

① Cursus et expérience professionnelle

Activités d'enseignement

Activités de recherche

② Synthèse des travaux de recherche

Introduction

Problématique 1 : Analyser les données multidimensionnelles

Problématique 2 : Pré-traiter les images

Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés

③ Projet de recherche

Plan

① Cursus et expérience professionnelle

Activités d'enseignement

Activités de recherche

② Synthèse des travaux de recherche

Introduction

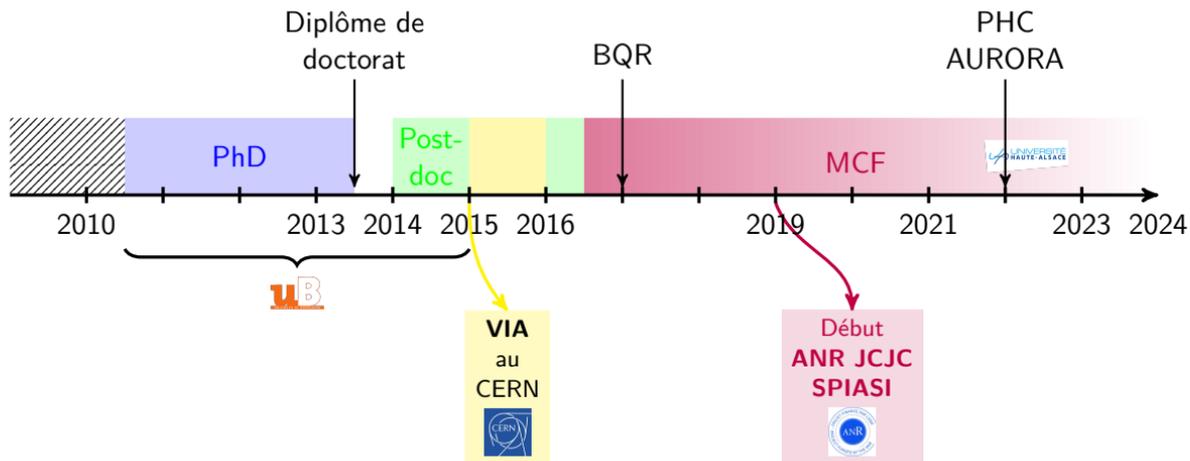
Problématique 1 : Analyser les données multidimensionnelles

Problématique 2 : Pré-traiter les images

Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés

③ Projet de recherche

Cursus et expérience professionnelle



- **Trois filières dans lesquelles j'interviens :**
 - ① Ingénieur Automatique et Systèmes Embarqués - ASE (75% des heures d'enseignement)
 - Électronique numérique et FPGA
 - Outils mathématiques
 - ② Master 2 Électronique, Énergie électrique, Automatique - EEA (15%)
 - Électronique numérique et FPGA
 - Images avancées
 - ③ Cycle Post-Bac intégré ENSISA/ENSCMU (10%)
 - Systèmes linéaires

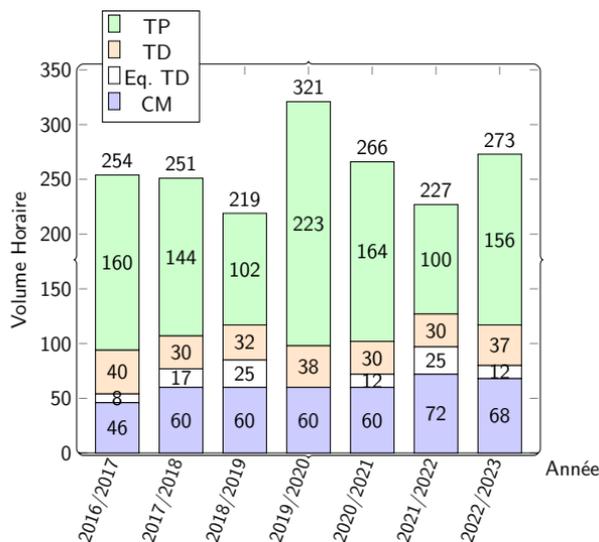


Figure 1 – Volume horaire par an. Le volume total Eq. TD est au-dessus de chaque barre. **L'encadrement de projets étudiants (2A/3A/M2) est inclus et représentent en moyenne 50h TP/an.**

Encadrement de jeunes chercheurs : Master 2 / PFE Ingénieurs

- 10 encadrements
 - 5 en coencadrement avec NTNU (Norwegian University of Science and Technology - Ivar Farup & Jean-Baptiste Thomas)
 - 3 poursuites en thèse de doctorat
 - 3 communications publiées durant les encadrements :
 - 1 article de journal Q1
 - 2 communications en conférences internationales
 - +1 article de journal actuellement en révision

- Encadrement de jeunes chercheurs : Doctorants

Nom	Début Fin	% Enc.	Sujet / Co-encadrement	Fonds	Pub.
Yilbert Gimenez	1 ^{er} Oct. 2018 Mar. 2022	60%	"Computational imaging for Polarization Filter Array (PFA)" Alban Foulonneau (30%), Laurent Bigué (10%)	CDE UHA	[21, 24]
Sumera Sattar	16 Avr. 2019 Dec. 2022	60%	"Spectral and polarization imaging for surface inspection" Alban Foulonneau (30%), Laurent Bigué (10%)	ANR SPIASI	[23, 33]
Guillaume Courtier	1 ^{er} Oct. 2020 Dec. 2023	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)	[28, 29] [26, 36]
Ronan Dumoulin	1 ^{er} Oct. 2023 -	30%	Imagerie multimodale à l'aide de capteurs microstructurés Alban Foulonneau (30%), Laurent Bigué (30%)	CDE UHA	

- Projets : en tant que coordinateur

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 - 2023	UHA- NTNU	PHC AURORA - P.-J. Lapray (coordinateur) "Spectral and Polarization Imaging of Specular Cultural Heritage Artifacts".	7 k€

- Production scientifique par projet :

- BQR UHA : 1 communication dans une conférence internationale
- ANR JCJC : 9 communications dans des conférences internationales et 6 articles de journaux
- PHC AURORA : 1 article de journal en phase de relecture



15 Résultats

Projet ANR - Code de la référence : ANR-18-CE10-0005

		Info par	Pertinence
<input type="checkbox"/>	 Joint qualitative and quantitative evaluation of fast image dehazing based on dark channel prior Lyes Akkas, Pierre-Jean Lapray, Alban Foulemaieu, Laurent Bigue <small>2018 Proceedings of SPIE, Apr 2018, Bellingham, France, pp.110-111 (12) (2017566)</small> Communication dans un congrès hal-03195242		
<input type="checkbox"/>	 Performance comparison of division of time and division of focal plane polarimeters Pierre-Jean Lapray, Laurent Bigue <small>Research International Conference on Quality Control by Artificial Vision, Jun 2023, Abil, France, pp.6, 110-111 (17) (2028586)</small> Communication dans un congrès hal-04198021		

- **Projets : en tant que participant**

- ① UHA SINPTA 2020 - “Selfib : Mesure des fibres émergentes à l’issue du détourage d’un composite”, 11 k€
 - Coordinateur : Alban Foulonneau
 - En partenariat avec le laboratoire LPMT (Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles)
- ② 2022/2023 - “QuarCamp : Quartier du Campus” (ANR-21-SS19-0005), 16 k€
 - SAPS-CSTI-Générique 18-19 (Science avec et pour la société – Culture scientifique, technique et industrielle)
 - Coordinatrice : Bénédicte LEBEAU
 - C’est un projet de médiation scientifique avec comme participants les porteurs de projets ANR génériques 2018-2019

LES 12 TRAVAUX DE LA RECHERCHE

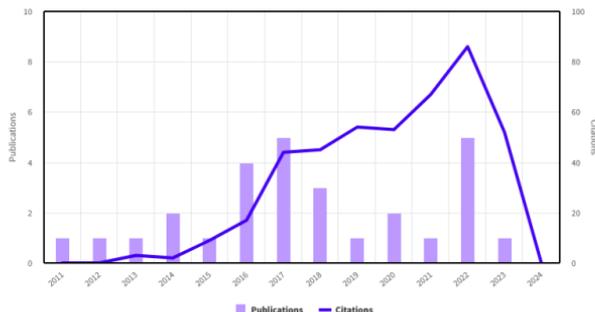


Figure 2 – Projet QuarCamp : Participation à la création d’une BD par une graphiste (Maxwell Superbien) intitulée « Les 12 travaux de la recherche ».

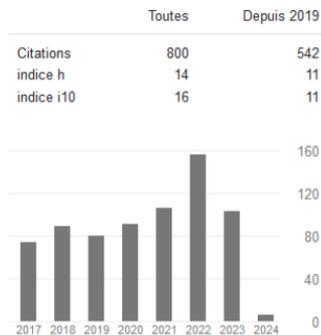
- **Bibliométrie (depuis 2010) :**

- 13 articles de revues indexées :
 - 6 Q1 (1 Optics Letters et 5 MDPI Sensors)
 - 6 Q2 (1 JRTIP, 1 JEOS, 1 Frontiers in Computer Science, 1 IJCTA, 1 Optical Engineering)
 - 1 Q3 (JEI)
- 25 communications dans des congrès internationaux :
 - 11 SPIE, 8 IEEE, 2 ACM, 2 Springer, 2 CIC
- 4 communications dans des congrès nationaux
 - 2 GRETSI, 1 CETSIS, 1 CFM
- 1 Short course donné à Color Imaging Conference en 2017
 - "Spectral Filter Arrays Technology"
- Autres : un article dans J3eA (revue nationale pour l'enseignement)

Times Cited and Publications Over Time



(a) Web of Science (début d'année 2024)



(b) Google Scholar (début d'année 2024)

Figure 3 – Bibliométrie

- **Activité éditoriale**

- Membre du comité consultatif thématique de MDPI Sensors
- Éditeur d'une collection thématique chez MDPI Sensors
 - "Advances in Spectroscopy and Spectral Imaging", 9 papiers
 - Initialement numéro spécial transformé en collection thématique
- Éditeur invité pour un numéro spécial
 - "Multispectral, Polarized and Unconventional Vision in Robotics", 2 papiers



- **Expertise scientifique**

- 3 jurys de CoSel MCF
- 1 comité de suivi de thèse
- Membre du forum de recherche de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), RF-01 "Spectral Imaging"
- 58 révisions d'articles de journal depuis 2014 selon Web of Science
 - Les principaux journaux :

Reviewer Summary

For manuscripts reviewed from date range January 2014 - January 2024

(9) Sensors	(6) Journal of Real-Time Image Proce...
(5) Journal of the Optical Society of ...	(5) IEEE Transactions on Circuits and...
(5) Journal of Imaging	(4) IEEE Transactions on Image Proc...
(4) Applied Optics	(4) Optics Express
(2) Journal of Imaging Science and T...	(2) Scientific Reports
(2) SN Computer Science	(2) Journal of Low Power Electronics ...
(1) Optics & Laser Technology	(1) Journal of the European Optical S...
(1) IEEE Transactions on Industrial El...	(1) IEEE Transactions on Computatio...
(1) Electronics	(1) Journal of Electronic Imaging
(1) IEEE Sensors Journal	(1) Computers

58 REVIEWS OF 40 MANUSCRIPTS

For manuscripts published from date range January 2014 - January 2024

- **Diffusion scientifique**
 - Membre du comité d'organisation local :
 - QCAV 2019
 - Membre du comité de programmation :
 - SITIS (workshop WAI), ISCAS, CVCS, QCAV
 - Organisation de séminaire en local
 - Bruno Albert (Ineva SAS)
 - Federico Grillini (doctorant NTNU)
 - Steven Le Moan (MCF NTNU)
 - Certaines fêtes de la science à Mulhouse

- **Science ouverte**

- Bases de données :
 - **Images "Spectral Filter Array"**, combinant le visible et le NIR [15]. Les images ont été capturées à l'aide du prototype développé au cours de mon post-doctorat en 2014.
 - **Images couleurs et multispectrales** [18].
 - **Images polarimétriques et multispectrales** dans le visible et le proche-infrarouge [18].
 - **Coefficients de corrélation** inter-bande calculés sur des bases de données spectropolarimétriques existantes [26].
 - **Deux scènes spectropolarimétriques prises en extérieur** et contenant du brouillard [32].
 - **Images spectrales et polarimétriques** capturées à partir d'un système d'acquisition stéréo dans le visible [33]. Un calibrage spectral est fourni pour de la reconstruction de reflectance.
- Codes Matlab :
 - **Algorithme de dématricage des images de polarisation** issues d'un capteur filtré [27, 30]
 - **Algorithme de dématricage des images spectropolarimétriques** issues d'un capteur filtré [27, 30]
 - **Processus d'optimisation des transmissions de filtres** pour la conception de caméras spectrales [14]

<https://github.com/pjlapray>

The screenshot shows the MATLAB File Exchange interface. At the top, there's a navigation bar with 'MathWorks' logo, 'Produits', 'Solutions', 'Le monde académique', 'Support', 'Communauté', and 'Événements'. A search bar is present with 'Search File Exchange' and a 'File Exchange' dropdown. Below the navigation, the main content area displays the repository details for 'Demosaicing Algorithm for Sony IMX250 MYR' by Pierre-Jean Lapray. It includes the version '1.0.0 (27.4 MB)', a description of the algorithm, and the GitHub link. There are also buttons for 'Share', 'Open in MATLAB Online', and 'Download'. At the bottom, there's a tabbed interface with 'Overview' selected, and other tabs for 'Functions', 'Version History', 'Reviews (0)', and 'Discussions (0)'.

Demosaicing-CPFA-LMMSE

This code allow you to demosaic a colour and polarimetric image from a filter array sensor with the Linear Minimum Mean Square

MATLAB Release Compatibility
Created with R2023a
Compatible with any release

Plan

① Cursus et expérience professionnelle

Activités d'enseignement

Activités de recherche

② Synthèse des travaux de recherche

Introduction

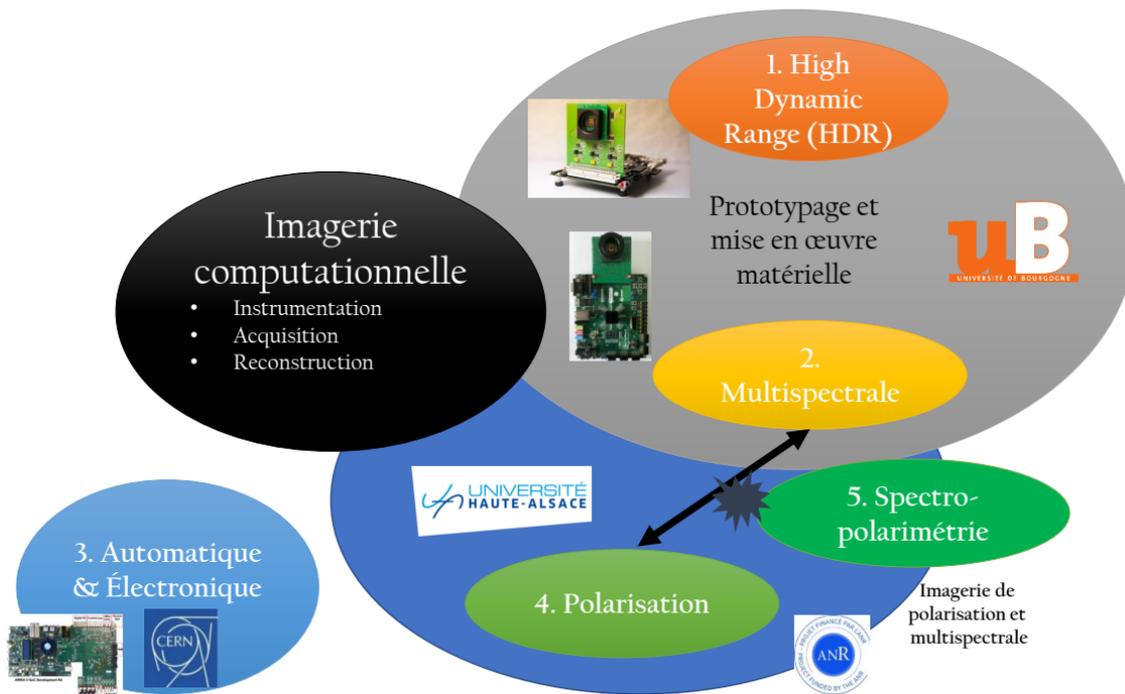
Problématique 1 : Analyser les données multidimensionnelles

Problématique 2 : Pré-traiter les images

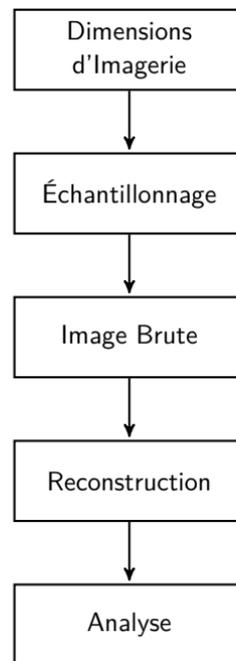
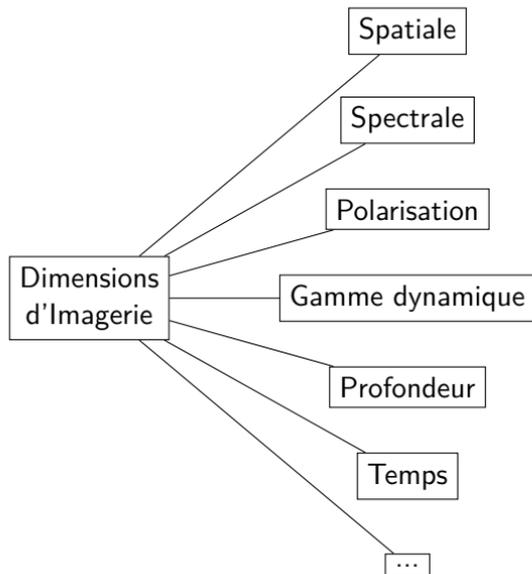
Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés

③ Projet de recherche

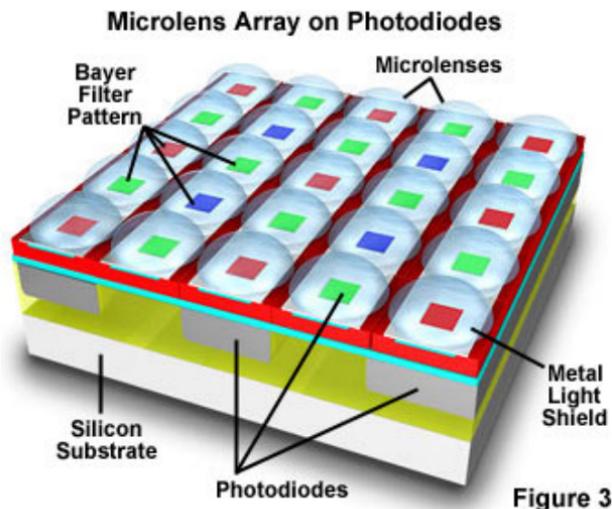
- Cadre de la recherche et mots-clés



- **Problématique générale : échantillonner le monde avec plusieurs dimensions d'imagerie**



- **L'échantillonnage**
 - Méthode par division temporelle/d'amplitude : Acquisitions multiples
 - Méthode par division du plan focal : Acquisition instantanée
- **La mosaïque de filtres : une manière d'échantillonner les dimensions**
 - Le capteur filtré comporte :
 - Une zone photosensible
 - Des micro-filtres
 - Des micro-lentilles



(a)

Figure 4 – Structure d'un capteur à base de micro-filtres RGB et utilisant l'arrangement spatial de Bayer [1] Université de Haute-Alsace
Référence de la figure : Hamamatsu.

Différentes façons de filtrer la lumière...



(a) Église Saint-Michel aux Bréseux (Doubs), Alfred Manessier



(b) Heinz Mack, "Héraldique en bleu"

Figure 5 – En utilisant une variété de filtres spectraux. Source : Denis Krieger.

Différentes façons de filtrer la lumière...



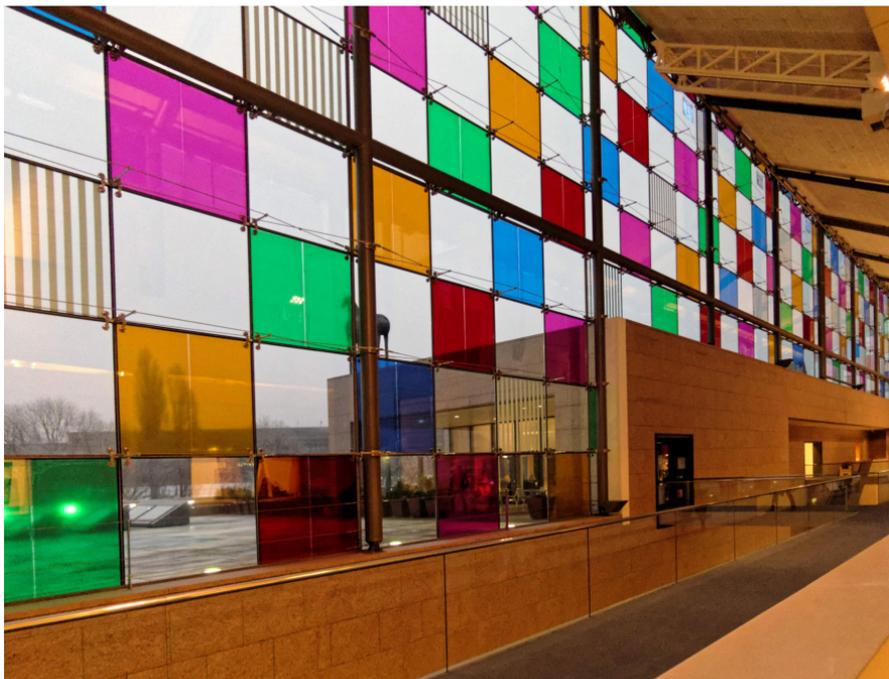
(a) Abbatiale Sainte-Foy de Conques
(Aveyron), Pierre Soulages



(b) Abbatiale Sainte-Foy de Conques
(Aveyron), Pierre Soulages

Figure 6 – En utilisant une variété de polariseurs, orientés différemment. Source : Denis Krieger

Différentes façons de filtrer la lumière...

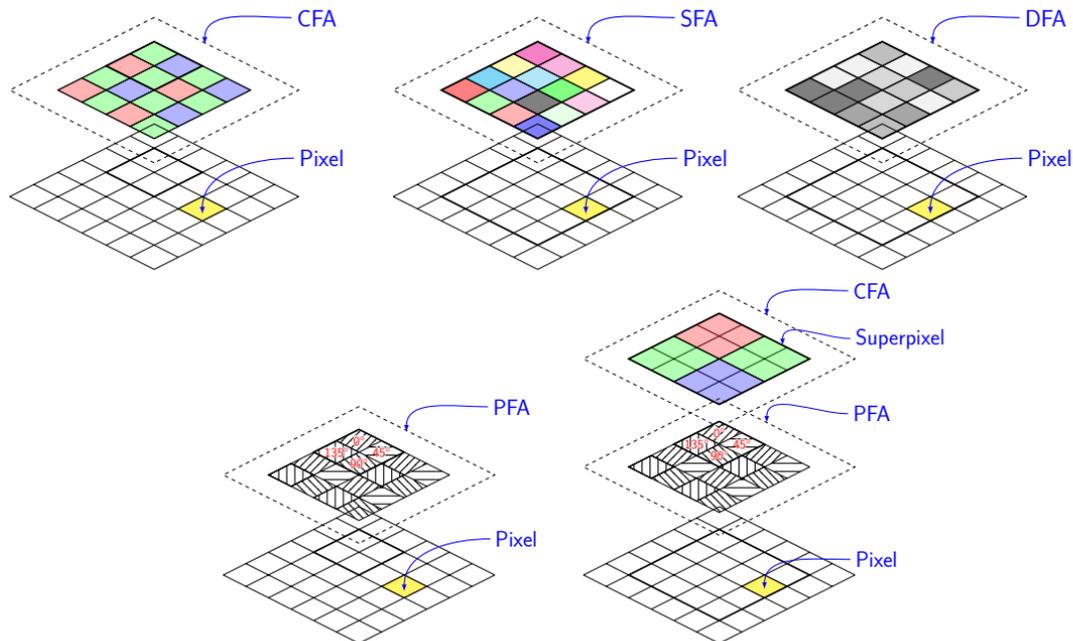


(a) Musée d'Art Moderne et Contemporain de Strasbourg, vitraux du bâtiment

Figure 7 – Un assortiment de filtres...

- **La mosaïque de filtres : une manière d'échantillonner les dimensions**

- Colour Filter Array (CFA) [1]
- Spectral/MultiSpectral Filter Array (SFA/MSFA) [9, 11]
- Neutral Density Filter Array (DFA) [7]
- Polarization Filter Array (PFA) [4]
- Colour-Polarization Filter Array (CPFA) [19], etc.



Les progrès technologiques récents en matière de matrices de filtres permettent l'imagerie multidimensionnelle, mais...

- Un nombre fini de pixels/dimensions
- Une information "clairsemée" (spatialement)
- Du bruit introduit par les microfiltres :
 - Caractéristiques optiques imparfaites,
 - Non-uniformité spatiale,
 - Diaphonie, etc.
- Du bruit introduit par un déséquilibre de l'utilisation de l'énergie incidente totale entre les canaux

Leur mise en œuvre nécessite une chaîne de traitements dédiée.

Problématique 1 : Analyser les données multidimensionnelles

- Les images spectropolarimétriques 12 canaux semblent posséder des régularités entre les canaux
- Il est intéressant d'analyser ces degrés de ressemblance de manière statistique → Calcul de corrélations
- Contexte : imagerie passive, source large bande, RGB + polarisation linéaire
- Ces corrélations sont-elles équivalentes pour différents matériaux et différents types de réflexion (diffuse ou spéculaire) ?

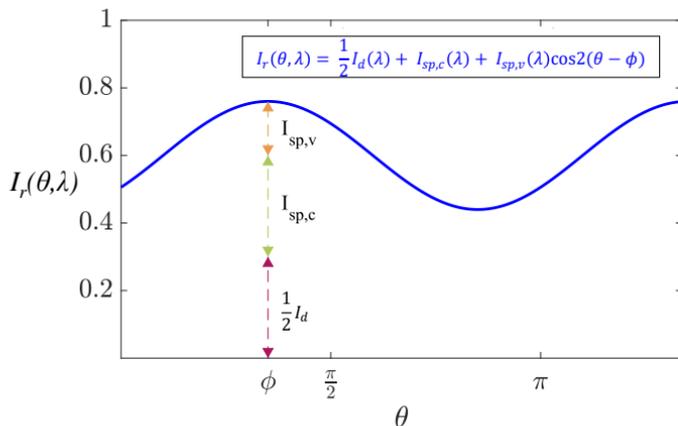
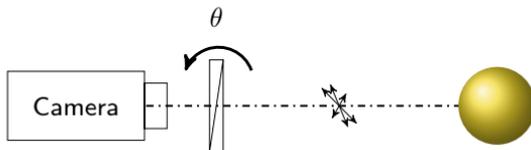


Figure 8 – Une image spectropolarimétrique à 12 canaux.

Problématique 1 : Analyser les données multidimensionnelles

• Détecter les zones spéculaires à partir de la polarisation

- Modèle additif : Intensité totale = composante diffuse + composante spéculaire
- Hypothèse : seule la composante spéculaire est polarisée



(a)

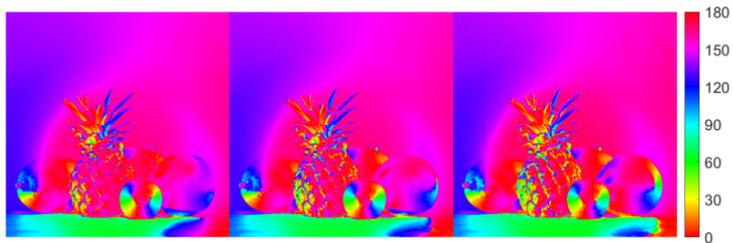
(b)

Figure 11 – Après une réflexion de surface, la lumière non polarisée devient polarisée linéairement (partiellement). L'intensité de sortie décrit une sinusoïde avec des composantes d'intensité constantes et variables.

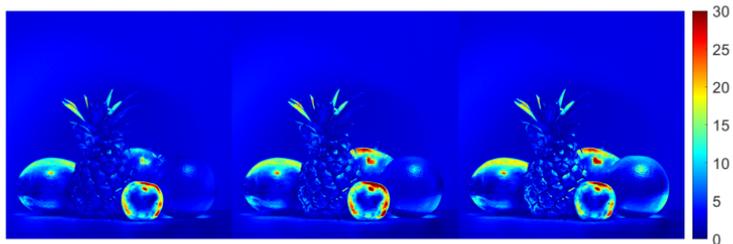
Problématique 1 : Analyser les données multidimensionnelles



(a) Bandes R, G, B



(b) Angle de polarisation



(c) Degré de polarisation

(d)

Problématique 1 : Analyser les données multidimensionnelles

- Une expérimentation pour l'analyse statistique

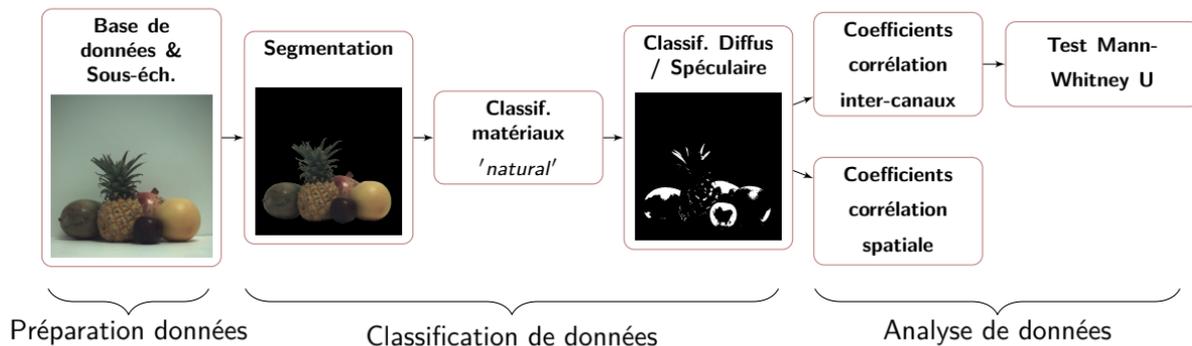
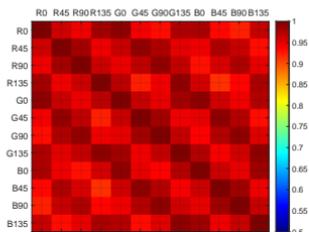


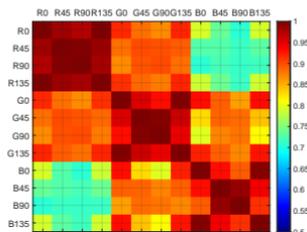
Figure 13 – Chaîne de traitement pour l'expérimentation sur l'analyse de données spectropolarimétriques.

Problématique 1 : Analyser les données multidimensionnelles

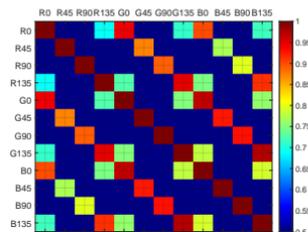
- Plus les bandes spectrales sont éloignées, moins la corrélation est importante.
- Plus les bandes de polarisation sont éloignées en termes d'angles, moins la corrélation est grande pour une même bande spectrale.
- Faibles corrélations pour les zones spéculaires, fortes corrélations pour les zones diffuses
- On distingue nettement des différences entre les matériaux



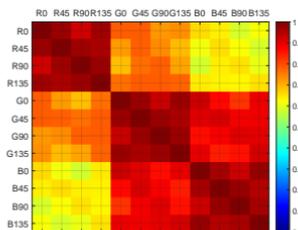
(a) Métallique



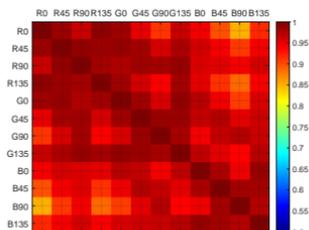
(b) Naturel



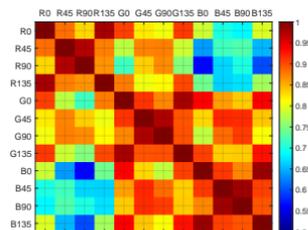
(c) Actif



(d) Plastique



(e) Verre



(f) Autres

Figure 14 – Visualisation de la corrélation inter-canal pour les objets en réflexion diffuse ou spéculaire [26]

Autres visualisations : [ici](#).

Problématique 1 : Analyser les données multidimensionnelles

- Retombées possibles
 - Orienter la définition de nouveaux algorithmes de vision par ordinateur (détection, segmentation, suivi, "*inpainting*", etc.)
 - Orienter la conception des capteurs
 - Orienter la reconstruction des images
- Mais :
 - Compléter l'étude avec les corrélations spatiales par matériaux
 - Statistiques valides par rapport à un champ lumineux spécifique : peu de variations d'éclairage dans les bases de données disponibles
 - La signature polarimétrique de l'objet imagé n'est pas unique en polarisation passive → difficultés d'interprétation → passer en polarisation active ?

Problématique 2 : Pré-traiter les images

- Un pixel d'une caméra CPFA ne capte qu'une partie de l'information
- Les images des canaux individuels ont une information très parcimonieuse...

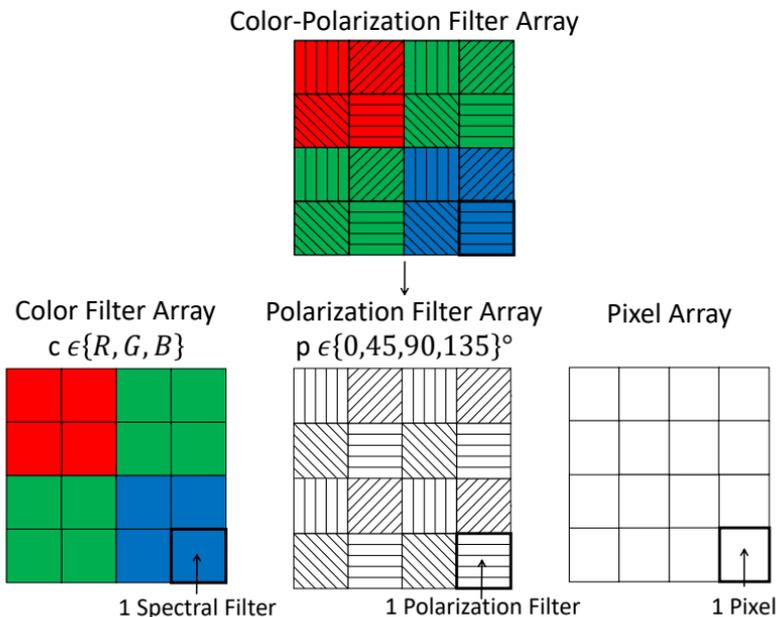


Figure 15 – Une architecture de capteur CPFA. Un motif de superpixel (4×4 pixels) est composé de filtres R, G, B et de micropolariseurs. La disposition spatiale des filtres ici est celle du capteur SONY IMX250 MYR.

Problématique 2 : Pré-traiter les images



Figure 16 – Image brute prise avec le capteur SONY IMX250 MYR à Mortzwiller (68).

Problématique 2 : Pré-traiter les images



Figure 16 – Image brute prise avec le capteur SONY IMX250 MYR à Mortzwiller (68).

Problématique 2 : Pré-traiter les images



Figure 16 – Image brute zoomée.

Problématique 2 : Pré-traiter les images



Figure 16 – Extraction de la bande rouge polarisée à 90° de la zone zoomée.

Problématique 2 : Pré-traiter les images

- L'absence d'information peut être assimilée à une dégradation de l'image (bruit)
- Pour chaque emplacement de pixel, il y a nécessité d'estimer les valeurs des canaux manquants
- **Comment reconstruire l'information selon des dimensions individuelles ?**

Problématique 2 : Pré-traiter les images

- Nous avons observé des corrélations inter-canal et intra-canal dans les travaux précédents
- L'opération de dématricage pourrait bénéficier de ces corrélations
- Ceci nous permet de supposer qu'un modèle linéaire de dématricage pourrait être judicieux.

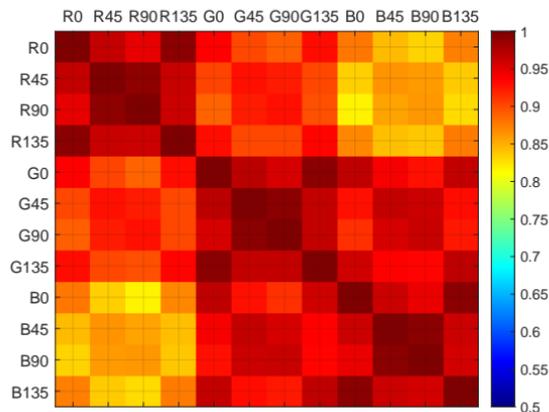


Figure 17 – Tableau des coefficients de corrélation affichés en fausses couleurs à partir d'une analyse faite sur 40 images et 12 canaux spectropolarimétriques [25].

Problématique 2 : Pré-traiter les images

- **Dématricage par l'erreur quadratique moyenne minimale linéaire (LMMSE)**

- Initialement utilisé pour du signal 1-D, puis pour la correction 2-D de dégradations (comme le bruit ou le flou optique) [2, 3]
- Puis adapté pour dématricer les images CFA [8, 10]
- et les images SFA (Amba *et al.* [13])

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

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}\mathbf{y} , \quad (1)$$

où les vecteurs \mathbf{x} et \mathbf{y} sont les versions vectorisées des images matricées et pleine résolution respectivement, et \mathbf{H} représente l'opérateur de matricage.

- L'estimation de \mathbf{y} à partir de l'erreur quadratique moyenne minimale linéaire peut être faite par [3] :

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{R}_y \mathbf{H}^t [\mathbf{H} \mathbf{R}_y \mathbf{H}^t]^{-1} \mathbf{x} , \quad (2)$$

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.

Problématique 2 : Pré-traiter les images

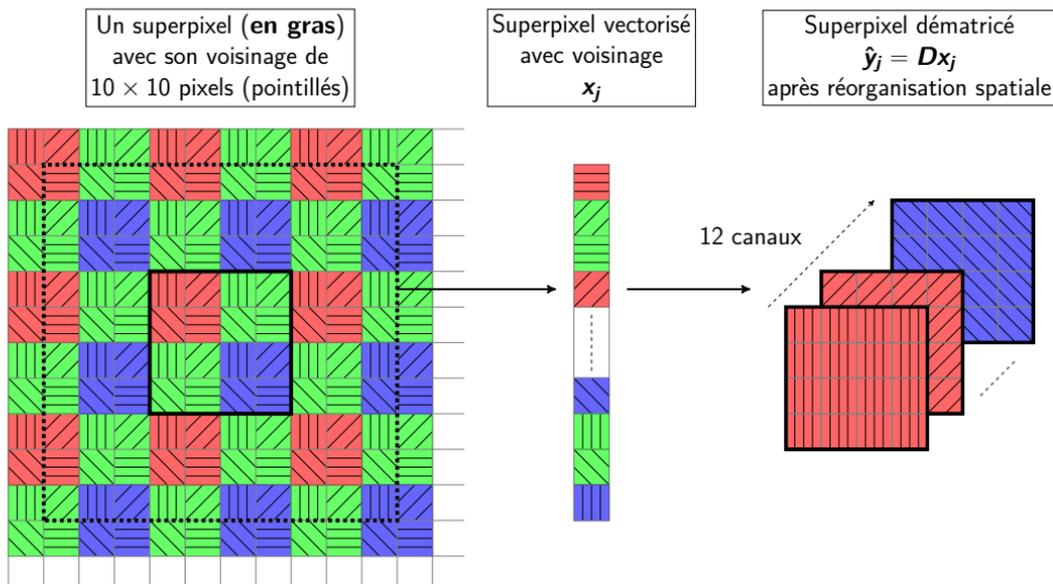


Figure 18 – Dématricage avec l'algorithme LMMSE. Chaque superpixel de l'image à la position j est vectorisé avec son voisinage, avant l'application du modèle linéaire D .

Problématique 2 : Pré-traiter les images



Figure 19 – Image brute zoomée.

Problématique 2 : Pré-traiter les images



Figure 19 – Bande rouge polarisée à 90° sous-échantillonnée.

Problématique 2 : Pré-traiter les images



Figure 19 – Bande rouge polarisée à 90° reconstruite par dématricage LMMSE.

Problématique 2 : Pré-traiter les images

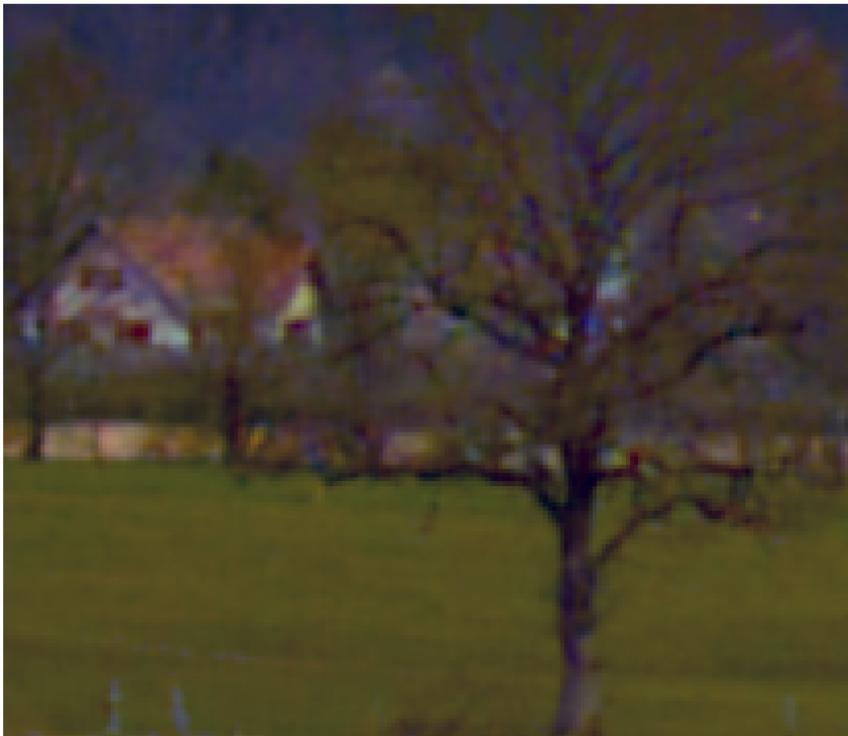


Figure 19 – Image sRGB de la zone zoomée.

Problématique 2 : Pré-traiter les images

- Visualisation des résultats

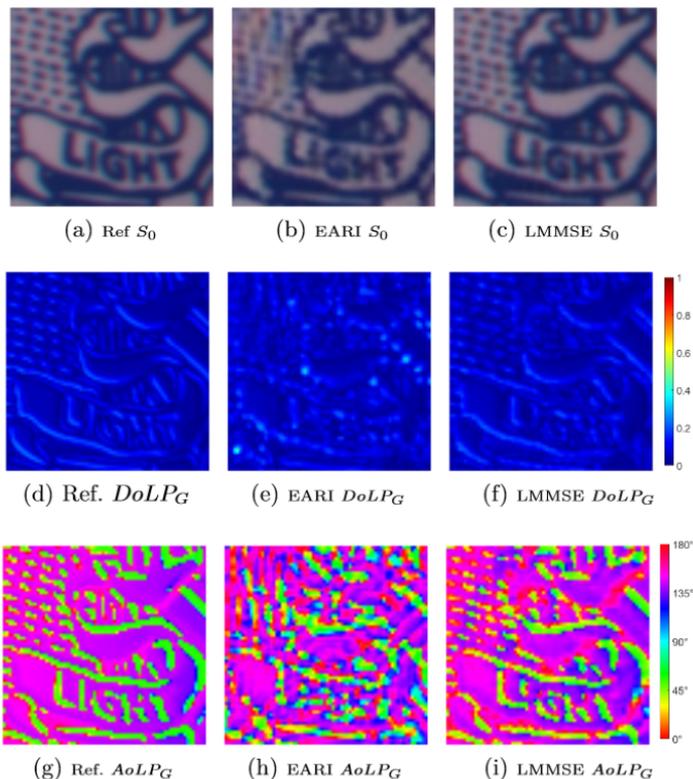


Figure 20 – Visualisation et comparaison avec une technique de dématricage CPFA dédié.

Problématique 2 : Pré-traiter les images

• Bilan du LMMSE

- Algorithme relativement rapide sur processeur malgré la convolution ($< 1s$ pour une image de 768×1024 pixels)
- Adapté au déploiement vidéo temps-réel avec possibilité de traitement dans le flux de pixel
- Peu d'images d'entraînement nécessaire
 - \rightarrow peut être optimisé "facilement" pour des applications spécifiques (contrôle de métaux, tri d'objets, analyse de scènes routières, etc.)
- Possibilité de généraliser le dématricage du LMMSE pour N canaux (en PFA, SFA, SPFA, etc.) \rightarrow en cours...

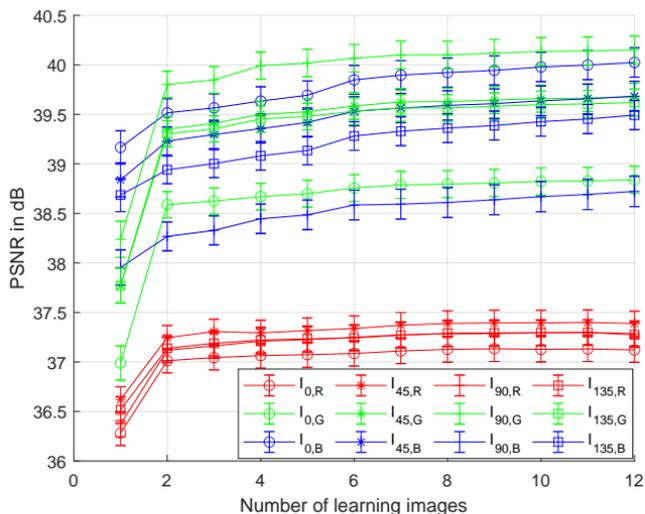


Figure 21 – PSNR en fonction du nombre d'images d'apprentissage.

Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés

- **Mise en oeuvre 1 : Montage d'acquisition d'images multispectrale et polarimétrique en une seule prise de vue**
- **Mise en oeuvre 2 : Capture de scènes spectropolarimétriques en extérieur**

Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés

- Mise en oeuvre 1 : Montage et acquisition d'images multispectrale et polarimétrique en une seule prise de vue
 - Montage stéréo à 2 caméras CPFA
 - Méthode "dual-RGB" ¹ : Ajout de filtre passe-bande les caméras pour changer leur sensibilité

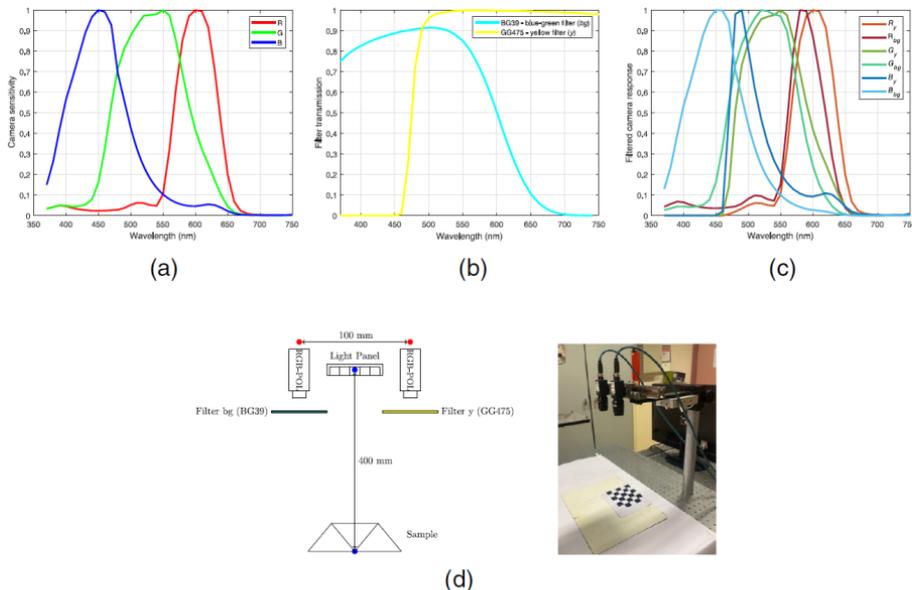


Figure 22 – Système à 2 caméras CPFA combinées avec des filtres passe-bande. (a) Sensibilité spectrale d'une caméra CPFA, (b) transmittance des filtres passe-bande, (c) sensibilité totale après recombinaison, (d) montage optique.

1. F. H. IMAI. « Multi-spectral image acquisition and spectral reconstruction using a trichromatic digital camera system associated with absorption filters ». In : *Munsell Color Science Laboratory, Rochester Institute of Technology* (1998).

Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés

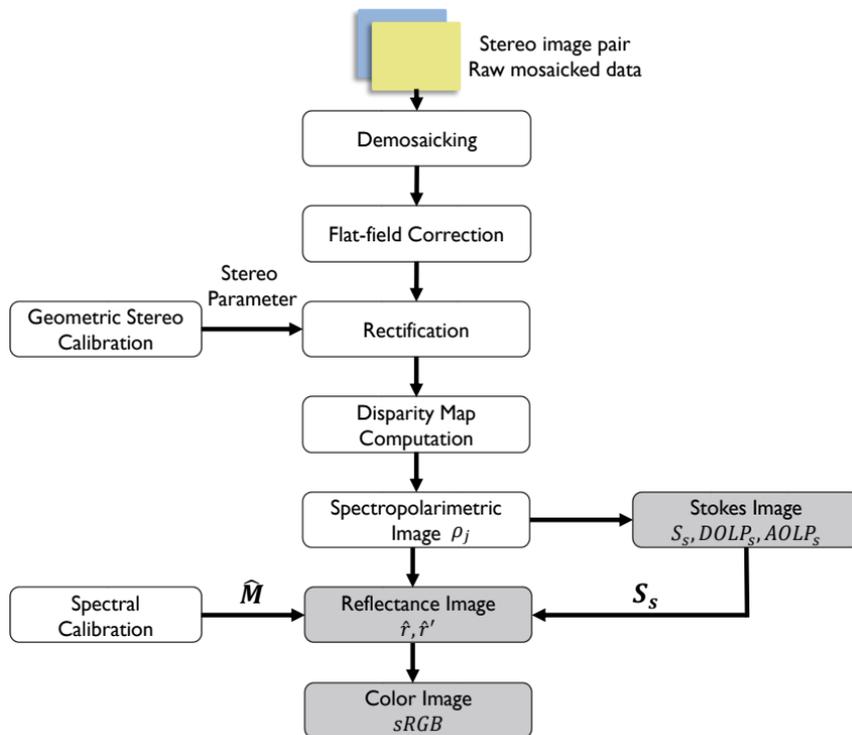


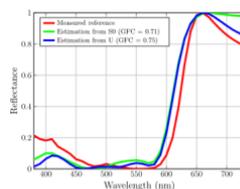
Figure 23 – Chaîne de traitement des données spectropolarimétriques.

Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés

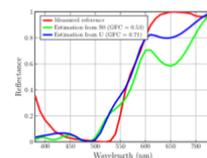
- **Mise en oeuvre 1 : Montage et acquisition d'images multispectrale et polarimétrique en une seule prise de vue**
 - Génération d'une base de données de 28 images 24 canaux (6 bandes spectrales, 4 canaux de polarisation linéaire)
 - Reconstruction spectrale avec un modèle linéaire
 - Évaluation de la reconstruction après filtrage de l'intensité polarisée



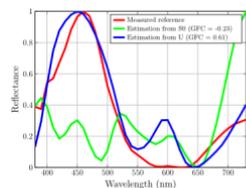
(a)



(c)



(e)



(g)

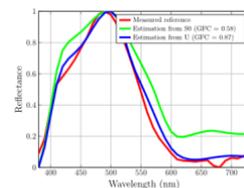


Figure 24 – Base de données et reconstruction spectrale.

Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés

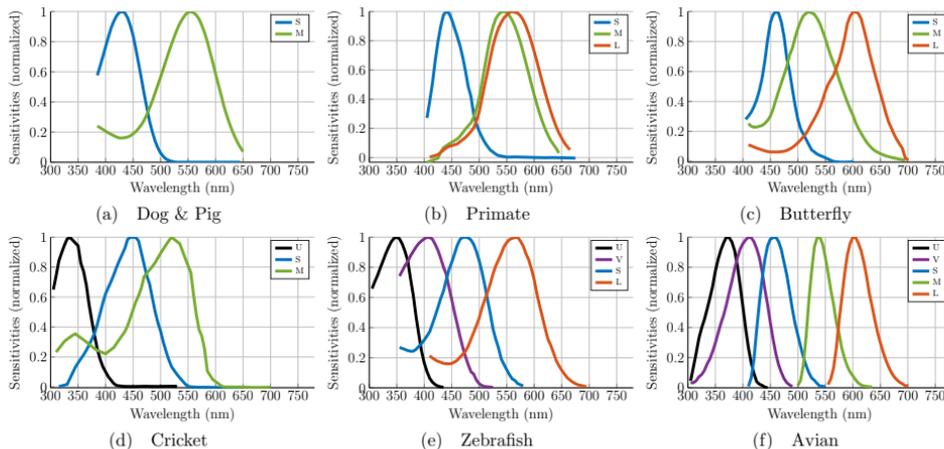
- **Mise en oeuvre 2 : Capture de scènes spectropolarimétriques en extérieur**
 - Question : Est-ce que les sensibilités spectrales et de polarisation présentes dans la nature peuvent aider à la restauration de la visibilité dans les images ?

Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés

- **Mise en oeuvre 2 : Capture de scènes spectropolarimétriques en extérieur**
 - 6 systèmes visuels d'animaux envisagés

N°	Système visuel	Canaux spectraux	Sensibilité UV-A	Canaux de polar. (linéaire)
1	Chien & Porc	2	-	0
2	Primate	3	-	0
3	Papillon Papilio	3	-	4
4	Criquet	3	+	2
5	Poisson zèbre	4	+	0
6	Oiseau	5	+	0

Table 1 – Résumé des systèmes visuels.



Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés

- Mise en oeuvre 2 : Capture de scènes spectropolarimétriques en extérieur
 - Capture d'images en extérieurs
 - 6 bandes visibles, 1 bande UV-A, 4 canaux de polarisation linéaire

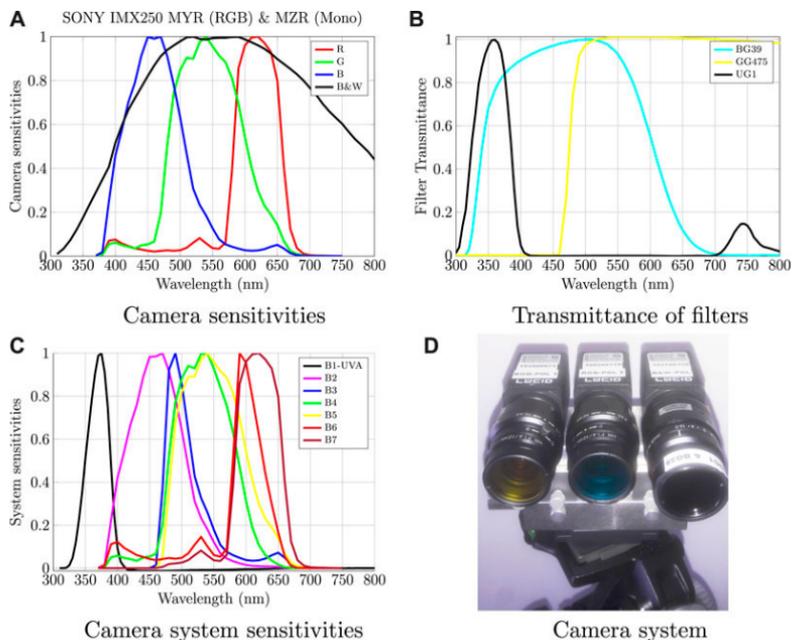


Figure 25 – (a) Sensibilités spectrales normalisées des deux caméras utilisées. (b) Transmission des filtres passe-bande. (c) Sensibilité totale du système.

Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés

- **Mise en oeuvre 2 : Capture de scènes spectropolarimétriques en extérieur**

- Pré-traitements associés aux caméras
- Reconstruction spectrale (visible)
- Les images spectrales seront utilisées ensuite pour l'émulation de capteurs bio-inspirés

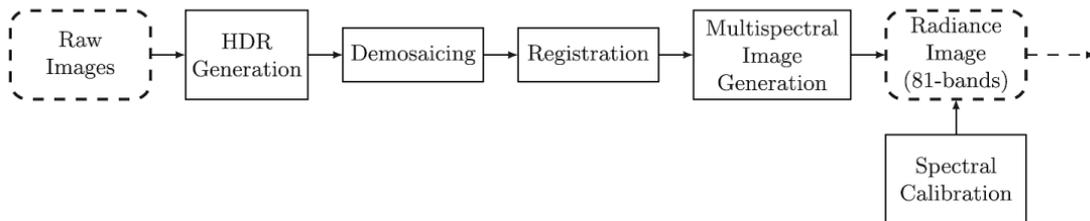


Figure 26 – Chaîne de traitement pour la préparation des données.

Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés



B1 (UV)



B2



B3



B4



B5



B6

Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés

- Simulation de capteurs bio-inspirés
- Simulation des images bio-inspirées à partir des images spectrales (radiance)
- Évaluations d'algorithmes de débrumage et visualisation des images couleurs (projection de l'espace du capteur bio-inspiré vers un espace colorimétrique)

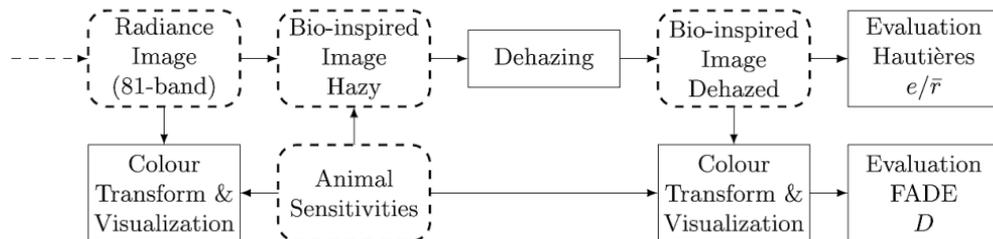


Figure 28 – Chaîne de traitement pour l'expérimentation.

- Débrumage mais pas seulement...

Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés

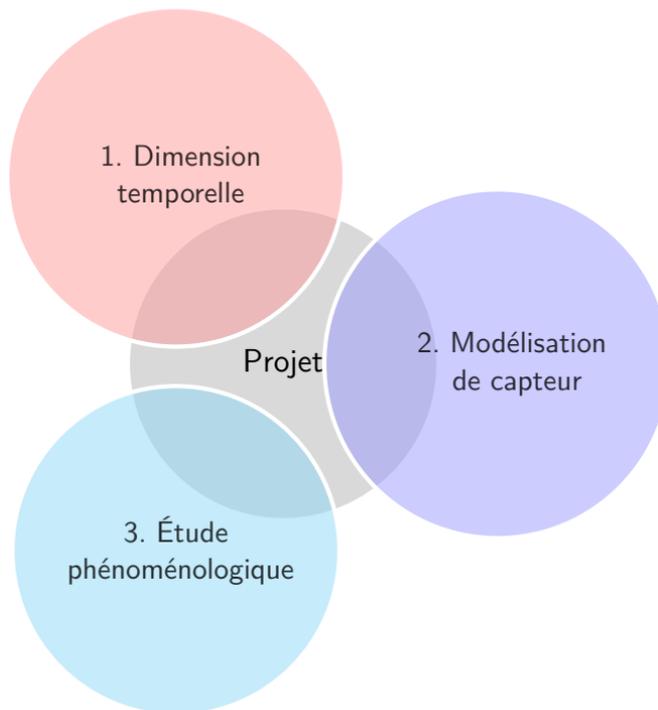


Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés



Plan

- ① Cours et expérience professionnelle
 - Activités d'enseignement
 - Activités de recherche
- ② Synthèse des travaux de recherche
 - Introduction
 - Problématique 1 : Analyser les données multidimensionnelles
 - Problématique 2 : Pré-traiter les images
 - Problématique 3 : Mettre en oeuvre les capteurs filtrés
- ③ Projet de recherche

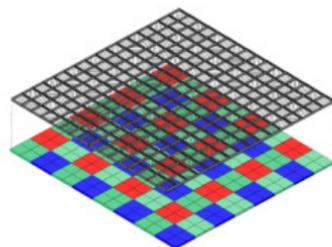


① La dimension temporelle

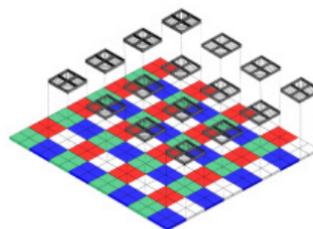
- Changement de paradigme : Image \rightarrow Séquence d'images
- Analyser et exploiter les corrélations inter-image dans le cas spécifique de l'imagerie spectropolarimétrique
- Pré-traiter les vidéos de manière efficace
 - Les modèles linéaires dans la chaîne de traitement pour respecter la cadence vidéo ?
- Réadapter les algorithmes
 - Flux optique, structure à partir du mouvement, suivi d'objet, etc.
- Ouverture en enseignement
 - Écriture d'un livre unifiant les aspects matériels et images

② Contribuer à la prochaine génération de capteurs filtrés

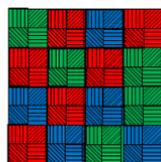
- Quel arrangement de filtre pour le CPFA ?
- L'arrangement de Sony semble avoir été sélectionné pour des raisons pratiques
 - Sony [19]
 - Tu *et al.* [16]
 - "Color polarization sparse focal plane array", Liu *et al.* 2023 [37]
 - Super-pixel pseudo-aléatoire adapté au CPFA [12]
 - Basé sur les corrélations inter et intra-canal



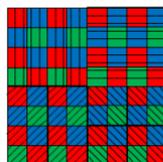
(a) DoFP polarization sensor



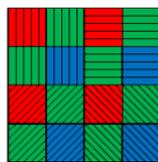
(b) Sparse DoFP polarization sensor



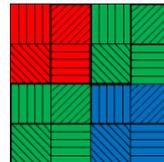
Pseudo-random 1



Pseudo-random 2



Tu et al.



Sony

② Contribuer à la prochaine génération de capteurs filtrés

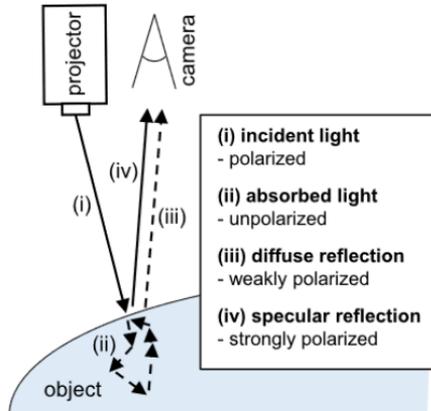
- Pousser le concept GFA ("General Filter Array") jusqu'à ses limites
- Nombre de canaux
 - Étude de la résolution optique (MTF) des systèmes VS la résolution spatiale des capteurs
- Sélection des micro-polariseurs :
 - Passer de 4 états de polarisation → 3 états linéaires ?
 - Quel est l'impact sur la reconstruction de l'information de polarisation ?
 - Imagerie HDR et balance énergétique des bandes

② Contribuer à la prochaine génération de capteurs filtrés

- L'évaluation des algorithmes d'imagerie computationnelle
 - Problème de la quantité/qualité des données prises en environnement réel lorsque le nombre de canaux augmente
 - Alignement des canaux, rapport signal sur bruit, nombre de canaux insuffisant, etc.

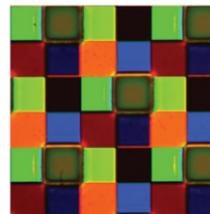
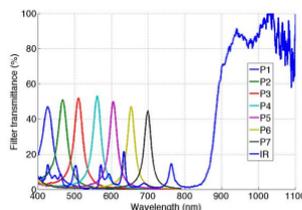
② Contribuer à la prochaine génération de capteurs filtrés

- L'évaluation des algorithmes d'imagerie computationnelle
 - Derniers modèles de rendu graphique ?
 - Ex. Mitsuba 3 [31] avec pBRDF² incluant également la polarisation de la composante diffuse



② Contribuer à la prochaine génération de capteurs filtrés

- Le filtrage du signal avec les matrices de filtres "conventionnelles" implique une efficacité de l'utilisation de l'énergie lumineuse limitée,



- Nombre de canaux du système d'imagerie → sensibilité totale du système.
- Une technologie émergente : les "Routers"
 - Principe : La lumière est "aiguillée" vers des pixels voisins de canaux différents

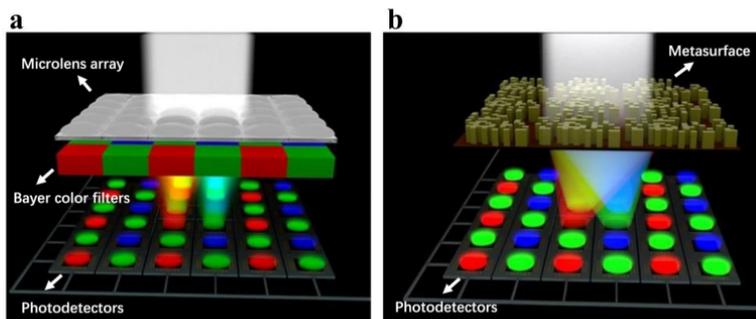


Figure 29 – Source :³

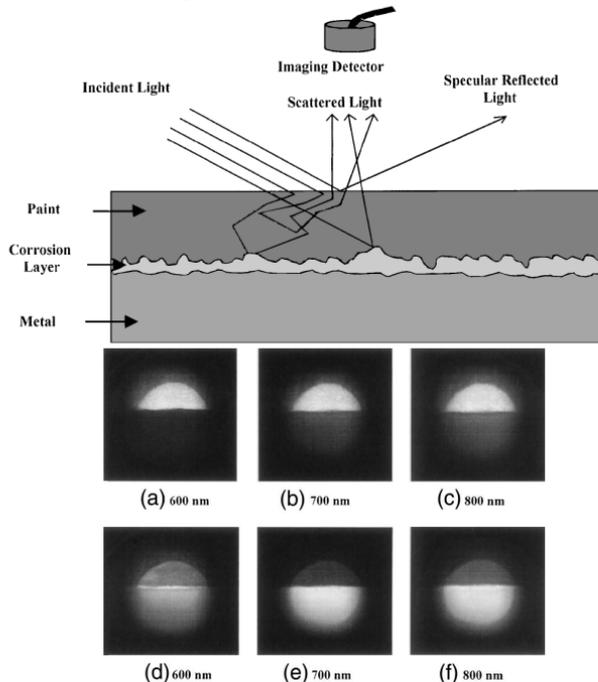
3. X. ZOU, Y. ZHANG, R. LIN, G. GONG, S. WANG, S. ZHU et Z. WANG. « Pixel-level Bayer-type colour router based on metasurfaces ». In : *Nature Communications* 13.1 (2022), p. 3288.

③ Étude des phénomènes physiques

- La signature polarimétrique en imagerie active
 - Étudier la dépendance spectrale de la réponse polarimétrique, mais en limitant la dépendance au champ lumineux
 - Redéployer les méthodes d'analyse statistique pour l'imagerie de polarisation active

③ Étude des phénomènes physiques

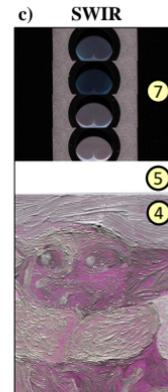
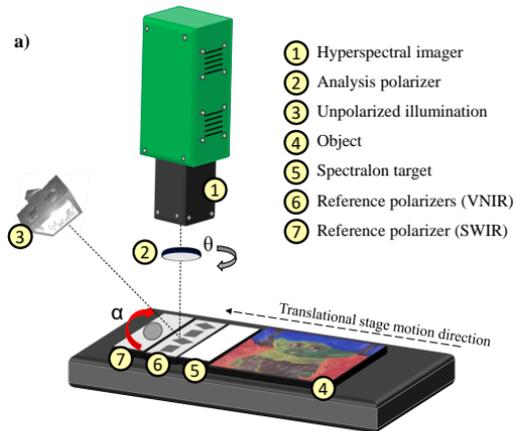
- La détection de défauts sous-surfacique⁴
 - Quelle profondeur pour quelle longueur d'onde ?



4. J. H. ALI, W. B. WANG, P. P. HO et R. R. ALFANO. « Detection of corrosion beneath a paint layer by use of spectral polarization optical imaging ». In : *Opt. Lett.* 25.17 (sept. 2000), p. 1303-1305.

③ Étude des phénomènes physiques

- La polarisation en imagerie hyperspectrale large bande : travaux PHC (en phase de soumission)
 - Imagerie passive dans le VIS/VNIR/SWIR
 - Etude de la relation DOLP/réflectance



- **Applications potentielles**

- Patrimoine culturel et solutions de préservation
 - Initiée par le PHC AURORA
- Navigation et robotique mobile
 - Initiée par la thèse en collaboration avec l'Institut Saint-Louis ISL (Guillaume Courtier)
- Système d'aide à la conduite (ADAS)
 - Intégration au MIAM
 - Projet ANR INARI - Projet de Recherche Collaborative (PRC)
- Agriculture
 - Détection précoce de maladies (oïdium, mildiou, pourriture grise et moisissure) par HSI et polarisation

- Pistes de financement
 - ANR, à privilégier?
 - PRC, PRCE
 - Soumission ERC
- Participation plus active aux conférences nationales
- Soumission à des conférences internationales où l'impact est important

Je vous remercie de votre attention - Références I

- [1] B. E. BAYER. « Color imaging array ». In : *United States Patent 3,971,065* (1976).
- [2] N. GALATSANOS et R. CHIN. « Digital restoration of multichannel images ». In : *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 37.3 (1989), p. 415-421.
- [3] H. TRUSSEL, M. SEZAN et D. TRAN. « Sensitivity of color LMMSE restoration of images to the spectral estimate ». In : *IEEE Transactions on Signal Processing* 39.1 (1991), p. 248-252.
- [4] D. M. RUST. *Integrated dual imaging detector*. US Patent 5,438,414. Août 1995.
- [5] F. H. IMAI. « Multi-spectral image acquisition and spectral reconstruction using a trichromatic digital camera system associated with absorption filters ». In : *Munsell Color Science Laboratory, Rochester Institute of Technology 2* (1998).
- [6] J. H. ALI, W. B. WANG, P. P. HO et R. R. ALFANO. « Detection of corrosion beneath a paint layer by use of spectral polarization optical imaging ». In : *Opt. Lett.* 25.17 (sept. 2000), p. 1303-1305.
- [7] 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, p. 472-479.
- [8] 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, 801-804 vol.3.
- [9] R. RAMANATH, W. E. SNYDER, G. L. BILBRO et W. A. SANDER. « Robust multispectral imaging sensors for autonomous robots ». In : *Tech. Rep.* (2001).
- [10] H. J. TRUSSELL et R. E. HARTWIG. « Mathematics for demosaicking ». In : *IEEE Transactions on image processing* 11.4 (2002), p. 485-492.
- [11] P.-J. LAPRAY, X. WANG, J.-B. THOMAS et P. GOUTON. « Multispectral Filter Arrays : Recent Advances and Practical Implementation ». In : *Sensors* 14.11 (2014), p. 21626-21659. URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/11/21626>.
- [12] P. AMBA, J. DIAS et D. ALLEYSSON. « Random CFAs are better than regular ones ». In : *Journal of Imaging Science and Technology* (2016).
- [13] P. AMBA, J. B. THOMAS et D. ALLEYSSON. « N-LMMSE demosaicking for spectral filter arrays ». In : *Journal of Imaging Science and Technology* 61.4 (2017), p. 40407-1.
- [14] P.-J. LAPRAY, J.-B. THOMAS, P. GOUTON et Y. RUICHEK. « Energy balance in Spectral Filter Array camera design ». In : *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications* 13.1 (2017), p. 1. URL : <http://dx.doi.org/10.1186/s41476-016-0031-7>.

Je vous remercie de votre attention - Références II

- [15] **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, p. 187-196.
- [16] 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 ». In : *Optics Express* 25.26 (2017), p. 33160-33175.
- [17] S.-H. BAEK, D. S. JEON, X. TONG et M. H. KIM. « Simultaneous acquisition of polarimetric SVBRDF and normals ». In : *ACM Trans. Graph.* 37.6 (déc. 2018).
- [18] **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, p. 10677 - 10677 -14. URL : <https://doi.org/10.1117/12.2306244>.
- [19] SONY. *Polarization Image Sensor*. Rapp. tech. Polarsens, 2018. URL : https://www.sony-semicon.co.jp/products_en/IS/sensor5/pdf/IMX250_253MZR_MYR_Flyer_en.pdf.
- [20] 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.
- [21] 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. BAZELLE et N. VERRIER. T. 11172. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2019, p. 1117216. URL : <https://doi.org/10.1117/12.2521752>.
- [22] 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, p. 2571-2575.
- [23] 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, p. 191-203. URL : <https://doi.org/10.1117/12.2555745>.
- [24] Y. GIMÉNEZ, **P.-J. Lapray**, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. « Calibration algorithms for polarization filter array camera : survey and evaluation ». In : *Journal of Electronic Imaging* 29.4 (2020), p. 1-13. URL : <https://doi.org/10.1117/1.JEI.29.4.041011>.
- [25] G. COURTIER, P.-J. LAPRAY, J.-B. THOMAS et I. FARUP. « Correlations in Joint Spectral and Polarization Imaging ». In : *Sensors* 21.1 (2021). URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/1/6>.

Je vous remercie de votre attention - Références III

- [26] G. COURTIER, **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et I. FARUP. « Correlations in Joint Spectral and Polarization Imaging ». In : *Sensors* 21.1 (2021). URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/1/6>.
- [27] SPOTE, A., **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et I. FARUP. « Joint demosaicing of colour and polarisation from filter arrays ». In : *Color and Imaging Conference 2021.29* (2021), p. 288-293. URL : <https://www.ingentaconnect.com/content/ist/cic/2021/00002021/00000029/art00047>.
- [28] 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, p. 1-4.
- [29] 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, p. 173-182. URL : <https://doi.org/10.1117/12.2616833>.
- [30] 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, p. 275-280.
- [31] W. JAKOB, S. SPEIERER, N. ROUSSEL et D. VICINI. « Dr.Jit : A Just-In-Time Compiler for Differentiable Rendering ». In : *Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH)* 41.4 (juill. 2022).
- [32] **P.-J. Lapray**, J.-B. THOMAS et I. FARUP. « Bio-Inspired Multimodal Imaging in Reduced Visibility ». In : *Frontiers in Computer Science* 3 (2022). URL : <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fcomp.2021.737144>.
- [33] SATTAR S., **P.-J. Lapray**, L. AKSAS, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. « Snapshot spectropolarimetric imaging using a pair of filter array cameras ». In : *Optical Engineering* 61.4 (2022), p. 1-14. URL : <https://doi.org/10.1117/1.0E.61.4.043104>.
- [34] X. ZOU, Y. ZHANG, R. LIN, G. GONG, S. WANG, S. ZHU et Z. WANG. « Pixel-level Bayer-type colour router based on metasurfaces ». In : *Nature Communications* 13.1 (2022), p. 3288.
- [35] 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, 126900B.

Je vous remercie de votre attention - Références IV

- [36] 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, p. 1373-1379.
- [37] J. LIU, J. DUAN, Y. HAO, G. CHEN, H. ZHANG et Y. ZHENG. « Polarization image demosaicing and RGB image enhancement for a color polarization sparse focal plane array ». In : *Opt. Express* 31.14 (juill. 2023), p. 23475-23490.
URL : <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-31-14-23475>.

② Contribuer à la prochaine génération de capteurs filtrés

- L'évaluation des algorithmes d'imagerie computationnelle⁵
 - Une image de polarisation (DOLP) issue d'une base de données de référence (Morimatsu et al. [22]) utilisée pour l'évaluation des algorithmes



5. 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, 126900B.

② Contribuer à la prochaine génération de capteurs filtrés

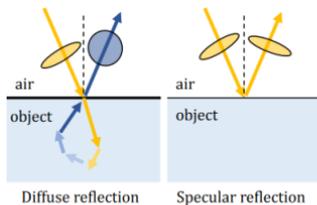
- L'évaluation des algorithmes d'imagerie computationnelle⁵
 - Une image de polarisation (DOLP) issue d'une base de données de référence (Morimatsu et al. [22]) utilisée pour l'évaluation des algorithmes



5. 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, 126900B.

Polarimetric BRDF

[Hyde IV 2009, Priest and Gerner 2000]



Specular polarization



Diffuse polarization



Diffuse polarization is weaker than specular polarization

Appearance from Polarization

[Ma 2007, Ghosh 2010, Riviere 2017]



Specular polarization

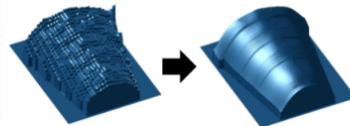


Diffuse polarization



Shape from Polarization

[Kadambi 2015, Cui 2017]



Specular polarization



or



Diffuse polarization



Modality problem:

Either one of them is allowed

