.3 Conception et réalisation d'un capteur SPFA	90
4.1.4 Applications potentielles	93
4.2 Point de vue sur l'imagerie de polarisation dans le milieu académique	94
4.3 Enseignement	95
4.4 Conclusion	96

4.1 Recherche

4.1.1 Dimension temporelle et accélération d'algorithmes

D'une part, le déploiement des capteurs filtrés pour certains types d'applications utilisant un flux vidéo plutôt que des images est une piste intéressante. Ce type de capteur est particulièrement approprié pour la capture vidéo, nécessaire aux applications à signaux dynamiques telle que l'analyse modale pour la vibrométrie [99]. La dimension temporelle deviendrait une nouvelle information à considérer dans les pré-traitements et la restauration des images filtrées. Dans le cadre du dématricage, nous avons exploité précédemment les corrélations spatiales et inter-canal pour la restauration, il serait intéressant de tirer bénéfice également d'un "voisinage temporel" pour les superpixels. L'exploitation de cette dimension implique néanmoins une complexité accrue pour l'implémentation des

algorithmes, la quantité de données à manipuler pour traiter une image augmentant avec la résolution spatio-temporelle.

D'autre part, la transmission de grands ensembles d'images brutes pour le traitement déporté n'est pas approprié pour des applications telles que la robotique mobile, la robotique industrielle, l'agronomie ou la télédétection : une solution embarquée est souhaitable. L'imagerie pour les nanosatellites en est un exemple emblématique, où il y a nécessité de faire la capture et le traitement du signal avant la transmission, afin de limiter le trafic dans la liaison de communication (en envoyant uniquement des données pertinentes et pré-traitées), et ce, de manière embarquée (avec des contraintes d'encombrement et d'efficacité énergétique). Comme la complexité des algorithmes d'imagerie computationnelle dédiés aux capteurs filtrés tend à augmenter, par exemple pour la correction de bruit, la restauration ou la reconstruction spectrale/polarimétrique, la capture et le traitement dans un seul et même système vidéo est un défi. Cela est d'autant plus compliqué si l'on rajoute la contrainte temps-réel, c.-à-d. avoir un déterminisme temporel en plus du déterminisme logique dans la chaîne.

Finalement, le traitement d'images dans le flux vidéo en temps-réel a été en partie l'objet de ma thèse et d'une partie de mes travaux après-thèse. Je souhaite revaloriser ces travaux dans le cadre du traitement vidéo répondant aux besoins énoncés ci-dessus. Par exemple, les travaux sur le dématricage [151, 156], nécessitent un noyau de filtrage conséquent, ce qui rend inopérable une exécution rapide et efficace sur un système à base de processeurs. Il serait donc intéressant d'examiner la possibilité d'optimisation matérielle des algorithmes basés sur les systèmes linéaires comme le dématricage, la reconstruction spectrale ou le débrumage, et de les réadapter à la dimension temporelle. La valorisation de ces travaux pourrait être multiple : 1-le dépôt de projet en collaboration avec des entreprises dont les besoins sont identifiés dans ces domaines, 2-un prototype faisant une restauration d'image complète en temps-réel, 3-un service/produit développé en tant qu'éventuel spin-off universitaire, créé au sein de l'établissement.

Dans tous les cas, ces perspectives auraient en plus comme avantage de faire un lien avec mes enseignements, les étudiants ASE à l'ENSISA étant particulièrement sensibilisés aux problématiques des systèmes embarqués. Cela pourrait être en partie valorisé au travers de projets de fin d'étude, de stages en développement logiciel/matériel ou de collaborations avec des entreprises du secteur.

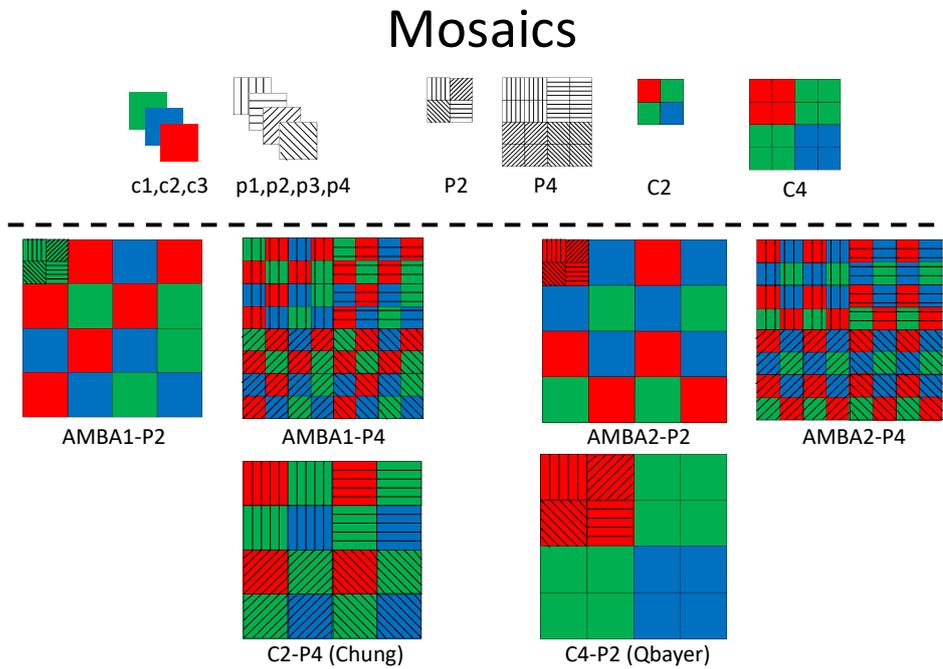


FIGURE 4.1 – On peut imaginer des capteurs CPFA avec des arrangements spatiaux très différents. Quelques arrangements sont présentés, combinant les matrices RGB pseudo-périodiques d’Amba *et al.* [106], et les arrangements de microfiltres polarisants. Quel est l’impact de ces différents arrangements sur la chaîne de reconstruction d’image ?

4.1.2 Étude de l’impact des arrangements spatiaux pour les capteurs spectropolarimétriques filtrés

L’arrangement spatial des filtres spectropolarimétriques n’a fait l’objet que de très peu de travaux spécifiques. Il y a donc nécessité d’étudier différents arrangements spatiaux pour les CPFA, dans le but d’identifier si certains arrangements seraient plus pertinents à utiliser que d’autres. À ma connaissance, il existe un seul arrangement alternatif à celui du capteur SONY IMX250 MYR [127], celui de Tu *et al.* [127].

Plusieurs méthodologies dans la définition d’un nouvel arrangement seraient à explorer.

La première serait de définir un arrangement qui soit le plus performant en termes de SNR, en utilisant une banque de données de référence disponible, et une banque de mosaïques synthétisées. Une méthode de type force brute matricage \rightarrow restauration \rightarrow évaluation pourrait permettre la définition d’un arrangement optimal d’un point de vue SNR, tel

que déjà réalisé pour les SFA.

La deuxième méthode serait basée sur les différentes études réalisées dans l'état de l'art, soit pour le spectral, soit pour la polarisation. Par exemple, il a été démontré qu'un arrangement des filtres de polarisation en 4×2 donnait de meilleurs résultats quant à l'échantillonnage du signal dans le domaine de Fourier [94]. De même, il a été démontré que les arrangements pseudo-périodiques pour les CFA surpassaient les arrangements standards réguliers de type Bayer [106]. On pourrait donc considérer les arrangements CPFA comme des hybrides d'arrangement CFA et PFA. La Figure 4.1 illustre ce principe avec des exemples de combinaisons de filtres CFA et PFA existants.

La troisième serait d'utiliser les a priori concernant les études statistiques des corrélations inter-canaux énoncées précédemment dans ce document [149]. Partant de cela, il serait intéressant de définir des arrangements spatiaux optimisés spécifiquement pour un type de matériaux (métaux, diélectriques, verres, etc.) ou un type de réflexion (diffuses ou spéculaires). Le capteur serait donc optimisé pour une tâche spécifique et dédié à être intégré dans un système embarqué. De plus, le dématricage LMMSE, entraîné sur une également sur des données spécifiques à l'application, pourrait être couplé au matricage.

Les études énoncées ci-dessus pourraient également être réadaptées pour l'imagerie multispectrale/hyperspectrale de polarisation, où la résolution spectrale serait plus importante, et potentiellement dans des domaines autres que le visible. Ceci ne pourra se faire que lorsque des données appropriées et conséquentes seront disponibles. Mon souhait serait de pouvoir contribuer à cette mise à disposition de données.

4.1.3 Conception et réalisation d'un capteur SPFA

Nous pensons qu'il est temps de concevoir la prochaine génération de capteur que nous appellerons le capteur SPFA (Spectral Polarization Filter Array). C'est la combinaison d'un PFA et d'un SFA, superposés et fixés sur un capteur CMOS (voir Figure 4.2b). Il vise à étendre le concept du CPFA, et à capturer des informations multispectrales et polarimétriques en une seule prise de vue. La réalisation d'un tel capteur est un défi, en raison du nombre important de canaux. La chaîne de pré-traitements des données pourrait réutiliser celle du CPFA. L'interprétation des données est également un défi. Ainsi, plusieurs pistes de recherche découlent directement de ce nouveau paradigme d'imagerie, que je voudrais aborder dans un futur proche.

Le but serait un prototypage complet d'un nouveau type de capteur filtré, le projet nécessitant plusieurs phases de recherche et développement : la modélisation, la simulation, la fabrication et la caractérisation d'un tel capteur. Une application dans le domaine de la

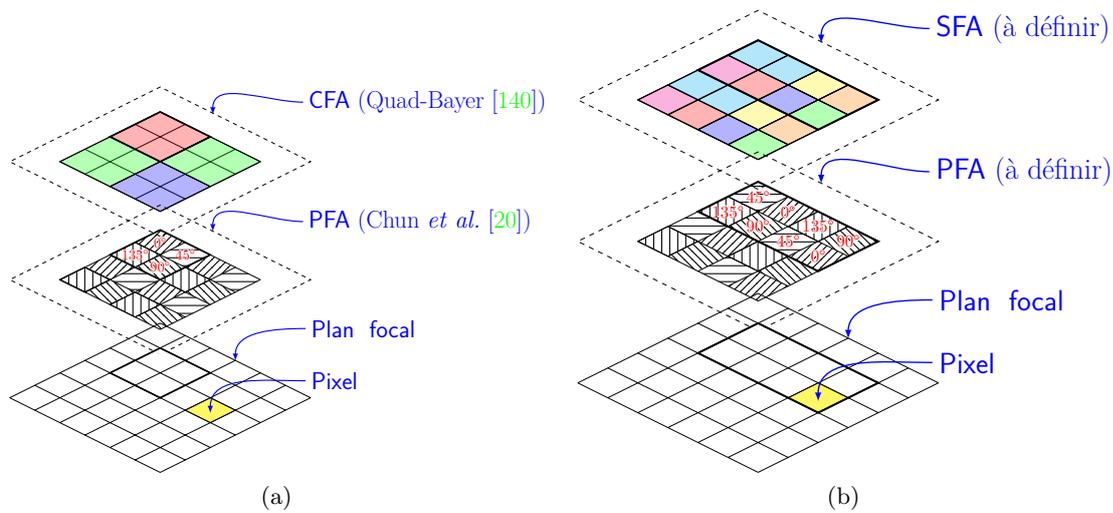


FIGURE 4.2 – Le capteur (a) CPFA et (b) une conception SPFA (Spectral Polarization Filter Array) proposée comme perspective. Chaque pixel est couvert par un filtre spectral et un filtre de polarisation.

vision par ordinateur et/ou de l'infographie pourrait être ciblée pour une démonstration aux acteurs industriels et académiques.

Modélisation du capteur

La conception des matrices de filtres doit être étudiée selon plusieurs aspects : la sélection de la gamme de longueurs d'onde, les sensibilités spectrales (ou les formes de filtres spectraux), les angles de polarisation et la disposition spatiale des différents filtres.

La récupération de l'information spatiale complète de l'image GFA se fait généralement par dématricage (une interpolation spatiale utilisant un voisinage de pixels). Il est d'un grand intérêt d'optimiser le voisinage des filtres, c'est-à-dire de se concentrer sur l'interaction entre la conception du réseau de filtres spectraux et le traitement d'image ultérieur. Ainsi, comme pour les CPFA, il est important d'analyser statistiquement des bases de données, et quantifier l'interdépendance (ou la corrélation) entre les canaux spectropolarimétriques. Il n'existe pas à ma connaissance de bases de données hyperspectrales/polarimétriques.

Un des principaux challenges est la reconstruction de l'image suivant les dimensions individuelles. Comme les SPFA comportent une variété de filtres importante, l'image capturée est gravement sous-échantillonnée pour au moins certains types de filtres. Cela conduit à des images reconstruites avec un fort repliement ("aliasing"). Certains travaux

proposent d'utiliser des capteurs avec des pixels très petits ($< 1\mu m$), pour que les performances de résolution du capteur dépassent la limite de résolution optique [73]. De ce fait, en sur-échantillonnant une bande particulière d'un capteur mosaïqué, on peut tout de même obtenir une bande dépourvue d'"aliasing", et l'utiliser pour réduire l'"aliasing" dans des bandes spatialement moins résolues. Ceci pourrait être ré-adapté au cas du SPFA.

Fabrication du capteur

L'assemblage sur un capteur CMOS se ferait par sous-traitance. Les réseaux de filtres de polarisation peuvent être fabriqués par Moxtek, avec leur technologie Pixelated Polarizers utilisant un réseau de grilles Nanowire® [166] (voir Figure 4.3a). Plusieurs personnalisations sont possibles : taille de pixels, disposition et nombre d'angles de polarisation différents. Le fournisseur des filtres Moxtek en France est Quantum Design France. À titre indicatif, le prix d'une série de 5 matrices de filtres pixelisés (en vue de pouvoir réaliser de 5 prototypes) a été estimé à 6000€.

La matrice de filtres spectraux pourrait être réalisée par SILIOS technologies, une entreprise française de Marseille. SILIOS Technologies a développé la technologie COLOR SHADES® [167] (voir Figure 4.3b). Cette technologie est basée sur le dépôt de couches minces et la micro/nano-gravure sur un substrat de silice. Les filtres sont sélectionnés dans la gamme de longueurs d'onde $400nm - 950nm$.

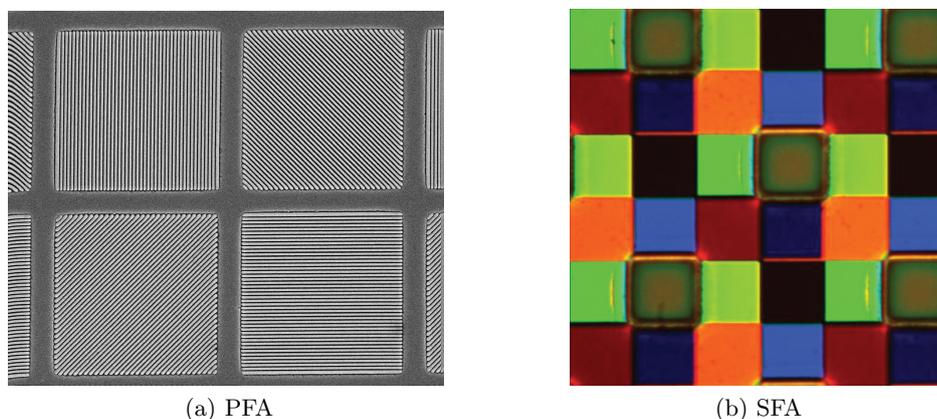


FIGURE 4.3 – (a) Image microscopique d'un réseau de filtres PFA après leur fabrication et avant le montage (source : site web Moxtek). (b) Image microscopique d'un filtre SFA par Silios Technologies [95].

Une fois fabriqués, les réseaux de filtres seront alignés et fixés au-dessus des micro-lentilles

du capteur (voir [113] pour plus de détails). Cette opération est particulièrement délicate à réaliser. Le capteur CMOS peut provenir d'une caméra monochrome déjà commercialisée (comme les caméras IDS).

Les prototypes de caméras devront être ensuite caractérisés spectralement et polarimétriquement. Une procédure de caractérisation qu'il est possible de réaliser est celle décrite dans [118]. La caractérisation des caméras se ferait préférentiellement en salle blanche, pour permettre une mesure depuis le capteur nu (sans objectif).

4.1.4 Applications potentielles

Imagerie hyperspectrale et polarimétrie appliquée au patrimoine culturel

L'intensité des réflexions spéculaires rend difficile la capture d'images pour les applications du patrimoine culturel. Les méthodes de correspondance pigmentaire ou de conservation pour les peintures ou les vitraux peuvent être impactées par ces effets indésirables. Ceci est en partie abordé dans le projet PHC AURORA qui est en cours, où l'on tente de mettre à niveau un scanner hyperspectral à NTNU avec un module de détection de la polarisation linéaire après réflexion.

Au stade actuel, l'objectif principal est de mettre en œuvre un cadre d'imagerie spectrale linéaire Stokes à faible bruit, ainsi que d'étudier la corrélation entre la réflectance et le degré de polarisation pour une peinture à l'huile. Des études précédentes ont montré l'intérêt de considérer la dépendance du degré de polarisation à la longueur d'onde dans le cadre de l'imagerie en réflexion [37, 65]. Il s'agit de :

1. Proposer un nouveau système spectropolarimétrique, permettant de capturer des images de résolution spectrale et spatiale suffisante pour l'analyse des données à l'échelle de la microstructure du tableau, c.-à-d. des coups de pinceaux,
2. Calibrer le système radiométriquement et polarimétriquement afin de fiabiliser la mesure,
3. Capturer la peinture contenant des reflets spéculaires et analyser conjointement les signatures spectrales et polarimétriques (en imagerie de Stokes avec une lumière incidente non polarisée).

Une extension possible de ces travaux serait d'aller plus loin dans l'analyse, en faisant de l'imagerie de Mueller, même incomplète, plutôt que de l'imagerie de Stokes. Ce travail serait placé dans un contexte plus large qui vise à réaliser une analyse matérielle plus approfondie dans le contexte du patrimoine culturel. Ceci peut se faire en polarisant la lumière incidente à l'aide d'un générateur d'état de polarisation en linéaire et en circulaire. Le principal défi pour faire de l'imagerie Mueller à faible bruit dans une large gamme

spectrale donnée réside dans l'utilisation de polariseurs circulaires à large bande (car la plupart utilisent des retardateurs de phase sélectifs λ) à déployer dans le générateur d'état de polarisation. Cette piste semble très prometteuse étant données les compétences du laboratoire en termes de pilotage de modulateurs de polarisation à cristaux liquides.

Autres applications potentielles

Les perspectives de recherche énoncées ci-dessus, à savoir l'ajout d'une dimension temporelle, l'implémentation d'algorithmes de reconstruction efficaces, et la définition de capteurs dédiés à l'embarqué, semble être en accord avec le déploiement de solutions pour la robotique mobile. Je suis membre de l'équipe MIAM (Modélisation et Identification en Automatique et Mécanique) depuis 2023. Cette équipe travaille initialement pour la définition de systèmes de navigation et de contrôle commande pour le transport terrestre. Il est naturel ici d'envisager de réadapter les travaux dédiés aux imageurs filtrés multimodaux dans le cadre spécifique de l'ADAS [138, 161]. Les tâches qui pourraient être envisagées seraient :

- L'état de l'art et la définition des dimensions utiles à l'ADAS, en l'occurrence pour la fusion d'information nécessaire à la compréhension et la segmentation des scènes routières,
- l'adaptation optique du système d'imagerie au format du système,
- la connexion du système avec le matériel,
- la capture de base de données en environnement non contrôlé (routier, agricole, etc.),
- l'analyse statistique des scènes capturées,
- l'adaptation des algorithmes aux dimensions choisies, tels que les pré-traitements ou la restauration.

4.2 Point de vue sur l'imagerie de polarisation dans le milieu académique

L'imagerie multispectrale/hyperspectrale était, jusqu'à il y a une vingtaine d'années il me semble, absente des mots clés des appels à contributions des conférences en imagerie et traitement du signal. Elle est maintenant présente dans beaucoup d'appels tels que EUSIPCO, CIC, SITIS, ICIP, EUVIP, CVCS, etc.

La polarisation est, quant à elle, omniprésente dans les domaines liés à la télécommunication. Mais elle est beaucoup plus discrète dans la communauté du traitement du signal

et de l'image. On peut remarquer, en regardant les mots clés des appels à contribution, que l'imagerie de polarisation est quasi inexistante, voire absente des conférences en signal/image. Il existe toutefois une conférence internationale spécifiquement dédiée à la polarisation nommée "SPIE Polarization Science and Remote Sensing". Celle-ci est particulièrement productive depuis plus de 20 ans sur les sujets d'instrumentation pour la capture d'image de polarisation (les polarimètres), la métrologie, et les applications de télédétection et de biomédical. Néanmoins, la communauté étant assez restreinte, relativement peu de travaux sont publiés chaque année (21 actes en 2023). Elle peut également apparaître dans ce que l'on appelle l'imagerie multimodale ou l'imagerie non conventionnelle (par ex. pour QCAV ou "SPIE Photonics Europe - Unconventional Optical Imaging"). Mon avis est que ceci n'est pas une fatalité, et qu'il faut continuer d'introduire l'imagerie de polarisation pour tenter de résoudre les problématiques de vision par ordinateur et d'imagerie computationnelle (comme cela est fait pour l'imagerie spectrale). Comme l'information couleur l'a été pour l'information d'intensité, ou l'information spectrale l'a été pour la couleur, la donnée de polarisation peut être considérée comme de la donnée décrivant le signal lumineux dans une dimension supplémentaire ou complémentaire. Depuis la fin des années 2010, l'imagerie de polarisation ne semble plus faire partie d'une niche académique très restreinte, car il est devenu beaucoup plus aisé de capturer cette information grâce à de nouveaux capteurs efficaces. Ceci pourrait donc profiter au vaste domaine de l'image et du signal.

Mon souhait est donc de continuer à introduire les problématiques liées à l'imagerie de polarisation dans les conférences pour lesquelles elles étaient jusque-là absentes, par des re-soumissions ou soumissions dans SITIS, CIC, EUSIPCO, Photonics Europe, ICIP, etc. D'autres conférences dans des domaines plus divers, tels que la navigation (acte IIIE/ION PLAN de 2023) ou la mécanique (l'analyse vibratoire par l'imagerie de polarisation), pourraient être considérées en collaboration avec des chercheurs issus de ma nouvelle équipe (MIAM) travaillant sur ces sujets.

4.3 Enseignement

Mon souhait est de compiler mes travaux pour écrire et éditer deux nouveaux supports de cours complets de type livre à distribuer électroniquement aux étudiants. J'ai déjà réalisé ce type de support pour l'enseignement des outils mathématiques (lien ici : [Cours Outils Mathématiques](#)), mais j'aimerais étendre le principe pour deux autres matières enseignées.

Le premier livre aura pour titre : "**Conception de systèmes numériques sur FPGA**". Il détaillera les bases de l'électronique numérique, en partant du transistor en technologie

CMOS, pour arriver jusqu'à la conception à haut niveau de systèmes mixtes (mêlant circuits logiques combinatoires/séquentiels et application exécutée sur processeur(s) embarqué(s)), en passant par la description RTL à l'aide de code VHDL synthétisable. Ce livre pourra bénéficier de support d'exemple par rapport aux méthodes et outils récents de conception matérielle (simulation, co-simulation Matlab/Modelsim et "FPGA-in-the-loop"), qui ont été entre autres utilisés dans mes publications de 2017 [117] et 2018 [132] employant les FPGAs. Ce support sera fourni aux étudiants ingénieurs ASE à l'ENSISA, ainsi qu'aux étudiants en Master EEA de l'ENSISA, et couvrira deux années du cursus (L1, M1).

Le deuxième livre aura pour titre "**Chaîne de traitement d'image pour les capteurs à matrice de filtres**". Il détaillera le principe des capteurs filtrés, le pipeline de traitements associés (caractérisation, calibrage, correction HDR, dématricage, reconstruction, restauration, implémentation vidéo, etc.), et les différentes applications utilisant ces capteurs. Les dimensions d'imagerie, telles qu'énoncées dans ce manuscrit, seront aussi énoncées. Le support sera fourni aux étudiants en Master EEA de l'ENSISA.

4.4 Conclusion

La recherche menée depuis ma thèse contribue modestement à développer, mettre en œuvre et fiabiliser une technologie (les capteurs filtrés). Les travaux sont composés entre autres de données expérimentales mises à la disposition de la communauté, de développement d'algorithmes de calibrage et de reconstruction, de prototypages capteurs/systèmes optiques et de mise en œuvre pratique pour des applications telles que la restauration de la visibilité, la navigation par la polarisation du ciel ou la mesure de propriétés de surfaces. En unifiant les différents blocs issus des différentes publications, il me semble dès à présent possible d'envisager le développement de nouveaux algorithmes d'imagerie computationnelle en lien avec les capteurs filtrés, en considérant la dimension temporelle (ou le flux vidéo) dans un cadre beaucoup plus applicatif. Je pense par exemple aux applications de conduite autonome pour des robots agricoles, de vibrométrie par l'imagerie de polarisation, ou de détection rapide de défauts sous-surfacique. Cela ouvrirait des perspectives de recherche qui pourraient générer des activités pour les prochaines années.

Bibliographie

1. H. POINCARÉ. *Théorie mathématique de la lumière II. : Nouvelles études sur la diffraction.– Théorie de la dispersion de Helmholtz. Leçons professées pendant le premier semestre 1891-1892.* T. 1. G. Carré, 1889.
2. H. KOSCHMEIDER. Theorie der horizontalen sichtweite. *Beitrage zur Physik der freien Atmosphere* (1924), 33-53.
3. R. P. FEYNMAN, R. B. LEIGHTON et M. SANDS. The Feynman lectures on physics ; vol. i. *American Journal of Physics* **33**(9) (1965), 750-752.
4. K. E. TORRANCE et E. M. SPARROW. Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces*. *J. Opt. Soc. Am.* **57**(9) (sept. 1967), 1105-1114.
5. B. E. BAYER. Color imaging array. *United States Patent 3,971,065* (1976).
6. W. K. PRATT et C. E. MANCILL. Spectral estimation techniques for the spectral calibration of a color image scanner. *Appl. Opt.* **15**(1) (jan. 1976), 73-75.
7. S. YAMANAKA. *Solid State Color Camera.* US Patent 4,054,906. Oct. 1977.
8. J. K. BOWMAKER et H. DARTNALL. Visual pigments of rods and cones in a human retina. *The Journal of physiology* **298**(1) (1980), 501-511.
9. S. A. SHAFER. Using color to separate reflection components. *Color Research & Application* **10**(4) (1985), 210-218. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/col.5080100409>.
10. L. T. MALONEY. Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters. *J. Opt. Soc. Am. A* **3**(10) (oct. 1986), 1673-1683.
11. L. T. MALONEY et B. A. WANDELL. Color constancy : a method for recovering surface spectral reflectance. *J. Opt. Soc. Am. A* **3**(1) (jan. 1986), 29-33.
12. G. J. KLINKER, S. A. SHAFER et T. KANADE. The measurement of highlights in color images. *International Journal of Computer Vision* **2**(1) (1988), 7-32.

13. N. GALATSANOS et R. CHIN. Digital restoration of multichannel images. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* **37**(3) (1989), 415-421.
14. D. HERZMANN et T. LABHART. Spectral sensitivity and absolute threshold of polarization vision in crickets : a behavioral study. *Journal of Comparative Physiology A* **165**(3) (1989), 315-319.
15. L. B. WOLFF. Polarization-based material classification from specular reflection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **12**(11) (nov. 1990), 1059-1071.
16. S. K. NAYAR, K. IKEUCHI et T. KANADE. Surface Reflection : Physical and Geometrical Perspectives. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **13**(7) (juill. 1991), 611-634.
17. H. TRUSSEL, M. SEZAN et D. TRAN. Sensitivity of color LMMSE restoration of images to the spectral estimate. *IEEE Transactions on Signal Processing* **39**(1) (1991), 248-252.
18. D. H. GOLDSTEIN. Mueller matrix dual-rotating retarder polarimeter. *Appl. Opt.* **31**(31) (nov. 1992), 6676-6683.
19. G. SHARMA et H. J. TRUSSELL. Characterization of Scanner Sensitivity. In : *Color Imaging Conference*. 1993, pp.103-107.
20. C. S. CHUN, D. L. FLEMING et E. TOROK. Polarization-sensitive thermal imaging. In : *Automatic Object Recognition IV*. T. 2234. International Society for Optics et Photonics. 1994, pp.275-286.
21. L. B. WOLFF. Diffuse-reflectance model for smooth dielectric surfaces. *J. Opt. Soc. Am. A* **11**(11) (nov. 1994), 2956-2968.
22. D. M. RUST. *Integrated dual imaging detector*. US Patent 5,438,414. Août 1995.
23. M. A. WOBER et F. R. SOINI. *Method and apparatus for recovering image data through the use of a color test pattern*. US Patent 5,475,769. Déc. 1995.
24. S. TOMINAGA. Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions. *J. Opt. Soc. Am. A* **13**(11) (nov. 1996), 2163-2173.
25. S. K. NAYAR, X.-S. FANG et T. BOULT. Separation of reflection components using color and polarization. *International Journal of Computer Vision* **21**(3) (1997), 163-186.
26. E. COMPAIN et B. DREVILLON. Broadband division-of-amplitude polarimeter based on uncoated prisms. *Appl. Opt.* **37**(25) (sept. 1998), 5938-5944.
27. J. Y. HARDEBERG, H. BRETTEL et F. J. M. SCHMITT. Spectral characterization of electronic cameras. In : *Electronic Imaging : Processing, Printing, and Publishing in Color*. Sous la dir. de J. BARES. T. 3409. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 1998, pp.100-109. <https://doi.org/10.1117/12.324101>.

28. F. H. IMAI et R. S. BERNIS. Spectral estimation using trichromatic digital cameras. In : *Proceedings of the International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives*. T. 42. Chiba University Chiba, Japan. 1999, pp.1-8.
29. T. MITSUNAGA et S. NAYAR. Radiometric self calibration. In : *Proceedings. 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cat. No PR00149)*. T. 1. 1999, pp.374-380 Vol. 1.
30. K. OKA et T. KATO. Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum. *Opt. Lett.* **24**(21) (nov. 1999), 1475-1477.
31. A. M. WALLACE, B. LIANG, E. TRUCCO et J. CLARK. Improving depth image acquisition using polarized light. *International Journal of Computer Vision* **32** (1999), 87-109.
32. J. M. BUENO. Polarimetry using liquid-crystal variable retarders : theory and calibration. *Journal of Optics A : Pure and Applied Optics* **2**(3) (2000), 216.
33. S. NAYAR et T. MITSUNAGA. High dynamic range imaging : spatially varying pixel exposures. In : *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2000 (Cat. No.PR00662)*. T. 1. 2000, pp.472-479 vol.1.
34. S. K. NAYAR et T. MITSUNAGA. High dynamic range imaging : Spatially varying pixel exposures. In : *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2000 (Cat. No. PR00662)*. T. 1. IEEE. 2000, pp.472-479.
35. D. TAUBMAN. Generalized Wiener reconstruction of images from colour sensor data using a scale invariant prior. In : *Proceedings 2000 International Conference on Image Processing (Cat. No.00CH37101)*. T. 3. 2000, pp.801-804 vol.3.
36. Z. ZHANG. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* **22**(11) (2000), 1330-1334.
37. L. LE HORS, P. HARTEMANN, D. DOLFI et S. BREUGNOT. Phenomenological model of paints for multispectral polarimetric imaging. In : *Targets and Backgrounds VII : Characterization and Representation*. T. 4370. SPIE. 2001, pp.94-105.
38. R. RAMANATH, W. E. SNYDER, G. L. BILBRO et W. A. SANDER. Robust multispectral imaging sensors for autonomous robots. *Tech. Rep.* (2001).
39. F. DURAND et J. DORSEY. Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images. In : *Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. SIGGRAPH '02*. San Antonio, Texas : Association for Computing Machinery, 2002, pp.257-266. <https://doi.org/10.1145/566570.566574>.
40. G. HORVÁTH, J. GÁL, T. LABHART et R. WEHNER. Does reflection polarization by plants influence colour perception in insects? Polarimetric measurements applied to a polarization-sensitive model retina of Papilio butterflies. *Journal of Experimental Biology* **205**(21) (2002), 3281-3298.

41. E. REINHARD, M. STARK, P. SHIRLEY et J. FERWERDA. Photographic Tone Reproduction for Digital Images. In : *Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '02. San Antonio, Texas : Association for Computing Machinery, 2002, pp.267-276. <https://doi.org/10.1145/566570.566575>.
42. H. J. TRUSSELL et R. E. HARTWIG. Mathematics for demosaicking. *IEEE Transactions on image processing* **11**(4) (2002), 485-492.
43. J. S. TYO. Design of optimal polarimeters : maximization of signal-to-noise ratio and minimization of systematic error. *Appl. Opt.* **41**(4) (fév. 2002), 619-630.
44. F. DRAGO, K. MYSZKOWSKI, T. ANNEN et N. CHIBA. Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes. *Computer Graphics Forum* **22**(3) (2003), 419-426. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1467-8659.00689>.
45. R. D. NELSON, D. E. LEAIRD et A. M. WEINER. Programmable polarization-independent spectral phase compensation and pulse shaping. *Opt. Express* **11**(15) (juill. 2003), 1763-1769.
46. K. OKA et T. KANEKO. Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms. *Opt. Express* **11**(13) (juin 2003), 1510-1519.
47. Y. Y. SCHECHNER, S. G. NARASIMHAN et S. K. NAYAR. Polarization-based vision through haze. *Appl. Opt.* **42**(3) (jan. 2003), 511-525.
48. F. GOUDAIL, P. TERRIER, Y. TAKAKURA, L. BIGUÉ, F. GALLAND et V. DEVLAMINCK. Target detection with a liquid-crystal-based passive Stokes polarimeter. *Appl. Opt.* **43**(2) (jan. 2004), 274-282.
49. L. MIAO, H. QI et W. E. SNYDER. A generic method for generating multispectral filter arrays. In : *2004 International Conference on Image Processing, 2004. ICIP'04*. T. 5. IEEE. 2004, pp.3343-3346.
50. D. R. CONNAH et J. Y. HARDEBERG. Spectral recovery using polynomial models. In : *Color Imaging X : Processing, Hardcopy, and Applications*. T. 5667. SPIE. 2005, pp.65-75.
51. N. S. HART et M. VOROBYEV. Modelling oil droplet absorption spectra and spectral sensitivities of bird cone photoreceptors. *Journal of Comparative Physiology A* **191**(4) (2005), 381-392.
52. H. HIRSCHMULLER. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. In : *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. T. 2. IEEE. 2005, pp.807-814.
53. R. LUKAC et K. PLATANIOTIS. Color filter arrays : design and performance analysis. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* **51**(4) (2005), 1260-1267.
54. H. TOMPKINS et E. A. IRENE. *Handbook of ellipsometry*. William Andrew, 2005.

55. H. BAY, T. TUYTELAARS et L. VAN GOOL. Surf : Speeded up robust features. In : *European conference on computer vision*. Springer. 2006, pp.404-417.
56. R. S. BERNS, L. A. TAPLIN, M. NEZAMABADI, Y. ZHAO et M. MOHAMMADI. Practical spectral imaging using a color-filter array digital camera. *Studies in Conservation* (2006).
57. E. REINHARD, G. WARD, S. PATTANAIK et P. E. DEBEVEC. *High dynamic range imaging : acquisition, display, and image-based lighting*. 2006.
58. J. S. TYO. Hybrid division of aperture/division of a focal-plane polarimeter for real-time polarization imagery without an instantaneous field-of-view error. *Optics letters* **31**(20) (2006), 2984-2986.
59. J. S. TYO, D. L. GOLDSTEIN, D. B. CHENAULT et J. A. SHAW. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications. *Appl. Opt.* **45**(22) (août 2006), 5453-5469.
60. V. VURPILLOT, A.-C. LEGRAND et A. TRÉMEAU. Spectral Sensitivity Estimation for Color Camera Calibration. *Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision* **3**(1) (2006), 302-302.
61. J. ZALLAT, S. AINOUZ et M. P. STOLL. Optimal configurations for imaging polarimeters : impact of image noise and systematic errors. *Journal of Optics A : Pure and Applied Optics* **8**(9) (2006), 807.
62. A. O. AKYÜZ et E. REINHARD. Noise reduction in high dynamic range imaging. *Journal of Visual Communication and Image Representation* **18**(5) (2007), 366-376.
63. N. GUPTA et D. R. SUHRE. Acousto-optic tunable filter imaging spectrometer with full Stokes polarimetric capability. *Appl. Opt.* **46**(14) (mai 2007), 2632-2637.
64. K. ACKERSON, C. MUSANTE, J. GAMBINO, J. ELLIS-MONAGHAN, D. MAYNARD, R. J. RASSEL, K. OGG et M. JAFFE. Characterization of "blinking pixels" in CMOS Image Sensors. In : *2008 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*. 2008, pp.255-258.
65. M. ALOUINI, F. GOUDAIL, N. ROUX, L. LE HORS, P. HARTEMANN, S. BREUGNOT et D. DOLFI. Active spectro-polarimetric imaging : signature modeling, imaging demonstrator and target detection. *The European Physical Journal-Applied Physics* **42**(2) (2008), 129-139.
66. G. BRADSKI et A. KAEHLER. *Learning OpenCV : Computer vision with the OpenCV library*. " O'Reilly Media, Inc.", 2008.
67. P. E. DEBEVEC et J. MALIK. Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs. In : *ACM SIGGRAPH 2008 Classes*. SIGGRAPH '08. Los Angeles, California : Association for Computing Machinery, 2008. <https://doi.org/10.1145/1401132.1401174>.
68. A. RIBES et F. SCHMITT. Linear inverse problems in imaging. *IEEE Signal Processing Magazine* **25**(4) (2008), 84-99.

69. S. TOMINAGA et A. KIMACHI. Polarization imaging for material classification. *Optical Engineering* **47**(12) (2008), 123201.
70. G. G. STOKES. « On the Composition and Resolution of Streams of Polarized Light from different Sources ». In : *Mathematical and Physical Papers*. T. 3. Cambridge Library Collection - Mathematics. Cambridge University Press, 2009, p. 233-258.
71. O. AHARON et I. ABDULHALIM. Liquid crystal wavelength-independent continuous polarization rotator. *Optical Engineering* **49**(3) (2010), 034002-034002-4.
72. E. REINHARD, W. HEIDRICH, P. DEBEVEC, S. PATTANAIK, G. WARD et K. MYSZKOWSKI. *High dynamic range imaging : acquisition, display, and image-based lighting*. Morgan Kaufmann, 2010.
73. F. YASUMA, T. MITSUNAGA, D. ISO et S. K. NAYAR. Generalized Assorted Pixel Camera : Postcapture Control of Resolution, Dynamic Range, and Spectrum. *IEEE Transactions on Image Processing* **19**(9) (2010), 2241-2253.
74. X. ZHAO, A. BERMAK, F. BOUSSAID et V. G. CHIGRINOV. Liquid-crystal micropolarimeter array for full Stokes polarization imaging in visible spectrum. *Opt. Express* **18**(17) (août 2010), 17776-17787.
75. L. GENDRE, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Full Stokes polarimetric imaging using a single ferroelectric liquid crystal device. *Optical Engineering* **50** (2011), 50 - 50 -10.
76. N. HAUTIÈRE, J.-P. TAREL, D. AUBERT et É. DUMONT. BLIND CONTRAST ENHANCEMENT ASSESSMENT BY GRADIENT RATIOING AT VISIBLE EDGES. *Image Analysis & Stereology* **27**(2) (2011), 87-95.
77. K. HE, J. SUN et X. TANG. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **33**(12) (2011), 2341-2353.
78. R. SHRESTHA, J. Y. HARDEBERG et A. MANSOURI. One-shot multispectral color imaging with a stereo camera. In : *Digital Photography VII*. T. 7876. International Society for Optics et Photonics. 2011, pp.787609.
79. M. VEDEL, S. BREUGNOT et N. LECHOCINSKI. Full Stokes polarization imaging camera. In : *Proc. SPIE*. T. 8160. 2011, pp.81600X.
80. K. A. BACHMAN, J. J. PELTZER, P. D. FLAMMER, T. E. FURTAK, R. T. COLLINS et R. E. HOLLINGSWORTH. Spiral plasmonic nanoantennas as circular polarization transmission filters. *Opt. Express* **20**(2) (jan. 2012), 1308-1319.
81. G. MYHRE, W.-L. HSU, A. PEINADO, C. LACASSE, N. BROCK, R. A. CHIPMAN et S. PAU. Liquid crystal polymer full-stokes division of focal plane polarimeter. *Opt. Express* **20**(25) (déc. 2012), 27393-27409.
82. S. WESTLAND, C. RIPAMONTI et V. CHEUNG. *Computational colour science using MATLAB*. John Wiley & Sons, 2012.

83. M. BORN et E. WOLF. *Principles of optics : electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Elsevier, 2013.
84. D. ENDEMAN, L. J. KLAASSEN et M. KAMERMANS. Action spectra of zebrafish cone photoreceptors. *PLoS One* **8**(7) (2013), e68540.
85. G. HORVÁTH et D. VARJÚ. *Polarized light in animal vision : polarization patterns in nature*. 2625-2635 XXIII, 447. - : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
86. A. A. KASPARSON, J. BADRIDZE et V. V. MAXIMOV. Colour cues proved to be more informative for dogs than brightness. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences* **280**(1766) (2013), 20131356.
87. A. PEINADO, A. LIZANA et J. CAMPOS. Optimization and tolerance analysis of a polarimeter with ferroelectric liquid crystals. *Appl. Opt.* **52**(23) (août 2013), 5748-5757.
88. S. B. POWELL et V. GRUEV. Calibration methods for division-of-focal-plane polarimeters. *Opt. Express* **21**(18) (sept. 2013), 21039-21055.
89. W. A. BELTRAN, A. V. CIDECIYAN, K. E. GUZIEWICZ, S. IWABE, M. SWIDER, E. M. SCOTT, S. V. SAVINA, G. RUTHEL, F. STEFANO, L. ZHANG et al. Canine retina has a primate fovea-like bouquet of cone photoreceptors which is affected by inherited macular degenerations. *PloS one* **9**(3) (2014), e90390.
90. G. HORVÁTH, A. LERNER et N. SHASHAR. *Polarized light and polarization vision in animal sciences*. T. 2. Springer, 2014.
91. W.-L. HSU, G. MYHRE, K. BALAKRISHNAN, N. BROCK, M. IBN-ELHAJ et S. PAU. Full-Stokes imaging polarimeter using an array of elliptical polarizer. *Opt. Express* **22**(3) (fév. 2014), 3063-3074.
92. J. E. KHOURY, J.-B. THOMAS et A. MANSOURI. Does Dehazing Model Preserve Color Information? In : *2014 Tenth International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems*. 2014, pp.606-613.
93. **Lapray, P.-J.**, X. WANG, J.-B. THOMAS et P. GOUTON. Multispectral Filter Arrays : Recent Advances and Practical Implementation. *Sensors* **14**(11) (2014), 21626.
94. D. A. LEMASTER et K. HIRAKAWA. Improved microgrid arrangement for integrated imaging polarimeters. *Opt. Lett.* **39**(7) (avr. 2014), 1811-1814.
95. **P.-J. Lapray**, B. HEYRMAN et D. GINHAC. Hardware-based smart camera for recovering high dynamic range video from multiple exposures. *Optical Engineering* **53**(10) (2014), 102110.
96. **P.-J. Lapray**, B. HEYRMAN et D. GINHAC. HDR-ARtiSt : an adaptive real-time smart camera for high dynamic range imaging. *Journal of Real-Time Image Processing* (2014), 1-16.

97. **P.-J. Lapray**, X. WANG, J.-B. THOMAS et P. GOUTON. Multispectral Filter Arrays : Recent Advances and Practical Implementation. *Sensors* **14**(11) (2014), 21626.
98. M. BOUDERBANE, **P.-J. Lapray**, J. DUBOIS, B. HEYRMAN et D. GINHAC. Overview of ghost correction for HDR video stream generation. In : *4th Workshop on the Architecture of Smart Cameras*. 2015.
99. J. G. CHEN, N. WADHWA, Y.-J. CHA, F. DURAND, W. T. FREEMAN et O. BUYUKOZTURK. Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification. *Journal of Sound and Vibration* **345** (2015), 58-71.
100. L. K. CHOI, J. YOU et A. C. BOVIK. Referenceless Prediction of Perceptual Fog Density and Perceptual Image Defogging. *IEEE Transactions on Image Processing* **24**(11) (2015), 3888-3901.
101. G. FYFFE et P. DEBEVEC. Single-Shot Reflectance Measurement from Polarized Color Gradient Illumination. In : *2015 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*. 2015, pp.1-10.
102. T. MU, C. ZHANG, Q. LI et R. LIANG. Error analysis of single-snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeters. *Opt. Express* **23**(8) (avr. 2015), 10822-10835.
103. A. PEINADO, A. LIZANA, A. TURPÍN, C. IEMMI, T. K. KALKANDJIEV, J. MOMPART et J. CAMPOS. Optimization, tolerance analysis and implementation of a Stokes polarimeter based on the conical refraction phenomenon. *Opt. Express* **23**(5) (mars 2015), 5636-5652.
104. J.-B. THOMAS. Illuminant estimation from uncalibrated multispectral images. In : *2015 Colour and Visual Computing Symposium (CVCS)*. 2015, pp.1-6.
105. W. A. WOŹNIAK, M. PRĘTKA et P. KURZYŃSKI. Imaging Stokes polarimeter based on a single liquid crystal variable retarder. *Appl. Opt.* **54**(20) (juill. 2015), 6177-6181.
106. P. AMBA, J. DIAS et D. ALLEYSSON. Random CFAs are better than regular ones. *Journal of Imaging Science and Technology* (2016).
107. M. BOUDERBANE, J. DUBOIS, B. HEYRMAN, **P.-J. Lapray** et D. GINHAC. Ghost removing for HDR real-time video stream generation. In : t. 9897. 2016, pp.98970F-98970F-6. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2230313>.
108. M. BOUDERBANE, J. DUBOIS, B. HEYRMAN, **P.-J. Lapray** et D. GINHAC. Ghost removing for HDR real-time video stream generation. In : t. 9897. 2016, pp.9897. <https://doi.org/10.1117/12.2230313>.
109. M. BOUDERBANE, **P.-J. Lapray**, J. DUBOIS, B. HEYRMAN et D. GINHAC. Real-time Ghost Free HDR Video Stream Generation Using Weight Adaptation Based Method. In : *Proceedings of the 10th International Conference on Distributed Smart Camera*. ICDSC '16. Paris, France : ACM, 2016, pp.116-120. <httpdoi.acm.org10.11452967413.2967439>.

110. I. ESTÉVEZ, V. SOPO, A. LIZANA, A. TURPIN et J. CAMPOS. Complete snapshot Stokes polarimeter based on a single biaxial crystal. *Opt. Lett.* **41**(19) (oct. 2016), 4566-4569.
111. J. M. LÓPEZ-TÉLLEZ, N. C. BRUCE et O. G. RODRÍGUEZ-HERRERA. Characterization of optical polarization properties for liquid crystal-based retarders. *Appl. Opt.* **55**(22) (août 2016), 6025-6033.
112. J. A. MARTIN et K. C. GROSS. Estimating index of refraction from polarimetric hyperspectral imaging measurements. *Opt. Express* **24**(16) (août 2016), 17928-17940.
113. J.-B. THOMAS, P.-J. LAPRAY, P. GOUTON et C. CLERC. Spectral Characterization of a Prototype SFA Camera for Joint Visible and NIR Acquisition. *Sensors* **16**(7) (2016), 993.
114. J.-B. THOMAS, P.-J. LAPRAY, P. GOUTON et C. CLERC. Spectral Characterization of a Prototype SFA Camera for Joint Visible and NIR Acquisition. *Sensors* **16**(7) (2016).
115. J.-B. THOMAS, **P.-J. Lapray**, P. GOUTON et C. CLERC. Spectral Characterization of a Prototype SFA Camera for Joint Visible and NIR Acquisition. *Sensors* **16**(7) (2016), 993.
116. P. AMBA, J. B. THOMAS et D. ALLEYSSON. N-LMMSE demosaicing for spectral filter arrays. *Journal of Imaging Science and Technology* **61**(4) (2017), 40407-1.
117. J. EMERY, A. BARJAU, B. DEHNING, J. H. ALVAREZ, **P.-J. Lapray** et M. MACCHINI. Design and validation methodology of the control system for a particle beam size measurement instrument at the CERN laboratory. In : *2017 American Control Conference (ACC)*. Mai 2017, pp.4221-4228.
118. M. GARCIA, C. EDMISTON, R. MARINOV, A. VAIL et V. GRUEV. Bio-inspired color-polarization imager for real-time in situ imaging. *Optica* **4**(10) (oct. 2017), 1263-1271.
119. H. A. KHAN, J.-B. THOMAS, J. Y. HARDEBERG et O. LALIGANT. Illuminant estimation in multispectral imaging. *J. Opt. Soc. Am. A* **34**(7) (juill. 2017), 1085-1098.
120. P.-J. LAPRAY, J.-B. THOMAS et P. GOUTON. High Dynamic Range Spectral Imaging Pipeline For Multispectral Filter Array Cameras. *Sensors* **17**(6) (2017).
121. P.-J. LAPRAY, J.-B. THOMAS, P. GOUTON et Y. RUICHEK. Energy balance in Spectral Filter Array camera design. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications* **13**(1) (2017), 1.
122. **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et P. GOUTON. A Database of Spectral Filter Array Images that Combine Visible and NIR. In : *International Workshop on Computational Color Imaging*. Springer. 2017, pp.187-196.
123. **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et P. GOUTON. High Dynamic Range Spectral Imaging Pipeline For Multispectral Filter Array Cameras. *Sensors* **17**(6) (2017).

124. **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS, P. GOUTON et Y. RUICHEK. Energy balance in Spectral Filter Array camera design. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications* **13**(1) (2017), 1.
125. J. RIVIERE, I. RESHETOUSKI, L. FILIPI et A. GHOSH. Polarization Imaging Reflectometry in the Wild. *ACM Trans. Graph.* **36**(6) (nov. 2017).
126. J.-B. THOMAS, **P.-J. Lapray** et P. GOUTON. « HDR Imaging Pipeline for Spectral Filter Array Cameras ». In : *Image Analysis : 20th Scandinavian Conference, SCIA 2017, Tromsø, Norway, June 12–14, 2017, Proceedings, Part II*. Sous la dir. de P. SHARMA et F. M. BIANCHI. Cham : Springer International Publishing, 2017, p. 401-412. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-59129-2_34.
127. X. TU, O. J. SPIRES, X. TIAN, N. BROCK, R. LIANG et S. PAU. Division of amplitude RGB full-Stokes camera using micro-polarizer arrays. *Optics Express* **25**(26) (2017), 33160-33175.
128. G. A. ATKINSON et J. D. ERNST. High-sensitivity analysis of polarization by surface reflection. *Machine Vision and Applications* **29** (2018), 1171-1189.
129. J. EL KHOURY, S. LE MOAN, J.-B. THOMAS et A. MANSOURI. Color and sharpness assessment of single image dehazing. *Multimedia tools and applications* **77**(12) (2018), 15409-15430.
130. J. KLEIN et B. HILL. Multispectral stereo acquisition using two RGB cameras and color filters. In : *18. Workshop Farbbildverarbeitung*. TU Darmstadt : Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Graphisch ... 2018, pp.89-96.
131. S. MIHOUBI, **P.-J. Lapray** et L. BIGUÉ. Survey of Demosaicking Methods for Polarization Filter Array Images. *Sensors* **18**(11) (2018).
132. **P.-J. Lapray**, L. GENDRE, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. An FPGA-based pipeline for micropolarizer array imaging. *International Journal of Circuit Theory and Applications* **46**(9) (2018), 1675-1689. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cta.2477>.
133. **P.-J. Lapray**, L. GENDRE, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Database of polarimetric and multispectral images in the visible and NIR regions. In : t. 10677. 2018, pp.10677 - 10677-14. <https://doi.org/10.1117/12.2306244>.
134. SONY. *Polarization Image Sensor*. Rapp. tech. Polarsens, 2018. https://www.sony-semicon.co.jp/products_en/IS/sensor5/pdf/IMX250_253MZR_MYR_Flyer_en.pdf.
135. C. VINEGONI, P. F. FERUGLIO et R. WEISSLEDER. High dynamic range fluorescence imaging. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **25**(1) (2018), 1-7.
136. C. O. ANCUTI, C. ANCUTI, M. SBERT et R. TIMOFTE. Dense-Haze : A Benchmark for Image Dehazing with Dense-Haze and Haze-Free Images. In : *2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2019, pp.1014-1018.

137. A. ARTUSI, R. K. MANTIUK, T. RICHTER, P. HANHART, P. KORSHUNOV, M. AGOSTINELLI, A. TEN et T. EBRAHIMI. Overview and evaluation of the JPEG XT HDR image compression standard. *Journal of Real-Time Image Processing* **16** (2019), 413-428.
138. R. BLIN, S. AINOZ, S. CANU et F. MERIAUDEAU. Road scenes analysis in adverse weather conditions by polarization-encoded images and adapted deep learning. In : *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. IEEE. 2019, pp.27-32.
139. N. HAGEN, S. SHIBATA et Y. OTANI. Calibration and performance assessment of microgrid polarization cameras. *Optical Engineering* **58**(8) (2019), 082408.
140. T. OKAWA, S. OOKI, H. YAMAJI, M. KAWADA, M. TACHI, K. GOI, T. YAMASAKI, H. IWASHITA, M. NAKAMIZO, T. OGASAHARA et al. A 1/2inch 48M All PDAF CMOS Image Sensor Using 0.8 μm Quad Bayer Coding $2\times 2\text{OCL}$ with 1.0 lux Minimum AF Illuminance Level. In : *2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. IEEE. 2019, pp.16-3.
141. T. OKAWA, S. OOKI, H. YAMAJI, M. KAWADA, M. TACHI, K. GOI, T. YAMASAKI, H. IWASHITA, M. NAKAMIZO, T. OGASAHARA, Y. KITANO et K. TATANI. A 1/2inch 48M All PDAF CMOS Image Sensor Using 0.8 μm Quad Bayer Coding $2\times 2\text{OCL}$ with 1.0lux Minimum AF Illuminance Level. In : *2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. 2019, pp.16.3.1-16.3.4.
142. S. QIU, Q. FU, C. WANG et W. HEIDRICH. Polarization Demosaicking for Monochrome and Color Polarization Focal Plane Arrays. In : *Vision, Modeling and Visualization*. Sous la dir. de H.-J. SCHULZ, M. TESCHNER et M. WIMMER. The Eurographics Association, 2019.
143. Y. GIMÉNEZ, P.-J. Lapray, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Calibration for polarization filter array cameras : recent advances. In : *Fourteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision*. Sous la dir. de C. CUDEL, S. BAZEILLE et N. VERRIER. T. 11172. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2019, pp.1117216. <https://doi.org/10.1117/12.2521752>.
144. M. MORIMATSU, Y. MONNO, M. TANAKA et M. OKUTOMI. Monochrome And Color Polarization Demosaicking Using Edge-Aware Residual Interpolation. In : *2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2020, pp.2571-2575.
145. M. MORIMATSU, Y. MONNO, M. TANAKA et M. OKUTOMI. Monochrome and Color Polarization Demosaicking Using Edge-Aware Residual Interpolation. In : *2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. IEEE. 2020, pp.2571-2575.
146. P.-J. Lapray. Exploiting redundancy in color-polarization filter array images for dynamic range enhancement. *Opt. Lett.* **45**(19) (oct. 2020), 5530-5533.
147. S. SATTAR, P.-J. Lapray, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Review of spectral and polarization imaging systems. In : *Unconventional Optical Imaging II*. Sous la dir. de C. FOURNIER, M. P. GEORGES et G. POPESCU. T. 11351. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2020, pp.191-203. <https://doi.org/10.1117/12.2555745>.

148. Y. GIMÉNEZ, **P.-J. Lapray**, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Calibration algorithms for polarization filter array camera : survey and evaluation. *Journal of Electronic Imaging* **29**(4) (2020), 1-13.
149. G. COURTIER, **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et I. FARUP. Correlations in Joint Spectral and Polarization Imaging. *Sensors* **21**(1) (2021).
150. N. ROBIDOUX, L. E. G. CAPEL, D.-e. SEO, A. SHARMA, F. ARIZA et F. HEIDE. End-to-end high dynamic range camera pipeline optimization. In : *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2021, pp.6297-6307.
151. SPOTE, A., **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et I. FARUP. Joint demosaicing of colour and polarisation from filter arrays. *Color and Imaging Conference* **2021**(29) (2021), 288-293.
152. S. WEN, Y. ZHENG et F. LU. A Sparse Representation Based Joint Demosaicing Method for Single-Chip Polarized Color Sensor. *IEEE Transactions on Image Processing* **30** (2021), 4171-4182.
153. L. AKSAS, **P.-J. Lapray**, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Joint qualitative and quantitative evaluation of fast image dehazing based on dark channel prior. In : *Unconventional Optical Imaging III*. Sous la dir. de M. P. GEORGES, G. POPESCU et N. VERRIER. T. 12136. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2022, pp.295-303. <https://doi.org/10.1117/12.2621566>.
154. COURTIER G., R. ADAM, **P.-J. Lapray**, E. PECHEUR, S. CHANGEY et J.-P. LAUFFENBURGER. Architecture matérielle et traitement d'images pour un système de navigation basé sur la polarisation de la lumière solaire. In : *28ème colloque GretsI*. Nancy, France, sept. 2022, pp.1-4.
155. COURTIER G., R. ADAM, **P.-J. Lapray**, E. PECHEUR, S. CHANGEY et J.-P. LAUFFENBURGER. Image-based navigation system using skylight polarization for an unmanned ground vehicle. In : *Unmanned Systems Technology XXIV*. Sous la dir. de H. G. NGUYEN, P. L. MUENCH et B. K. SKIBBA. T. 12124. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2022, pp.173-182. <https://doi.org/10.1117/12.2616833>.
156. DUMOULIN, R., **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et I. FARUP. Impact of training data on LMMSE demosaicing for Colour-Polarization Filter Array. In : *2022 16th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS)*. 2022, pp.275-280.
157. M. G. GLUSKIN. *Quad color filter array camera sensor configurations*. US Patent 11,405,535. Août 2022.
158. C. LANE, D. RODE et T. RÖSGEN. Calibration of a polarization image sensor and investigation of influencing factors. *Appl. Opt.* **61**(6) (fév. 2022), C37-C45.
159. **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et I. FARUP. Bio-Inspired Multimodal Imaging in Reduced Visibility. *Frontiers in Computer Science* **3** (2022).

160. SATTAR S., **P.-J. Lapray**, L. AKSAS, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. Snapshot spectropolarimetric imaging using a pair of filter array cameras. *Optical Engineering* **61**(4) (2022), 1-14.
161. Y. ZHANG, O. MOREL, R. SEULIN, F. MÉRIAUDEAU et D. SIDIBÉ. A central multimodal fusion framework for outdoor scene image segmentation. *Multimedia Tools and Applications* (2022), 1-14.
162. COURTIER G., R. ADAM, **P.-J. Lapray**, S. CHANGEY et J.-P. LAUFFENBURGER. Ground Vehicle Navigation Based on the Skylight Polarization. In : *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. 2023, pp.1373-1379.
163. **P.-J. Lapray** et L. BIGUÉ. Performance comparison of division of time and division of focal plan polarimeters. In : *Sixteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision*. Sous la dir. d'I. JOVANČEVIĆ et J.-J. ORTEU. T. 12749. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2023, pp.1274907. <https://doi.org/10.1117/12.2688566>.
164. CHROMAXION. *Spectral Library*. <https://www.chromaxion.com/spectral-library.php>, Accessed on October 2021.
165. CIE. CIE TC MULTISPECTRAL IMAGE FORMATS, CIE 223 :2017, Division 8, ISBN : 978-3-902842-10-7, 2017. ()).
166. MOXTEK. *MICRO-OPTICS Supplier*. <https://moxtek.com/optics-product/pixelated-polarizer/>.
167. SILIOS-TECHNOLOGIES. *MICRO-OPTICS Supplier*. <http://www.silios.com/>.



Annexe 1

Sur la page suivante, un poster réalisé en 2017 par des étudiants ASE ayant travaillé sur une problématique de recherche en rapport avec l'imagerie.

Microphone visuel

Principe

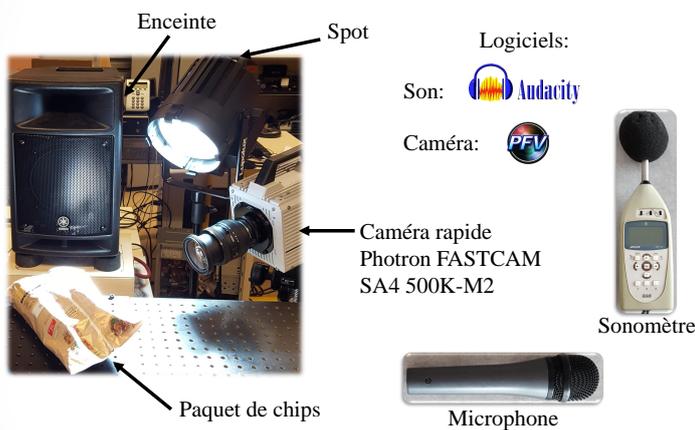
Enregistrer du son grâce au déplacement d'un objet filmé avec une caméra rapide.



Étapes de l'algorithme

- 1/ Décomposition de chaque image de la vidéo en sous-bandes de différentes résolutions et orientations grâce au concept de la pyramide orientable.
- 2/ Pour chaque résolution et orientation:
 - Détermination du déplacement de chaque pixel en utilisant le déphasage propre au signal.
 - Réalisation d'une moyenne pondérée des signaux des pixels afin d'avoir un signal de mouvement local.
- 3/ Calcul du signal de déplacement global qui est la somme des signaux locaux en prenant soin d'aligner ces derniers pour éviter les interférences destructives.
- 4/ Filtrage du bruit pour obtenir le signal de déplacement final de l'objet qui nous permet de reconstruire le son.

Protocole expérimental



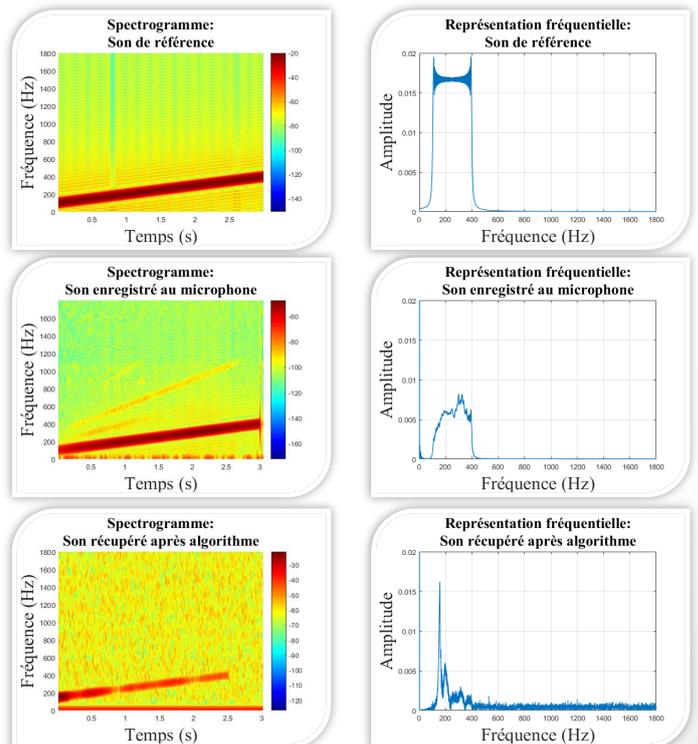
Objet	Fréquence du son de l'enceinte	Cadence d'images de la caméra (FPS)	Résolution de la caméra
- Paquet de chips - Plante - Tissu avec poils	- Fréquence pure de 200 Hz et de 500 Hz - Rampe de 100 Hz à 400 Hz - Voix humaine - Mélodie	- 3600 images/s (maximum en résolution optimale) - 1000 images/s - 2000 images/s	- 1024*1024 (maximum) - 640*640 - 768*640

Tableau: paramètres expérimentaux testés

Distance objet-caméra: 18cm / Niveau sonore: 95dB / Luminosité variable

Résultats

Analyse objective: rampe (100 à 400 Hz) sur paquet de chips (3600 images/s et résolution 1024*1024).



Analyse subjective: correspondance entre son envoyé et récupéré après l'algorithme mais présence de bruit.

Discussion et conclusion

- L'environnement extérieur et les caractéristiques acoustiques des appareils modifient le son obtenu.
- La synchronisation précise des signaux est difficile à atteindre.
- Les réponses en fréquence de l'enceinte et du microphone ne sont pas homogènes sur le spectre étudié.
- Les paramètres expérimentaux et la qualité du matériel ont beaucoup d'influence sur les résultats.

Référence: Abe Davis, Michael Rubinstein, Neal Wadhwa, Gautham J. Mysore, Frédo Durand, and William T. Freeman. 2014. The visual microphone: passive recovery of sound from video. *ACM Trans. Graph.* 33, 4, Article 79 (July 2014), 10 pages.

Résumé : Ce document présente un aperçu de mes activités de recherche sur l'imagerie multimodale basée sur les capteurs à réseaux de filtres. Après avoir présenté une série de travaux sélectionnés, nous formulons les orientations et les défis futurs.