NNT/NL : 2020AIXM0001/001ED000

# THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue à Aix-Marseille Université
le 12 septembre 2024 par

**Léo Poughon**

## Utilisation de la polarisation de la lumière du ciel pour l'obtention d'un cap en automobile

**Discipline**

Sciences du Mouvement Humain

**École doctorale**

ED 463 Sciences du Mouvement Humain

**Laboratoire/Partenaires de recherche**
Institut des Sciences du Mouvement
Etienne-Jules Marey
UMR 7287 CNRS & Aix-Marseille Université

Stellantis
Centre Technique de Vélizy-Villacoublay

**Composition du jury**

| | |
|---|---|
| Olivier Morel<br>Maître de conférences<br>Laboratoire ImViA | Rapporteur |
| François Goudail<br>Professeur des universités<br>Institut d'Optique | Rapporteur |
| Samia Ainouz<br>Professeure des universités<br>LITIS | Examinatrice |
| Laurent Bigué<br>Professeur des universités<br>IRIMAS | Président du jury |
| Stéphane Viollet<br>Directeur de Recherches<br>ISM | Directeur de thèse |
| Julien Serres<br>Professeur des universités<br>ISM | Co-Directeur de thèse |
| Jocelyn Monnoyer<br>Ingénieur<br>Stellantis | Invité |

# Affidavit

Je soussigné, Léo Poughon, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Stéphane Viollet et de Julien Serres, dans le respect des principes d'honnêteté, d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect à la fois de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et de la charte d'Aix-Marseille Université relative à la lutte contre le plagiat.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Marseille le 11 Juillet 2024



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

# Liste de publications et participation aux conférences

## Liste des publications réalisées dans le cadre du projet de thèse :

1. Brevet Francais :
   Cessionnaires : Aix Marseille Universite, Centre National de la Recherche Scientifique CNRS, PSA Automobiles SA, 2021,
   Procédé et système pour déterminer des données caractérisant un cap suivi par un véhicule automobile à un instant courant [en ligne],
   Inventeurs : Leo Poughon, Stefano Mafrica, Jocelyn Monnoyer, Laetitia Pradere, Julien Serres, Stéphane Viollet.
   Déposé le : 21/10/2021. Brevet FR3128528B1.
   Disponible sur : https://data.inpi.fr/brevets/FR3128528?q=FR3128528
2. Thomas Kronland-Martinet, Léo Poughon, Marcel Pasquinelli, David Duché, Julien R Serres, et Stéphane Viollet.
   SkyPole—A method for locating the north celestial pole from skylight polarization patterns. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2023, 120 (30), ⟨10.1073/pnas.2304847120⟩. ⟨hal-04164096⟩
   https://hal.science/hal-04164096
3. Antoine Moutenet, Léo Poughon, Bruno Toulon, Julien R. Serres, Stéphane Viollet,
   OpenSky : a modular and open-source simulator of sky polarization measurements.
   IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73, 1-16.
   https://amu.hal.science/hal-04520460/
4. Léo Poughon,Vincent Aubry,Jocelyn Monnoyer,Stéphane Viollet,Julien R Serres, An extended database of annotated skylight polarization images covering a period of two months.
   Soumis le 26/04/2024 dans BMC Research Notes.

## Participation aux conférences et ateliers thématiques au cours de la période de thèse :

1. Léo Poughon, Jocelyn Monnoyer , Stefano Mafrica , Stéphane Viollet, Laetitia Pradere , et Julien Serres. Poster présenté au congrès GDR Biomim 2020 Nice

« Bio inspired use of skylight polarization to measure heading for automotive industry ». In : Workshop GDR 2088 BIOMIM 1st Annual Meeting, Nice, France, 13-14 Oct., pp. 87, 2020, https://hal.science/hal-04621135v1

2. Léo Poughon, Jocelyn Monnoyer, Stéphane Viollet, Vincent Aubry, Julien R Serres, Bio-inspired use of skylight polarization to measure heading for automotive industry, Poster présenté à la Journée des Doctorants du groupe Stellantis en présence du C.T.O. Ned Curic, 6 Octobre 2022, Vélizy, France
3. Léo Poughon, Vincent Aubry, Jocelyn Monnoyer, Stéphane Viollet, Julien R Serres. A stand-alone polarimetric acquisition system for producing a long-term skylight dataset. IEEE Sensors 2023, IEEE, Oct 2023, Vienna, Austria. ⟨10.1109/SENSORS56945.2023.10325176⟩. ⟨hal-04267766⟩ : https://hal.science/hal-04267766
4. Léo Poughon, Vincent Aubry, Jocelyn Monnoyer, Stéphane Viollet, Julien R Serres, Capteur de cap basé sur les variations de propriété d'une lame d'onde avec l'incidence, Poster aux 18èmes journées Imagerie Optique Non-Conventionnelle, Mar 2023, Paris, France, 2023.
5. Léo Poughon, Vincent Aubry, Jocelyn Monnoyer, Stéphane Viollet, Julien R Serres, Capteur de cap basé sur les variations de propriété d'une lame d'onde avec l'incidence, Poster à la 18ème Journée de l'École Doctorale Sciences du Mouvement Humain ED463 (JEDSMH 2023)
6. Léo Poughon, Vincent Aubry, Jocelyn Monnoyer, Stéphane Viollet, Julien R Serres, Capteur de cap basé sur les variations de propriété d'une lame d'onde avec l'incidence, Poster présenté à la Journée 2RM "Outils logiciels et matériels pour la recherche sur les véhicules terrestres autonomes", 5 octobre 2023, https://hal.science/hal-04621135v1
7. Léo Poughon, Vincent Aubry, Jocelyn Monnoyer, Stéphane Viollet, Julien R Serres, Capteur de cap basé sur les variations de propriété d'une lame d'onde avec l'incidence, Poster présenté aux Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique à Moliets-et-Mâa, 2023. ⟨hal-04521170⟩ : https://hal.science/hal-04521170/
8. Julien Serres, Antoine Moutenet, Léo Poughon, Thomas Kronland-Martinet, Stéphane Viollet. Tour d'horizon des capteurs polarimétriques dédiés à la robotique mobile. Poster aux 18èmes journées Imagerie Optique Non-Conventionnelle, Mar 2023, Paris, France. ⟨hal-04109732⟩ : https://hal.science/hal-04109732
9. Thomas Kronland-Martinet, Léo Poughon, Marcel Pasquinelli, David Duché, Julien R Serres, Stéphane Viollet, SkyPole : a geolocation algorithm based on polarized vision without using astronomical ephemerides. In Polarization : Measurement, Analysis, and Remote Sensing XVI (Vol. 13050, pp. 74-79). SPIE., Juin 2024, https://hal.science/hal-04607780/
10. Léo Poughon, Vincent Aubry, Jocelyn Monnoyer, Stéphane Viollet, Julien R Serres, Utilisation de la polarisation de la lumière du ciel pour l'obtention d'un cap en automobile, Présentation orale au workshop Capteurs visuels émergents et applications Journée inter GdR IASIS et Robotique, 4 juillet 2024, Paris, France

# Résumé

Les systèmes de localisation pour la navigation pour l'automobile sont généralement basés sur l'utilisation de *Global Navigation Satellite System* (GNSS) tels que le GPS américain, le Galileo européen ou encore le Glonass russe. Cependant, ces systèmes peuvent présenter des performances dégradées dans certaines situations ou être sujets à des brouillages. Par ailleurs, dans un contexte automobile, on cherche à développer des capteurs dont le coût est le plus faible possible.

Afin de répondre à cette problématique, le présent travail de thèse propose une solution originale, basée sur l'utilisation de la polarisation de la lumière du ciel pour obtenir les coordonnées du Soleil même lorsque celui-ci est partiellement occulté. Une fois sa position dans le ciel estimée, d'une part vis-à-vis du véhicule, et calculée d'autre part dans le repère local Est-Nord-Haut, on peut utiliser ces deux informations comme une référence absolue pour l'obtention d'un cap. Ce cap contribuera, par la suite, à déterminer l'attitude du véhicule, puis eventuellement la position grâce à des méthodes de navigation à l'estime.

Dans la nature, certains insectes tels que la fourmi *Cataglyphis bicolor* sont capables de naviguer de cette manière afin, par exemple, de pouvoir rentrer au nid sans utiliser de piste odorante. Ce comportement peut être imité sur des systèmes artificiels au travers d'une démarche de bio-inspiration. Des travaux précédents ont montré qu'on pouvait reproduire cette modalité, mais ces derniers présentaient des inconvénients de coût et de fiabilité empêchant alors une application directe en automobile.

Le manuscrit se divise en trois chapitres. Le premier présente des modèles et explications du phénomène que l'on cherche à mesurer (le patron de polarisation dans le ciel). Le second chapitre se concentre sur la réalisation d'une expérience de longue durée placée sur un toit permettant d'obtenir des données en conditions réelles. Enfin, le dernier chapitre présente un concept et une réalisation d'un capteur bas-coût original se basant sur les variations de retardance d'une lame d'onde avec l'incidence des rayons. Ces derniers travaux ont fait l'objet d'un brevet.

Mots clés : Navigation, Polarimétrie, Optique, Prototypage Rapide

# Abstract

Navigation location systems for automobiles are generally based on the use of *Global Navigation Satellite System* (GNSS) such as the American GPS, the European Galileo or the Russian Glonass. However, these systems can deliver degraded performance in certain situations, or be subject to interference. Furthermore, in an automotive context, the aim is to develop sensors with the lowest possible cost.

To address this issue, the present thesis proposes an original solution, based on the use of sky light polarization to obtain the sun's coordinates even when it is partially occulted. Once its position in the sky has been estimated, on the one hand with respect to the vehicle, and calculated on the other in the local East-North-High reference frame, these two pieces of information can be used as an absolute reference to obtain a heading. This heading can then be used to determine the vehicle's attitude, and eventually its position using dead reckoning navigation methods.

In nature, certain insects such as the *Cataglyphis bicolor* ant are able to navigate in this way, for example, to return to the nest without using a scent trail. This behavior can be imitated on artificial systems through a bio-inspired approach. Previous work has shown that this modality can be reproduced, but the disadvantages in terms of cost and reliability preclude direct automotive application.

The manuscript is divided into three chapters. The first presents models and explanations of the phenomenon to be measured (the polarization pattern in the sky). The second chapter focuses on the realization of a long-term rooftop experiment to obtain data under real conditions. Finally, the last chapter presents the concept and realization of an original low-cost sensor based on variations in the retardance of a waveplate with the incidence of rays. This latest work has been patented.

Keywords: Navigation, Polarimetry, Optics, Rapid Prototyping

*Est-il possible, — le fût-il, —*
*Ce fier exil, ce triste exil ?*

PAUL VERLAINE,
ROMANCES SANS PAROLES

# Remerciements

Un peu plus de cinq ans ont passé à l'heure où j'écris (et réécris !) ces lignes depuis cet après midi de Mars 2019 où j'ai reçu dans ma boite mail de l'Institut d'Optique une offre de thèse autour de la navigation utilisant la polarisation du ciel, et la première visite qui en a suivi sur le site de R&D PSA de Vélizy, puis à l'ancienne soufflerie du campus de Luminy. Me voilà maintenant à terminer ce manuscrit de thèse, et le passage habituel à toute thèse [1] qu'est celui des remerciements. Il serait difficile de mentionner tout le monde, aussi je m'excuse d'avance pour ceux que j'aurais éventuellement oublié, j'espère qu'ils me pardonneront.

Mes remerciements vont tout d'abord à Stéphane Viollet et à Julien Serres, pour leur encadrement m'ayant laissé une très grande liberté tout au long de ces années. Merci aussi Stéphane pour tes conseils musicaux (mes roulements ne sont toujours pas très nets, mais j'y travaille !), et Julien pour tes blagues et tes conseils de vie divers et variés.

Merci aussi à mes tuteurs industriels coté Stellantis (qui s'appelait encore *Groupe PSA* au début de ma thèse), Jocelyn Monnoyer pour son énergie, son enthousiasme et ses idées originales sur place au laboratoire. Merci aussi à Vincent Aubry qui a bien voulu prendre la relève à Vélizy malgré les turbulences de la réorganisation et de la crise sanitaire. On n'aura eu l'occasion de ne se voir physiquement qu'une seule fois finalement, dans ce sous-sol du B14 qui sert temporairement de laboratoire à l'équipe avant le déménagement à Poissy. Une pensée aussi pour les tuteurs initiaux du projet, Stefano Mafrica et Laetitia Pradere, depuis partis vers d'autres aventures professionnelles en interne ou en dehors du groupe.

Merci à Olivier Morel et François Goudail d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail malgré la période estivale qui s'annonce encore étouffante, ainsi que Samia Ainouz et Laurent Bigué pour avoir bien voulu l'examiner lors de la soutenance qui s'annonce.

Merci à Matthieu Mika de m'avoir permis de faire un essai de roulage avec une caméra polarimétrique sur la piste de la Ferté-Vidame, et à Thomas Sigoigne de m'y avoir conduit en voiture. J'ai aussi pu avoir des discussions très intéressantes avec Guillaume Point autour des capteurs dans l'automobile, Frédéric Guidez autour des vitrages, les équipes de la Chambre Aéroclimatique de Vélizy, et Franck Guillemard de manière plus générale.

1. et le plus lu...

Merci à Laurent Perrinet et Guillaume Masson pour avoir bien voulu que j'installe mon dispositif d'acquisition sur le toit de l'Institut des Neurosciences de la Timone, ainsi qu'aux étudiants et techniciens qui m'auront prêté ponctuellement des outils sur place ou un peu d'étain pour bricoler un fusible de fortune, et dont j'ignore le nom... Merci aussi au Centre de Calcul Intensif d'Aix-Marseille qui m'a permis d'accéder à ses ressources de calcul de haute performance pour traiter les différentes bases de données et d'entraîner les réseaux de neurones [2].

Le travail à Luminy a aussi été facilité par les conseils et la bonne ambiance *Biorob* créée par les différents membres de l'équipe, que ce soient les techniciens (Julien Dip' pour la méca, et Jean-Marc pour l'élec mais pas que), les autres permanents (Franck, Domi', Antoine Morice), les différents (post-)doctorants et CDD qui m'auront précédé et suivis, dont Corentin, Aimie, Emilie, Charles, Anna (merci pour ton bureau fantastique !), Xavier (*un p'tit café ?*), *Pepe*, Abdoullah, Sabrine, *Gaby*, Ilya et sa patte de l'expert (*la pêche ?*), Lucia & Christophe (merci pour les balades et les après midi jeux de société !), Laurence (grâce à qui j'ai eu l'opportunité d'intégrer l'Ensemble Musical du Sud !), Imane (encore désolé...), William qui aura pu rencontrer sa sympathique colloc' Lilla grâce à moi, Martin (*tsssssssccccccchhhhhhhhrrrrrrr*), Kéliane, ainsi que les stagiaires parmi lesquels Florentin (promis, je t'enverrai une photo de mon horloge Nixie quand je l'aurai terminée), Hiba (encore merci à toi et à Maxime Nourry-Martin pour l'hébergement d'urgence lors de la liquidation du club IOtaRIE... ), Benjamin (a.k.a. *Tintin* pour les intimes, compère éphémère de bennes et de bricolages du soir), ou encore Linda. Les services administratifs auront aussi été souvent arrangeants et efficaces, que ce soit Marie-Eve, Nathalie, Annie, Sylvie, Wilfried. Un merci aussi à *Abdou* de la déchetterie du campus et son rendez-vous incontournable du vendredi matin. Enfin, c'était chouette de co-encadrer ton stage Fauzi, et te souhaite bien du courage pour ta future thèse, même si ton sujet n'aura à priori rien à voir avec la polarisation.

Un merci tout particulier aux deux compères du *Pola Gang*, Antoine Moutenet et Thomas Kronland-Martinet, doctorants travaillant sur la même thématique pour d'autres applications, mais dont le soutien aura été bien au-delà de la polarisation. [3]

Merci à *Fred* Pous pour l'opportunité de donner des cours/TP de Traitement du Signal avec une liberté pédagogique totale et à mes étudiants qui auront au moins eu la joie de faire beaucoup de bruit avec leurs sifflets imprimés en 3D. Est-ce qu'ils auront vraiment tous parfaitement compris la Transformée de Fourier à Court Terme et toutes les conséquences d'un fenêtrage mal choisi grâce à ça, par contre... quoi qu'il en soit, c'était marrant à faire.

2. https ://mesocentre.univ-amu.fr/

3. A noter particulièrement, grâce à la rigueur d'Antoine, la figure 1.2 (promis, j'ai bien mis uniquement des *arctan2* dans mes calculs).

Ces travaux ont aussi été possibles grâce aux connaissances acquises lors de ma période comme apprenti à l'Institut d'Optique, tant à ses professeurs et personnels (parmi lesquels Julien Villemejane, Riad Haidar, Julien Moreau, Hervé Sauer qui aura su me conforter dans mon choix de faire une thèse un soir d'Avril 2019, Gaëlle Lucas-Leclin, Yvan Sortais (et plus tard sa sympathique doctorante), ainsi que François Balembois et Thierry Avignon qui ont bien voulu que je puisse sauver de la benne la "monture orange" chère à mon coeur qui a depuis fait Paris-Marseille, démontée en Twingo, en auto-train. Je vous l'avais bien dit que j'en ferais quelque chose un jour!), qu'aux étudiants que j'ai pu y rencontrer (dont Nicolas et ses blagues toujours du meilleur goût, Hector le compère du club IOtaRIE en compagnie de Baptiste, Sylvain et les innombrables heures à parler politique depuis la prépa même si on est rarement d'accord (encore que), Léonce même si je suis rigoureusement incapable de comprendre ce que tu fais en thèse, Matthieu, sans oublier mes binômes de TP Romain et Raphael qui ont dû supporter mes contributions pas toujours à l'heure aux innombrables comptes rendus). Malgré les heures qu'on aura tous pu passer à râler sur SupOp et le paysage déprimant des travaux du plateau de Saclay, c'étaient quand même de bonnes années. Merci aussi aux équipes chez HORIBA Jobin-Yvon (*HORIBA France* depuis) pour ce que vous m'avez appris pendant mon C.F.A., Olivier Acher comme maître d'apprentissage, Simon, Liêm, Brice, Géraldine. J'espère que tous les travaux autour de *Sniper* auxquels j'ai pu très modestement contribuer seront bientôt profitables! Merci enfin à Daniel Dolfi qui m'a dit quand je suis arrivé à l'Institut d'Optique quelque chose comme *vous allez voir, l'optique c'est chouette pour qui aime la technique*; des années après, je peux en dire que ce n'est pas toujours évident, mais confirmer que c'est souvent chouette.

Merci à Yoann Barszezak, aux Coppillie, à Thomas Daniel, à Anthony Astié pour les moments passés ensemble qui m'auront souvent changé les idées, depuis bien avant ces quatre ans d'ailleurs.

Un élément essentiel à la réussite de cette thèse et qui m'aura aidé à garder le moral est ma pratique musicale, d'abord à la Chorale d'AMU avant le premier confinement, puis comme percussionniste dans jusqu'à trois orchestres simultanés, à l'Ensemble Musical du Sud (c'était chouette d'y faire ta connaissance, Mariette), à l'Harmonie Municipale d'Aix-en-Provence (merci Marion pour les nombreux covoiturages!), et plus rarement à l'Orchestre Symphonique d'AMU. Un clin d'oeil aussi à Mélodie (et sa pote Joana) qui reste à ce jour ma spectatrice la plus assidue. Merci à Corinne Barrère pour m'avoir transmis le goût du chant choral, et à Raphaël de SupOp ainsi qu'un certain Julien Joubert[4] pour m'avoir donné envie de rejoindre l'harmonie des Orchestres du Plateau de Saclay il y a maintenant presque sept ans, ainsi qu'aux chefs qui m'ont fait confiance depuis et incité à progresser. Plus généralement, merci à tout un tas de compositeurs parmi lesquels Vivaldi, Bach, Satie, Grieg, Stravinsky, Ravel, Cesarini...

4. https://web.archive.org/web/20171010102827/http://www.julien-joubert.net/2017/07/13/jai-toujours-voulu-faire-partie-dune-harmonie/

et tout particulièrement Julien Joubert dont certaines des oeuvres m'accompagnent depuis longtemps. *La littérature, la poésie, ça sert à ça, non ?*[5]

Merci enfin à ma famille, et tout particulièrement ma soeur Suzie ainsi que mes parents Ludovic et Stéphanie, de m'avoir supporté (dans tous les sens du terme), et permis de parvenir jusqu'ici ; cela est aussi dû à la patience dont vous avez fait preuve et vos encouragements constants.

Marseille Luminy, Juillet 2024

À Thuy Duyen Pham (02/03/1997 - 13/12/2017),
À mon frère Rémi (16/04/1997 - 09/05/1997),

*Et vous vivez un peu puisque je vous survis.*

MARGUERITE YOURCENAR,
"LES CHARITÉS D'ALCIPPE"

5. https://youtu.be/f5RKetALuUk?si=jOUKnV92MPaipIRO&t=2517

# Table des matières

**Affidavit** 2

**Liste de publications et participation aux conférences** 3

**Résumé** 5

**Abstract** 6

**Remerciements** 7

**Table des matières** 11

**Table des figures** 14

**Introduction** 19
- Techniques d'estimation d'attitude et de position . . . 20
  - La navigation inertielle (IMU) . . . 20
  - La navigation par utilisation de repères connus . . . 21
  - Capteurs employés pour l'aide à la conduite (ADAS) . . . 23
- Une démarche bio-inspirée . . . 26
  - Les travaux pionniers de Karl Von Frisch . . . 27
  - Cas de la fourmi du désert . . . 27
- Problématiques industrielles . . . 29
  - Perturbations au bon fonctionnement des capteurs . . . 29
  - Un capteur automobile de cap bio-inspiré . . . 30
  - Contraintes de l'environnement automobile . . . 31
- Ordre de grandeur de la précision nécessaire pour un capteur de cap pour une application automobile . . . 33
- Les capteurs de cap basés sur la polarisation existant dans la littérature . . . 40
  - Capteurs Non imageants (à base de photodiodes) . . . 41
  - Capteurs Imageants (avec capteur matriciel) . . . 42

**1 Diffusion de la lumière du Soleil par l'atmosphère et mesures polarimétriques** 46
- Polarisation de la lumière . . . 47
  - Représentation physique . . . 47
  - Formalisme de Stokes-Mueller . . . 49
  - Le formalisme de Jones . . . 52
  - Quelques exemples de polarisations . . . 53

1.1 Modèle de diffusion de Rayleigh . . . 55
1.2 Modèle de diffusion de Berry . . . 58
1.3 Simulateur de lumière polarisée . . . 60
1.4 Invariances du DOP au cours de la journée et Pôle Point . . . 61
1.5 Conclusion . . . 61

**2 Mesure polarimétrique de longue durée du ciel 62**
2.1 Choix du site de mesure . . . 63
2.2 Conception de l'expérience . . . 63
2.2.1 Conception mécanique . . . 64
2.2.2 Conception électrique . . . 65
2.3 Traitement des données enregistrées . . . 66
2.3.1 Acquisition . . . 66
2.3.2 Distorsion du fisheye et sélection de la zone d'intérêt . . . 67
2.3.3 Calibrage de l'orientation de la caméra . . . 67
2.4 Visualisation des données . . . 76
2.4.1 Définition de l'angle de polarisation . . . 76
2.4.2 Annotation des données . . . 80
2.5 Conclusion . . . 81

**3 Capteur basé sur les variations de retardance d'une lame d'onde avec l'incidence 82**
3.1 Motivations et expression du besoin . . . 83
3.1.1 Structure du capteur . . . 85
3.2 Interférences en lumière polarisée . . . 85
3.2.1 Interférences en lumière polarisée monochromatique . . . 85
3.2.2 Variations avec la longueur d'onde . . . 87
3.3 La biréfringence et ses fondements théoriques . . . 92
3.3.1 Les Équations de Maxwell dans la Matière . . . 93
3.3.2 Propagation d'une onde plane dans un matériau biréfringent . . . 93
3.3.3 Le Tenseur de susceptibilité diélectrique . . . 94
3.4 Mesures ellipsométriques et détermination des indices optiques de la lame d'onde . . . 96
3.4.1 Mise en place d'une acquisition à l'ellipsomètre . . . 97
3.4.2 Extraction des matrices de Mueller et détermination des retardances mesurées . . . 98
3.4.3 Modèle physique de la lame d'onde . . . 103
3.4.4 Ecart d'azimut du polariseur vu avec l'incidence . . . 109
3.4.5 Figure d'interférences conoscopiques . . . 110
3.4.6 La partie amont du capteur : le patron de polarisation du ciel . . . 118
3.5 Essais expérimentaux . . . 119
3.5.1 Dispositif expérimental utilisé . . . 119
3.5.2 Procédure d'acquisition . . . 122
3.5.3 Prétraitement avant entraînement . . . 123

3.5.4 Recalage des deux caméras . . . . . 123
3.5.5 Traitement des images avec une méthode d'apprentissage . . . 125
3.6 Entraînement d'un réseau de neurones . . . . . 128
3.6.1 Architecture du réseau . . . . . 128
3.6.2 Résultats . . . . . 128

**Discussion** **131**
Pistes d'éventuelle intégration sur véhicule . . . . . 133
Influence du pare-brise sur la polarisation . . . . . 133
Essais en soufflerie aéroclimatique . . . . . 135
Impact de la présence de glace en amont du capteur . . . . . 136

**Perspectives** **138**

**Conclusion** **141**

**Bibliographie** **142**

# Table des figures


1 Différentes technologies de gyromètres. . . . . 21
2 Schéma d'un sextant au cours d'une mesure de hauteur du Soleil par rapport à l'horizon. Source : Wikimedia . . . . . 23
3 Un exemple d'ADAS présentes à bords d'un véhicule. [Vin20] . . . . . 24
4 Un exemple d'ADAS présentes à bord d'un véhicule. [Vin20] . . . . . 25
5 Une des expériences de Karl Von Frisch : Ruche d'observation, placée horizontalement dans une cabane en fibre de bois fermée (illustrée ici ouverte), avec un polariseur tournable au-dessus du plancher de danse ; 1, écran en papier noir ; 2, cadre en bois rond avec une vitre en verre dépoli. Traduit de [Fri13] . . . . . 27
6 Trajectoire d'une fourmi *Cataglyphis* de sa sortie du nid (point du bas) jusqu'à trouver de la nourriture (point du haut), puis son retour en ligne directe au nid. [WW90] . . . . . 28
7 Quelques méthodes permettant de tromper des capteurs automobiles [Xu+23]. . . . . 29
8 Mise en situation d'un capteur de cap bio-inspiré sur une Citroën Ami. 31
9 Vue d'artiste d'une situation d'attaque avec un pointeur laser éventuellement polarisé. Adapté d'après une image générée sur www.midjourneyai.ai 32
10 Comparaison entre exactitude et précision. Adapté de : Wikimedia . . . 34
11 Simulation numérique de l'erreur de positionnement latéral associée à une erreur angulaire d'écart-type 1° . . . . . 35
12 Histogramme de l'erreur de positionnement latéral associée à une erreur angulaire d'écart-type 1°. . . . . 36
13 Distribution théorique des erreurs de positionnement latéral associée à une erreur angulaire d'écart-type donné. . . . . 37
14 Abaque de distance longitudinale maximale pour avoir une erreur de positionnement à deux écarts-types inférieure à une valeur donnée, pour une erreur angulaire d'écart-type donnée. Vitesse de 50km/h, fréquence d'échantillonage 1Hz. . . . . 38
15 Erreur de positionnement latéral associée à une erreur angulaire d'écart-type et de biais variables (a), et histogrammes de l'erreur angulaire (b) 39
16 Une comparaison des avantages et inconvénients des solutions préexistantes dans le cadre d'une application automobile. . . . . 45

1.1 Ellipse de polarisation et sphère de Poincaré. . . . . 48

1.2 Calcul de l'Angle de Polarisation en fonction de $S_1$ et $S_2$ avec les fonctions np.arctan($S_2/S_1$), np.arctan2($S_2$,$S_1$) et np.angle(1j $\cdot S_2$+$S_1$). On voit que la première de ces trois fonctions n'est pas correcte pour $S_2 < 0$, malgré ce qu'on peut souvent trouver dans la littérature. . . . . 50
1.3 Un exemple de lame d'onde avec un retard de $\frac{\lambda}{2}$ soit une lame demi-onde. Source : Wikipedia . . . . . 52
1.4 Rayons transmis et diffusés par l'atmosphère. En pratique, le Soleil est à l'échelle bien plus loin et les rayons incidents sur l'atmosphère sont relativement parallèles. Traduit de [Bri87] . . . . . 56
1.5 Diffusion d'un rayon par une particule, et rayons obtenus en fonction de l'état de polarisation du rayon incident . . . . . 57
1.6 Intensité de diffusion en fonction de la longueur d'onde, et couleurs RVB "vues" associées en tenant compte des sensibilités spectrales de l'oeil. 59
1.7 Comparaison des modèles de Rayleigh et de Berry, en AOP et DOP. . . . 60

2.1 Caméra polarimétrique-couleur à division de plan focal (DoFP). . . . . 64
2.2 Une vue globale et un rendu mécanique du système d'acquisition . . . 65
2.3 La tension de la batterie au cours du second mois d'acquisition des données. À noter, la charge moins élevée les jours de mauvais temps. . 65
2.4 L'architecture électrique de l'expérience. . . . . 66
2.5 Calibrage de la caméra avec la toolbox Matlab. . . . . 68
2.6 Rotations entre le repère de la caméra et le repère de l'ENU. . . . . 68
2.7 Course du Soleil sur le capteur simulée avec projection des éphemerides via fisheye après rotation, et course réelle mesurée sur les images, pour une journée. . . . . 69
2.8 Course du Soleil détectée sur le capteur sur une journée, ainsi qu'une simulation de la course du Soleil avec l'orientation du capteur estimée. 70
2.9 Erreurs entre la course du Soleil détectée sur le capteur sur une journée, ainsi qu'une simulation de la course du Soleil avec l'orientation du capteur estimée. . . . . 71
2.10 Affichage de la zone limite pour laquelle les rayons incidents ont une élévation comprise entre 0 et 90° dans le repère ENU sur une image d'exemple, et recadrage d'image associé. . . . . 72
2.11 Orientations (azimut $\alpha$, angle zénithal $\theta$) associées aux pixels dans le repère ENU. . . . . 72
2.12 Les courses detectées et estimées du Soleil sur toute la base de données 73
2.13 Estimation de l'orientation de la caméra chaque jour de la base de données, avant correction de la dérive temporelle. . . . . 74
2.14 Estimation de l'orientation de la caméra chaque jour de la base de données, après correction de la dérive temporelle. . . . . 75
2.15 Une image de l'ensemble de données avec la visualisation AOP et DOP (en bas) comparée à la simulation de Rayleigh (en haut). . . . . 77
2.16 Les 16 sous images (4 couleurs x 4 polarisations) extraites de la caméra et leur position dans le tableau Numpy de l'image complète. . . . . 78

2.17 Observation d'une mire couleur avec des polariseurs pour la visualisation de la convention choisie pour l'angle de polarisation. . . . . 79
2.18 Routine Python d'annotation manuelle du degré de nuages de chaque image. A noter, sur l'image présentée, la présence d'un intrus dans le champ de vue! . . . . . 80
2.19 Résultats des annotations manuelles des conditions météo des images au cours du mois. [POU+24] . . . . . 81

3.1 Structure du capteur . . . . . 85
3.2 Six exemples de points de fonctionnement avec un AOP à 45°/135° et un retard à 900 nm, 1400 nm, 3000nm, en lumière blanche. . . . . 89
3.3 Echelle de teintes en fonction de l'AOP et du retard de la lame d'onde, pour DOP= 1. . . . . 91
3.4 Schéma et bandes transmises par étage d'un filtre réalisé par Lyot, d'après [Lyo44]. . . . . 92
3.5 Coupes des surfaces des indices optiques vus par une onde se propageant dans le matériau. Extrait de [Fin24]. . . . . 96
3.6 Surfaces d'ondes et polarisations associées dans un milieu biaxe, d'après [shu60]. . . . . 96
3.7 Caractérisation du comportement optique d'un matériau en fonction de l'azimut et de l'incidence à l'ellipsomètre. . . . . 98
3.8 Paramètres de la matrice de Mueller pour chaque longueur d'onde telle que fournie par l'ellipsomètre, pour une orientation d'azimut à 0° et en incidence normale . . . . . 99
3.9 Les matrices de Mueller des mesures effectuées à l'ellipsomètre pour diverses incidences d'angles, et un azimut mécanique de 0°. . . . . 100
3.10 Les matrices de Mueller des mesures effectuées à l'ellipsomètre pour diverses incidences d'angles, et un azimut mécanique de 90°. . . . . 101
3.11 Retardance estimée en fonction de la longueur d'onde, en incidence normale. . . . . 102
3.12 Retardances estimées en fonction de la longueur d'onde, pour toutes les incidences. . . . . 102
3.13 Tentative de modélisation infructueuse par une lame uniaxe. . . . . 103
3.14 Ajustement du modèle biaxe sur les données à 565 nm. . . . . 105
3.15 Erreur du modèle biaxe sur les données à 565 nm. . . . . 106
3.16 Règle de Biot-Fresnel pour la détermination de la direction des vibrations propres dans un milieu biréfringent. Extrait de [SM94] . . . . . 107
3.17 Orientation locale des axes neutres équivalents au niveau du capteur dans le champ, obtenus avec la loi de Fresnel-Biot. Les axes optiques se trouvent de part et d'autre au delà de l'image. . . . . 108
3.18 Variations des différences d'indices avec la longueur d'onde. . . . . 109
3.19 Erreur azimutale du polariseur avec l'incidence. . . . . 110
3.20 Azimut et incidence des rayons associés à chaque pixel de l'image après calibration et détourage. . . . . 110

3.21 Calibration de la distorsion et du centre optique du fisheye. . . . . 111
3.22 Simulation de la retardance et de la figure d'interférences en lumière monochromatique projetée sur le capteur. . . . . 111
3.23 Simulation en lumière blanche de la figure d'interférences en lumière monochromatique projetée sur le capteur pour 16 lames quart d'ondes, avec un analyseur à 0°, lames d'ondes à 45° et polariseur tournant devant l'ensemble à 0° (a), 45° (b), 90° (c) et, 135° (d). . . . . 112
3.24 Projection de la figure d'interférences en lumière blanche entre polariseurs croisés, pour 16 lames quart d'onde, sur un dôme translucide. . . 113
3.25 Projection de la figure d'interférences en lumière blanche entre polariseurs croisés, pour 16 lames quart d'onde, en immersion et avec une inclinaison adaptée pour observer un des des deux axes optiques. . . . 114
3.26 Utilisation d'un demi-spectromètre de fluorescence comme source accordable et d'une sphère intégrante pour observer les irisations présentes dans l'image pour plusieurs longueurs d'ondes. . . . . 115
3.27 Images mesurées avec une largeur de bande de 15nm. . . . . 116
3.28 Images simulées correspondantes. . . . . 117
3.29 Simulation des AOP et DOP fournis par un modèle de Rayleigh projeté dans le plan du capteur. . . . . 118
3.30 Un exemple obtenu en extérieur, avec des nuages . . . . . 119
3.31 Le couple de caméras avec et sans polariseur et lame d'onde. . . . . 120
3.32 Photographie de la monture orange servant à orienter le capteur de manière connue en extérieur. . . . . 121
3.33 L'interface du code utilisé pour gérer l'acquisition de données. . . . . 122
3.34 Les rotations entre les repères des caméras et le repère ENU en fonction de l'angle d'azimut de la monture orange. . . . . 124
3.35 Les positions XY du Soleil affichées sur chacune des deux caméras (point bleu pour celle de gauche sans lame d'onde, point rouge pour celle de droite avec), estimée pour deux positions de la monture par rotation inverse des éphémérides par le modèle estimé (a). On peut ensuite (b) afficher ces positions dans le plan XY pour une des caméras et choisir si les images seront utilisées pour l'entrainement (point rouge), la validation (point vert) ou le test (point bleu). . . . . 125
3.36 Un exemple d'image RGB une fois convertie en HSV. . . . . 126
3.37 Augmentation de données avec l'ajout d'ellipses. En ligne, le type (de 0 à 6 de haut en bas). En colonne, les jeux (RefRGB, PilRGB, RefHSV et PilHSV de gauche à droite). . . . . 127
3.38 Précision moyenne des réseaux lors de l'apprentissage. . . . . 129
3.39 Histogramme des erreurs sur le jeu de données de test, PilHSV (en bleu) versus RefHSV (en orange). . . . . 129
3.40 Répartitions statistiques de l'erreur en fonction du réseau et de son jeu de test, en fonction du type du jeu (a) et pour deux d'entre eux en fonction du type d'ellipses d'obstruction ajoutées (b). . . . . 130

3.41 Histogramme des erreurs sur le jeu de données de test et lois normales ajustées. . . . . 132
3.42 Répartitions statistiques de l'erreur en fonction de l'angle d'azimut du Soleil sur l'image. Après zoom sur la vue large (a), on observe beaucoup de valeurs aberrantes de part et d'autre de l'azimut zéro (b) et des erreurs de l'ordre du degré pour la plupart (c). . . . . 133
3.43 Essais envisagés en soufflerie . . . . . 136
3.44 Des cristaux de glace déposés sur une vitre, vus entre polariseurs croisés en lumière blanche . . . . . 137
3.45 Essais véhicule sur le site de la Ferté-Vidame . . . . . 140

# Introduction

## Sommaire


Techniques d'estimation d'attitude et de position . . . . . 20
La navigation inertielle (IMU) . . . . . 20
La navigation par utilisation de repères connus . . . . . 21
Capteurs employés pour l'aide à la conduite (ADAS) . . . . . 23
Une démarche bio-inspirée . . . . . 26
Les travaux pionniers de Karl Von Frisch . . . . . 27
Cas de la fourmi du désert . . . . . 27
Problématiques industrielles . . . . . 29
Perturbations au bon fonctionnement des capteurs . . . . . 29
Un capteur automobile de cap bio-inspiré . . . . . 30
Contraintes de l'environnement automobile . . . . . 31
Ordre de grandeur de la précision nécessaire pour un capteur de cap pour une application automobile . . . . . 33
Les capteurs de cap basés sur la polarisation existant dans la littérature . . . 40
Capteurs Non imageants (à base de photodiodes) . . . . . 41
Capteurs Imageants (avec capteur matriciel) . . . . . 42


Afin de pouvoir naviguer sur Terre (et donc de se rendre à un point donné), il faut être en mesure de planifier son chemin et donc d'estimer l'endroit de départ, ainsi qu'un cap à suivre afin de parvenir à destination. La localisation et l'estimation de son orientation (qu'on nomme estimation d'attitude ou pose) sont donc deux informations fondamentales permettant de se déplacer.

De la même manière que le laser a été inventé sans avoir d'application précise à résoudre [6], la démarche bio-inspirée de cette thèse consiste globalement à observer un phénomène présent dans la nature (en l'occurence le comportement et la faculté de certains animaux de naviguer en utilisant la lumière du ciel) pour trouver des applications pour l'automobile.

Ce chapitre d'introduction présente donc les capteurs de cap et de position existants dans l'industrie, certaines problématiques pouvant intéresser l'industriel *Stellantis* finançant cette thèse, puis abordera les différentes technologies de capteurs bio-inspirés pré-existants avec leurs avantages et inconvénients pour cette application. Enfin, on effectuera une présentation du formalisme de polarisation utilisé dans la suite de cette thèse.

6. Ainsi, peu de temps après la naissance du laser, l'assistant de Théodore Maiman, Irnée D'Haenens, plaisantait en appelant le laser "une solution en quête d'un problème". [Hec10]

# Techniques d'estimation d'attitude et de position

Différents moyens permettent de se repérer dans l'espace en extérieur, que ce soit en mesurant sa propre évolution par rapport à un état connu précédent (capteurs inertiels, odométrie), ou en mesurant la position et/ou l'orientation de repères connus par rapport à nous (satellites, balises, champ magnétique, astres...) En pratique, et si c'est possible, on cherche généralement à combiner de manière redondante plusieurs de ces techniques afin de mitiger leurs inconvénients respectifs et pour obtenir une plus grande fiabilité, exactitude et précision.

## La navigation inertielle (IMU)

La navigation inertielle est une technique permettant de déterminer le mouvement d'un véhicule par rapport à un point de départ en utilisant des capteurs d'accélération et de rotation dont on intégrera les données au cours du temps, indépendamment de repères extérieurs. Pour cela on utilise les données issues d'un ensemble d'accéléromètres et de gyromètres.

### Accéléromètres

Plusieurs technologies d'accéléromètres existent dans la littérature, mais elles sont généralement basées sur l'utilisation de la loi fondamentale de la dynamique : on utilise alors une masse "sismique" suspendue sur laquelle on applique une force de rappel, puis l'on vient mesurer cette force appliquée (ou de manière équivalente, le déplacement de la masse), pour en déduire l'accélération par la formule $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$.

En pratique, en robotique mobile, on utilisera généralement des accéléromètres à MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) qui ont l'avantage d'être très compacts, de coût modique et faciles à interfacer.

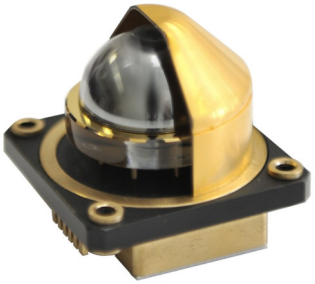
### Gyromètres

De la même manière que pour les accéléromètres, on peut obtenir facilement et à moindre coût des gyroscopes à base de MEMS ; cependant ceux-ci présentent une dérive qui devient trop importante une fois accumulée au cours du temps, les empêchant d'être utilisés sur des longues durées dans des applications de navigation inertielle sans subir une perte importante de précision.

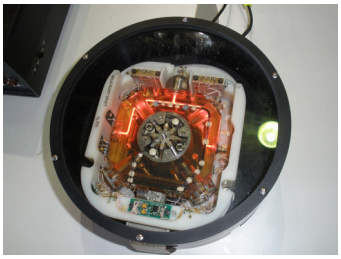
Il existe aussi d'autres technologies telles que le gyroscope mécanique, qui utilise une masse tournante tendant à garder un cap fixe (conservation du moment cinétique) (figure 1a), les gyroscopes à résonateur hémisphérique (HRG) sans pièces mobiles (figure 1b), qui fonctionnent en exploitant la stabilité directionnelle de la résonance induite électrostatiquement d'une coque hémisphérique solide (généralement en silice), ou encore les gyroscopes basés sur l'effet Sagnac, utilisant les interférences entre deux faisceaux optiques contra-rotatifs, que ce soit dans une cavité optique comme dans un gyrolaser (figure 1c), ou dans les gyroscopes à fibre optique. [Škr+20]



(a) Centrale inertielle basée sur des gyroscopes mécaniques du Missile S3, Musée de l'Air et de l'Espace, Paris Le Bourget (France). Source : Wikimedia



(b) Un gyroscope à résonateurs hémisphériques (HRG) produit par Sagem. Source : Wikimedia



(c) Un gyrolaser (RLG). Source : Wikimedia

FIGURE 1 – Différentes technologies de gyromètres.

## La navigation par utilisation de repères connus

Afin de pouvoir se repérer sur une carte, deux informations sont essentielles : la direction par rapport à l'observateur de repères connus (terrestres ou astronomiques), et éventuellement leur distance. Par exemple, un phare peut servir de point de référence visuel en mer, facilitant ainsi la détermination du cap, tandis que plusieurs d'entre eux peuvent permettre de déterminer la position.

### La boussole magnétique

La boussole magnétique est un instrument de navigation servant à mesurer l'orientation du champ magnétique local. On suppose que le champ magnétique local est uniquement composé du champ magnétique terrestre, généré par des mouvements de convection du noyau externe de la Terre, générant à leur tour des courants électriques, générant enfin un champ magnétique que l'on peut détecter à la surface de la Terre. Ce champ magnétique permet alors d'obtenir son cap relativement à une direction nommée Nord magnétique. Enfin, et s'il est nécessaire d'avoir une telle précision, on peut soustraire au cap obtenu ce qu'on nomme la déclinaison magnétique terrestre pour enfin connaître la direction du Nord géographique. Cette déclinaison dérive au cours du temps sans que cela soit facilement prévisible [Wit19], necessitant un recalage fréquent.

Une boussole magnétique est essentiellement constituée, pour les plus simples, d'une aiguille magnétisée qui s'aligne avec le champ magnétique terrestre, l'aiguille pointant alors vers le pôle Nord magnétique. Des magnétomètres électroniques, plus modernes et basés entre autres sur l'utilisation de l'effet Hall, existent aussi et sont couramment disponibles sur étagère. [Kha+21]

Son utilisation remonte à des siècles, elle aurait été développée en Chine il y a environ 2000 ans, puis importée en Europe au Moyen-Âge. [Uni] ; malgré son ancienneté, elle reste pertinente aujourd'hui dans de nombreuses applications de navigation.

La boussole magnétique peut être influencée par des éléments magnétiques dans son environnement, tels que des métaux ferreux (présence de masses métalliques) ou des champs magnétiques perturbateurs (par exemple, à proximité d'équipements industriels). Elle peut également être sensible à l'inclinaison magnétique à des latitudes élevées (proche des pôles).

### Les systèmes de positionnement par satellites (GNSS)

Les années 90 ont vu l'arrivée pour les civils du système de géopositionnement par satellite américain (GPS). Par la suite, plusieurs autres puissances économiques ont développé et mis en fonction leur propre système de localisation par satellite, telles que la Russie avec GLONASS (entrée en fonction en 1996), ainsi que l'Union Européenne avec le système Galileo (2016), la Chine avec le système Beidou (2003), et enfin le Japon (QZSS, 2018) et l'Inde (IRNSS, 2014) développant chacun de leur côté des systèmes assurant une couverture uniquement régionale.

Ces systèmes permettent de se localiser avec une précision de l'ordre du mètre à l'aide d'une constellation d'une trentaine de satellites artificiels, en calculant la distance entre le récepteur et plusieurs satellites en vue. On obtient alors l'heure et sa position par trilatération.

### La navigation astronomique

La navigation astronomique se caractérise par la détermination de sa position à l'aide de l'observation des astres.

Dans la navigation maritime, l'utilisation d'un sextant (figure 2) permet de mesurer la direction et la hauteur de ces astres (angle par rapport à l'horizon). On peut, par exemple dans le cas du Soleil, obtenir la latitude de l'observateur de cette manière, et la combinaison des éphémérides et d'une mesure précise de l'heure permet par ailleurs d'obtenir la longitude.

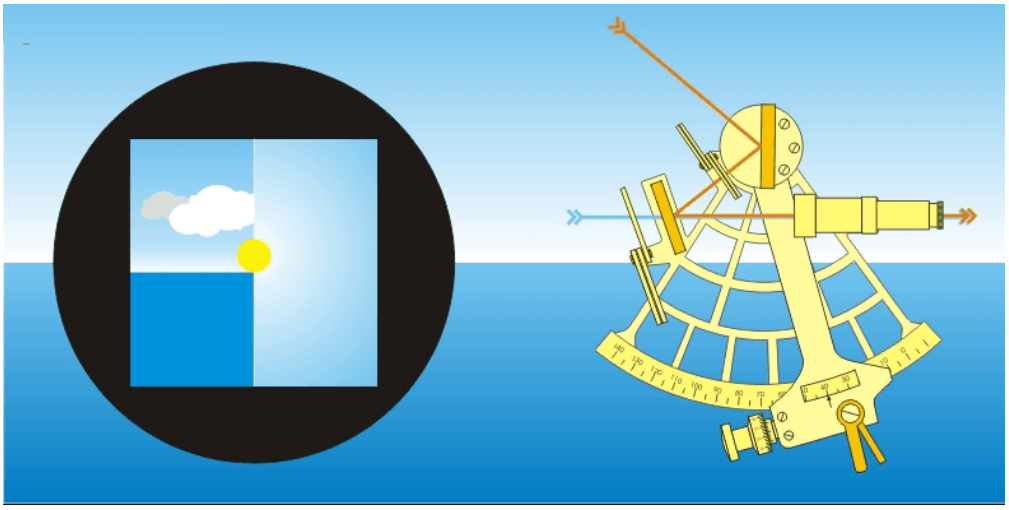


FIGURE 2 – Schéma d'un sextant au cours d'une mesure de hauteur du Soleil par rapport à l'horizon. Source : Wikimedia

En navigation spatiale, les engins spatiaux sont souvent équipés d'un viseur d'étoiles qui va comparer les étoiles détectées avec sa base de données pour estimer l'attitude du satellite.

### L'utilisation de balises radio

Le développement de la radio a permis dans la première moitié du XXe siècle, l'arrivée des premiers systèmes de radionavigation (en utilisant la mesure des angles d'arrivée des signaux radio, technique portant le nom de *radiogoniométrie*). Ceux-ci se sont diversifiés et développés, particulièrement au profit de la navigation aérienne, notamment pour les approches d'aérodromes et le guidage à l'atterrissage. On peut aussi citer les balises Ultra Wide Band (UWB) pour la localisation en intérieur.

Par ailleurs, pour permettre un meilleure précision du GNSS, on peut utiliser le système de correction Real Time Kinematic (RTK) qui permet de récupérer via ondes radio la dérive d'une balise fixe située à proximité afin de corriger sa propre position et d'atteindre une précision spatiale horizontale de l'ordre de quelques centimètres. Dans un contexte automobile, en plus de l'information de localisation, on ajoute aussi d'autres capteurs permettant de se renseigner sur l'environnement local pour aider à la navigation.

## Capteurs employés pour l'aide à la conduite (ADAS)

Afin de pouvoir aider le conducteur dans ses différentes taches, les véhicules modernes permettent différentes assistances (ADAS, de l'anglais : Advanced Driver-Assistance Systems), telles que la détection de l'environnement via des aides à la vision nocturne, la reconnaissance automatisée des panneaux de signalisation, le régulateur de vitesse avec freinage automatique, le pilotage de certains systèmes de

sécurité comme les freins d'urgence, l'aide au stationnement via l'assistance à la marche arrière, ou encore la détection automatique des changements de voie.

Diverses technologies de capteurs sont utilisées (figure 3), telles que le radar, les émetteur-récepteurs ultrasons, les caméras, et dans certains cas, des systèmes Lidar plus ou moins sophistiqués. Chacun de ces capteurs possède ses avantages et inconvénients, mais c'est leur interaction qui permet de répondre aux besoins d'assistance.

[Vin20] [BMW]

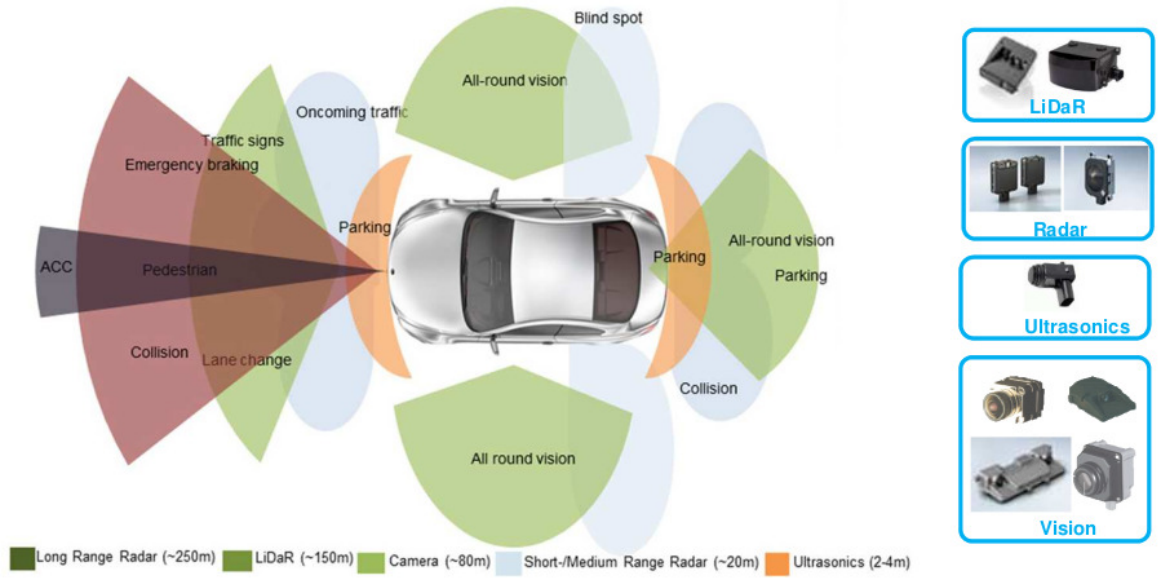



FIGURE 3 – Un exemple d'ADAS présentes à bords d'un véhicule. [Vin20]

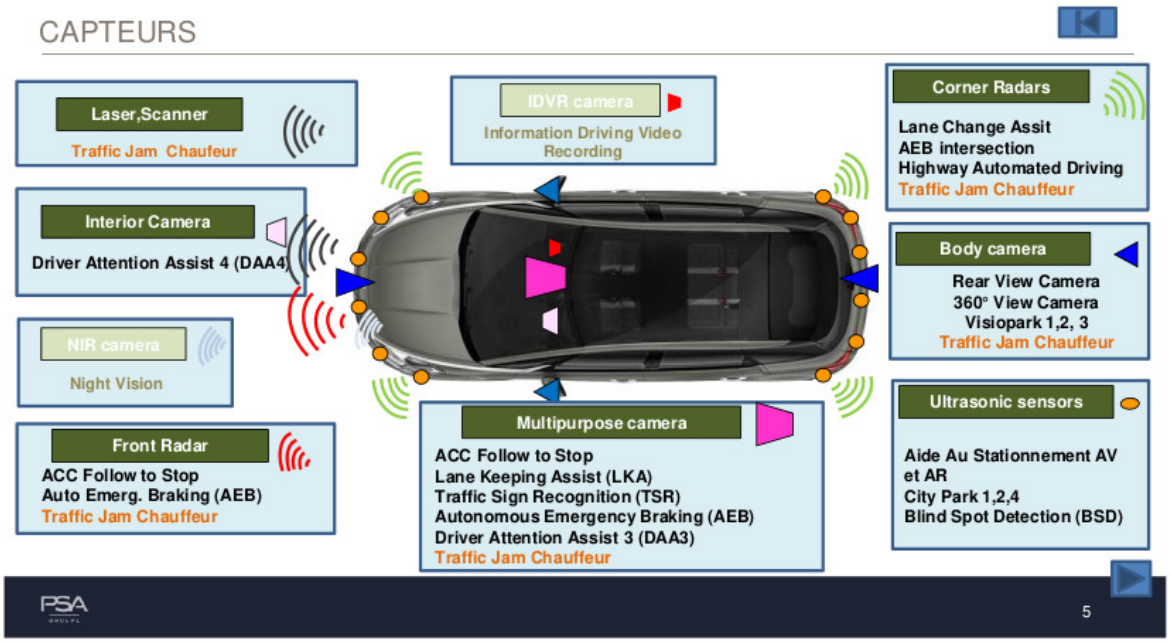



FIGURE 4 – Un exemple d'ADAS présentes à bord d'un véhicule. [Vin20]

### Ultrasons

Les capteurs à ultrasons mesurent le temps d'aller-retour d'une onde sonore pour mesurer la distance d'un obstacle proche. Ils sont utiles dans les fonctions de stationnement, offrant une mesure de distance précise allant au maximum jusqu'à quelques mètres. Ils fonctionnent aussi dans des conditions difficiles, telles que le brouillard et l'obscurité.

### Caméras

Les caméras, dotées d'une résolution élevée, permettent de faire de la classification d'objets : grâce à une reconnaissance des panneaux de signalisation ou d'eventuels obstacles, il est possible d'afficher des informations sur le tableau de bord pour attirer l'attention du conducteur. Il est aussi possible d'aider le conducteur à se garer (caméra de recul et caméras panoramiques affichant les alentours de la voiture), de faire de la detection de franchissement de ligne pour alerter de conducteur en cas d'endormissement, ou encore de reconnaitre le type d'environnement la nuit et les autres véhicules pour adapter l'éclairage des feux de route adaptatifs.

### Radar

Le radar, traditionnellement associé à l'aviation mais intégré depuis deux décennies à l'ingénierie automobile, excelle dans la mesure des vitesses et des distances, offrant une précision même lors de conditions météorologiques difficiles. Les radars à courte

et longue portées répondent à des besoins spécifiques, de l'assistant de changement de voie au régulateur de vitesse adaptatif.

### Lidar

Le lidar, encore en phase d'intégration dans les modèles de véhicules, utilise des impulsions lumineuses pour mesurer les distances et pour les plus avancés générer une carte 3D de l'environnement. Il possède l'avantage d'être fonctionnel y compris la nuit puisqu'utilisant sa propre source laser pour éclairer la scène.

Nous avons donc pu lister quelques uns des capteurs artificiels permettant d'obtenir des informations utiles à la navigation. Cependant, ce problème a déja été résolu dans la biosphère, dans laquelle certains animaux sont capables de naviguer de manière autonome. Nous allons donc, par la suite, chercher à nous en inspirer.

## Une démarche bio-inspirée

Le présent travail de thèse s'inscrit dans une démarche plus vaste menée par l'équipe *Systèmes Bio-inspirés* (SBI) de l'Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey (C.N.R.S./ Aix-Marseille Université, U.M.R. 7287), qui propose des avancées scientifiques basées sur la compréhension des systèmes vivants en vue de générer des innovations en ingénierie, particulièrement en robotique.

Une gamme étendue de sujets est étudiée au laboratoire avec une approche bio-mimétique : le vol des insectes [VMV23], la création de méthodes de conception mécanique en s'inspirant de l'ostéogenèse ou des articulations flexibles [Aud+18] [Saa+17], les actionneurs biologiques ou encore les processus perpétuels et cognitifs chez les animaux [Gat+23].

Les applications de cette recherche, en plus de contribuer à la compréhension de la nature, permettent de proposer des solutions frugales, durables et résilientes aux problèmes d'ingénierie actuels : la conception de structures légères, d'articulations flexibles, d'actionneurs multi-échelles ; ou le traitement des troubles sensorimoteurs par des prothèses robotiques.

Dans le cas de l'axe Biorobotique, (et en ce qui concerne le présent manuscrit), on développe en particulier de nouveaux capteurs pour la robotique, dans le cadre de travaux autour de la navigation sans GPS et la locomotion bio-inspirées [ISM].

Dans la nature, il a été démontré que les animaux utilisent certaines stratégies pour s'orienter et naviguer, nombre d'entre eux se basant sur l'utilisation de la polarisation de la lumière du ciel. [Hor14] [BG].

Deux exemples marquants seront mentionnés ici : les premières recherches sur la navigation des abeilles, puis le cas emblématique de la fourmi du désert.

## Les travaux pionniers de Karl von Frisch

Les travaux de Karl von Frisch [Fri13] sur la polarisation et les abeilles ont permis de mettre en évidence la communication entre abeilles via leur danse, pour indiquer la direction et la distance des sources de nourriture.

Par exemple, dans une de ses expériences en septembre 1949, par ciel couvert, les abeilles de la ruche qu'il étudiait effectuaient des dances désordonnées dans une boite en bois attenante à la ruche. Ensuite, il ajoutait un polariseur au dessus de la ruche : à ce moment là, les dances devenaient ordonnées ; par ailleurs, par temps clair, en faisant tourner le polariseur pour décaler l'angle de polarisation alors vu par les abeilles par rapport à celui qu'elles auraient du voir dans le ciel, les axes des danses se décalaient d'autant.

Parfois le contraste du motif de polarisation devenait trop faible. Afin d'être indépendant de cela, en septembre 1957 sous un ciel couvert de nuages, von Frisch a fourni, au lieu de la lumière polarisée artificiellement à partir des nuages, de la lumière polarisée d'une lampe suspendue dans une boite fermée au-dessus de la ruche horizontale pour effectuer ses expériences. (Figure 5)

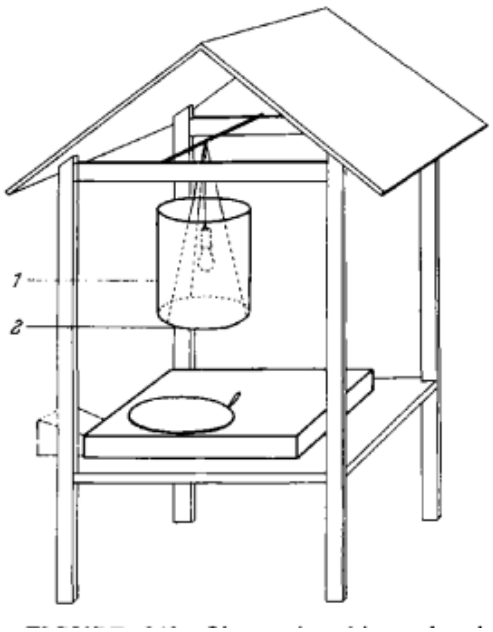



FIGURE 5 – Une des expériences de Karl Von Frisch : Ruche d'observation, placée horizontalement dans une cabane en fibre de bois fermée (illustrée ici ouverte), avec un polariseur tournable au-dessus du plancher de danse ; 1, écran en papier noir ; 2, cadre en bois rond avec une vitre en verre dépoli. Traduit de [Fri13]

## Cas de la fourmi du désert

L'un des exemples d'insectes navigateurs les plus remarquables est la fourmi du désert appartenant au genre Cataglyphis, rapporté par Wehner en 1990 [WW90] et présenté par la figure 6 (texte adapté [WW86] [WS81] ).

Dans cet exemple, une exploratrice de l'espèce *Cataglyphis Fortis* - une espèce qui habite les territoires complètement plats et dépourvus de caractéristiques des salines sahariennes - a quitté son nid souterrain en suivant un chemin tortueux sur une distance de 132 m à la recherche de nourriture. Au cours de cette recherche, elle a parcouru une distance totale d'environ 592 m jusqu'à ce qu'elle trouve une proie. Elle l'a saisie avec ses mandibules, s'est retournée, et a couru plus ou moins directement

vers le point de départ de son périple de recherche, l'entrée du nid. On remarque alors qu'elle n'a pas repris son chemin initial. Au lieu de cela, elle a suivi un chemin de retour étonnamment rectiligne, long de 140,5 m, et donc seulement 1,06 fois plus long que la distance linéaire entre le site de capture et l'entrée du nid. Pendant l'ensemble de son trajet de 25,3 minutes, la fourmi a maintenu une vitesse moyenne de 0,5 m/s.

Ses trajectoires ont été enregistrées en utilisant un réseau de lignes peintes sur le terrain plat à des intervalles de 5 m, et en suivant les mouvements de la fourmi sur des feuilles de données avec une réduction de grille de 100 :1. De plus, des intervalles d'une minute, signalés par les bips d'une minuterie, ont été marqués sur les traces des trajets de recherche de nourriture et de retour de la fourmi.

Ce qui est particulièrement remarquable, c'est que *Cataglyphis Fortis* accomplit cette tâche de navigation de retour sans recourir à une quelconque information cartographique basée sur des repères. Pendant sa recherche de nourriture, elle ne prend pas de repères positionnels sur le terrain et ne revient pas plus tard au point de départ en se référant au terrain. Au contraire, elle garde une trace de sa position actuelle par rapport à son nid en utilisant la navigation à l'estime. Cela peut facilement être démontré en déplaçant la fourmi au début de sa course de retour sur une courte distance, par exemple, 10 m. Lors de sa libération, la fourmi suivait inévitablement son vecteur de retour en courant droit dans la direction préalable au déplacement sur une distance égale à la distance de pré-déplacement vers le nid. Finalement, arrivée à la position fictive du nid, elle interrompait sa course rectiligne et commençait une recherche systématique de l'entrée du nid.

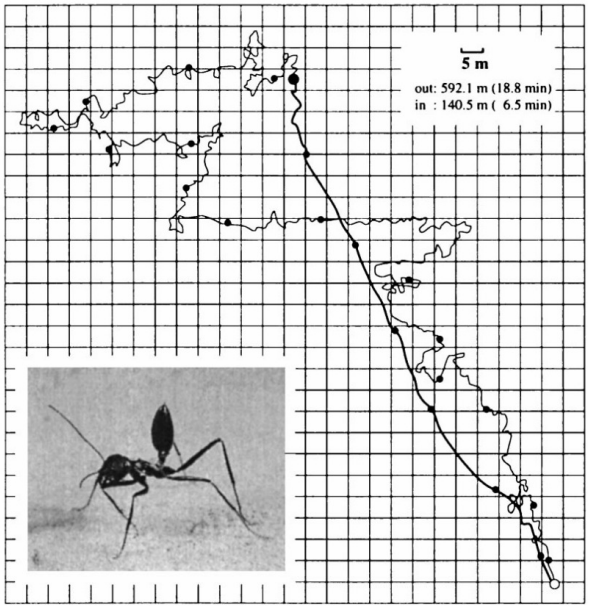



FIGURE 6 – Trajectoire d'une fourmi *Cataglyphis* de sa sortie du nid (point du bas) jusqu'à trouver de la nourriture (point du haut), puis son retour en ligne directe au nid. [WW90]

Ces mécanismes de navigation par les insectes étant maintenant portés à notre connaissance, nous pouvons maintenant nous intéresser à des problématiques que pourrait rencontrer un industriel automobile et voir comment s'inspirer des millions d'années d'évolution.

# Problématiques industrielles

## Perturbations au bon fonctionnement des capteurs

Plusieurs éléments peuvent venir impacter la performance de chacun des capteurs pour la navigation, de manière mal intentionnée ou non. Diverses méthodes existent pour tromper un capteur, notamment celles listées dans [Xu+23] (figure 7).

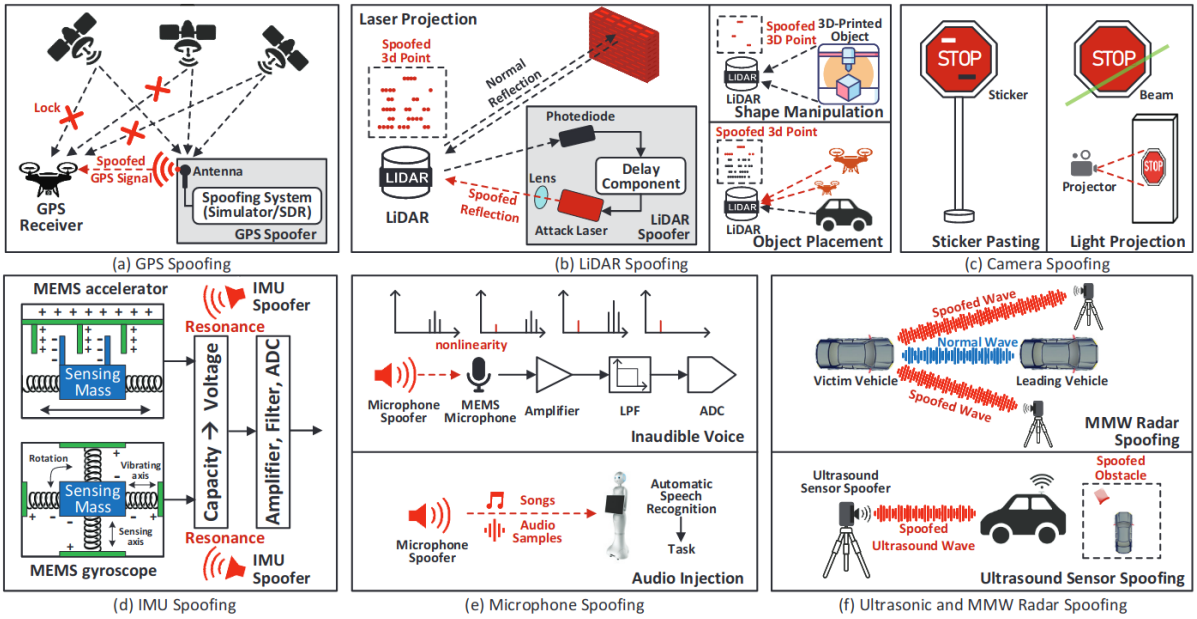



FIGURE 7 – Quelques méthodes permettant de tromper des capteurs automobiles [Xu+23].

### Perturbations GNSS

On peut imaginer un monde où les GNSS seraient inopérants à la suite d'une catastrophe (perturbations électromagnétiques dues à l'activité solaire, incidents nucléaires, disruption des satellites suite à une attaque militaire...), ce qui causerait une désorganisation et aurait un impact économique lourd. A titre d'exemple, deux rapports de l'agence spatiale du Royaume-Uni [Govb] [Gova] estiment pour ce pays entier à 7,6 milliards de livres sterling (soit 9 milliards d'euros) une perte pendant sept jours des systèmes GNSS, tandis qu'une analyse distincte estimait qu'une panne de 24 heures créerait une perte économique estimée de 1,4 milliards de livres sterling (soit 1,6 milliards d'euros) au cours de cette période.

Les systèmes GNSS peuvent être victimes de brouillages ou de falsifications. Ainsi, le "spoofing" consiste à émettre des signaux falsifiés, induisant ainsi en erreur les récepteurs à proximité. Par exemple, une entreprise a réussi à détourner une automobile Tesla en lui envoyant de faux signaux et en la faisant sortir à une autre sortie d'autoroute que celle prévue initialement. [Reg19]

On peut aussi citer le cas de chercheurs ayant montré des cas de *spoofing* dans la vraie vie, où des personnalités du gouvernement russe seraient protégés par des "bulles" dans lesquelles un récepteur GNSS se retrouverait à estimer sa position à un aéroport prédéfini, ce qui permettrait d'empêcher le décollage dans la zone de drones commerciaux, habituellement configurés pour ne pas voler à proximité d'aéroports [C4A19].

## Un capteur automobile de cap bio-inspiré

Afin de pouvoir robustifier la mesure de localisation, on se propose dans ce manuscript, de se baser sur la polarisation de la lumière du ciel tout comme pourrait faire un insecte pour obtenir un cap. Nous pourrons alors monter sur une automobile (figure 8) un capteur optique sensible à la polarisation, celle-ci ayant un motif bien particulier que nous expliciterons par la suite. Cela permettra alors d'estimer la position du Soleil par rapport au vehicule d'une part, et on pourra obtenir la position du Soleil dans le repère Est-Nord-Haut local grâce aux éphémérides d'autre part. La comparaison de ces deux informations pourra alors nous aider à savoir comment le véhicule est orienté par rapport au Nord géographique (mode boussole) ou dans certains cas à obtenir une localisation sur terre (mode sextant).

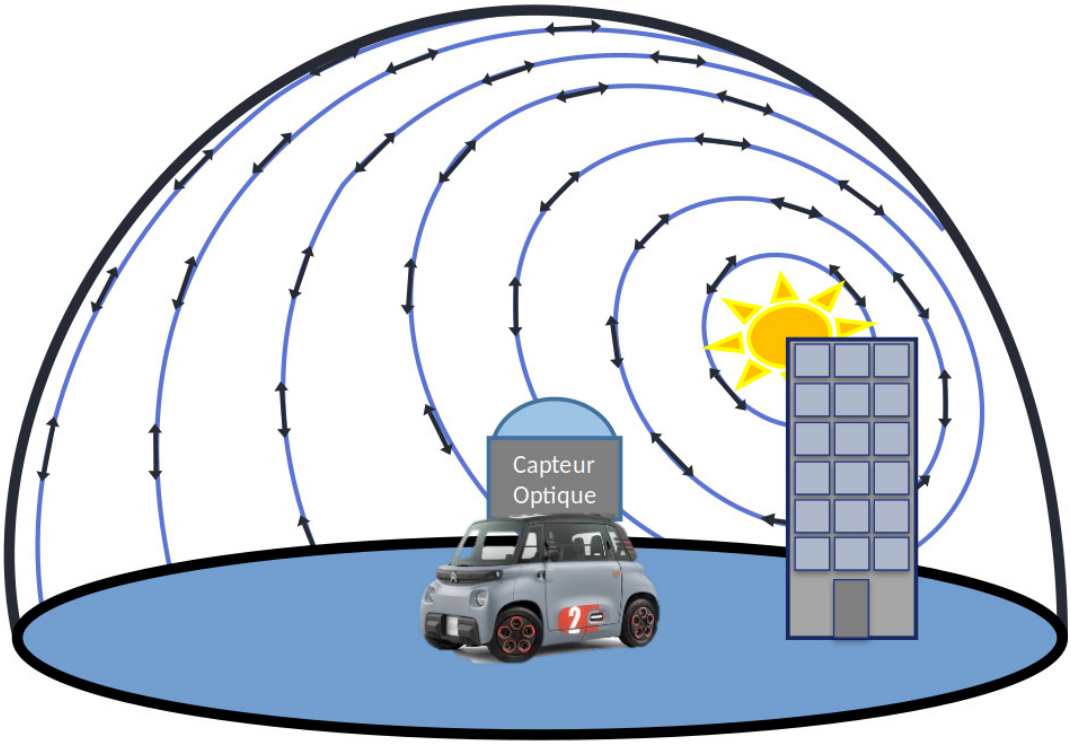



FIGURE 8 – Mise en situation d'un capteur de cap bio-inspiré sur une Citroën Ami.

## Contraintes de l'environnement automobile

Afin de répondre au mieux aux contraintes associées au milieu automobile, nous avons listé quelques critères auxquels il serait nécessaire pour un capteur de cap de répondre afin de donner satisfaction :

### Mesure instantanée

Le capteur étant appelé à être embarqué sur un véhicule roulant, il est nécessaire d'avoir un temps de mesure quasi instantané (ou du moins très faible devant la vitesse de rotation en lacet/roulis/tangage pour ne pas avoir de décalage de grandeur mesurée (intensités lumineuses) pendant la mesure). En pratique, les vitesses angulaires maximales sont de l'ordre de quelques degrés par seconde, soit un temps d'acquisition maximal de l'ordre de la centaine de millisecondes.

### Robustesse à une occultation proche

En pratique, certaines zones spatiales du capteur peuvent se retrouver occultées (présence de boue sur le pare-brise par exemple). Il faut donc que le capteur soit au moins en mesure de détecter cette présence et/ou de ne pas ou peu être perturbé par une occulation partielle liée à des objets à proximité.

### Robustesse à une occultation lointaine

De la même manière, lorsque le champ de vue du capteur sur le patron de polarisation est en partie masqué (immeubles, arbres, nuages...), on veut être dans la mesure du possible capables d'obtenir quand même un cap.

### Robustesse à une source ponctuelle polarisée différemment du ciel

On pourrait imaginer un attaquant qui viendrait par exemple illuminer à distance le capteur avec une source polarisée forte (par exemple, un pointeur laser surmonté d'un polariseur linéaire 9). Dans ce cas, on veut à minima être capable de détecter qu'il y a une attaque et/ou ne pas se laisser perturber.



FIGURE 9 – Vue d'artiste d'une situation d'attaque avec un pointeur laser éventuellement polarisé. Adapté d'après une image générée sur www.midjourneyai.ai

### Coût faible

Dans une perspective d'intégration automobile, c'est-à-dire dans un marché de masse à plusieurs dizaines/centaines de milliers d'unités, il est nécessaire du point de vue de l'industriel de disposer d'une solution ayant un coût marginal le plus réduit possible afin de pouvoir envisager une application industrielle.

### Encombrement faible

Un véhicule étant déjà équipé d'un certain nombre de capteurs, et dans un souci d'intégration et de style, il faudra enfin que le capteur aie un encombrement le plus réduit possible.

# Ordre de grandeur de la précision nécessaire pour un capteur de cap pour une application automobile

Un système effectuant de la navigation à l'estime se base sur une position connue précédemment, et l'intégration au cours du temps des déplacements successifs estimés, pour estimer la position courante. Les déplacements successifs estimés sont obtenus en mesurant pendant un laps de temps donné le cap moyen ainsi que la vitesse longitudinale (dans le cas d'un véhicule, on peut par exemple compter le nombre de tours de roues pour obtenir cette information, ou utiliser un capteur de flux optique) [MSR16] [Dup].

Afin de mieux se rendre compte des ordres de grandeur en jeu, on va maintenant imaginer un véhicule se déplaçant en ligne droite, à une vitesse longitudinale $v$ et une période d'échantillonage $t_{step}$.On va alors regarder l'impact au cours du temps d'une erreur du capteur de cap sur l'erreur latérale en position $D_{lat}$, au premier ordre.

Pour les simulations numériques qui suivront, on prendra une vitesse de $50 km/h$, ce qui correspond à la vitesse d'un véhicule en agglomération, et un pas $t_{step} = 1s$ ce qui correspond à la période d'échantillonage de certains capteurs disponibles dans la littérature.

On peut définir l'erreur d'un capteur (en supposant qu'elle suive une loi normale ayant une moyenne donnée et un écart-type $\sigma_{angle}$) à l'aide de deux termes (figure 10) que sont la précision (aussi nommée fidélité, grandeur correspondant à l'écart type de la loi normale associée) et la justesse (parfois nommée exactitude ou biais, correspondant à la moyenne de la loi normale associée).

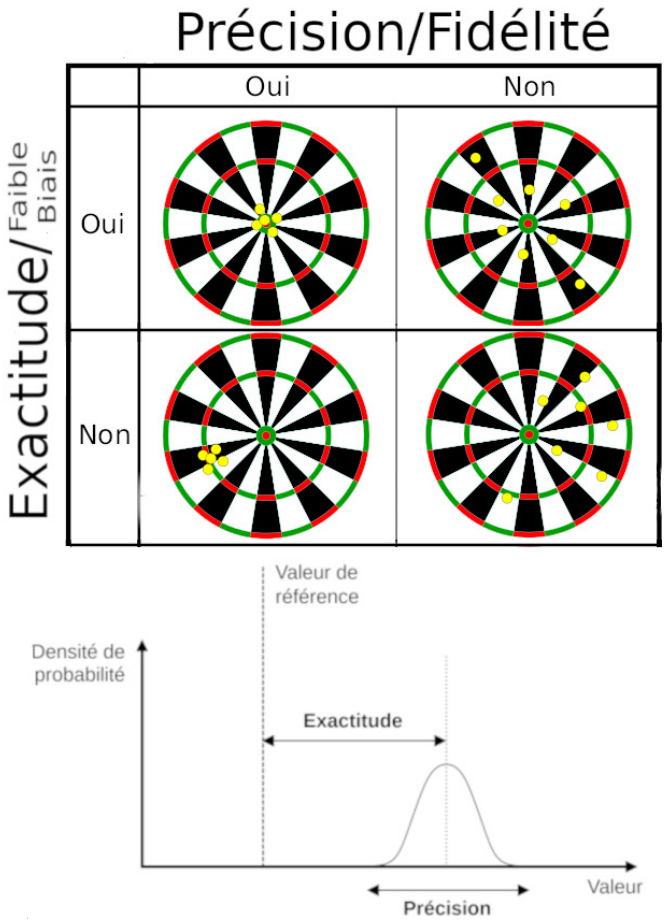



FIGURE 10 – Comparaison entre exactitude et précision. Adapté de : Wikimedia

### Cas d'un capteur ayant une erreur suivant une loi normale, sans biais

On peut simuler numériquement pour un certain nombre de lancers le comportement qu'aurait l'écart latéral au cours du temps (donc pour une distance longitudinale parcourue $D_{long}$ après $N_{pas}$ d'échantillonnages) pour une erreur angulaire aléatoire ayant un écart-type donné $\sigma_{angle}$ et un biais nul.

Voici par exemple, toujours avec $v = 50km/h$ soit $13,9m/s$ et $t_{step} = 1s$, un exemple (figure 11) de la répartition pour 100 trajectoires estimées avec un capteur de cap présentant une erreur normale d'écart-type de 1° :

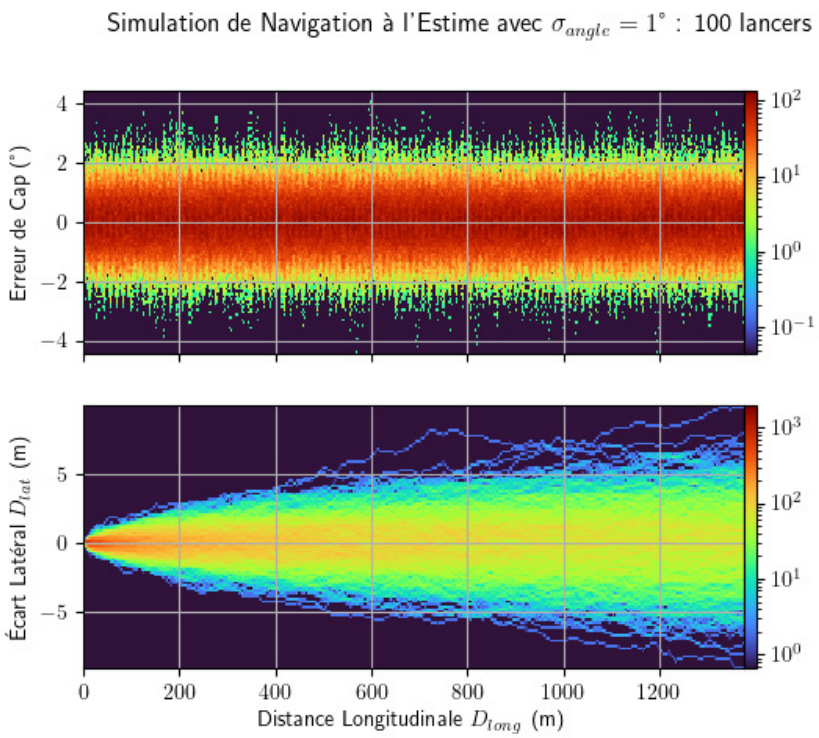



FIGURE 11 – Simulation numérique de l'erreur de positionnement latéral associée à une erreur angulaire d'écart-type 1°

On se retrouve alors dans le cas d'une marche aléatoire gaussienne [wik24] dont on peut prédire la valeur théorique de l'écart-type $\sigma_{lat}$ de la loi normale associée aux erreurs latérales :

$$\sigma_{lat} = \sqrt{N_{pas}} \cdot v \cdot t_{step} \cdot \sigma_{angle} \tag{0.1}$$

ou encore

$$\sigma_{lat} = \sqrt{D_{long}} \cdot \sqrt{\frac{v}{f_e}} \cdot \sigma_{angle} \tag{0.2}$$

On peut essayer de lancer expérimentalement un grand nombre de lancers (ici 10 000) avec les mêmes paramètres (figure 12) pour s'assurer que la distribution est bien celle attendue :

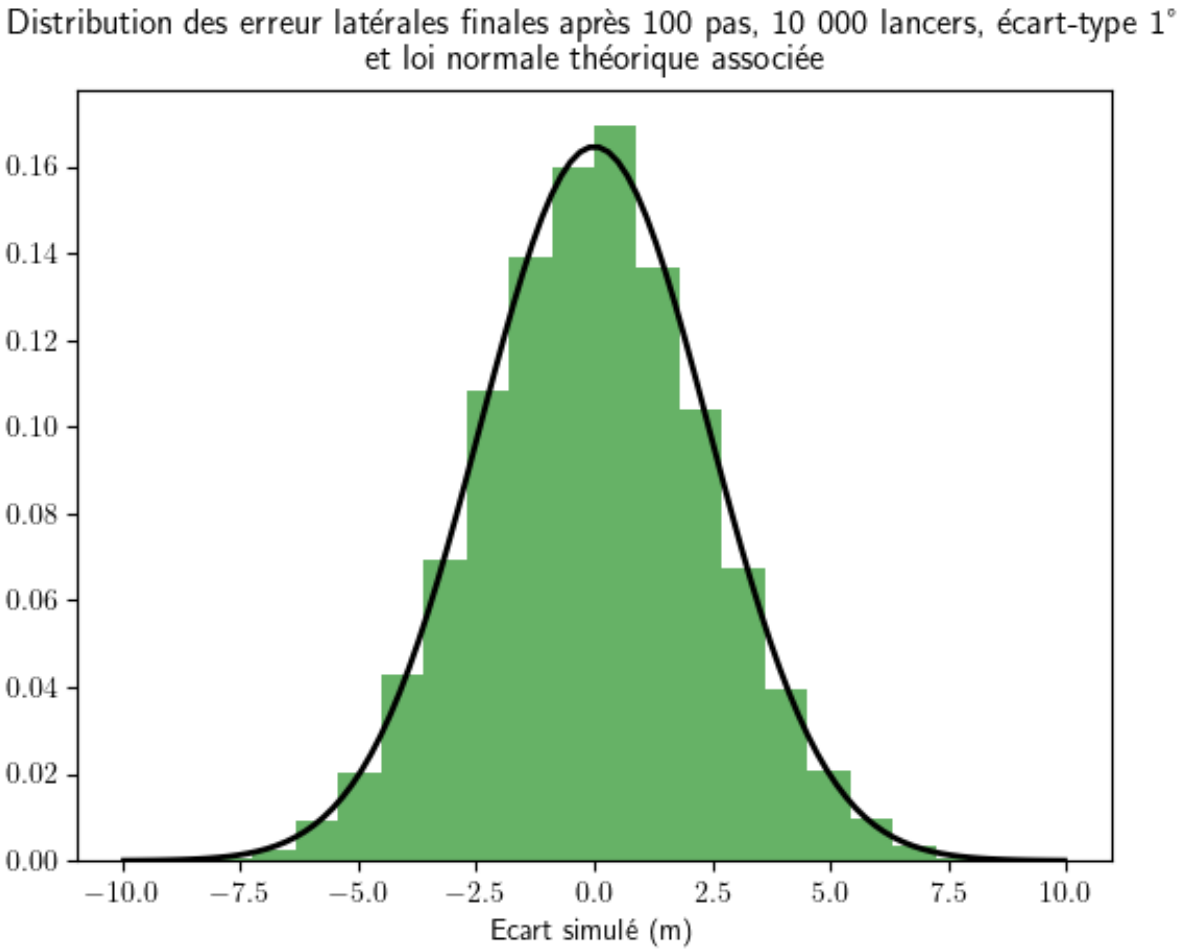
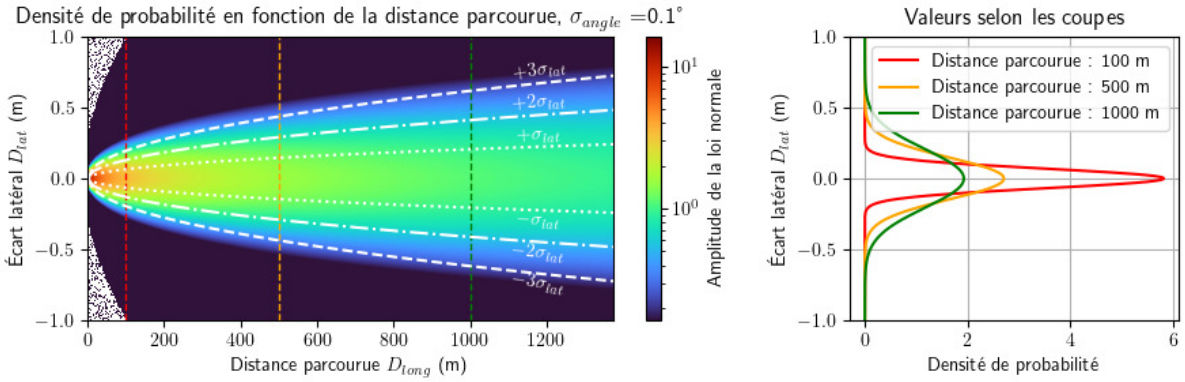
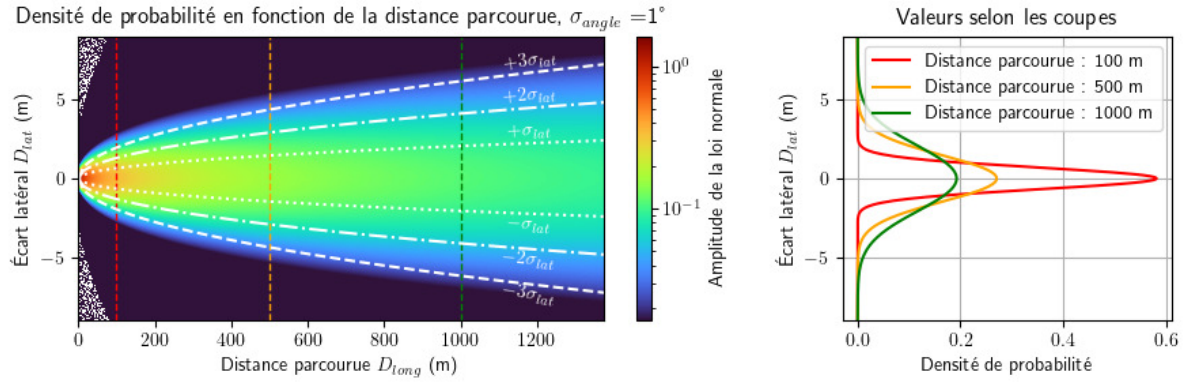



FIGURE 12 – Histogramme de l'erreur de positionnement latéral associée à une erreur angulaire d'écart-type 1°.

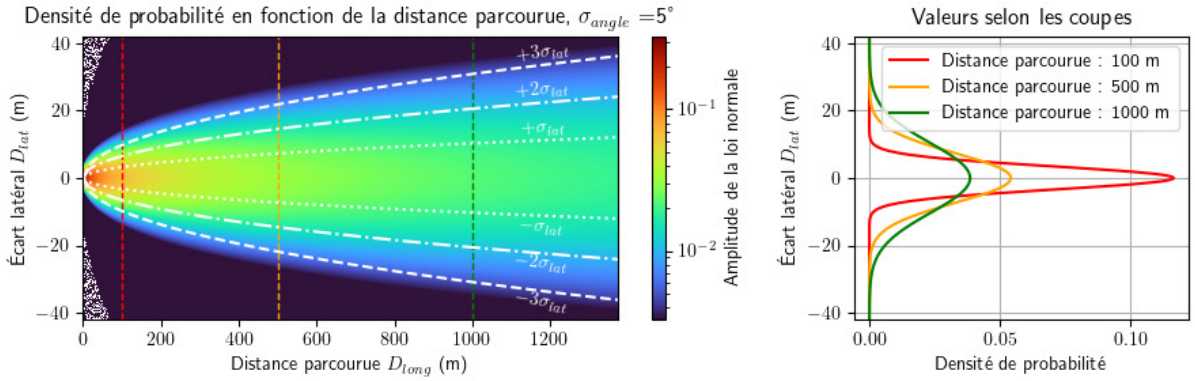
On peut ainsi estimer de manière théorique l'évolution de l'erreur latérale pour plusieurs valeurs données d'écart-types angulaires (figure 13) :




(a) Erreur angulaire d'écart-type 0.1°




(b) Erreur angulaire d'écart-type 1°




(c) Erreur angulaire d'écart-type 5°

FIGURE 13 – Distribution théorique des erreurs de positionnement latéral associée à une erreur angulaire d'écart-type donné.

Enfin, on peut déterminer, pour un intervalle de confiance donné (par exemple à $2\sigma_{lat}$), la valeur limite de distance $D_{long}$ à parcourir pour rester à l'arrivée dans un intervalle [-$D_{latMax}$,$D_{latMax}$] (à 95% dans notre exemple) :

$$2\sigma_{lat} < D_{latMax} \tag{0.3}$$

soit encore

$$D_{long} < \frac{D_{latMax}^2}{4} \frac{f_e}{v \cdot \sigma_{angle}^2} \tag{0.4}$$

On peut alors tracer sur un graphe log-log (figure 14) les distances longitudinales $D_{long}$ à partir desquelles on sort de l'intervalle de confiance à 95 % pour des valeurs d'écart-type angulaires en sortie de capteur, et pour un écart latéral maximal donné (différentes courbes).

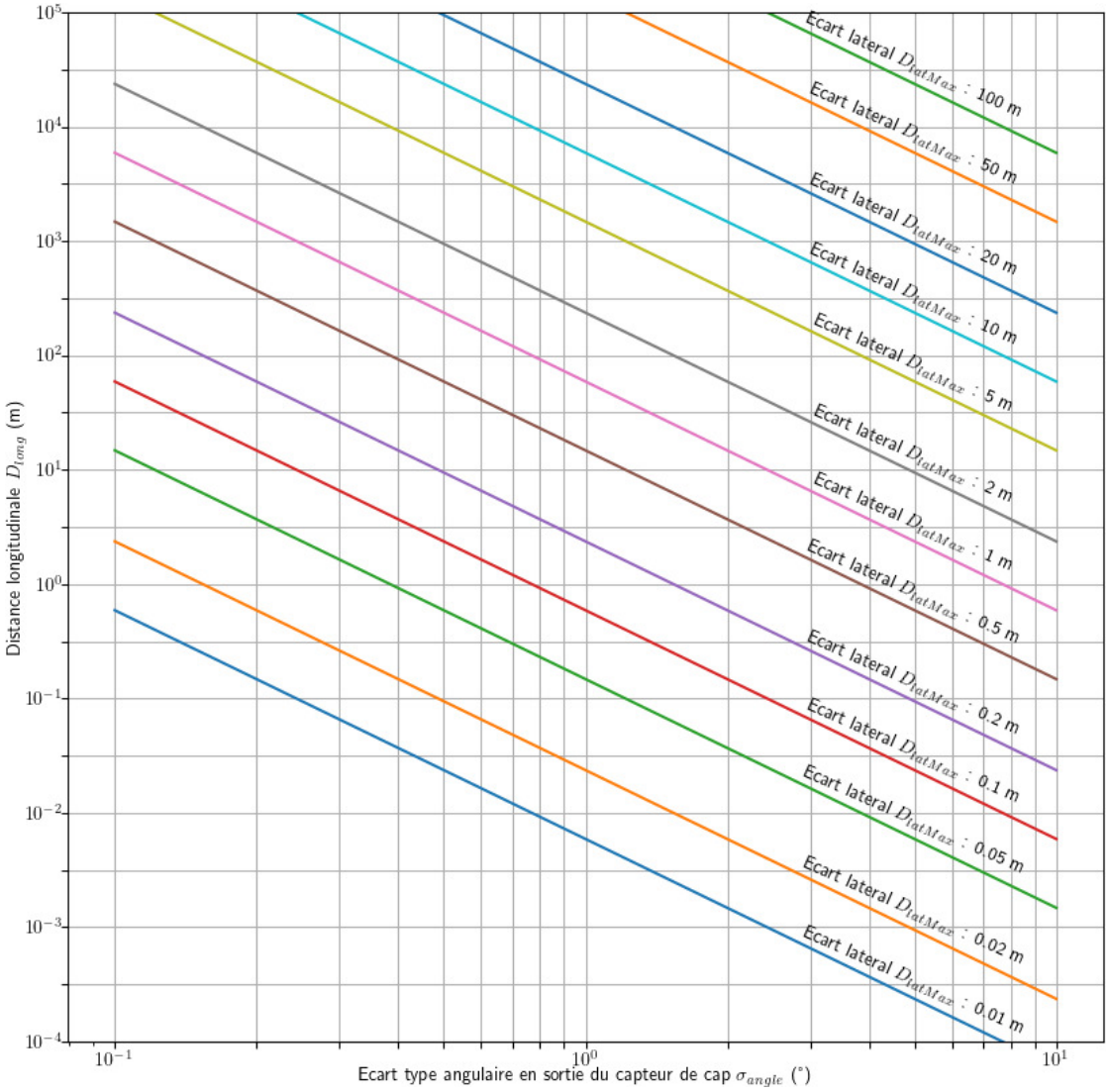
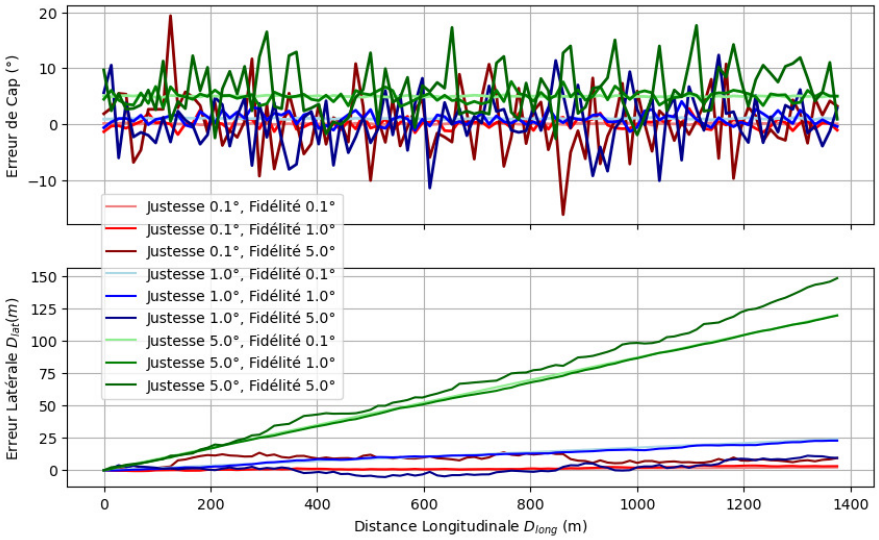


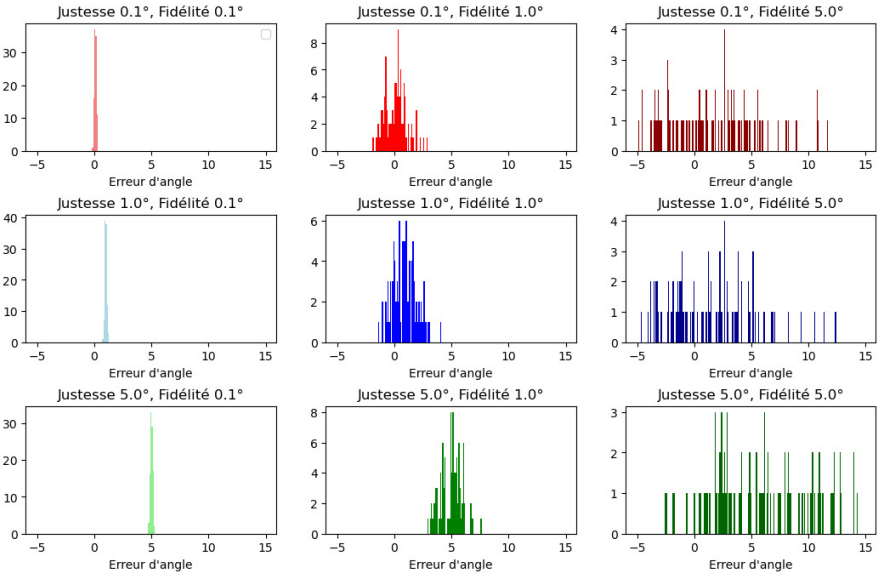

FIGURE 14 – Abaque de distance longitudinale maximale pour avoir une erreur de positionnement à deux écarts-types inférieure à une valeur donnée, pour une erreur angulaire d'écart-type donnée. Vitesse de 50km/h, fréquence d'échantillonage 1Hz.

### Cas d'un capteur ayant un biais non nul

Dans le cas où on aurait un biais non nul, et par la nature intégrante de la navigation à l'estime, on observera une dérive au cours du temps de la position estimée. On a dans la figure 15 tracé plusieurs exemples avec des biais et des écarts-types de 0,1°, 1° et 5° afin de pouvoir visualiser un ordre de grandeur des dérives associées.




(a)




(b)

FIGURE 15 – Erreur de positionnement latéral associée à une erreur angulaire d'écart-type et de biais variables (a), et histogrammes de l'erreur angulaire (b)

On voit donc qu'il est primordial, dans une application de navigation à l'estime, de

réduire au minimum possible de biais de mesure, et si possible son écart-type.

### Ordres de grandeurs des précisions nécessaires pour diverses applications

Suivant l'application retenue, l'abaque de la figure 14 permet de trouver l'erreur angulaire maximale admissible en sortie du capteur au bout d'une distance parcourue.

Par exemple, si on veut une estimation de trajectoire pour savoir dans quelle voie on est sur une route pour un changement de file en se basant sur cette seule information, la précision requise est de l'ordre de 20 cm latéralement, pour une distance de l'ordre de 10 m. On en déduit alors qu'il faut un écart type angulaire maximal de l'ordre du degré. Cependant dans ce cas la distance parcourue en une seconde sera aussi de l'ordre du mètre, ce qui veut dire qu'on n'aurait une estimation fiable que pour de très courtes distances. On peut aussi imaginer un capteur plus rapide et/ou une vitesse moins élevée. Sur des distances plus grandes, par exemple le km (atteint au bout d'environ une minute), on aurait une précision latérale de l'ordre de quelques mètres, ce qui peut aussi avoir son utilité si on vient combiner cette information avec d'autres.

D'autres applications peuvent nécessiter des précisions moins importantes si on fusionne les données du capteur de cap avec d'autres capteurs. Par exemple, pour faire du suivi de route, on peut fusionner un cap même peu précis avec les informations de la carte et des recalages réguliers sur des éléments connus pour connaître sa position au cours du trajet, comme le ferait un conducteur humain équipé seulement d'une carte et d'une boussole (ainsi pour déterminer quelle direction on prend à une intersection il n'est nécessaire que d'avoir quelques degrés voire même quelques dizaines de degrés de précision).

On peut aussi utiliser plus rarement le compas optique pour recaler une centrale inertielle (IMU) du véhicule périodiquement au cours du temps.

Maintenant que nous avons une idée de l'utilité que pourrait avoir un capteur de cap polarisé pour une application automobile et des contraintes associées, il est utile de s'intéresser aux capteurs similaires ayant exité par le passé.

## Les capteurs de cap basés sur la polarisation existant dans la littérature

Historiquement, les navigateurs vikings sont supposés avoir été les premiers à exploiter la lumière polarisée à des fins de navigation et d'exploration, entre environ 900 et 1200 après J.-C afin de naviguer entre la Norvège et le Groenland ou l'Amérique. Ils auraient utilisé des cristaux biréfringents comme polariseurs afin de s'orienter lorsque le Soleil n'était pas directement visible [Heg+07] [Hor+11] [Rop+11] en égalisant les rayons réfractés de manière ordinaire et extraordinaire afin d'obtenir l'azimut de la polarisation et donc du Soleil.

Plus proche de notre époque, les États-Unis ont exploité ce type de navigation à des fins militaires ; ainsi, dans les années 50, l'armée américaine a utilisé des compas

célestes pour équiper son armée de l'air, afin de faire des rondes depuis l'Alaska en direction du pole Nord. Les compas magnétiques n'étant alors pas satisfaisant près des poles, ils embarquaient à bord de leurs bombardiers un instrument optique (réalisé par Pfund [Moo50]) utilisé là aussi manuellement, en tournant une plaque demi-onde contre un filtre polarisant linéaire afin une fois de plus d'égaliser des intensités perçues pour détecter un cap.

Par la suite, la navigation basée sur les informations polarimétriques est tombée en désuétude en raison de la navigation inertielle de haute précision et de la navigation GNSS.

Un ensemble de capteurs de polarisation de la lumière du ciel ont depuis été développés dans la littérature. Etant donné que ce sont des systèmes polarimétriques, on peut de manière plus globale les classer selon des catégories équivalentes aux systèmes de mesure polarimétriques ayant ou non cette application [Tyo+06]. En pratique, tous les polarimètres comportent un étage "optique" comportant entre autres des polariseurs, venant moduler spatialement et/ou temporellement l'état de polarisation, afin d'avoir en sortie et après acquisition un jeu d'intensités lumineuses que l'on viendra détecter avec des photocapteurs individuels ou disposés en grille sur un imageur.

Plusieurs articles ont recensé les capteurs existants si l'on se concentre plus particulièrement sur le sujet du compas céleste, en particulier [KDG12], [Kon23], et dernièrement [Ser+24] qui permettent de se faire une idée rapide de l'état de l'art. En ce qui concerne ce manuscrit, nous classifierons les capteurs tout en adoptant le point de vue pratique de l'industriel au regard des contraintes évoquées précédemment.

## Capteurs non imageants (à base de photodiodes)

Les capteurs "non imageants" visent une ou plusieurs zones ponctuelles du ciel en fonction du nombre de photodiodes embarquées. Les premiers travaux autour de capteurs d'orientation basés sur la polarisation de la lumière du ciel qui soient automatiques et embarquables utilisaient des photodiodes, le traitement embarqué d'images issues de caméras n'en étant alors qu'à ses balbutiements. En 1997 a été mis en œuvre à bord d'un robot mobile appelé Sahabot[Lam+97] [Lam+00] un capteur constitué de 6 photodiodes groupées par paires qui regardent à la verticale. Cette structure est directement inspirée des élements sensibles à la polarisation dans le système visuel des insectes [Lab88].

Par la suite, de nombreux capteurs à base de photodiodes ont été réalisés. Chahl et Mizutani [CM12] ont développé un capteur imitant les ocelles de certains insectes avec un triplet de photodiodes verticales surmontées de leur polariseur. Chu et al. ont aussi conçu un capteur basé sur une unité comportant six canaux de polarisation (trois paires de photodiodes, lues en log-ratio analogiquement) [Chu+08], tout comme Xian et al. [Xia+14] et Du et al. [Du+20] avec à chaque fois des algorithmes et usages différents. Une version sous-marine a aussi été réalisée [Zha+21b]. Ces capteurs ont aussi été utilisés en combinant deux unités de six photodiodes orientés différemment [Wan+15], voire neuf unités réparties sur une sphère en combinaison avec une

IMU [Zha+21a]. Yang et al. [Yan+17] utilisent deux unités orientées différemment, compotant chacune seulement deux paires de photodiodes orthogonales avec des performances similaires. Les photodiodes étant chaque fois utilisées par paires avec polariseurs orthogonaux, Yang et al. ont quant a eux remplacé les filtres polarisants par des cubes séparateurs pour garantir une meilleure orthogonalité [Yan+18]. Enfin, Dupeyroux et al. [Dup] ont développé une boussole céleste ayant deux photodiodes dans la gamme UV et des polariseurs tournants en quadrature.

Tous ces capteurs démontrent des performances acceptables (entre quelques dizièmes de degrés et quelques degrés de précision sur le cap) mais ont l'inconvénient pour notre application d'être relativement volumineux ou d'utiliser pour certains des éléments tournants et n'être donc pas instantanés. De plus, quelqu'un qui viendrait éclairer l'ensemble avec une polarisation autre que celle du ciel (figure 9) pourrait faire dévier facilement le capteur sans que ce soit nécessairement possible de le détecter, d'autant plus qu'il y a peu de photodiodes, puisque celles-ci ont tendance à regarder une zone relativement étendue du ciel. Les capteurs à photodiodes sont aussi d'autant moins robustes que la zone visée globalement est large (en cas d'oculation lointaine de celle-ci par des arbres ou des nuages épais, par exemple).

## Capteurs Imageants (avec capteur matriciel)

Afin de pouvoir avoir un capteur suffisamment robuste au rejet d'une source ponctuelle, et puisque les systèmes d'imagerie sont maintenant largement répandus, y compris en ce qui nous intéresse dans l'industrie automobile, il semble préférable de se tourner vers un système imageant. De nombreuses architectures ont été proposées pour réaliser un capteur de cap, mais aucune ne se révèle pleinement satisfaisante pour notre application.

### Mesure à division temporelle

Le type de polarimètre le plus simple à réaliser et sans doute celui basé sur un polariseur tournant placé devant une caméra. C'est par exemple ce qu'on fait Usher et al. en 2001 [URC01] en utilisant une caméra couleur surmontée d'un film polarisant, ou encore Miyazaki et al. en 2009 [Miy+09] avec un capteur équipé d'un objectif grand-angle. En 2011, afin de se rapprocher de la vision de l'insecte, Carey et al. [CS11] ont utilisé une caméra dans le proche UV et une autre dans le visible, avec un grand champ de vue grâce à un miroir sphérique, les deux caméras étant surmontées d'un polariseur.

Cependant ce type de systèmes présente l'inconvénient comme tous les systèmes de polarimétrie à division temporelle, de nécessiter une certaine stabilité durant l'acquisition, tant du ciel que du véhicule sur lequel le capteur est monté. Des essais réalisés au laboratoire au début de cette thèse ont cependant pu montrer que les nuages se déplaçaient souvent plus rapidement que le temps nécessaire pour réaliser une acquisition complète (de l'ordre de quelques secondes), faussant ainsi la comparaison d'intensités pour chaque angle de polarisation et invalidant de fait ce genre

de système pour une application mobile comme l'automobile. On peut ajouter par ailleurs que les systèmes mécaniques ont généralement besoin d'un peu d'entretien et présentent un risque de panne due à l'usure des composants.

### Capteurs à cristaux liquides (SLM)

Un autre type de capteur à division temporelle est celui à cristaux liquides ("SLM" pour "Spatial Light Modulator") [Zha+14] qui présentent l'avantage d'être généralement plus rapides que qu'un filtre rotatif. Cependant, ils nécessitent une électronique adaptée pour leur mise en œuvre devant être synchronisée avec l'acquisition, et présentent eux aussi une erreur due au déplacement du véhicule et de la scène au cours de l'acquisition. Là encore, ils ne sont donc pas adaptés à une application automobile.

### Capteurs multi caméras

Afin d'obtenir des systèmes qui soient instantanées ("snapshot"), c'est-à-dire capables de déterminer l'état de polarisation en une seule mesure, certaines équipes ont tenté d'utiliser plusieurs caméras identiques surmontées chacune d'un filtre polarisant ayant une orientation différente [Sun+13] [SC12], y compris pour une application automobile [Fan+18]. Ces systèmes sont intéressants, mais ils présentent l'inconvénient d'être généralement encombrants et nécessitent une synchronisation des caméras entre elles. Par ailleurs, pour une application automobile, s'il venait à y avoir une obstruction légère dans le champ de vue de l'une d'entre elles mais pas forcément des autres (par exemple, une salissure sur le pare-brise) il se pourrait que son intensité lumineuse captée soit réduite, et que le système interprète cela de manière erronée au niveau de la mesure de l'angle de polarisation.

Certains ont utilisé un polarimètre à division d'amplitude où un même faisceau entrant est séparé spatialement selon plusieurs polarisations propres avant d'être imagé sur plusieurs matrices. Dans ce cas on n'a plus ce problème de sensibilité à l'obstruction mais on a alors besoin d'aligner précisément l'ensemble et le tout est volumineux et couteux [Sun+19].

### Capteurs à codage d'ouverture et capteurs à lame d'onde en S

D'autres articles ont proposé des systèmes plus complexes placés devant une caméra unique, comme par exemple l'article de Zhang et al. [Zha+15] réalisant un codage en ouverture sur une caméra "light field". Ils placent pour cela un triplet de polariseurs à l'entrée de la caméra, et ajoutent des microlentilles qui permettent de projeter sur le capteur une image microstructurée dépendant de la polarisation. Cette configuration est très intéressante mais elle nécessite d'avoir une caméra qui soit spécialement conçue pour avec des microlentilles, ce qui ne semble pas encore disponible pour un marché automobile avec un coût réduit. Là encore, de la même manière que pour les systèmes à multi-caméras, étant donné que l'on vient diviser spatialement les faisceaux optiques en entrée du système pour analyser différemment la polarisation

pour chacun d'eux, ce genre de systèmes seront sensibles à une obstruction partielle proche telle qu'une salissure sur un pare-brise.

Une autre équipe [Zha+16] remplace le triplet de polariseurs par une lame d'onde en S qui convertit une polarisation linéaire spatialement uniforme en une polarisation linéire spatialement radiale, et inversement, tout en gardant le système à division d'ouverture à microlentilles, ce qui présente encore les incovénients cités précedemment.

Enfin une dernière équipe [Fan+21] n'utilise pas de microlentilles derrière la lame d'onde, mais vient plutot conjuguer optiquement celle-ci avec le capteur, cela permet alors de faire apparaître sur l'image obtenue du ciel un trait en intensité représentant le méridien solaire, image que l'on peut ensuite traiter numériquement. Ces deux dernières méthodes sont très intéressantes mais comportent malheureusement l'inconvénient d'utiliser une lame d'onde particulière qui coûte encore très cher, et dans le dernier cas de devoir ajouter un système optique de conjugaison entre celle-ci et le plan focal, ajoutant encore du volume et du coût au système.

### Capteurs à division de plan focal

Enfin, la solution qui semble être retenue par un nombre croissant de recherches est celle de l'utilisation de capteurs à division de plan focal. Ce type de capteur présente beaucoup d'avantages tel que l'instantanéité de la mesure, la faible sensibilité à une obstruction partielle proche (puisque chaque pixel utilise toute l'ouverture du capteur) et lointaine (puisque l'on image en haute résolution un grand champ de vue), avec une très bonne compacité. Ces capteurs nécessitent cependant l'intégration de micropolariseurs placés soit juste au-dessus du capteur (dépot de nano-fils polarisants sur une vitre), soit directement intégrés par des procédés de microélectronique pendant la fabrication du capteur. Si certaines équipes fabriquaient elles-mêmes (ou faisaient fabriquer exprès en très petite série) leur capteur par le passé par ajout de masque sur une caméra existante [Han+17] ou dépot supplémentaire sur une caméra spécialement conçue pour [Ras+18] [Sar+11] [Gua+22], on observe cependant une utilisation croissante [Hu+22] [Lia+20] [Ren+20] [Li+23] [Pan+24] des capteurs commerciaux de Sony [Sona], référence IMX250MYR pour la version couleur et IMX250MZR pour la version monochrome, qui se retrouvent embarqués dans la quasi totalité des caméras "sur étagère" sur le marché. A noter qu'on rencontre aussi chez certains fabricants de caméras [Sonb] une version équivalente mais un peu moins chère, due à la simplification de certains circuits de lecture, référence IMX264MYR/MZR, et une version ayant plus de pixels (12MP au lieu de 5MP), référence IMX253MYR/MZR.

Ainsi on trouve sur étagère des caméras complètes basées sur ce capteur avec un coût relativement abordable pour une application de laboratoire (de l'ordre du millier d'euros pour la caméra, et généralement quelques centaines d'euros pour un objectif adapté). Cependant, si ces avancées rendent les prix de ces caméras potentiellement abordables pour certaines applications de petite série (telles que certaines applications militaires [Dua+13], ou pour du controle qualité en sortie de chaine de production [19]), ils sont encore bien trop chers pour une application de masse telle

que l'automobile.

Beaucoup de travaux sont réalisés autour du traitement des images issues de ces caméras [Ham17], y compris pour une utilisation sur des véhicules terrestres [Cou+22] [Cou+23].

Nous avons cependant fait le choix dans le cadre de cette thèse d'acquérir une caméra de ce type afin, comme nous l'allons voir par la suite, de recueillir des informations polarimétriques du ciel.

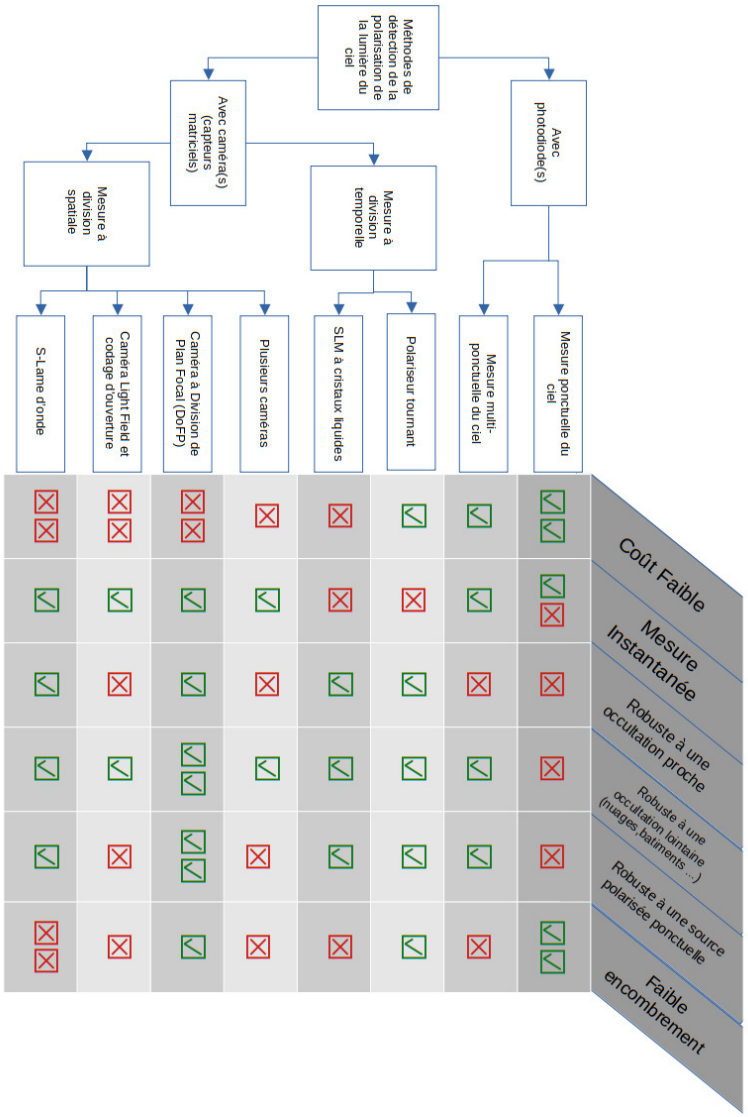



FIGURE 16 – Une comparaison des avantages et inconvénients des solutions préexistantes dans le cadre d'une application automobile.

En conclusion, et à notre connaissance, bien que les capteurs existants présentent des performances interessantes, elles ne sont pas tout à fait acceptables pour pouvoir être utiles en automobile. Il nous faut donc rechercher une autre solution plus adaptée en changeant d'architecture au niveau de la caméra.

# 1 Diffusion de la lumière du Soleil par l'atmosphère et mesures polarimétriques

Afin de pouvoir concevoir un capteur se basant sur le motif de polarisation présent dans le ciel, il faut dans un premier temps connaître la structure de celui-ci. Pour cela, différents modèles existent, ayant des degrés de complexité différents.

Après avoir expliqué les bases du formalisme permettant de décrire la polarisation, ce chapitre évoque donc différents modèles de polarisation de la lumière diffusée du ciel ayant été étudiés au cours de cette thèse. Mes travaux m'ont d'ailleurs permis d'être co-auteur de deux publications. La première (avec Antoine Moutenet en premier auteur) concerne un simulateur complet open-source, originellement en Matlab et dont j'ai effectué une traduction en Python [Mou+24]. Par ailleurs, les données récoltées avec l'expérience du chapitre 2 ont permis de confronter ces modèles avec nos mesures.

Les images acquises (par beau temps) du degré de polarisation ont aussi aidé à mettre en évidence l'existence d'un point particulier dans le ciel nommé le "Pole Céleste", ayant pour propriété une invariance du degré de polarisation au cours du temps. Cela m'a permis d'être co-auteur d'une publication dans PNAS (avec Thomas Kronland-Martinet en premier auteur) [Kro+23]. Ce phénomène sera donc rapidement évoqué dans ce chapitre car pouvant être d'intérêt pour des applications générales de navigation.

## Sommaire


Polarisation de la lumière . . . . . 47
Représentation physique . . . . . 47
Formalisme de Stokes-Mueller . . . . . 49
Le formalisme de Jones . . . . . 52
Quelques exemples de polarisations . . . . . 53
1.1 Modèle de diffusion de Rayleigh . . . . . 55
1.2 Modèle de diffusion de Berry . . . . . 58
1.3 Simulateur de lumière polarisée . . . . . 60
1.4 Invariances du DOP au cours de la journée et Pôle Point . . . . . 61
1.5 Conclusion . . . . . 61

# Polarisation de la lumière

La découverte et l'explication des phénomènes de polarisation lumineuse s'est étalée sur pluiseurs siècles, des premières observations jusqu'à un formalisme complet permetant de fournir explications et prédictions [Col05].

Ainsi, sont rapportées la découverte par Rasmus Bartholin en 1669 des deux rayons ordinaires et extraordinaires se propageant dans un cristal de calcite, qui est un matériau biréfringent.

Ces observations ont ensuite été reprises par Christiaan Huygens qui s'est rendu compte qu'en empilant deux cristaux et en les faisant tourner sur l'axe du rayon lumineux, on pouvait éteindre l'une des deux images.

Étienne-Louis Malus, en 1808, a découvert à l'aide d'un cristal de calcite que la lumière réfléchie obliquement par une surface de verre devenait polarisée, et qu'elle pouvait être totalement éteinte avec le cristal de calcite sous un certain angle. Malus a, par ailleurs, proposé la loi qui porte son nom reliant, pour un polariseur, l'intensité en entrée $I_{in}$, l'intensité en sortie $I_{out}$, et la différence $\theta$ entre l'angle de polarisation d'une lumière incidente totalement polarisée et l'angle de polarisation du polariseur :

$$I_{out}(\theta) = I_{in} * cos^2(\theta)$$

David Brewster a trouvé aux alentours de 1812 que la polarisation réfléchie l'était totalement à un certain angle d'incidence $\theta_b$ portant le nom d'angle de Brewster, tel que

$$\theta_b = arctan(\frac{n_2}{n_1})$$

où $n_2$ est l'indice optique de l'air et $n_1$ l'indice optique du verre.

Augustin Fresnel, aux alentours des années 1820, a proposé une théorie ondulatoire de la lumière qui explique, en plus des phénomènes de diffraction et d'interférence, bon nombre de phénomènes de polarisation.

Enfin, George Gabriel Stokes a proposé en 1852 le formalisme qui porte son nom avec des paramètres observables, que l'on peut rassembler au sein d'un vecteur du même nom. Les effets de certains composants sur un état de polarisation donné peuvent être modélisés grâce aux matrices de Mueller présentées par Hans Mueller en 1943, et proposées simultanément par Francis Perrin en 1942 et par Subrahamanyan Chandrasekhar en 1947.

Un autre formalisme existe pour traiter des faisceaux cohérents, qui est le formalisme de Jones inventé par Robert Clark Jones en 1941 [Jon42].

## Représentation physique

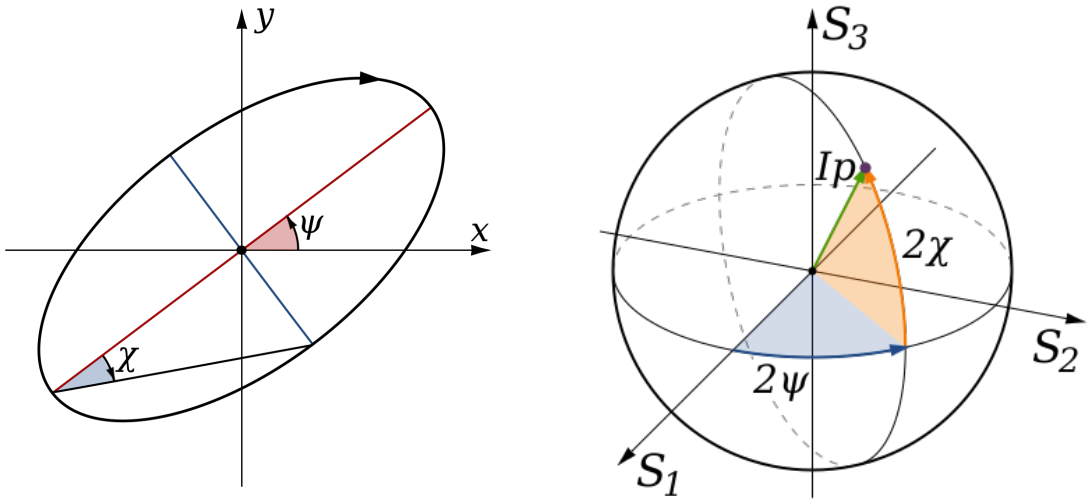
La lumière est une onde electromagnetique composée d'un champ electrique $\vec{E}$ et d'un champ magnetique $\vec{B}$, reliés entre eux par les equations de Maxwell [Max97]. Une onde lumineuse est caractérisée par plusieurs grandeurs : sa longueur d'onde,

son amplitude, sa phase ou encore sa polarisation. En fonction du milieu où elle se trouve, elle aura une certaine vitesse de propagation inférieure ou égale à la célérité dans le vide.

L'orientation de son champ électrique oscillant peut dans certains cas être restreinte à une direction spécifique, dans ce cas la lumière est dite polarisée.

Par exemple, on considère une onde plane lumineuse se propageant selon un axe $\vec{Z}$ dans un milieu isotrope, homogène et non atténuant.

D'après la théorie de Fresnel, les composantes électriques $E_x$ et $E_y$ décrivent des oscillations sinusoïdales dans les plans $xz$ et $yz$ respectivement. En combinant les deux équations, on obtient alors l'équation d'une ellipse correspondant à la trajectoire balayée par l'extrémité du vecteur champ électrique. Les paramètres de cette ellipse de polarisation peuvent ainsi être représentées grâce à deux grandeurs, l'azimut $\psi$ et l'ellipticité $\chi$ de l'ellipse. (Figure 1.1, en haut) Dans le cas où l'ellipticité est nulle on parle d'une onde linéairement polarisée et on peut décrire ce qu'on nomme *angle de polarisation* l'angle entre la direction d'oscillation et un axe préalablement défini (ici $\vec{x}$) perpendiculaire à la direction de propagation.




(a) Un exemple d'ellipse de polarisation, avec ses paramètres d'azimut $\psi$ et d'ellipticité $\chi$. Source : Wikipedia

(b) Représentation d'un état totalement polarisé elliptiquement sur la sphère de Poincaré, en fonction de son azimut $\psi$ et ellipticité $\chi$. Source : Wikipedia

FIGURE 1.1 – Ellipse de polarisation et sphère de Poincaré.

Certaines sources optiques émettent des trains d'onde ayant une polarisation aléatoire ; dans ce cas on dit que l'onde est non polarisée. Son vecteur de Stokes associé sera $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$.

On peut aussi évoquer le cas intermediaire où une onde est partiellement polarisée

et peut se décomposer comme la somme d'une onde complètement dépolarisée et d'une onde complètement polarisée. Dans ce cas, on dira que le faisceau aura un degré de polarisation égal au rapport de l'intensité polarisée divisée par l'intensité totale.

Il est également possible de représenter cet état sur une sphère : c'est l'idée qu'a suggéré Poincaré avec sa sphère du même nom où l'azimut d'un état est représenté par sa longitude $2\psi$ sur la sphère, l'ellipticité par sa latitude $2\chi$ , et le degré de polarisation par la norme du vecteur tracé (Figure 1.1, en bas).

On peut noter que dans le cas général le champ électrique est polarisé elliptiquement, mais qu'il y a différentes combinaisons d'amplitude et de phase qui sont remarquables, qu'on appelle les états dégénérés de polarisation : ce sont les états de polarisation linéaire horizontale, verticale, ou orientée avec un angle de plus ou de moins 45 degrés, qui présentent alors des ellipticités nulles et des angles d'azimut variables, ainsi que de la lumière polarisée circulairement qui correspond à une ellipticité de $\frac{\pi}{2}$.

Ainsi n'importe quel état de polarisation peut être présenté sur la sphère, et les points dégénérés présentés précédemment se trouvent aux différents pôles en ce qui concerne les polarisations purement circulaires (circulaire droite et gauche), et tout autour de l'équateur pour les polarisations linéaires.

L'état de polarisation d'un faisceau n'étant pas directement mesurable en général, puisque les détecteurs optiques ne sont pas sensibles à la phase instantanée mais seulement à la moyenne temporelle de l'amplitude du champ electrique sur une certaine période.

## Formalisme de Stokes-Mueller

Le formalisme de Stokes permet de représenter un état de polarisation de manière vectorielle, et les matrices de Mueller de calculer l'impact d'un composant optique sur cet état.

On introduit les différentes grandeurs $S_0$, $S_1$, $S_2$, et $S_3$ (parfois notées respectivement $I$, $Q$, $U$, $V$) telles que :

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{I_0+I_{90}+I_{45}+I_{135}}{2} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_{CirculaireGauche} - I_{CirculaireDroite} \end{pmatrix}$$

où $I_0$, $I_{45}$, $I_{90}$, et $I_{135}$ sont les intensités correspondant aux composantes linéaires projetées selon ces axes à 0°, 45°, 90 et 135° (par exemple les intensités mesurées derrirère un polariseur parfait ayant ces orientations), et $I_{CirculaireGauche}$ et $I_{CirculaireDroite}$ les intensités correspondant aux composantes circulaires. On pose aussi l'intensité totale $I_{total} = \frac{I_0+I_{90}+I_{45}+I_{135}}{2}$

Les paramètres de l'ellipse de polarisation et de la matrice de Mueller sont reliés par

la relation :

$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{total} \\ I_{total} \cdot DoP \cdot \cos(2\psi) \cdot \cos(2\chi) \\ I_{total} \cdot DoP \cdot \sin(2\psi) \cdot \cos(2\chi) \\ I_{total} \cdot DoP \cdot \sin(2\chi) \end{pmatrix}$$

et à l'inverse,

$$I_{total} = S_0$$
$$DoP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}$$
$$\psi = \frac{1}{2}\arctan2(S_2, S_1)$$
$$\chi = \frac{1}{2}\arctan\frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}$$

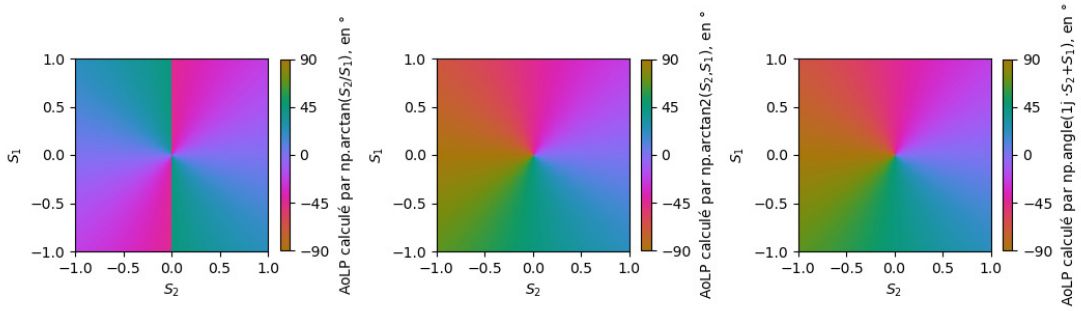



FIGURE 1.2 – Calcul de l'Angle de Polarisation en fonction de $S_1$ et $S_2$ avec les fonctions np.arctan($S_2/S_1$), np.arctan2($S_2$,$S_1$) et np.angle(1j $\cdot S_2$+$S_1$). On voit que la première de ces trois fonctions n'est pas correcte pour $S_2 < 0$, malgré ce qu'on peut souvent trouver dans la littérature.

On peut remarquer que dans certains articles ou sites en ligne, la valeur de l'angle $\psi$ est calculée par la formule $\psi = \frac{1}{2}\arctan(\frac{S_2}{S_1})$. Cependant, comme le montre la figure 1.2, cette formule donne un résultat erroné quand $S_2 < 0$, d'où la necessité de bien utiliser $arctan2$.

On introduit aussi les matrices de Mueller, de dimension 4x4, permettant de manipuler les vecteurs de Stokes ; ainsi, si un faisceau de vecteur $\vec{S}_i$ traverse un élément optique défini par sa matrice de Mueller $M$, il en ressort dans un état $\vec{S}_o$ tel que : $\vec{S}_o = M\vec{S}_i$

On peut par la suite combiner les matrices pour obtenir l'état final du faisceau après traversée d'un système multiple par associativité, en revanche l'ordre est important puisque la multiplication matricielle n'est en général pas commutative.

Deux composants optiques sont particulièrement utilisés dans cette thèse, les polariseurs et les lames d'onde.

### Polariseur linéaire

Un polariseur linéaire idéal effectue une projection de la polarisation sur un axe d'azimut $\theta$. Dans ce cas, la matrice de Mueller associée est :

$$M = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & \cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ \cos(2\theta) & \cos^2(2\theta) & \cos(2\theta)\sin(2\theta) & 0 \\ \sin(2\theta) & \cos(2\theta)\sin(2\theta) & \sin^2(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On peut alors obtenir les matrices de Mueller pour quelques orientations remarquables de polariseur :

| **Polariseur linéaire orienté à 0°** | **Polariseur linéaire orienté à 90°** | **Polariseur linéaire orienté à 45°** | **Polariseur linéaire orienté à 135°** |
|---|---|---|---|
| $\frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ | $\frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ | $\frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ | $\frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ |

### Lame d'onde

Une lame d'onde (ou lame à retard) est un composant comportant deux axes perpendiculaires dits axes rapides et lents. Elles sont généralement taillées dans un milieu anisotrope.

Lorsqu'un faisceau optique traverse une telle lame (figure 1.3), la composante de la polarisation selon l'axe rapide et celle selon l'axe lent voyagent dans la lame à des vitesses différentes (elles voient des indices optiques différents nommés indice ordinaire $n_o$ et indice extraordinaire $n_e$). L'axe ayant le plus grand indice associé est alors nommé axe lent et l'autre axe rapide, ces axes étant aussi nommés axes neutres. Cette différence d'indice provoque un retard $\delta$ (homogène à une distance, généralement exprimée en nm) en sortie de la lame d'une composante sur l'autre, impliquant un déphasage $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \delta$ d'une composante sur l'autre, entraînant généralement une modification de l'état de polarisation.

Certaines valeurs de retard sont remarquables. Pour un déphasage de $\pi$ (180° soit un retard de phase de $\frac{\lambda}{2}$), la polarisation en sortie est le symétrique de la polarisation d'entrée selon les axes neutres (la lame est alors nommée lame demi-onde). Pour un déphasage de $\pi/2$ (90° soit un retard de phase de $\frac{\lambda}{4}$), pour une polarisation linéaire en entrée on se retrouve en sortie avec une elliptique de demi grand axe aligné avec l'azimut d'entrée et d'ellipticité la différence d'angle avec l'axe rapide (la lame est alors nommée lame quart d'onde).

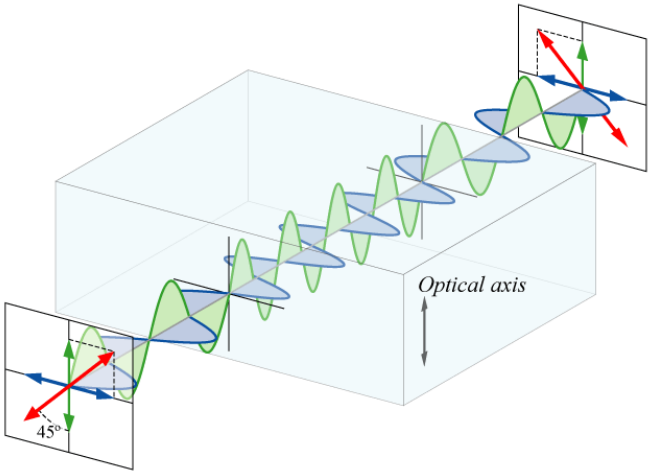



FIGURE 1.3 – Un exemple de lame d'onde avec un retard de $\frac{\lambda}{2}$ soit une lame demi-onde. Source : Wikipedia

Dans le cas général, la matrice de Mueller d'une lame d'onde ayant ses axes neutres orientés selon un axe de $\theta$ et présentant un retard de $\delta$ est :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta)+\sin^2(2\theta)\cos(\delta) & \cos(2\theta)\sin(2\theta)(1-\cos(\delta)) & \sin(2\theta)\sin(\delta) \\ 0 & \cos(2\theta)\sin(2\theta)(1-\cos(\delta)) & \cos^2(2\theta)\cos(\delta)+\sin^2(2\theta) & -\cos(2\theta)\sin(\delta) \\ 0 & -\sin(2\theta)\sin(\delta) & \cos(2\theta)\sin(\delta) & \cos(\delta) \end{pmatrix}$$

Voici donc quelques matrices de Mueller de lames d'ondes dans certains cas particuliers :

| **Lame quart d'onde avec axe rapide horizontal (0°)** | **Lame demi-onde avec axe rapide horizontal (0°)** | **Lame d'onde de retardance $\delta$ avec un axe rapide orienté à 0°** | **Lame d'onde de retardance $\delta$ avec un axe rapide orienté à 45°** |
|---|---|---|---|
| $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\delta) & \sin(\delta) \\ 0 & 0 & -\sin(\delta) & \cos(\delta) \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\delta)) & 1 & -\sin(\delta) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) \end{pmatrix}$ |

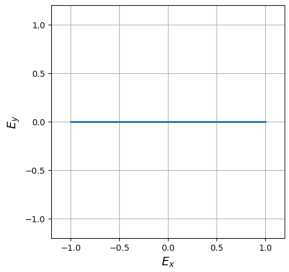
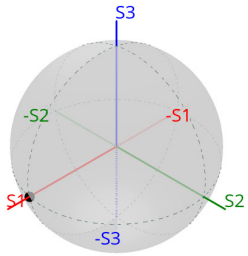
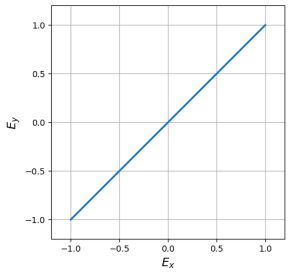
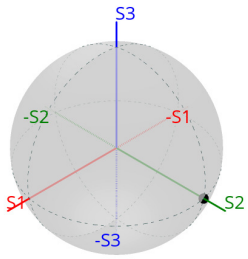
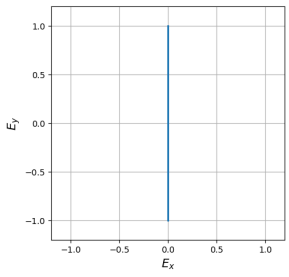
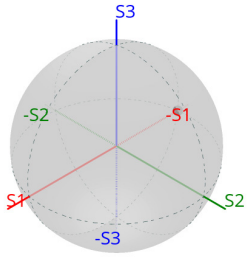
## Le formalisme de Jones

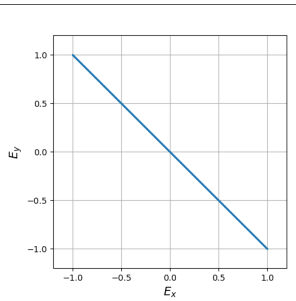
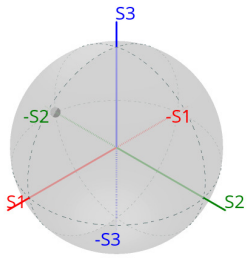
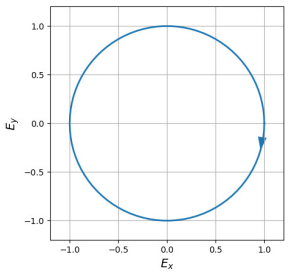
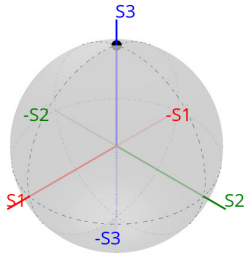
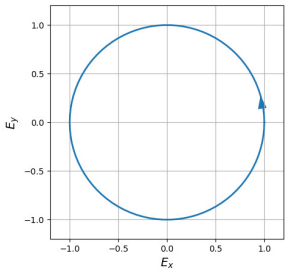
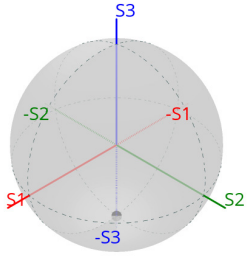
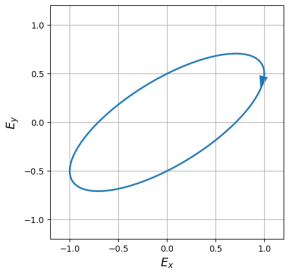
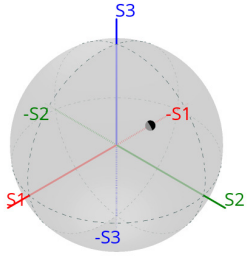
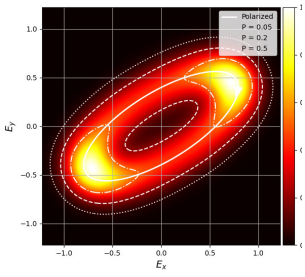
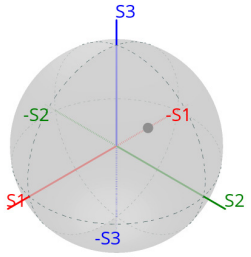
Le formalisme de Jones permet, comme celui de Stokes-Mueller, de décrire les états de polarisation d'un faisceau lumineux dans un milieu isotrope, homogène et non atténuant (grâce aux vecteurs de Jones, qui sont dans ce cas des vecteurs complexes $2 \times 1$) ainsi que l'effet que peuvent avoir certains composants optiques (tels que des polariseurs, des lames d'ondes...) sur ceux-ci (au moyen des matrices de Jones). En revanche, il ne permet de décrire la lumière que dans le cas où celle-ci est totalement

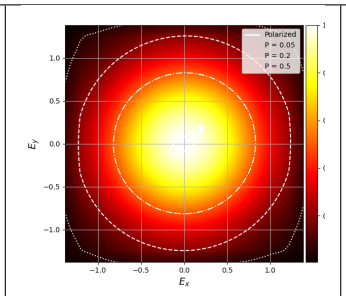
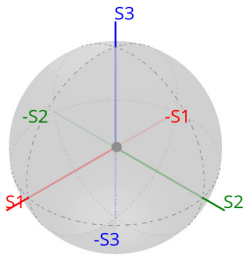
polarisée à l'inverse du formalisme de Mueller-Stokes permettant de prendre aussi en compte la dépolarisation. En revanche, le formalisme de Stokes a pour lui de conserver la phase du signal lumineux, ce qui a une utilité lorsqu'on traite de lumière cohérente.

## Quelques exemples de polarisations

Voici un tableau représentant quelques vecteurs de Jones, de Stokes, la trajectoire de l'extrémité du vecteur $\vec{E}$ dans le plan perpendiculaire ainsi que la position associée sur la sphère de Poincaré. Elles sont générées avec la bibliothèque python *py-pol* [Jes].

| Désignation | Vecteur de Jones | Vecteur de Stokes | Ellipse de polarisation | Position sur la sphère de Poincaré |
|---|---|---|---|---|
| Linéaire Horizontale (0°) | $\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix}1\\1\\0\\0\end{pmatrix}$ |  |  |
| Linéaire Diagonale (45°) | $\begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix}1\\0\\1\\0\end{pmatrix}$ |  |  |
| Linéaire Verticale (90°) | $\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix}1\\-1\\0\\0\end{pmatrix}$ |  |  |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Linéaire Antidiagonale (135°) | $\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$ |  |  |
| Circulaire Gauche | $\begin{pmatrix} 1 \\ 1i \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ |  |  |
| Circulaire Droite | $\begin{pmatrix} 1 \\ -1i \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$ |  |  |
| Elliptique | $\begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{2}+\frac{1}{2}i \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \end{pmatrix}$ |  |  |
| Elliptique avec DOP=0.95 | | $\begin{pmatrix} 1 \\ \frac{0.95}{3} \\ \frac{0.95}{3} \\ \frac{2\cdot 0.95}{3} \end{pmatrix}$ |  |  |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Totalement dépolarisée (DOP=0) | | $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ |  |  |



Maintenant qu'ont été présentés différents formalismes décrivant la polarisation, il est possible de modéliser l'état de de celle ci lors de la diffusion de la lumière du soleil dans le ciel.

## 1.1 Modèle de diffusion de Rayleigh

La façon la plus courante de décrire la diffusion atmosphérique dans le spectre visible est le modèle de Rayleigh [Str71] (1871). Il permet de décrire toutes les propriétés du champ électromagnétique en considérant une diffusion élastique simple par des particules de taille beaucoup plus petites que la longueur d'onde, y compris la dépendance spectrale de l'intensité de diffusion, et l'état de polarisation de l'onde diffusée.

L'article [Mou+24] explique la provenance de ce motif de polarisation et les modèles de Rayleigh et de Berry, dont on rapporte ci-après certaines explications, traduites en français et adaptées.

Une façon simplifiée de modéliser les propriétés de diffusion atmosphérique est de considérer une petite particule chargée vibrant selon la perturbation du champ électrique incident, venant dans notre cas du Soleil (figure 1.4).

Un dipôle rayonnant oscillant selon une direction donnée a tendance à ré-émettre dans toutes les directions avec une intensité variant au carré du cosinus de l'angle entre le rayon incident et le rayon diffusé. Cela signifie qu'il n'y aura pas d'émission dans la direction d'oscillation, et une émission maximale perpendiculairement à celui-ci.

Cette particule elle-même générera des perturbations du champ électrique, selon ses directions de vibration, qui seront perçues différemment en fonction de la position de l'observateur par rapport à la particule (figure 1.5).

Il est aussi possible de définir ce qui est nommé plan de diffusion comme celui formé par les directions de la lumière incidente et de la lumière diffusée, c'est-à-dire qu'il contient le Soleil, la particule observée et l'observateur (figure 1.5).

Mis à part les effets résultant de la longueur d'onde et de l'absorption, si nous considérons le champ électrique incident le long de deux axes orthogonaux, l'un parallèle et l'autre perpendiculaire au plan de diffusion, nous pouvons observer que la composante perpendiculaire est entièrement transmise, et la composante parallèle

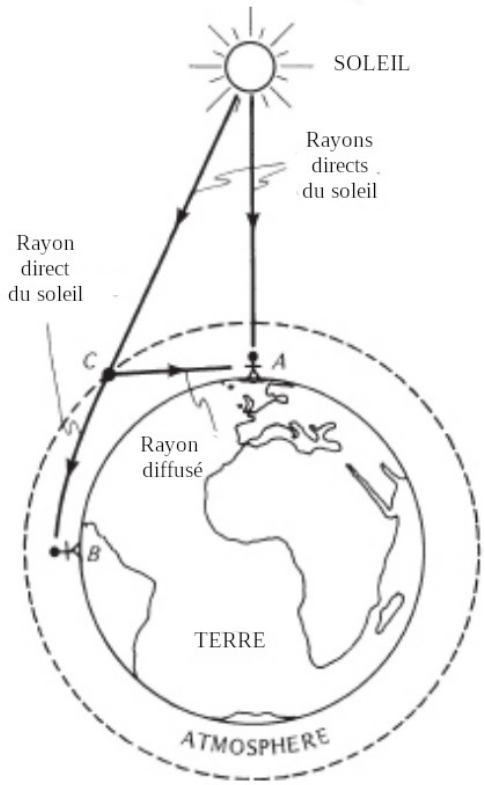



FIGURE 1.4 – Rayons transmis et diffusés par l'atmosphère. En pratique, le Soleil est à l'échelle bien plus loin et les rayons incidents sur l'atmosphère sont relativement parallèles. Traduit de [Bri87]

est partiellement transmise (figure 1.5), selon une loi variant comme le cosinus de l'angle de diffusion $\gamma$ pris entre rayon incident et rayon diffusé.

$$E_{scat_\perp} \propto E_{inc_\perp} = E\, E_{scat_\parallel} \propto E_{inc_\parallel} \cdot \cos(\gamma) = E \cdot cos(\gamma) \tag{1.1}$$

Étant donné qu'il est courant de considérer l'intensité lumineuse comme le carré de l'amplitude du champ électrique, nous obtenons alors les deux composantes d'intensité diffusée :

$$I_{\text{scat}_\perp} = E^2 \tag{1.2}$$

$$I_{\text{scat}_\parallel} = E^2 \cdot \cos(\gamma)^2 \tag{1.3}$$

Pour déterminer les propriétés de polarisation, nous devons considérer la lumière diffusée comme la somme d'une composante polarisée et d'une composante non polarisée, ce qui nous donne les intensités suivantes :

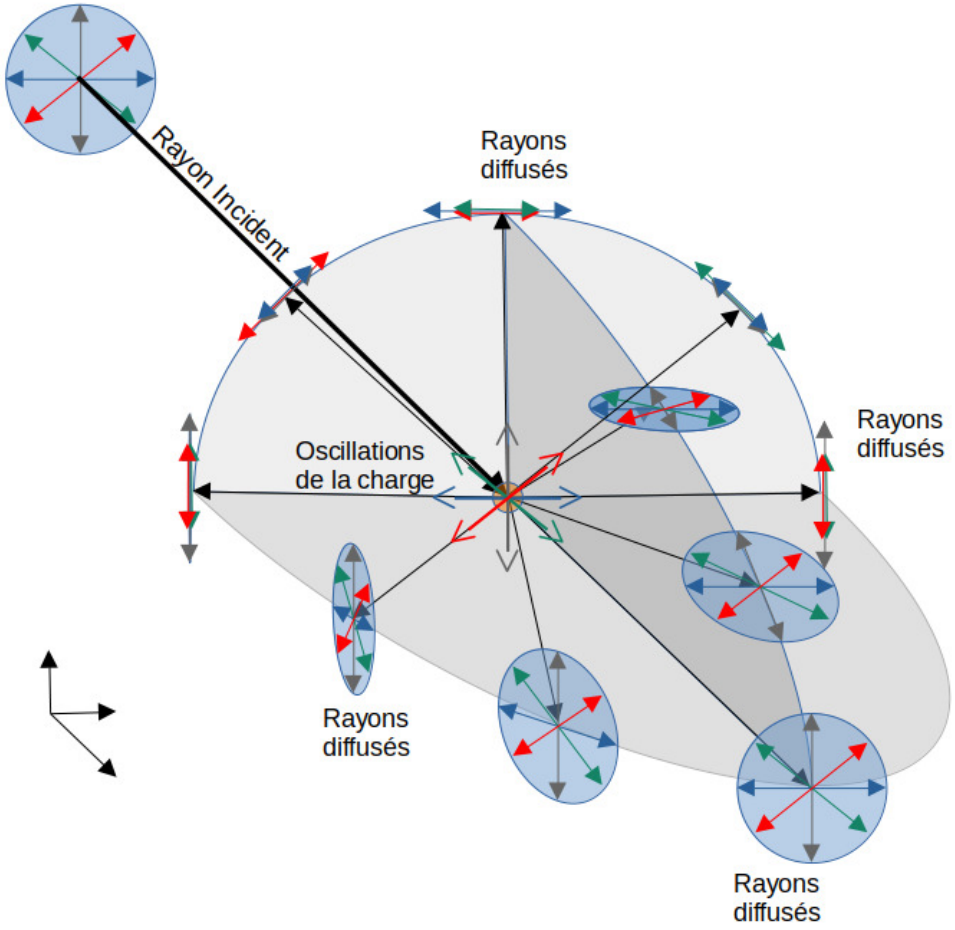



FIGURE 1.5 – Diffusion d'un rayon par une particule, et rayons obtenus en fonction de l'état de polarisation du rayon incident

$$I_{\text{scat}} = I_{\text{scat}_\perp} + I_{\text{scat}_\parallel} \tag{1.4}$$

$$I_{\text{scat}_{\text{unpol}}} = 2 \cdot I_{\text{scat}_\parallel} \tag{1.5}$$

$$I_{\text{scat}_{\text{pol}}} = I_{\text{scat}_\perp} - I_{\text{scat}_\parallel} \tag{1.6}$$

Ces deux composantes d'intensité, polarisée ($I_{scat_{pol}}$) et non polarisée ($I_{scat_{unpol}}$), nous permettent d'exprimer le degré de polarisation linéaire ($DoLP$) :

$$DoLP = \frac{I_{scat_{pol}}}{I_{scat}} = \frac{E^2 - E^2 \cdot \cos(\gamma)^2}{E^2 + E^2 \cdot \cos(\gamma)^2} = \frac{\sin(\gamma)^2}{1+\cos(\gamma)^2} \; DoLP = \frac{\sin(\gamma)^2}{1+\cos(\gamma)^2} \tag{1.7}$$

Nous traitons le $DoLP$ car la diffusion élastique atmosphérique n'implique que la polarisation linéaire. Comme écrit dans (1.7), le $DoLP$ prend des valeurs de 0 à 1, mais dans des conditions réelles, c'est-à-dire en présence de diffusion atmosphérique

multiple, le $DoLP$ n'atteint jamais 1 [ES18] ; ce $DoLP$ est généralement corrigé avec un coefficient de valeur maximale, $DoLP_{max}$, qui est le $DoLP$ maximal observable, en fonction de la turbidité du ciel (généralement de l'ordre de 0,75 pour un ciel clair) :

$$DoLP = \frac{sin(\gamma)^2}{1 + cos(\gamma)^2} \cdot DoLP_{max} \tag{1.8}$$

Et par ailleurs en définissant le repère méridien orthonormé associé à la particule, avec $\overrightarrow{z_{mer}}$ qui pointe vers l'observateur et $\overrightarrow{x_{mer}}$ sa perpendiculaire dans le plan méridien, en nommant $\overrightarrow{E_{dir}}$ la direction du champ électrique, on a alors :

$$\begin{aligned} \tan(AoP_l) &= -\frac{\overrightarrow{E_{dir}} \cdot \overrightarrow{y_{mer}}}{\overrightarrow{E_{dir}} \cdot \overrightarrow{x_{mer}}} \\ &= \frac{\sin(\theta_p) \cdot \cos(\theta_s) \cdot \cos(\alpha_p - \alpha_s) - \cos(\theta_p) \cdot \sin(\theta_s)}{\cos(\theta_s) \cdot \sin(\alpha_p - \alpha_s)} \end{aligned} \tag{1.9}$$

où $\theta_s$, $\theta_p$, $\alpha_s$ et $\alpha_p$ sont les azimuts et elevations du soleil et de la particule dans le repère de l'observateur.

L'AOP global $AoP_g$ est défini grâce à l'AOP local $AoP_l$, il suffit donc d'ajouter ou de retrancher à nos motifs l'azimut du point de mesure pour passer de l'un à l'autre :

$$AoP_g = AoP_l + \alpha_p \tag{1.10}$$

Par ailleurs l'intensité diffusée est différente en fonction de la longueur d'onde avec un facteur variant en $\frac{1}{\lambda^4}$ (figure 1.6). Lorsqu'on associe cette courbe d'intensité avec celles de la sensibilité spectrale de l'oeil pour les couleurs Rouge, Vert, Bleu (par exemple avec la norme CIE 1964), cela explique alors pourquoi par beau temps le ciel a tendance à être plutot bleu (et non pas violet même si les UV sont sensés être plus diffusés, car l'oeil humain n'y est que peu sensible).

## 1.2 Modèle de diffusion de Berry

Le modèle de diffusion Rayleigh est largement utilisé, mais il ne décrit qu'un phénomène de diffusion simple. Dans le modèle de diffusion Rayleigh, il existe deux points présentant un $DoLP$ nul, la direction du Soleil et la direction opposée au Soleil. Il a été observé [Hor+02 ; HV04] que, en raison de la turbidité atmosphérique et de la diffusion multiple, le schéma de polarisation global ne correspond pas au modèle de Rayleigh et qu'il existe en réalité quatre points présentant un $DoLP$ nul, appelés points neutres. Ces quatre points neutres sont nommés Brewster (sous le Soleil), Babinet (au-dessus du Soleil), Arago (au-dessus de l'anti-Soleil) et le Quatrième (sous l'anti-Soleil). Ils sont tous situés sur le méridien solaire, mais, pour une position fixe du Soleil, leurs élévations respectives varient avec la longueur d'onde de la lumière [Hor+02 ; HV04]

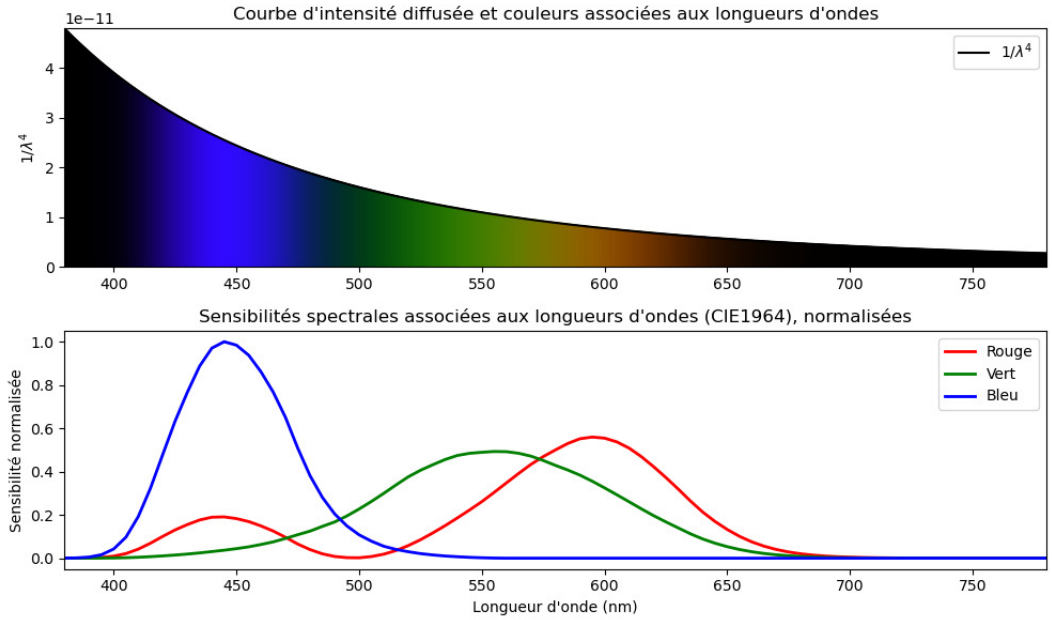



FIGURE 1.6 – Intensité de diffusion en fonction de la longueur d'onde, et couleurs RVB "vues" associées en tenant compte des sensibilités spectrales de l'oeil.

et le niveau de turbidité atmosphérique, causé par la pollution de l'air, les nuages, et même les débris des éruptions volcaniques [Bel87 ; Shi90]. Il a également été observé que les distances entre les points neutres augmentent lorsque le Soleil se couche [Pan+23], ce qui pourrait être facilement intuitif étant donné que plus le Soleil est bas dans le ciel, plus la couche atmosphérique est épaisse et donc plus grande est la diffusion.

Berry a proposé un modèle amélioré [BDL04] pour exprimer $AoP$ et $DoLP$ afin de prendre en compte les quatre points neutres observés. Ce modèle, plus précis que le modèle de Rayleigh, peut être utile pour des mesures de cap plus précises [Jue+23] mais ne peut pas être utilisé simplement comme modèle de prédiction de motif en raison de la difficulté à prédire les variations des positions des points neutres.

Il est à noter que d'autres modèles sont disponibles pour calculer plus précisément la polarisation de la lumière du ciel que le modèle de Rayleigh, tels que ceux reposant sur la diffusion de Mie ou des algorithmes basés sur Monte-Carlo [CCS10], qui nécessitent des ressources de calcul considérables. Il ne seront pas abordés ici.

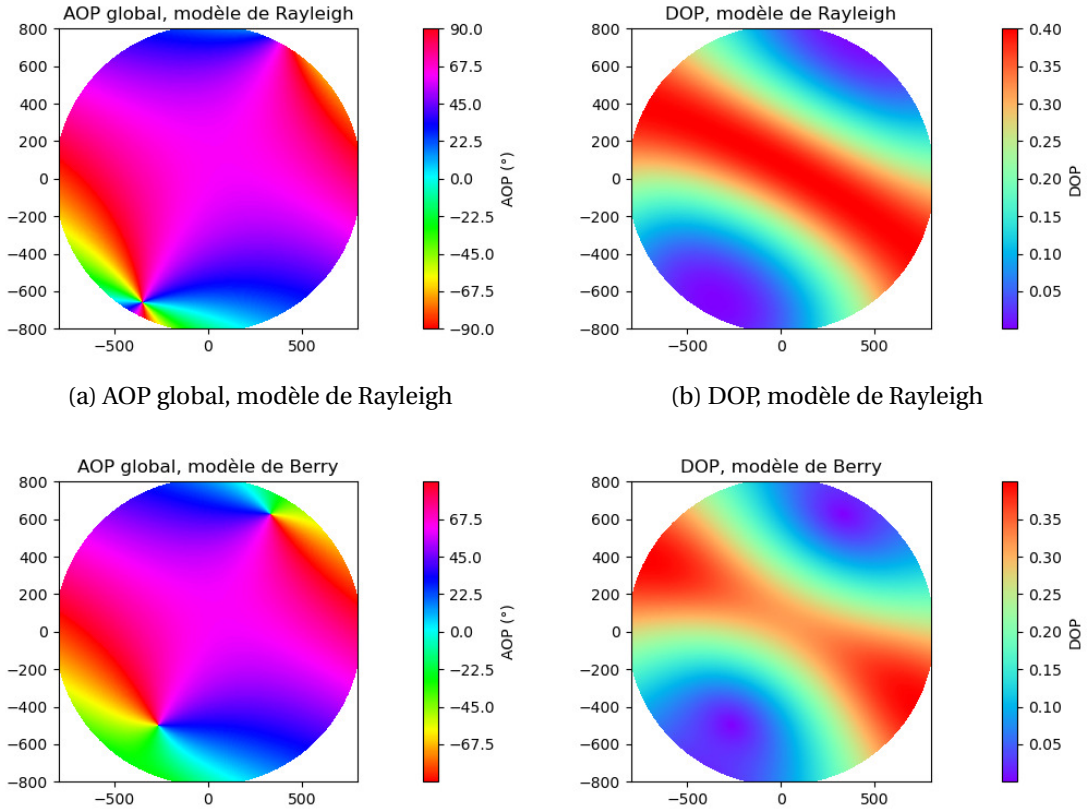
Le modèle de Berry suppose que les points Brewster et Babinet sont équidistants de l'axe du Soleil et sont symétriques par rapport au point d'observation avec, respectivement, les points Arago et Quatrième. Ce modèle repose sur la projection stéréoscopique de la sphère céleste unitaire sur son plan équatorial. Ce dernier, centré sur l'observateur, est considéré comme un plan complexe, avec le vecteur du Soleil projeté sur l'axe imaginaire positif $i\,\mathrm{Re}^+$. Une fois que l'ensemble du dôme céleste est projeté sur ce plan complexe, les paramètres de polarisation peuvent être calculés à l'aide d'une seule fonction $w$.

## 1.3 Simulateur de lumière polarisée

Grace au simulateur Opensky, on peut estimer directement les angles et degrés de polarisation (linéaire) dans le plan du capteur en indiquant les paramètres optiques de la caméra (focale, fonction de distorsion, centre optique).

On peut par exemple comparer (figure 1.7) ce que donne une simulation pour un ciel clair qui serait vu avec une caméra équivalente à celle du chapitre 2 (avec des paramètres de position du Soleil équivalente à celle de la figure 2.15, et en prenant arbitrairement un angle entre les points neutres de 40°). On arrive alors à quelque chose de proche de ce que l'on observe en réalité.

Une implémentation en python permet alors de générer les motifs que l'on souhaite, à la demande.




(a) AOP global, modèle de Rayleigh

(b) DOP, modèle de Rayleigh

(c) AOP global, modèle de Berry

(d) DOP, modèle de Berry

FIGURE 1.7 – Comparaison des modèles de Rayleigh et de Berry, en AOP et DOP.

## 1.4 Invariances du DOP au cours de la journée et Pôle Point

Le motif de polarisation du ciel en DOP possède une propriété intéressante, ayant été exploitée pour créer la méthode nommée "SkyPole" [Kro+23] rapportée ci-après. Elle permet de localiser le pôle céleste nord à partir des invariances dans les motifs de degré de polarisation de la lumière du ciel

La méthode actuelle consiste à comparer des images du degré de polarisation linéaire (DoLP) de la lumière du ciel prises à différents moments avec une caméra fixe. En calculant la différence entre les images des deux motifs de DoLP prises à deux moments distincts (avec des intervalles de temps allant de 30 à 60 minutes), cela permet d'afficher les axes d'invariance radiale et planaire. Comme le Soleil tourne autour du pôle céleste nord (le pôle céleste sud perçu par un observateur dans l'hémisphère sud), l'angle de diffusion $\gamma$ reste constant à ce point, et donc le DoLP au pôle céleste nord restera constant à tout moment de la journée. Le pôle céleste nord est situé sur le cercle d'invariance radiale, et c'est le seul point visible sur la sphère céleste qui est présent en tout temps sur cet axe. Le pôle céleste nord peut donc être trouvé à l'intersection entre les axes d'invariance radiale résultant des différences d'images du DoLP variant dans le temps. Théoriquement, seules trois vues du motif de DoLP du ciel sont nécessaires pour calculer la position du pôle céleste nord [Kro+23].

Cette méthode brevetée permet donc d'obtenir, en plus de la position du Soleil, une direction correspondant au "pole céleste" équivalente à la direction de l'étoile polaire. Cela permettrait alors, par exemple, de se servir de nos mesures, et eventuellement de l'heure, pour obtenir, en plus du cap, une estimation de la latitude du véhicule sur Terre, et éventuellement de sa longitude.

## 1.5 Conclusion

En conclusion on peut noter que différents modèles existent et nous renseignent sur les effets de polarisation engendrés par diffusion de la lumière du soleil par le ciel. Cependant ils ne tiennent pas compte d'autres phénomènes de diffusion telle que celle effectuée par les nuages (diffusion de Mie) qui sont alors plus complexes. Le chapitre suivant permettra d'observer l'état du ciel dans le monde réel et de comparer celui-ci qualitativement avec un modèle de Rayleigh, et ces modèles pourraient servir dans de futurs développements tels qu'explicités au chapitre 3.

# 2 Mesure polarimétrique de longue durée du ciel

## Sommaire


2.1 Choix du site de mesure . . . . . 63
2.2 Conception de l'expérience . . . . . 63
2.2.1 Conception mécanique . . . . . 64
2.2.2 Conception électrique . . . . . 65
2.3 Traitement des données enregistrées . . . . . 66
2.3.1 Acquisition . . . . . 66
2.3.2 Distorsion du fisheye et sélection de la zone d'intérêt . . . . . 67
2.3.3 Calibrage de l'orientation de la caméra . . . . . 67
2.4 Visualisation des données . . . . . 76
2.4.1 Définition de l'angle de polarisation . . . . . 76
2.4.2 Annotation des données . . . . . 80
2.5 Conclusion . . . . . 81


Le phénomène de polarisation de la lumière du ciel est à l'origine d'un intérêt croissant pour la navigation bio-inspirée, ainsi que d'autres domaines tels que le rendu photo-réaliste de scènes en extérieur. Les capteurs d'orientation basés sur la polarisation de la lumière du ciel peuvent être simulés sur la base de modèles physiques ; par ailleurs, les algorithmes d'apprentissage automatique nécessitent une grande quantité de données pour être entraînés. Cependant, si certaines bases de données simulées existaient déjà dans la littérature [Lia20], ce n'est pas le cas d'une base de données publique composée d'images polarimétriques en couleur du ciel dans différentes conditions météorologiques.

Ce chapitre présente un dispositif expérimental, conçu pour être laissé sur un toit éloigné à long terme afin d'acquérir des données pendant plusieurs mois, en utilisant un imageur polarimétrique à division de plan focal avec un objectif fisheye, monté sur une monture de télescope rotatif. Une conception mécanique et électrique est proposée pour faciliter la reproduction de l'expérience à d'autres endroits, avec un algorithme permettant d'obtenir l'orientation dans laquelle la caméra a été installée dans l'espace, dans le repère Est-Nord-Haut (East-North-Up, ou ENU par la suite, en anglais). Enfin, un échantillon de données d'une durée de deux mois est fourni sur une archive publique. Le tout est disponible en licence "Open Source" (CC-BY). Cela a fait l'objet d'un premier article de conférence [Pou+23b] accompagné d'un code associé publié sur Github [Pou24] et d'une base de données d'un mois [POU], puis

d'un article à paraitre associé à une base de données étendue de 2 mois [POU+24] [mol24] avec une correction de dérive temporelle.

## 2.1 Choix du site de mesure

Les premières mesures du ciel en extérieur au cours de cette thèse ont été effectuées au laboratoire de l'Institut des Sciences du Mouvement à Luminy. Cependant il a vite été évident que ce site ne conviendrait pas pour faire des mesures de longue durée. En effet, afin de pouvoir laisser l'expérience pendant plusieurs mois sans qu'elle ne soit vandalisée, il était nécessaire qu'elle soit inaccessible au grand public, ce qui n'est pas le cas sur le campus de Luminy où il y a beaucoup de passage, y compris en dehors des heures d'ouverture.

Par ailleurs, afin d'avoir un champ de vue le plus large possible, nous devions trouver un site ne présentant pas d'occultation visuelle, le site de Luminy présentant en ce qui le concerne une occultation à cause du mont Puget, en amont du laboratoire dans le massif des calanques.

Notre choix s'est alors porté sur le toit de l'Institut des Neurosciences de la Timone (INT) à Marseille, puisque ce site était accessible uniquement pour nous, sécurisé, relativement discret, et à proximité des équipes de ce laboratoire. Enfin le bâtiment de l'INT présente un toit relativement élevé, ce qui nous permettait d'avoir un champ de vue acceptable.

L'expérience a pu être fixée sur les grilles du toit autour des dispositifs d'aération du bâtiment.

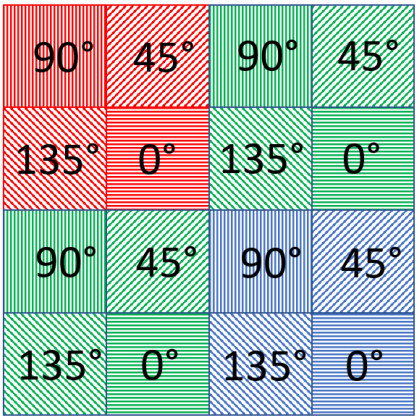
## 2.2 Conception de l'expérience

La caméra utilisée pour l'acquisition est fabriquée par Lucid Vision Labs, référence PHX050S. Elle est basée sur un capteur à division de plan focal "DoFP" fabriqué par Sony (IMX250MYR) qui dispose de micro-polariseurs orientés à 0°, 90°, 45° et 135° (figure 2.1), eux-même associés par groupe de quatre à un filtre de Bayer "couleur" Rouge, Vert, Vert, Bleu. L'ensemble forme un motif de 16 pixels se répétant périodiquement sur le capteur. Chaque pixel fait 3,45 microns de coté et l'image obtenue fait 2048x2448 pixels, soit une image polarimétrique couleur résultante après regroupement des macro-pixels de 512x612 pixels.

On vient ajouter un objectif fisheye fabriqué par Fujinon (référence FE185C057HA-1), ayant pour focale 1,8mm et une distorsion de formule :

$$y = f \cdot \theta$$

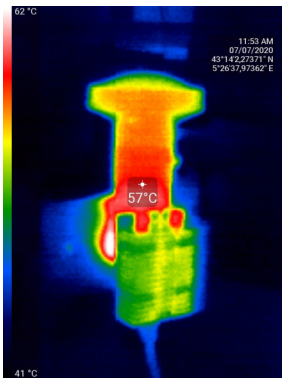
[Fujb] [Fuja]. Celui-ci permet d'imager le ciel avec un grand champ de vue (185°).




(a) Le motif de macro-pixel 4x4 présent sur le filtre de Bayer de la caméra : polariseurs et filtres couleur.
A noter que les valeurs d'angle sont définie comme dans la documentation du capteur, ce qui n'est pas le cas par la suite



(b) La caméra utilisée et son objectif fisheye




(c) Une prise de vue à la caméra thermique lors du fonctionnement. Ça chauffe!

FIGURE 2.1 – Caméra polarimétrique-couleur à division de plan focal (DoFP).

### 2.2.1 Conception mécanique

La caméra polarimétrique a été montée sur une monture de télescope (référence Sky-Watcher Az-GTI) rotative afin de pouvoir l'aligner en azimut et en élévation. Comme la monture n'a que deux axes de rotation, un degré de liberté en rotation a été perdu. Nous n'avons pas pu orienter tout à fait librement notre caméra dans l'espace. Cependant, nous avons développé une méthode (voir plus loin 2.3.3) pour estimer l'orientation de la caméra en comparant d'une part la position du Soleil en coordonnées sphériques dans le repère ENU obtenue avec les éphémérides, avec d'autre part la position du Soleil mesurée par la caméra et reprojetée en inverse dans le repère de la caméra. Nous pouvons ainsi fixer une orientation approximative de la caméra dans l'espace, puis mesurer la course du Soleil, par temps clair, en réglant le temps d'exposition au minimum pour calibrer l'orientation de la caméra.

Nous avons utilisé une structure à base de profilés en aluminium pour obtenir une liaison robuste entre la monture et la caméra. Il était également utile d'ajouter un dôme en polyméthacrylate de méthyle (PMMA) qui protégeait la caméra et la monture de la pluie grâce à un support imprimé en 3D. Une pièce découpée au laser a également permis de fixer une bâche en dessous (voir figure 2.2) pour permettre à la monture de tourner librement tout en la protégeant de la pluie. L'ensemble a été conçu en utilisant le logiciel libre FreeCad et réalisé à l'atelier mécanique de l'Axe Biorobotique en utilisant les machines de découpe laser, impression 3D, et fraisage manuel.

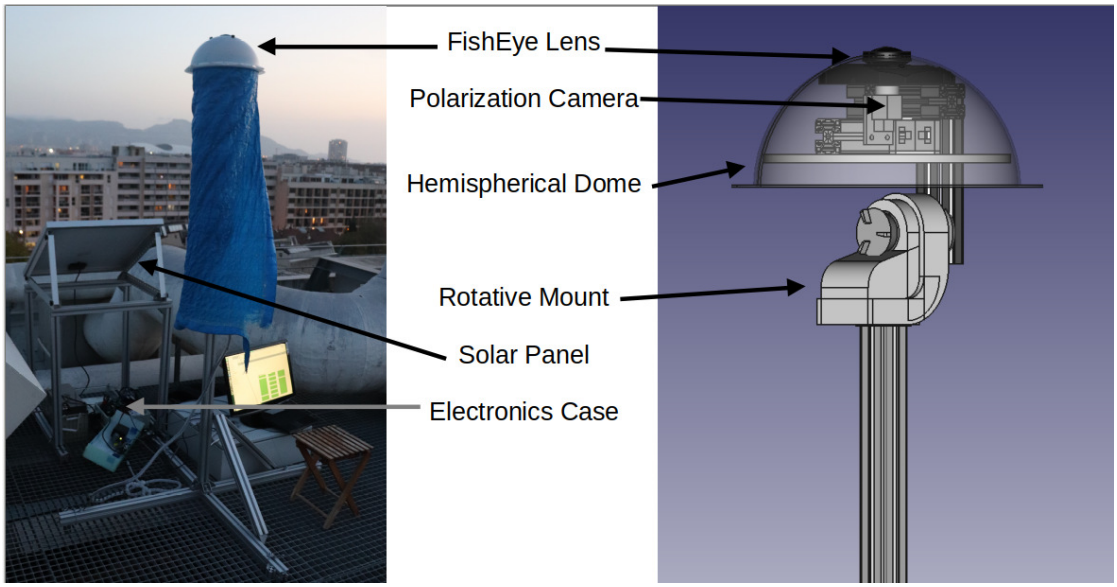



FIGURE 2.2 – Une vue globale et un rendu mécanique du système d'acquisition

### 2.2.2 Conception électrique

Notre système devait rester sur le toit pendant de longues périodes sans nécessiter d'intervention. Comme aucune source d'énergie n'était facilement accessible, nous avons ajouté un panneau solaire de 160 W et une batterie au plomb de 120 Ah pour maintenir l'alimentation pendant les nuits et les jours nuageux. Cela a suffi pour fournir suffisamment d'énergie à notre expérience sans interruption pendant des mois.

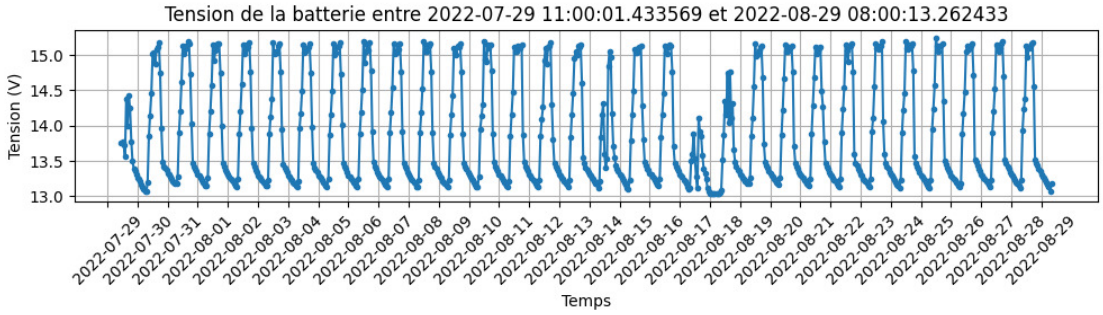



FIGURE 2.3 – La tension de la batterie au cours du second mois d'acquisition des données. À noter, la charge moins élevée les jours de mauvais temps.

À des fins de surveillance, un convertisseur analogique-numérique (CAN) nous a permis de suivre heure par heure la tension de la batterie (figure 2.3) via un pont diviseur de résistances afin d'adapter l'échelle d'entrée aux exigences du CAN. Puisque la tension de la batterie fluctuait au gré des charges et décharges, nous avons ajouté un régulateur DC-DC 11-15V à 12V pour la stabiliser, ce qui nous a permis d'alimenter notre caméra et notre monture rotative avec une tension unique et stable.

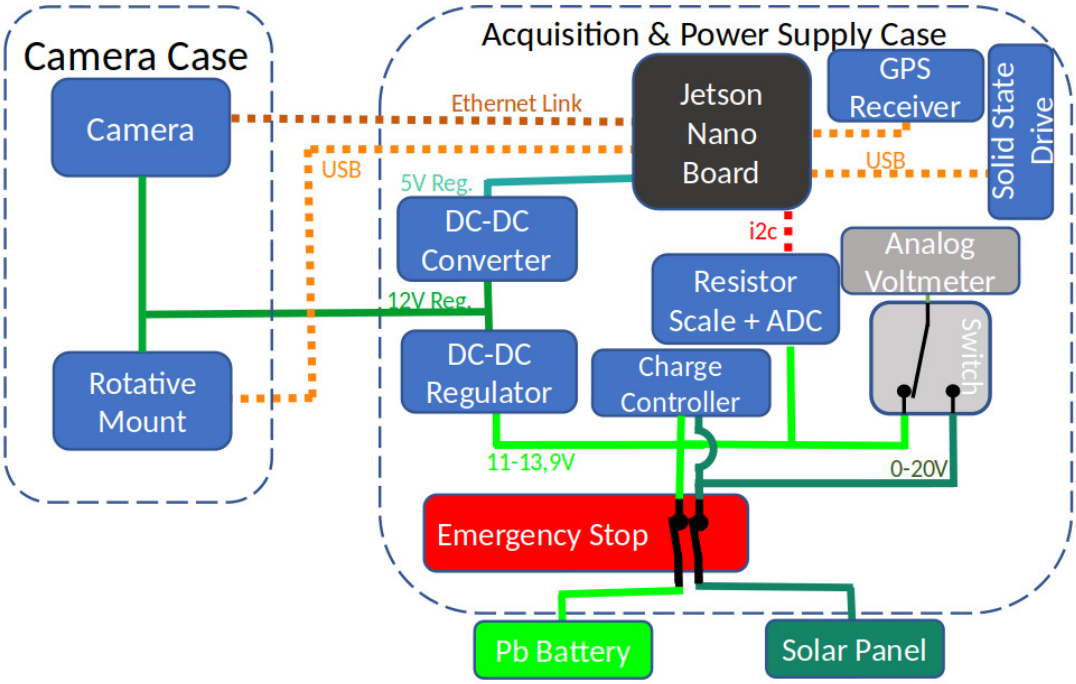



FIGURE 2.4 – L'architecture électrique de l'expérience.

Nous voulions à l'origine disposer d'un accès internet sur l'expérience afin de pouvoir surveiller son état sans devoir nous déplacer à chaque fois. Cependant malgré nos nombreux efforts, nous n'avons pas réussi à trouver une solution satisfaisante pour obtenir un accès réseau sur le toit, que ce soit en installant un modem 4G via un téléphone (volume de données très restreint, connexion entrante impossible en SSH nous forçant à installer un tunnel sortant vers une machine fixe "relais" au laboratoire qui s'est avérée instable) ou via le réseau eduroam de la faculté (nécessitant d'utiliser des rallonges USB étanchéifiées et cascadées avec un adaptateur wifi en bout qui s'est aussi révélé instable, ou d'antennes wifi directionnelles qui n'ont pas suffi pour assurer une connexion satisfaisante).

Cette déconnexion a entraité une non-synchronisation de l'horloge système de la carte embarquée, où pourrait provenir une certaine dérive que l'on observe lors des calibrages (voir plus bas). On introduit alors, par la suite, une correction adaptée pour corriger du mieux possible cette dérive.

## 2.3 Traitement des données enregistrées

### 2.3.1 Acquisition

Plusieurs milliers d'images ont été prises entre le 07 Juillet et le 28 Août 2022. Une image a été acquise toutes les 10 minutes, avec plusieurs temps d'exposition fixes et automatiques à chaque acquisition. L'orientation de la caméra a été supposée

constante dans le temps.

### 2.3.2 Distorsion du fisheye et sélection de la zone d'intérêt

La caméra polarimétrique était composée d'un imageur SONY IMX250MYR et d'un objectif Fujinon FE185C057HA-1 fisheye avec un champ de vision de 185° et une ouverture sélectionnable dans la gamme $f/1,4 - f/22$. Si l'ouverture était trop grande, la polarisation pouvait être impactée en raison des grands angles d'incidence de la lumière polarisée [LRR22], nous avons donc choisi d'utiliser une ouverture de $f/4$. La distance focale théorique et la fonction de distorsion sont données par le fabricant : ici, $f = 1,8mm$ et la fonction de distorsion est calculée comme suit : $y = f \cdot \Theta$, où $y$ est la distance entre le centre du capteur et le point projeté, et $\Theta$ est l'angle d'incidence sur l'objectif fisheye.

Le centre optique est mesuré en utilisant la boite à outils Matlab "Camera Calibration" de Scaramuzza (figure 2.5) grâce à une mire de calibrage en damier [SMS06] [Sca07] [RSS08].

```
  Standard Errors of Estimated Camera Parameters
  ----------------------------------------------

Intrinsics
----------
Mapping coefficients:    [  514.1287 +/- 0.8515       -0.0007 +/- -0.0000
0.0000 +/- 0.0000       -0.0000 +/- -0.0000 ]
Distortion center (pixels):[ 1215.1460 +/- 0.8093     1030.4336 +/- 0.7662  ]
Stretch matrix parameters:[    1.0015 +/- 0.0004       0.0110 +/- 0.0008
-0.0111 +/- 0.0009  ]
```

On obtient ainsi un centre optique de $x_0 = 1215,15$ pixels et $y_0 = 1030,43$ pixels correspondant à une incidence nulle des rayons sur l'objectif.

### 2.3.3 Calibrage de l'orientation de la caméra

Une fois le système mis sous tension et la caméra à peu près orientée vers le ciel, nous devions connaître l'orientation du cadre de la caméra dans le cadre local Est-Nord-Haut (ENU) (figure 2.6). Pour ce faire, nous avons choisi de comparer la course du Soleil mesurée sur le capteur avec les éphémérides du Soleil fournies par le noyau Python développé par la communauté Astropy [Rob+13] [Col+18] [Col+22].

Lors d'une journée ensoleillée, en capturant des images avec le temps d'exposition le plus bas que notre capteur pouvait fournir, nous avons obtenu chaque fois une image avec la projection du Soleil à travers l'objectif fisheye, qui montrait une tache lumineuse (le Soleil) entourée d'un arrière-plan sombre (le ciel). Un algorithme de détection de points (utilisant la bibliothèque Python Scipy [Vir+20]) nous a permis d'évaluer la position X-Y de cette projection du Soleil sur le capteur. En prenant

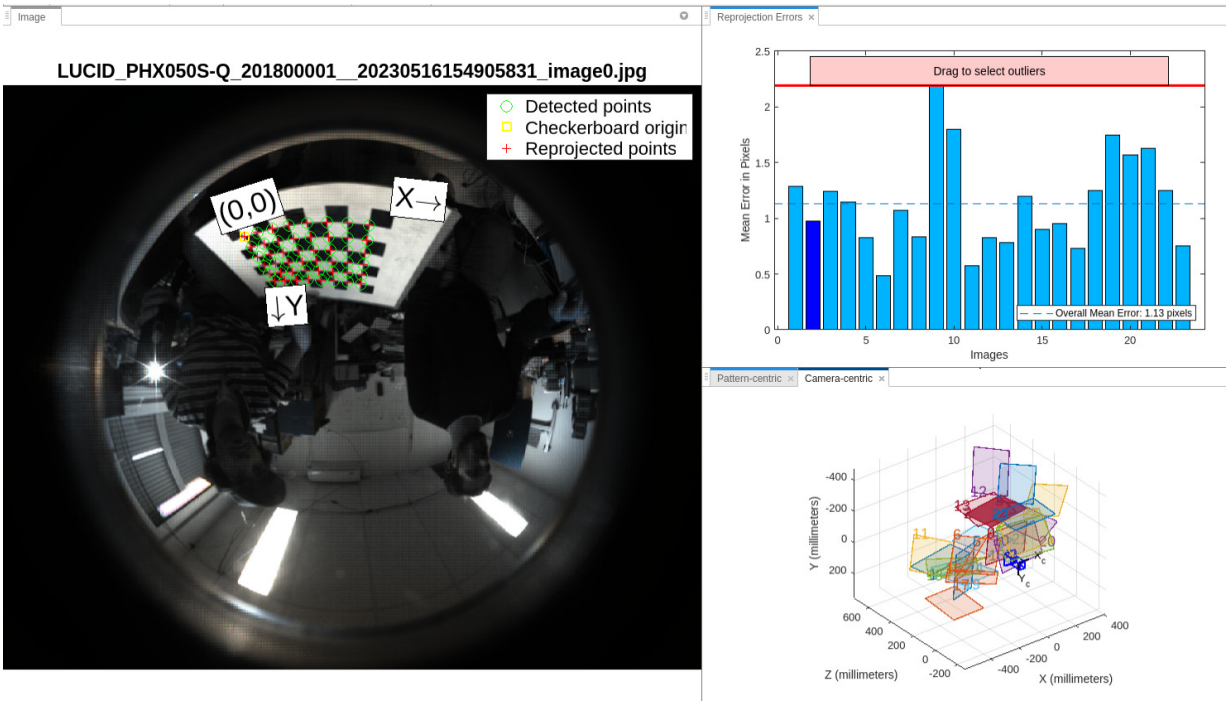



FIGURE 2.5 – Calibrage de la caméra avec la toolbox Matlab.

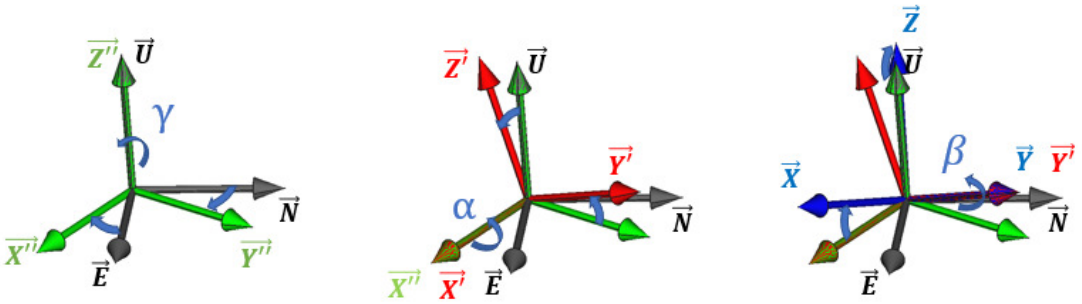



FIGURE 2.6 – Rotations entre le repère de la caméra et le repère de l'ENU.

plusieurs photos au cours de la journée, nous avons enfin pu tracer la course du Soleil sur le capteur.

Simultanément, nous disposions d'un ensemble d'orientations connues pour le Soleil au même moment dans le cadre ENU, obtenues grâce aux éphémérides. Il s'agissait alors de trouver une matrice de rotation entre les deux repères. Pour cela, nous utilisons la bibliothèque Python LMFit [New+14] qui permet d'employer une méthode de minimisation des moindres carrés (figure 2.7) basée sur l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Cela permet alors d'estimer les paramètres $\gamma$, $\alpha$ et $\beta$ minimisant numériquement l'écart entre l'ensemble de vecteurs Soleil calculés dans le repère ENU par éphémérides, puis tournés de la rotation entre les deux repères, et les vecteurs Soleil mesurés sur le capteur et reprojetés en inverse dans le repère caméra.

A noter qu'il aurait aussi été possible de remplacer l'étape de minimisation d'erreur,

qui est ici obtenue numériquement par itérations successives, par d'autres méthodes permettant de résoudre le "problème de Wahba" [Wah65] qui permettent la mise en concordance de deux jeux de vecteurs dans des repères différents en estimant la matrice de rotation optimale entre les deux.

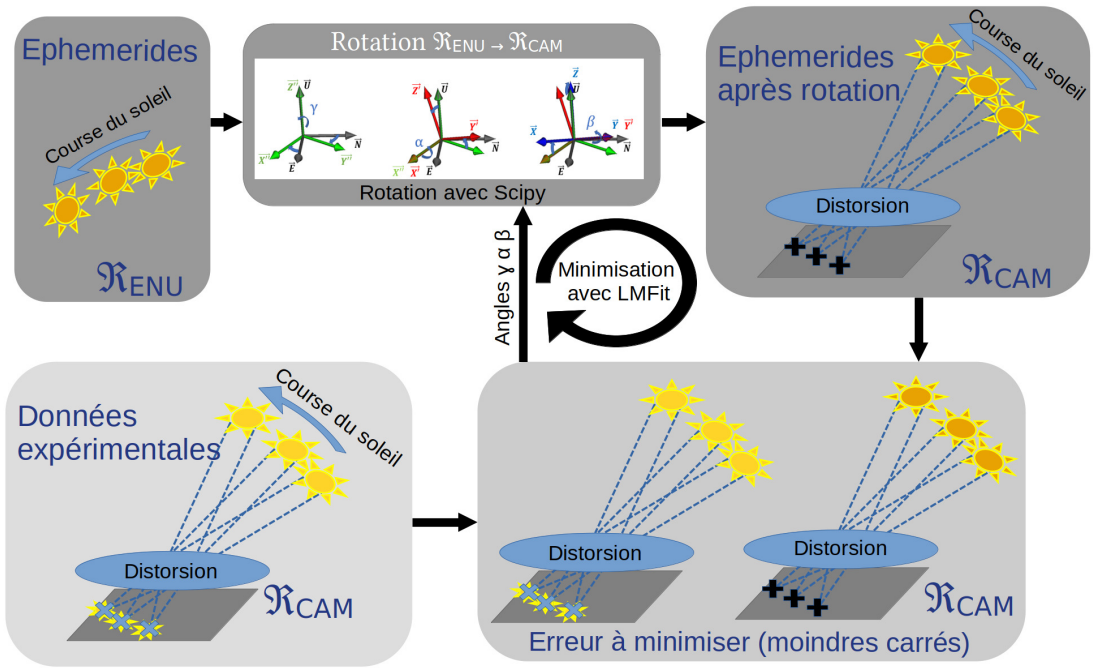



FIGURE 2.7 – Course du Soleil sur le capteur simulée avec projection des éphemerides via fisheye après rotation, et course réelle mesurée sur les images, pour une journée.

Voici un exemple de résultat obtenu après calibrage lors d'une journée ensoleillée, ici le 27 Août 2022 :

```
[[Fit Statistics]]
    # fitting method   = least_squares
    # function evals   = 71
    # data points      = 60
    # variables        = 4
    chi-square         = 1.6843e-10
    reduced chi-square = 3.0076e-12
    Akaike info crit   = -1587.93233
    Bayesian info crit = -1579.55495
[[Variables]]
    gamma: -135.744421 +/- 0.01569388 (0.01%) (init = 0)
    alpha:  0.98769611 +/- 0.01107261 (1.12%) (init = 0)
```

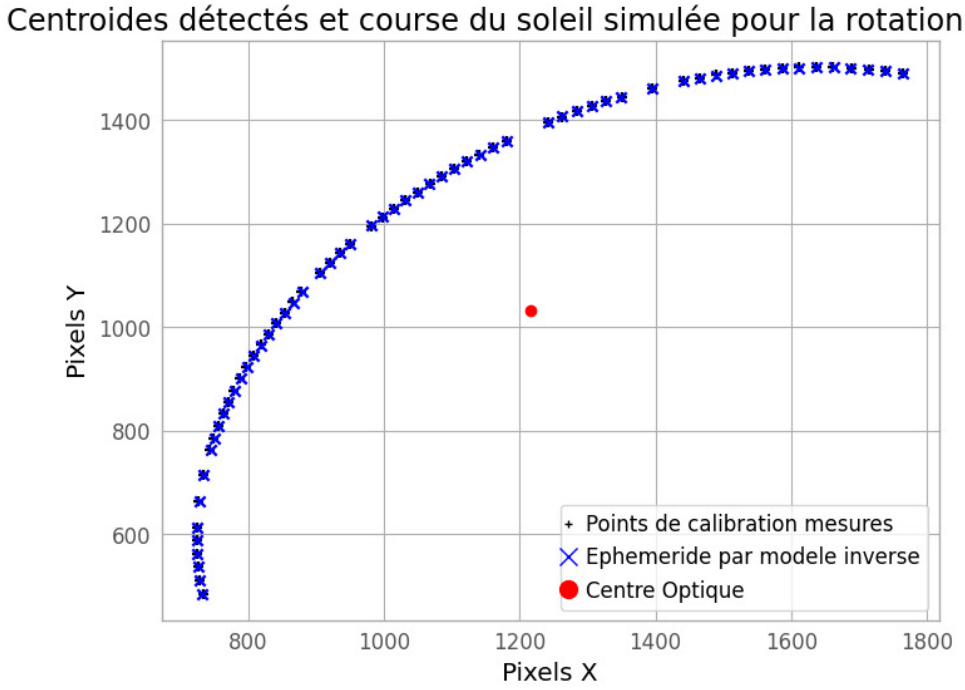



FIGURE 2.8 – Course du Soleil détectée sur le capteur sur une journée, ainsi qu'une simulation de la course du Soleil avec l'orientation du capteur estimée.

```
    beta:   2.16969520 +/- 0.01175268 (0.54%) (init = 0)
    f:      519.840014 +/- 0.06692460 (0.01%) (init = 514.1287)
[[Correlations]] (unreported correlations are < 0.100)
    C(alpha, beta) = +0.5485
    C(beta, f)     = +0.3756
    C(gamma, beta) = -0.3510
    C(alpha, f)    = +0.3316
    C(gamma, f)    = +0.1010
```

Après détection des positions et minimisation de l'erreur par rapport aux éphémérides (figures 2.8 et 2.9), le code nous fournit les trois angles d'Euler permettant de passer du repère ENU au repère Caméra, avec une estimation de l'incertitude associée. A noter que l'algorithme fait une estimation en variant les trois angles d'Euler mais aussi la focale de l'optique qui est alors estimée à 519,8 pixels · 3,45 $\mu m$ soit 1,79 mm, là où la boite à outils Matlab l'estimait à 514 pixels. Des variations de température en extérieur, ainsi que le vieillissement de l'optique avec la solarisation des verres exposés au rayonnement solaire sur le long terme pourraient expliquer cet écart. On peut répéter ce calibrage chaque jour de la base de donnée et choisir celui pour lequel la somme des erreurs quadratiques est minimale, ce qui correspond en pratique au jour où les conditions météo étaient les meilleures et où la détection du Soleil n'était pas perturbée par des nuages (figure 2.13). On observe un légér décalage au cours des deux mois qui pourrait correspondre à une dérive mécanique, ou une dérive de l'hor-

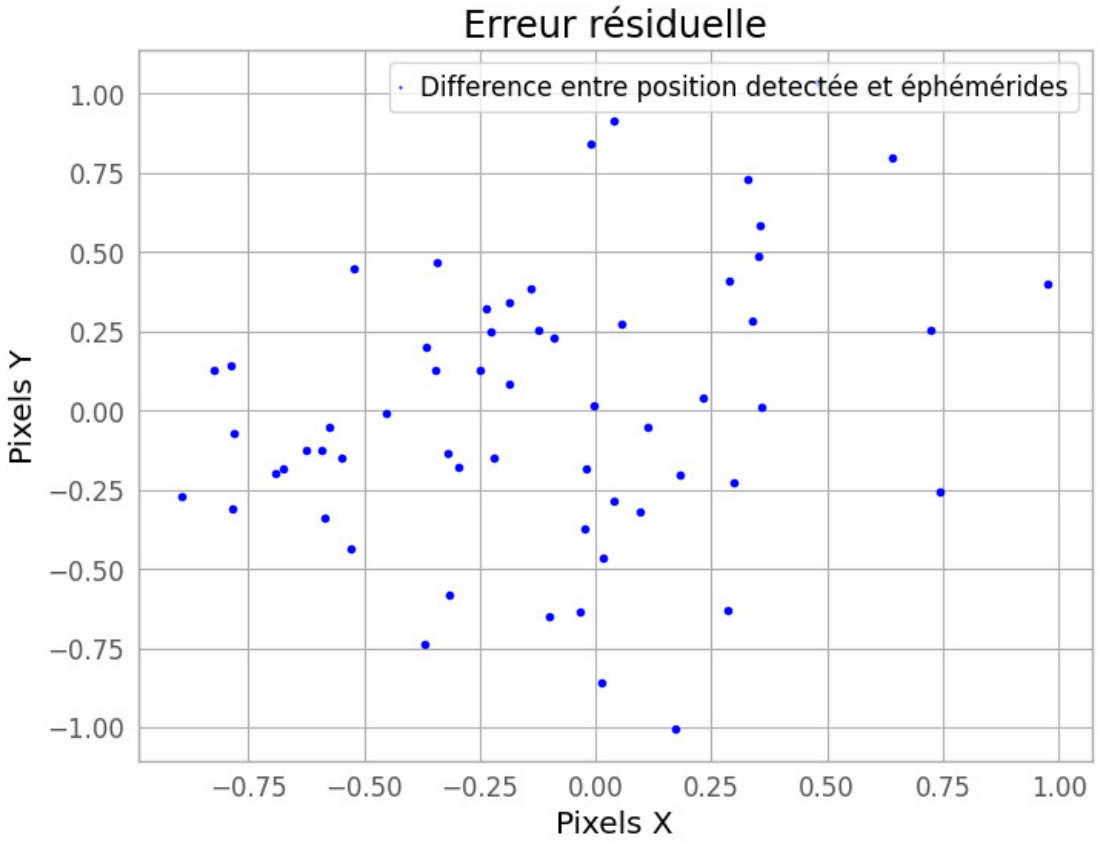



FIGURE 2.9 – Erreurs entre la course du Soleil détectée sur le capteur sur une journée, ainsi qu'une simulation de la course du Soleil avec l'orientation du capteur estimée.

loge embarquée (que n'avons malheureusement pas pu évaluer faute de connexion internet stable, ni d'accès possible à la valeur en fin d'expérience du fait que le système s'est involontairement éteint en fin de mois avant notre visite au retour de congés estivaux, impliquant une remise à zéro de l'heure).

Afin de corriger ce décalage de jour en jour, on ajoute un retard progressif sur l'horloge (de l'ordre de 5 minutes à la fin des deux mois, retard ajusté "à la main" pour avoir une courbe de tendance constante sur le premier paramètre $\gamma$). Une fois ce retard ajouté et le calibrage relancé pour chaque jour, on observe une variation dans l'estimation de l'orientation au cours des deux mois bien moindre.

On retient alors comme valeurs de l'orientation la moyenne des orientations estimée (courbes tracées en pointillés sur la figure 2.14), soit $(Z, X, Y) = (-134.98°, 0.13°, 2.77°)$. La caméra semble donc relativement bien orientée à la verticale.

Une fois cette valeur de rotation obtenue, puisque l'objectif effectue une conjugaison Infini-Capteur, on peut associer à chaque pixel de la caméra la direction du rayon incident associé dans le repère ENU. Cela permet de délimiter une zone d'image utile sur le capteur correspondant à la voûte céleste, soit une élévation des rayons

dans le repère ENU comprise entre 0 et 90° (figure 2.10). Cette zone carrée sera par la suite utilisée pour recadrer toutes les images pour gagner en espace de stockage en enlevant la zone périphérique inutile. Enfin les données sont regroupées par jour dans un fichier *Numpy*.

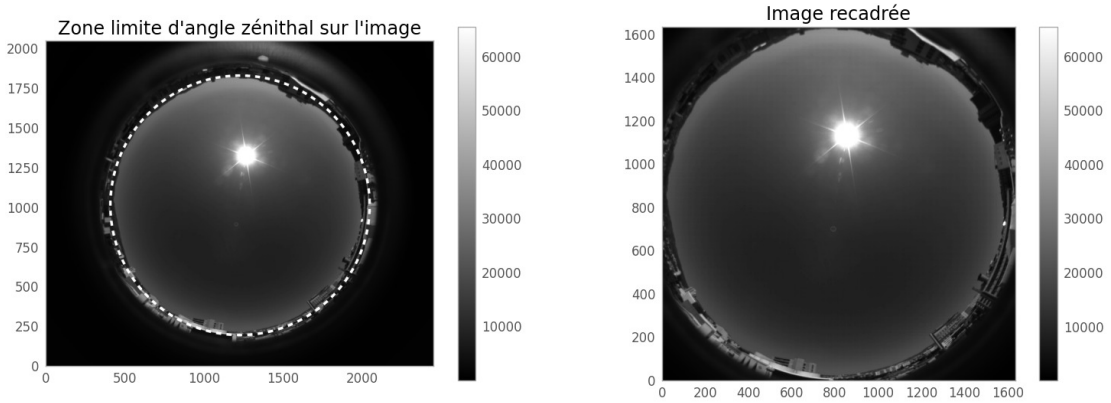



FIGURE 2.10 – Affichage de la zone limite pour laquelle les rayons incidents ont une élévation comprise entre 0 et 90° dans le repère ENU sur une image d'exemple, et recadrage d'image associé.

Enfin, cela permet d'obtenir, pour chaque pixel des images recadrées, l'incidence des rayons associés dans le repère ENU (figure 2.11). Cela permettra par exemple de simuler un ciel équivalent avec le modèle de Rayleigh.

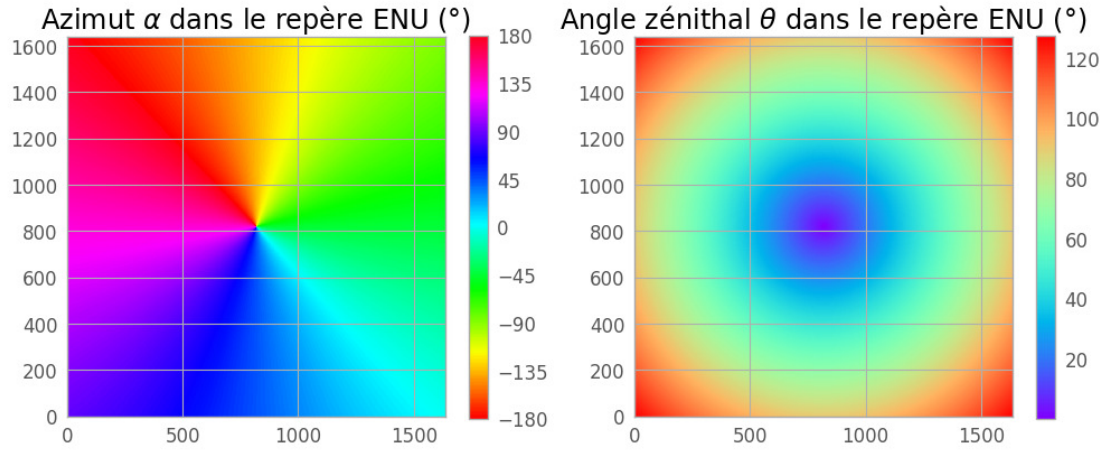
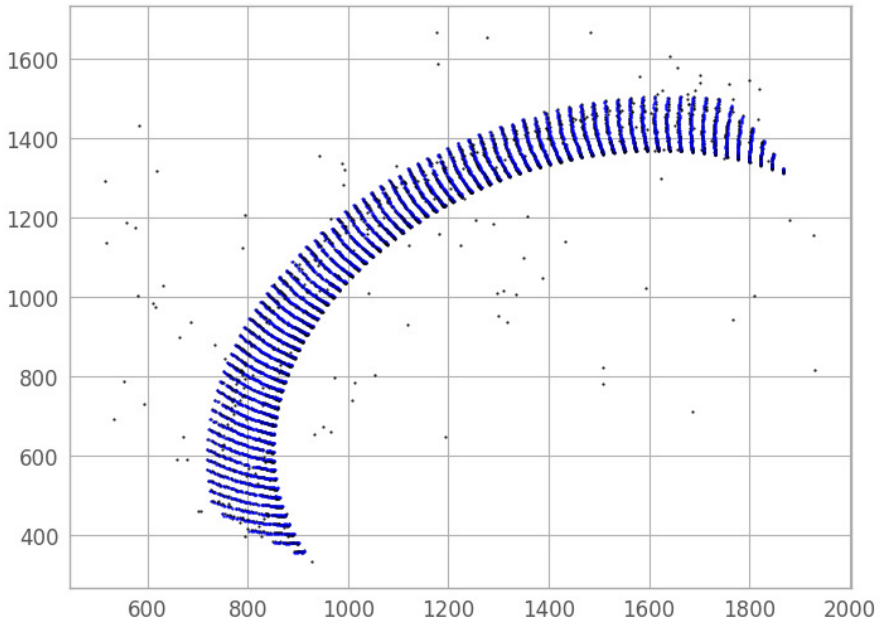


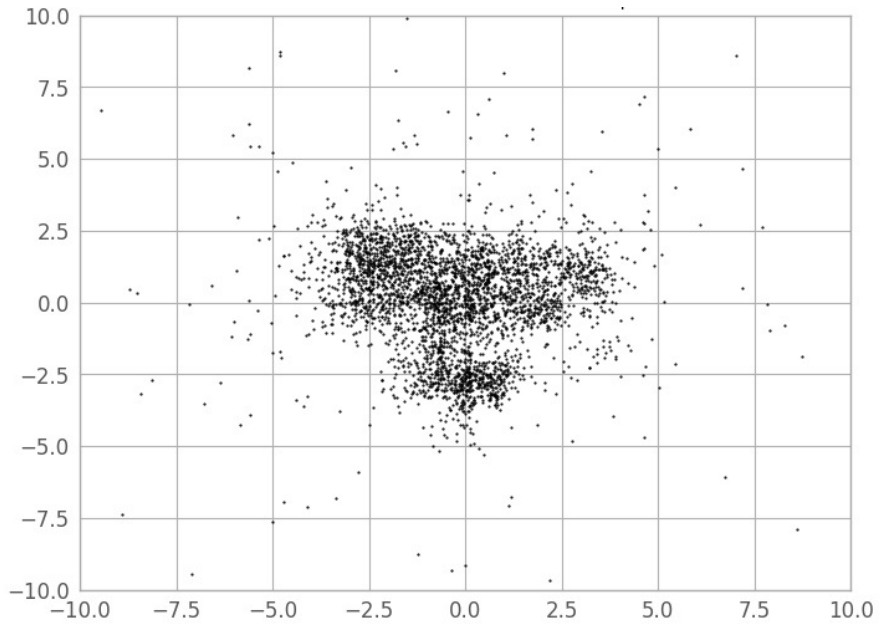

FIGURE 2.11 – Orientations (azimut $\alpha$, angle zénithal $\theta$) associées aux pixels dans le repère ENU.

La connaissance de l'orientation permet également d'estimer la position du Soleil grâce aux éphémérides même sans connaître celle-ci (lorsqu'il fait nuageux et qu'il n'est pas directement visible). On peut d'ailleurs tracer (figure 2.12), pour l'intégralité de la base de données, toutes les positions detectées du Soleil sur le capteur (en noir),

et celles estimées avec la rotation des ephémérides (en bleu). La différence est alors en règle générale de l'ordre de quelques pixels, ce qui donne une idée de la précision de cette estimation comme "vérité terrain" pour pouvoir par la suite estimer la précision d'éventuels algorithmes d'estimation de cap dans diverses conditions météo.




(a) Course estimée (en bleu) et detectée (en noir), coordonnées en pixels sur l'imageur




(b) Écart associé (zoomé, en pixels)

FIGURE 2.12 – Les courses detectées et estimées du Soleil sur toute la base de données

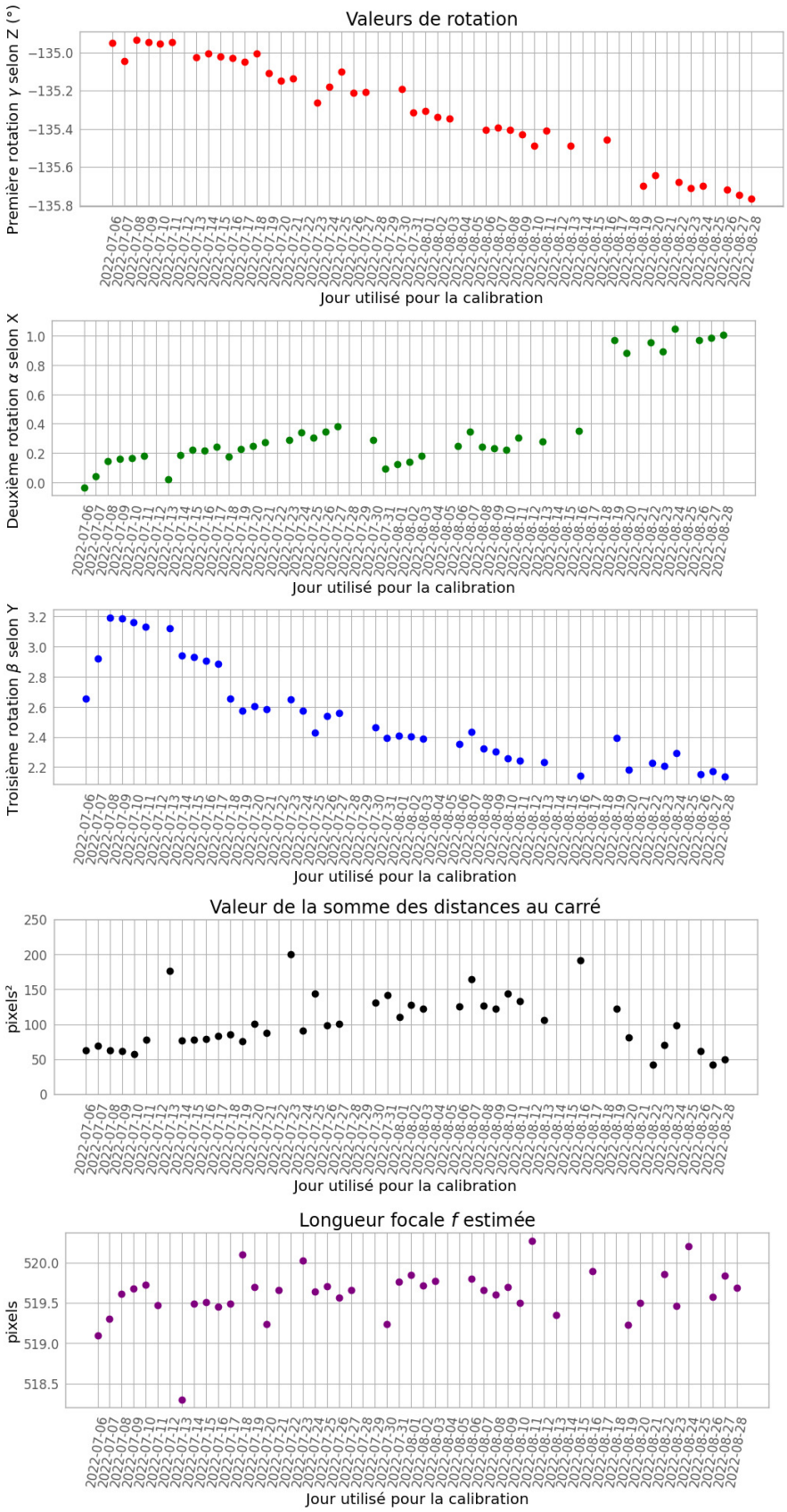



FIGURE 2.13 – Estimation de l'orientation de la caméra chaque jour de la base de données, avant correction de la dérive temporelle.

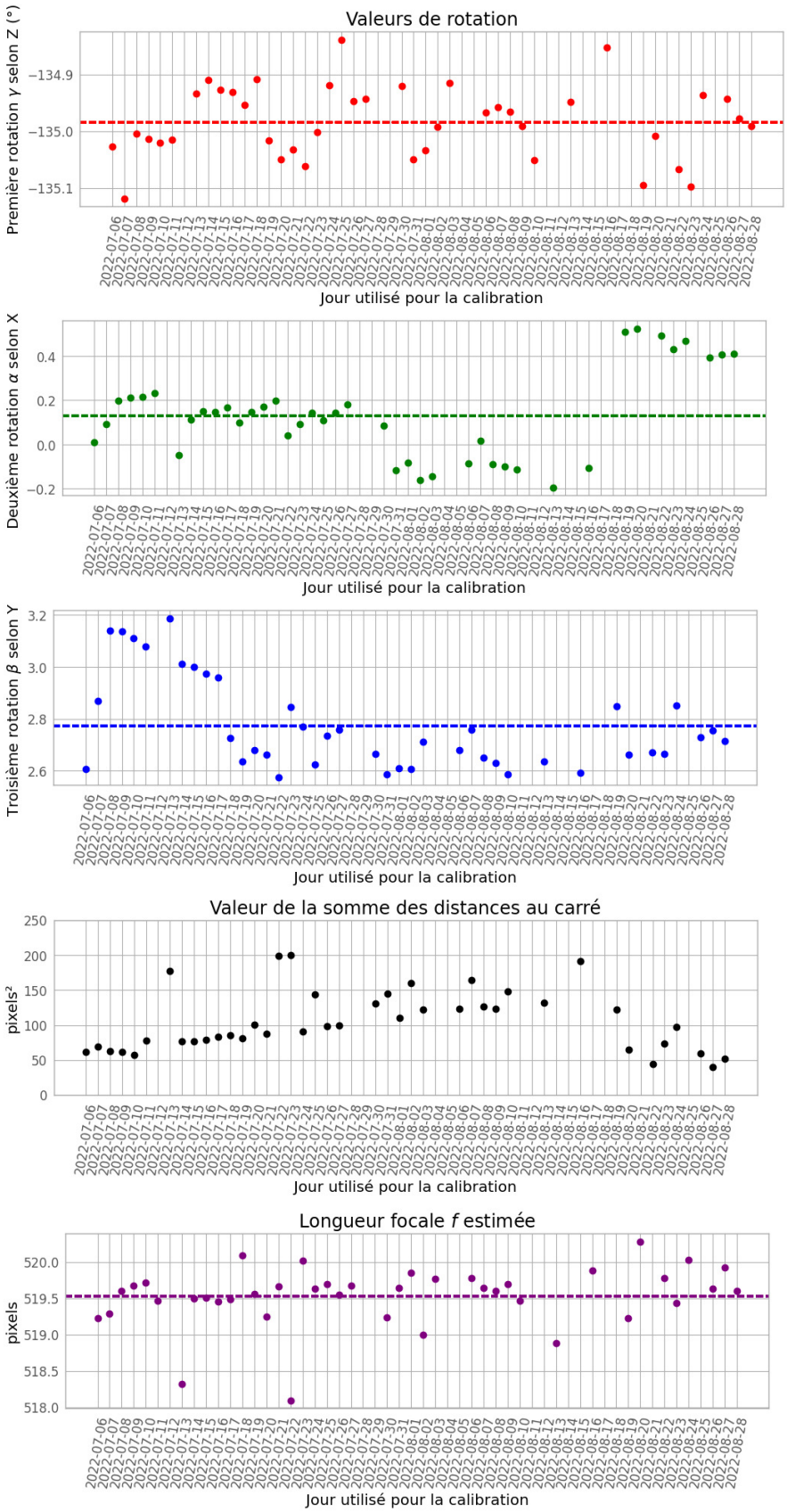



FIGURE 2.14 – Estimation de l'orientation de la caméra chaque jour de la base de données, après correction de la dérive temporelle.

## 2.4 Visualisation des données

Une fois la base de données d'images compilée, nous avons appliqué un programme de post-traitement capable de traiter l'angle (AOP) et le degré de polarisation (DOP) de chaque image. Si une image était saturée à plus de 20 %, elle était supprimée de la base de données. Les images ont été recadrées pour réduire leur taille, puis un dossier a été créé pour chaque image contenant l'image brute de polarisation, le temps d'exposition, l'horodatage, l'AOP et le DOP traités, et une figure montrant la course du Soleil au cours de la journée, l'image RGB, l'AOP et le DOP traités, et l'AOP et le DOP reconstruits à partir d'une simulation de Rayleigh du ciel au même moment vu avec le même système optique. (exemple figure 2.15)

Pour obtenir les données polarimétriques à partir d'une image, on extrait l'un des 4 canaux couleur R, Gr, Gb ou B, puis l'AOP et le DOP sont obtenus en combinant les quatre pixels adjacents dont on suppose qu'ils visent la même zone dans le ciel. En notant respectivement les intensités de chaque pixel $I_0$, $I_{45}$, $I_{90}$ et $I_{135}$, on peut alors calculer :

$$I_{dofp} = \frac{I_0 + I_{90} + I_{45} + I_{135}}{2}$$

$$Q_{dofp} = I_0 - I_{90}$$

$$U_{dofp} = I_{45} - I_{135}$$

Enfin

$$AOP = \frac{arctan2(U_{dofp}, Q_{dofp})}{2}$$

et

$$DOP = \frac{\sqrt{Q_{dofp}^2 + U_{dofp}^2}}{I_{dofp}}$$

Afin d'obtenir un temps de traitement acceptable, l'ensemble du jeu de données est transféré sur le centre de calcul intensif d'Aix-Marseille (le "mésocentre"), ce qui permet de paralléliser le traitement à l'aide du module *MultiProcessing*. Pour cela, on crée une fonction traitant une seule image, et après avoir indiqué en préambule du code effectuant le traitement un nombre de processus à lancer en parallèle, on distribue simplement plusieurs fois le même code sur différents CPU de la machine (jusqu'à 32 sur certains noeuds du cluster), chaque CPU traitant alors une image sur 32 et ignorant les autres.

### 2.4.1 Définition de l'angle de polarisation

L'angle de polarisation (AOP) d'une image 2D est défini par rapport à un axe de référence. De plus si on effectue des opérations de "miroir" sur l'image pour avoir l'origine (0,0) du tableau de données en bas à gauche ou bien en haut à gauche sur l'image, l'angle ne "tourne" pas dans le même sens sur l'image. Pour lever toute ambiguité pour l'expérimentateur qui voudrait réutiliser nos données, on a ajouté une image

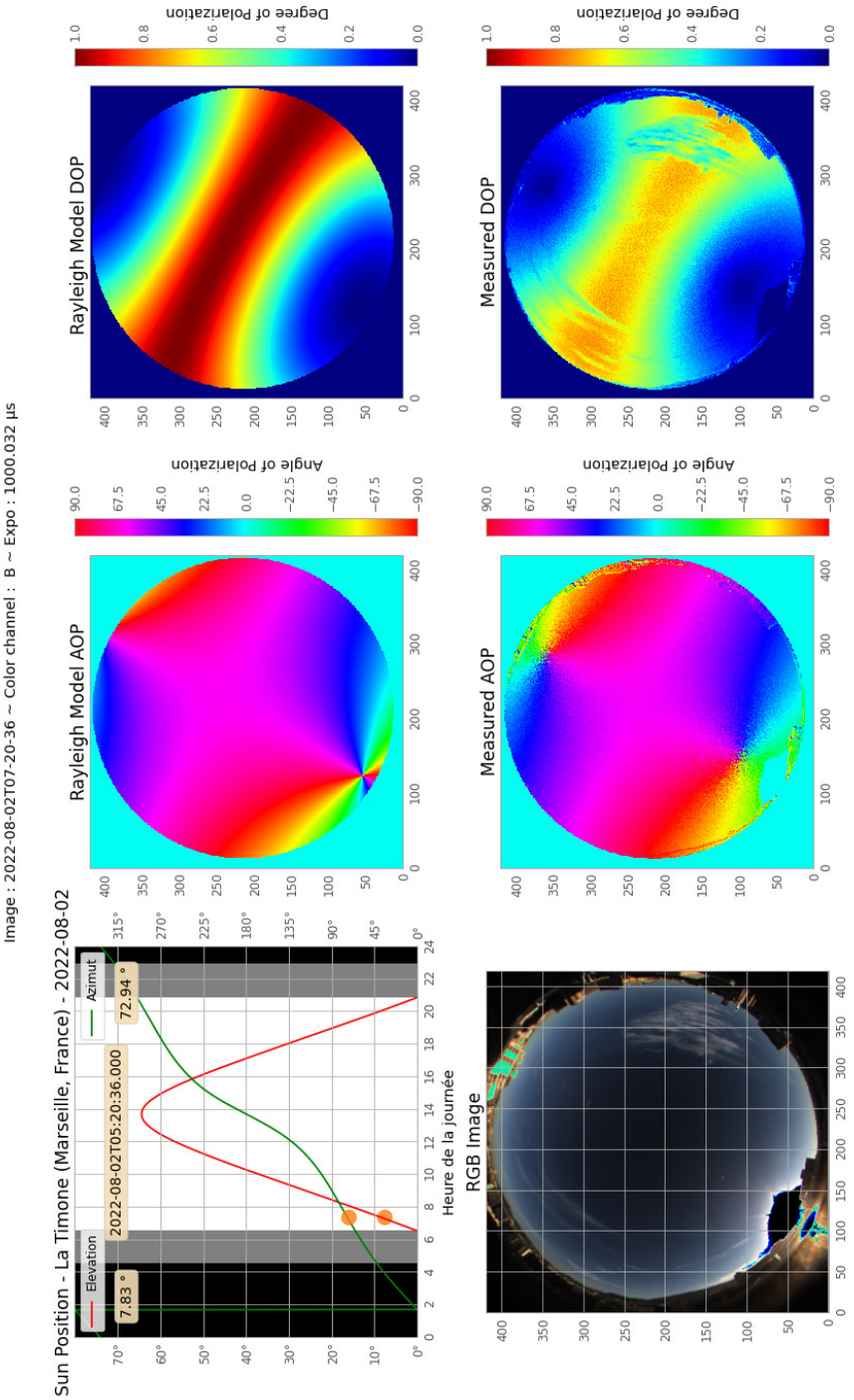



FIGURE 2.15 – Une image de l'ensemble de données avec la visualisation AOP et DOP (en bas) comparée à la simulation de Rayleigh (en haut).

d'une mire en carton couleur ayant quatre morceaux de polariseurs rectangulaires ayant leur axe de polarisation linéaire passante parallèle au long bord.

La figure 2.16 permet alors de visualiser ce que voient les 16 sous-images (4 couleurs x 4 polarisations) avec leur ordre sur le capteur.

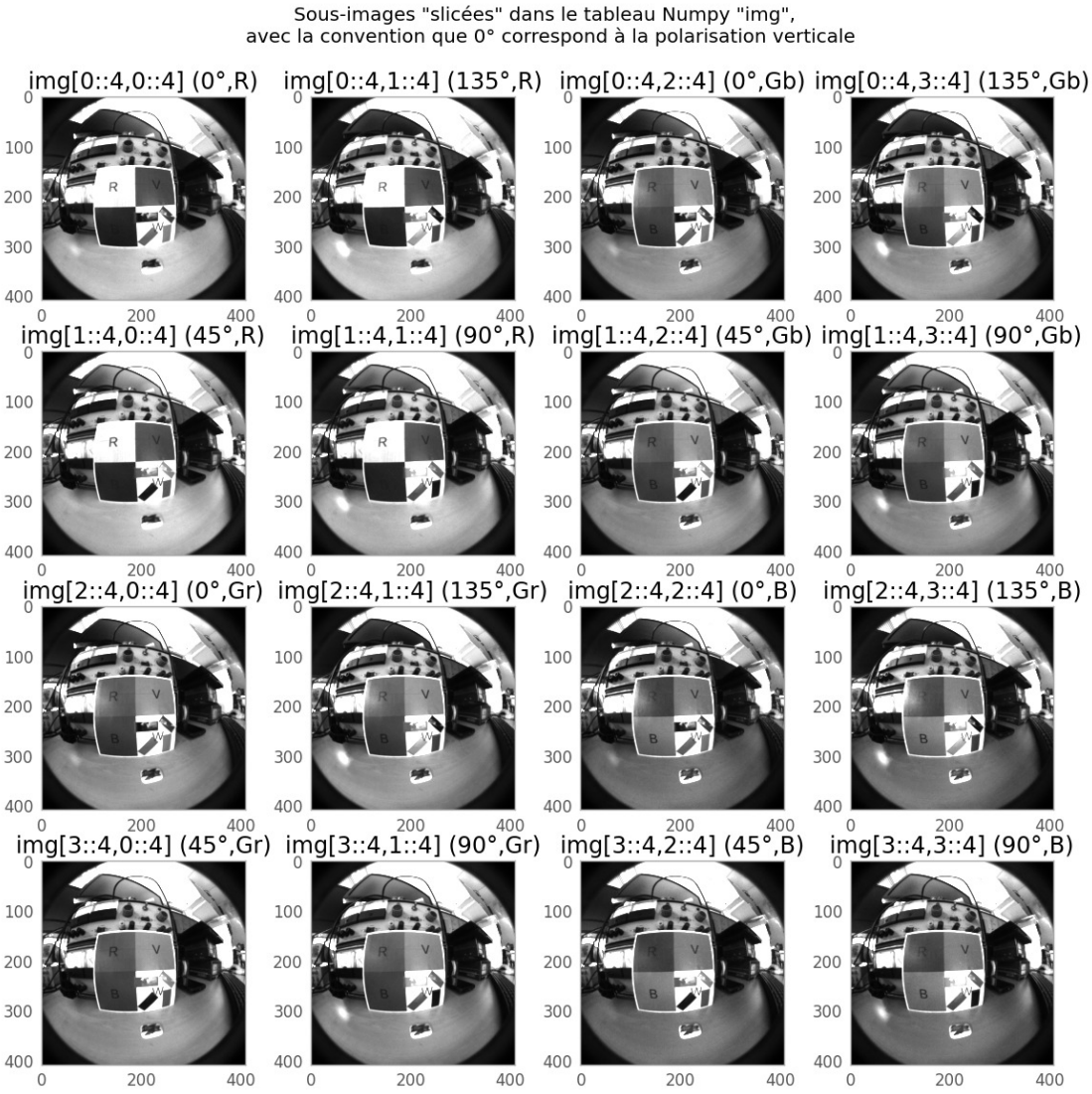
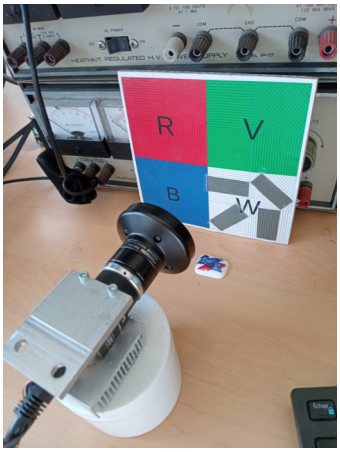
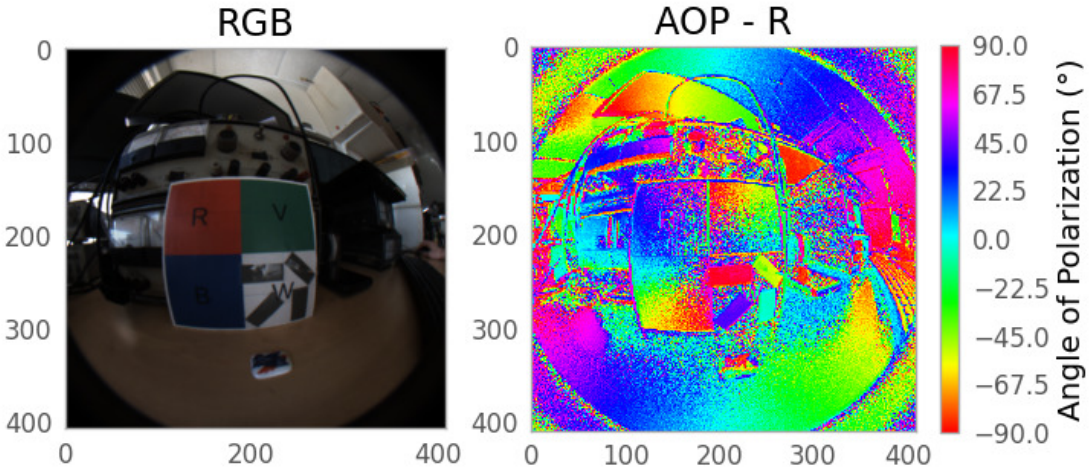



FIGURE 2.16 – Les 16 sous images (4 couleurs x 4 polarisations) extraites de la caméra et leur position dans le tableau Numpy de l'image complète.

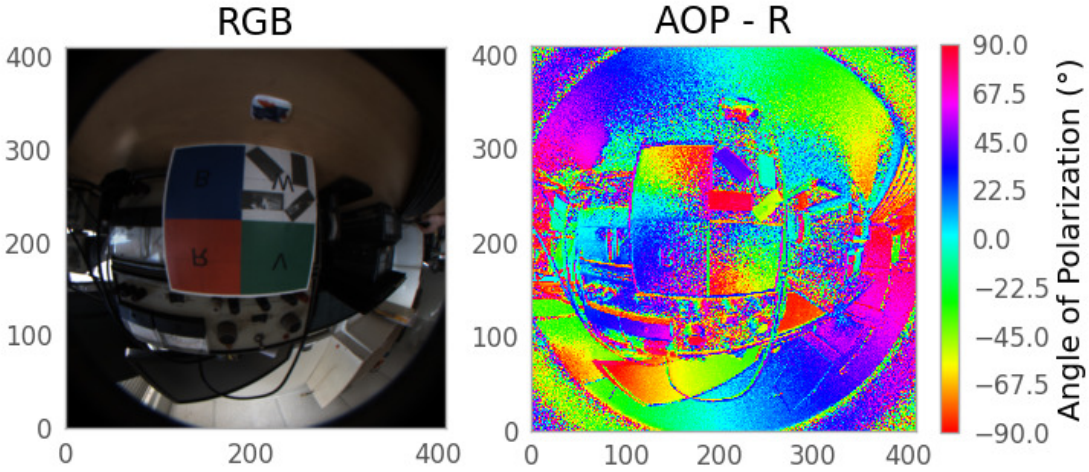
D'autre part, la figure 2.17 permet de visualiser la convention d'angle de polarisation reconstruit ainsi que le sens dans lequel il tourne, si l'image est mise en miroir vertical ou non.




(a) La scène observée par la caméra




(b) Reconstruction couleur et polarimétrique sans mettre l'image en miroir




(c) Reconstruction couleur et polarimétrique en mettant l'image en miroir

FIGURE 2.17 – Observation d'une mire couleur avec des polariseurs pour la visualisation de la convention choisie pour l'angle de polarisation.

### 2.4.2 Annotation des données

Les images ayant été prises sur près d'un mois, la météo a pu varier au cours de l'expérience. Afin de rendre les données plus exploitables, nous avons ajouté une routine (figure 2.18) pour pouvoir annoter les images en fonction de degré de couverture nuageuse, allant d'un ciel clair à une couverture complète. Les données étaient groupées par acquisition en affichant tous les temps d'exposition enregistrés afin de permettre une meilleure reconnaissance des images à l'annotateur.

Une fois l'annotation effectuée, une autre routine affiche le résultat dans un tableau (figure 2.19). Cela permet de mieux se rendre compte des différents types de ciel au cours du mois, et aussi de visualiser les enregistrements défaillants. Un utilisateur parcimonieux qui ne voudrait qu'un seul type de ciel et utilisant une machine de bureau moins puissante que le mésocentre pourra aussi choisir les jours téléchargés dans la base de données.

Les jours où la météo était sombre corresponds bien aux jours où la batterie de l'expérience s'est mal chargée (figure 2.3) ; à remarquer également, l'évolution approximative du lever et du coucher du Soleil au cours du mois, venant respectivement de plus en plus tard et tôt dans la journée.

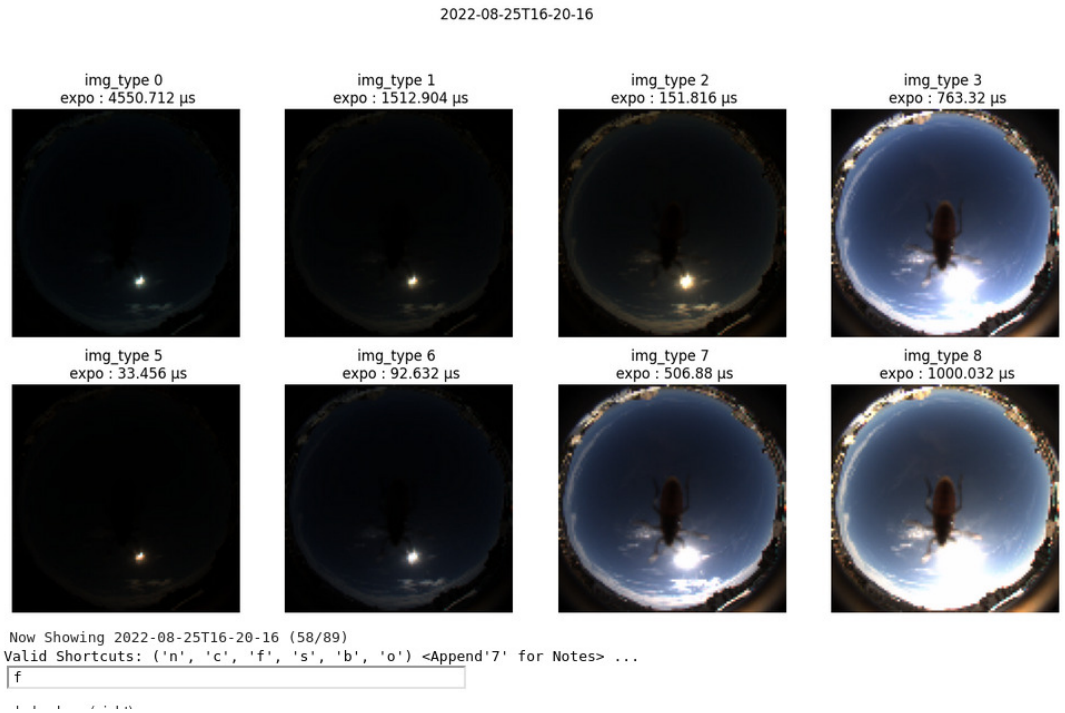



FIGURE 2.18 – Routine Python d'annotation manuelle du degré de nuages de chaque image. A noter, sur l'image présentée, la présence d'un intrus dans le champ de vue !

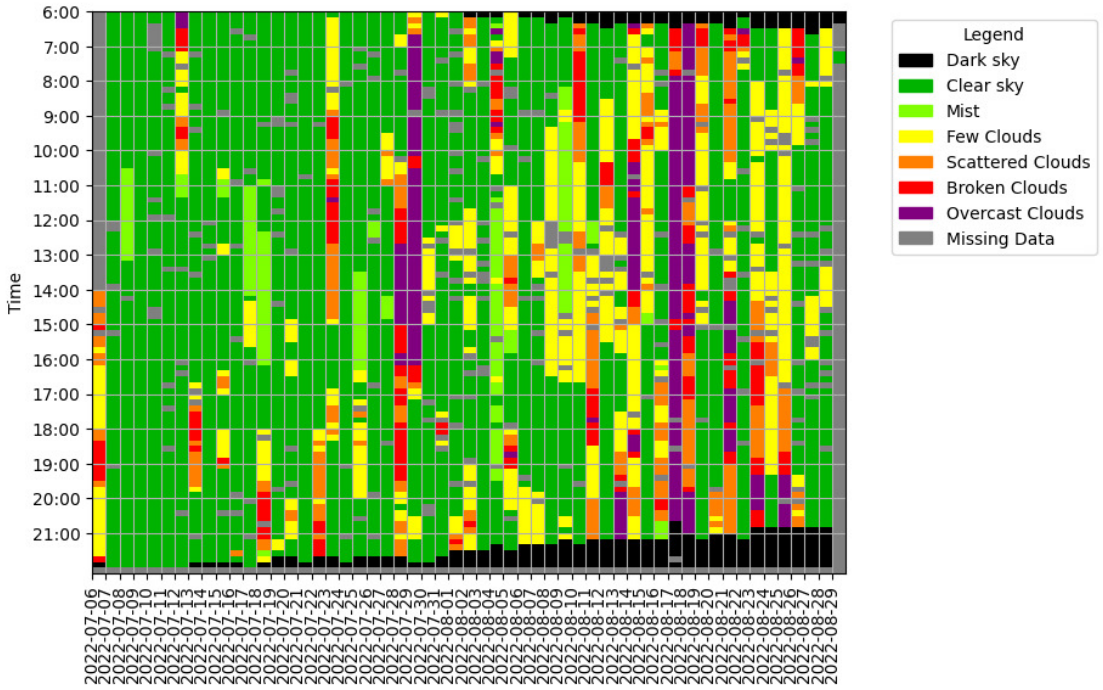



FIGURE 2.19 – Résultats des annotations manuelles des conditions météo des images au cours du mois. [POU+24]

## 2.5 Conclusion

Nous avons décrit un système autonome basé sur une caméra polarimétrique pour construire une base de données d'images. Nous avons également développé un outil open source en Python pour visualiser et comparer les images réelles avec les images simulées obtenues avec le modèle de Rayleigh. Dans un futur développement, le système pourrait être simplifié sans avoir besoin d'une monture de télescope (qui n'a que peu servi dans le cadre de cette thèse, bien que cela ait été utile pour les validations expérimentales de l'article [Kro+23]) afin de prendre des images panoramiques avec une orientation fixe de la caméra. Notre base de données pourrait être utile pour tester et développer des algorithmes de traitement d'images basés sur les réseaux neuronaux, ou par d'autres méthodes plus classiques. Enfin, notre base de données pourrait être utilisée pour valider les modèles de lumière polarisée du ciel sous diverses conditions météorologiques.

# 3 Capteur basé sur les variations de retardance d'une lame d'onde avec l'incidence

## Sommaire


3.1 Motivations et expression du besoin . . . 83
3.1.1 Structure du capteur . . . 85
3.2 Interférences en lumière polarisée . . . 85
3.2.1 Interférences en lumière polarisée monochromatique . . . 85
3.2.2 Variations avec la longueur d'onde . . . 87
3.2.2.1 Les travaux pionniers de Lyot . . . 91
3.3 La biréfringence et ses fondements théoriques . . . 92
3.3.1 Les Équations de Maxwell dans la Matière . . . 93
3.3.2 Propagation d'une onde plane dans un matériau biréfringent . . . 93
3.3.3 Le Tenseur de susceptibilité diélectrique . . . 94
3.4 Mesures ellipsométriques et détermination des indices optiques de la lame d'onde . . . 96
3.4.1 Mise en place d'une acquisition à l'ellipsomètre . . . 97
3.4.2 Extraction des matrices de Mueller et détermination des retardances mesurées . . . 98
3.4.3 Modèle physique de la lame d'onde . . . 103
3.4.4 Ecart d'azimut du polariseur vu avec l'incidence . . . 109
3.4.5 Figure d'interférences conoscopiques . . . 110
3.4.5.1 Caractérisation de la distorsion de l'objectif utilisé . . . 110
3.4.5.2 Caractérisation du capteur complet avec une source accordable . . . 114
3.4.6 La partie amont du capteur : le patron de polarisation du ciel . . . 118
3.4.6.1 Connexion avec un simulateur simple . . . 118
3.5 Essais expérimentaux . . . 119
3.5.1 Dispositif expérimental utilisé . . . 119
3.5.1.1 Capteur optique . . . 119
3.5.1.2 Monture rotative . . . 120
3.5.1.3 Contrôle de l'expérience . . . 121
3.5.2 Procédure d'acquisition . . . 122
3.5.3 Prétraitement avant entraînement . . . 123

3.5.4 Recalage des deux caméras . . . . . 123
3.5.5 Traitement des images avec une méthode d'apprentissage . . . 125
3.5.5.1 Traitement des images (données d'entrée du réseau de neurone) . . . . . 125
3.5.5.2 Traitement de l'angle (données à prédire par le réseau de neurone) . . . . . 128
3.6 Entraînement d'un réseau de neurones . . . . . 128
3.6.1 Architecture du réseau . . . . . 128
3.6.2 Résultats . . . . . 128

Ce chapitre propose un nouveau type de capteurs de position du Soleil dans la voute céleste, utilisant la polarisation de la lumière diffusée du ciel. Ceux-ci sont basés sur la variation des propriétés optiques d'une lame d'onde en fonction de l'angle d'incidence des rayons la traversant.

Ainsi, ce chapitre propose une nouvelle structure de compas optiques basés sur la lumière du ciel, composés d'une lame d'onde, d'un polariseur et d'une caméra composée d'un objectif grand angle et d'un capteur de couleur RGB. Le capteur utilise les irisations induites par les interférences de lumière polarisée qui varient en fonction de l'incidence, du degré et de l'angle de polarisation de la zone observée. Cela ajoute un motif de franges hyperboliques dont la couleur et le contraste dépendent de la polarisation de la lumière du ciel, et donc de l'orientation du capteur. L'entraînement d'un réseau de neurones permet ensuite d'estimer l'azimut du Soleil par rapport au capteur, puis d'en déduire le cap de notre capteur par rapport au repère ENU. Cette nouvelle structure brevetée [Pou+23a] présente l'avantage d'être simple, résistante à des occultations et sources ponctuelles polarisées différemment, mais aussi très peu coûteuse. La précision et l'incertitude de la mesure de l'angle du capteur d'orientation sont vérifiées par simulation numérique et par des expériences en plein air. Les résultats démontrent que le capteur d'orientation a un potentiel applicatif dans la navigation autonome, avec un coût suffisamment faible pour être compatible avec un marché de masse.

## 3.1 Motivations et expression du besoin

Comme évoqué dans le chapitre d'introduction, les capteurs existants dans la littérature n'étaient pas pleinement satisfaisants pour une application automobile.

Puisque l'on veut être robuste à des scènes plus ou moins complexes présentant des occultations du ciel avec parfois des éléments étrangers ajoutant de la lumière "parasite" polarisée différemment, il semblait nécessaire de devoir utiliser un capteur de type imageant afin d'avoir la possibilité, par la suite, en implémentant des méthodes de traitement d'image, de différencier le signal utile (celui venant du ciel), de signaux qui ne le sont pas (tels que la lumière provenant de nuages épais, de bâtiments, de réflexions sur des vitres qui sont polarisées, etc). Cependant, il semblait préférable d'utiliser un capteur ne faisant pas de division d'ouverture via différents canaux spatiaux de polarisation (tels que les systèmes à plusieurs caméras comme le

font [Fan+18] pour une automobile), puisque ceux-ci sont sensibles à une occultation proche sur l'une des voies (telle que de la boue sur un pare-brise) qui viendrait fausser l'estimation de l'angle de polarisation.

La piste la plus intéressante semble les caméras à division de plan focal, qui ont déjà été mises en œuvre par plusieurs équipes [Cou+22] [Cou+23], cependant comme déjà évoqué elles ont pour le moment un coût prohibitif pour une application automobile.

Partant de ces constats, il était donc préférable de trouver une nouvelle solution ne comportant qu'une seule caméra, qui ait un coût faible. Les caméras *bas coût* les plus répandues sont les caméras couleurs, avec parfois un grand champ de vue (puisque cela correspond à des marchés tels que les smartphones, les caméras de recul pour automobile, etc). Ce genre de composant est donc disponible pour un coût de quelques dizaines d'euros pour une application de prototypage rapide, coût qui pourrait probablement descendre à quelques euros une fois la solution industrialisée.

Par ailleurs, l'observation des tracés des rayons optiques d'un imageur *bas coût* montre que celui-ci réalise généralement une conjugaison infini-foyer, c'est-à-dire qu'il fait converger des rayons parallèles provenant d'une direction donnée en un point (une tache) sur la matrice CMOS de l'imageur.

Cela nous met donc sur la piste d'un système qui devrait moduler l'état de polarisation en fonction de l'angle à partir duquel viennent les rayons. Il pourrait en changer l'intensité et/ou la couleur, donnant un système créant des données caractérisant la polarisation de la lumière du ciel en fonction de la position du Soleil.

En cherchant dans les livres de référence de polarimétrie [Hua94] [BW99] [Gol17] [Chi19], on tombe assez rapidement sur les effets d'interférence en lumière polarisée, qui créent des irisations colorées en fonction de la polarisation incidence, grâce à l'emploi d'une lame d'onde. On observe par ailleurs que ces lames d'onde ont tendance à avoir des propriétés qui varient lorsque les rayons incidents s'écartent de la normale (utilisation pour laquelle la lame d'onde est normalement conçue). Ce qui est d'habitude considéré comme un défaut pour l'opticien pourrait alors être retourné à notre avantage pour avoir un système qui peut effectivement ajouter des couleurs sur l'image en fonction de l'état de polarisation (et donc de la position du Soleil dans le ciel).

Cela nous amène donc assez naturellement à rechercher un capteur ayant une structure telle qu'évoquée par la suite, où l'on vient simplement devant un objectif grand-angle ajouter une lame d'onde suivie d'un polariseur, donnant un montage compact.

Pour simplifier le travail au laboratoire, nous avons choisi d'utiliser des lames d'ondes en plastique (récupérées au laboratoire d'optique du site PSA de Vélizy) qui étaient donc immédiatement disponible, et dont certaines caractéristiques étaient connues. Il sera ensuite envisageable de remplacer ces lames par un élément en plastique biréfringent "quelconque" bien choisi détourné de son utilisation afin de réduire encore les coûts ; par exemple, des transparents de rétroprojecteurs, ou encore du ruban adhésif transparent.

### 3.1.1 Structure du capteur

Le capteur proposé est intitulé "PILONE" pour *Polarimètre Imageant à Lame d'Onde à Nuances Encodantes*. Il s'organise comme suit :

— Une (ou plusieurs lames) d'ondes empilées, ayant des axes rapides/lent orientés à +/- 45°,
— Un polariseur, orienté à 0°
— Un objectif grand angle
— Un capteur d'image RGB.

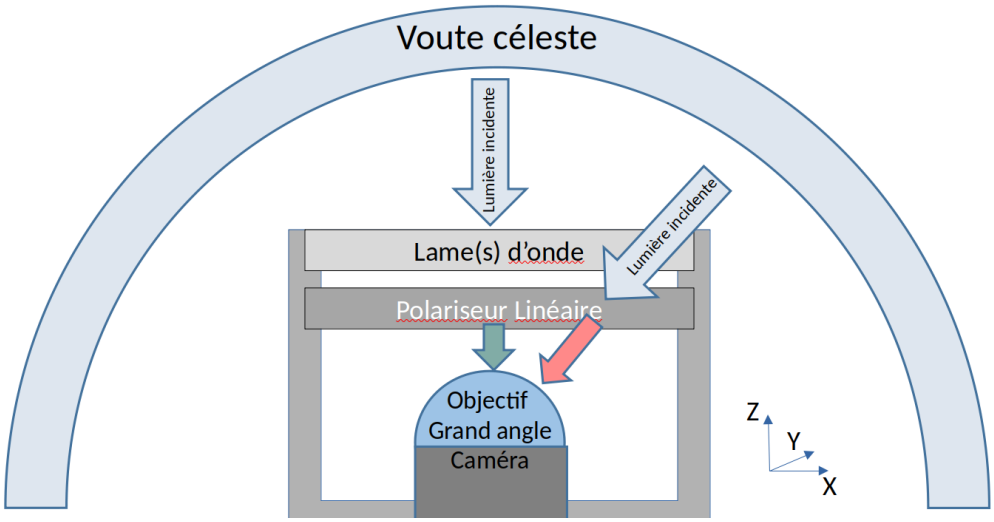



FIGURE 3.1 – Structure du capteur

Cette différence d'orientation de 45° entre les axes rapides/lents de la lame d'onde et celui du polariseur permet d'obtenir des irisations avec un contraste maximal, irisations qui dépendront de l'orientation, de la longueur d'onde et de la polarisation des rayons incidents.

## 3.2 Interférences en lumière polarisée

Afin de mieux comprendre les phénomènes physiques à l'oeuvre dans le capteur proposé, nous allons dans un premier temps étudier le phénomène d'interférences en lumière polarisée polychromatique créant des teintes irisées dans le cas simple en incidence normale, avant d'étudier le cas plus complexe régissant les rayons inclinés par rapport à l'axe optique.

### 3.2.1 Interférences en lumière polarisée monochromatique

Le principe de base du capteur présenté ici est d'utiliser les irisations colorées apparaissant lors d'interférences en lumière polarisée polychromatique ; cependant pour faciliter le calcul nous verrons d'abord ce qu'il en est dans le cas monochromatique,

avec un faisceau polarisé linéairement selon un angle $\psi$ par rapport à l'axe X du capteur. Son état de polarisation est :

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1, \\ \cos(2\psi) \\ \sin(2\psi) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

(3.2)

Un polariseur orienté à 0° a une matrice telle que :

$$M_{pola0} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

Une lame d'onde avec son axe rapide orienté à 45° a une matrice telle que :

$$M_{\delta_{45}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\delta) & 0 & -\sin(\delta) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) \end{pmatrix} \tag{3.4}$$

Le produit des deux donne :

$$M_{pola0} * M_{\delta_{45}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos(\delta) & 0 & -\sin(\delta) \\ 1 & \cos(\delta) & 0 & -\sin(\delta) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{3.5}$$

On en déduit que le vecteur de Stokes d'une onde polarisée linéairement traversant un ensemble lame d'onde+polariseur est :

$$\vec{S}_{out} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \cos(\delta) \cdot \cos(2\psi) \\ 1 + \cos(\delta) \cdot \cos(2\psi) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3.6}$$

Par ailleurs, en considérant en entrée un faisceau polarisé linéairement (donc de composante $V = 0$), en ayant un DOP tel que

$$DOP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \tag{3.7}$$

on obtient un vecteur en entrée

$$\vec{S}_{in} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1, \\ DOP \cdot \cos(2\psi) \\ DOP \cdot \sin(2\psi) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3.8}$$

soit en sortie

$$\vec{S}_{out} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + DOP \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(2\psi) \\ 1 + DOP \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(2\psi) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3.9}$$

Ainsi l'ensemble lame d'onde + polariseur va venir moduler l'intensité d'un facteur $\frac{1}{2}(1 + DOP \cdot \cos(2\psi) \cdot \cos(\delta))$. Le facteur en $\cos(2\psi)$ est dû à la différence d'azimut entre la polarisation linéaire entrante et l'axe rapide de la lame d'onde pour le rayon incident, tandis que le facteur en $\cos(\delta)$ dépend de la retardance $\delta$ (c'est-à-dire du retard de phase entre les deux polarisations propres se propageant dans la lame d'onde).

Par la suite, on verra qu'avec la variation d'incidence les axes rapides ne sont plus nécessairement à 45° du polariseur. Dans ce cas, avec un angle $\psi_{WP/P}$ entre lame d'onde et polariseur, l'intensité transmise varie alors d'un facteur $\frac{1}{2}(1 + DOP \cdot \sin(2\psi_{WP/P}) \cdot \sin(2\psi) + DOP \cdot \cos(2\psi_{WP/P}) \cdot \cos(2\psi)\cos(\delta))$.

### 3.2.2 Variations avec la longueur d'onde

Cette intensité dépend de la longueur d'onde (en nm) et du retard optique (en nm) entre les deux polarisations (c'est-à-dire une différence de marche) engendré par la lame d'onde. On considère dans ce paragraphe que l'intensité spectrale en entrée du montage est notée $I(\lambda)$ (elle sera considérée constante dans le cas d'une lumière blanche), et que la sensibilité spectrale de chaque canal R, G, B de la caméra couleur est $R_R$, $R_G$, $R_B$ (que l'on pourrait normaliser, ce qui n'a pas été fait ici où on a pris directement les valeurs fournies par la norme CIE 1964).

En partant du principe, pour simplifier notre exemple, que la différence de marche (ou retard) $\Delta$ est la même quelque soit la longueur d'onde (différence d'indices ordinaires et extraordinaires constante), la retardance $\delta$ vaut alors

$$\delta = \frac{2\pi\lambda}{\Delta}$$

soit une intensité en sortie du montage en lumière polychromatique qui vaut pour chaque longueur d'onde

$$I_{mod}(\lambda, \Delta) = I(\lambda)(1 + DOP \cdot \cos\left(\frac{2\pi\lambda}{\Delta}\right) \cdot \cos(2\psi))$$

Si on prend une caméra couleur RGB, on aura, par exemple pour le canal rouge (de même pour G et B) pour une intensité spectrale $I(\lambda)$,

$$I_R = \int_{400nm}^{800nm} R_R(\lambda) I(\lambda) d\lambda \tag{3.10}$$

soit dans le cas présent

$$I_R = \int_{400nm}^{800nm} R_R(\lambda) I_{mod}(\lambda) d\lambda = \int_{400nm}^{800nm} R_R(\lambda) I(\lambda) (1 + DOP \cdot \cos\left(\frac{2\pi\lambda}{\Delta}\right) \cdot \cos(2\psi)) d\lambda \tag{3.11}$$

ou encore en décomposant

$$I_R = \int_{400nm}^{800nm} R_R(\lambda) I(\lambda) d\lambda + DOP \cdot \cos(2\psi) \int_{400nm}^{800nm} R_R(\lambda) I(\lambda) \cos\left(\frac{2\pi\lambda}{\Delta}\right) d\lambda \tag{3.12}$$

Quelques figures d'exemples avec des valeurs différentes d'AOP et de retard sont données (figure 3.2).

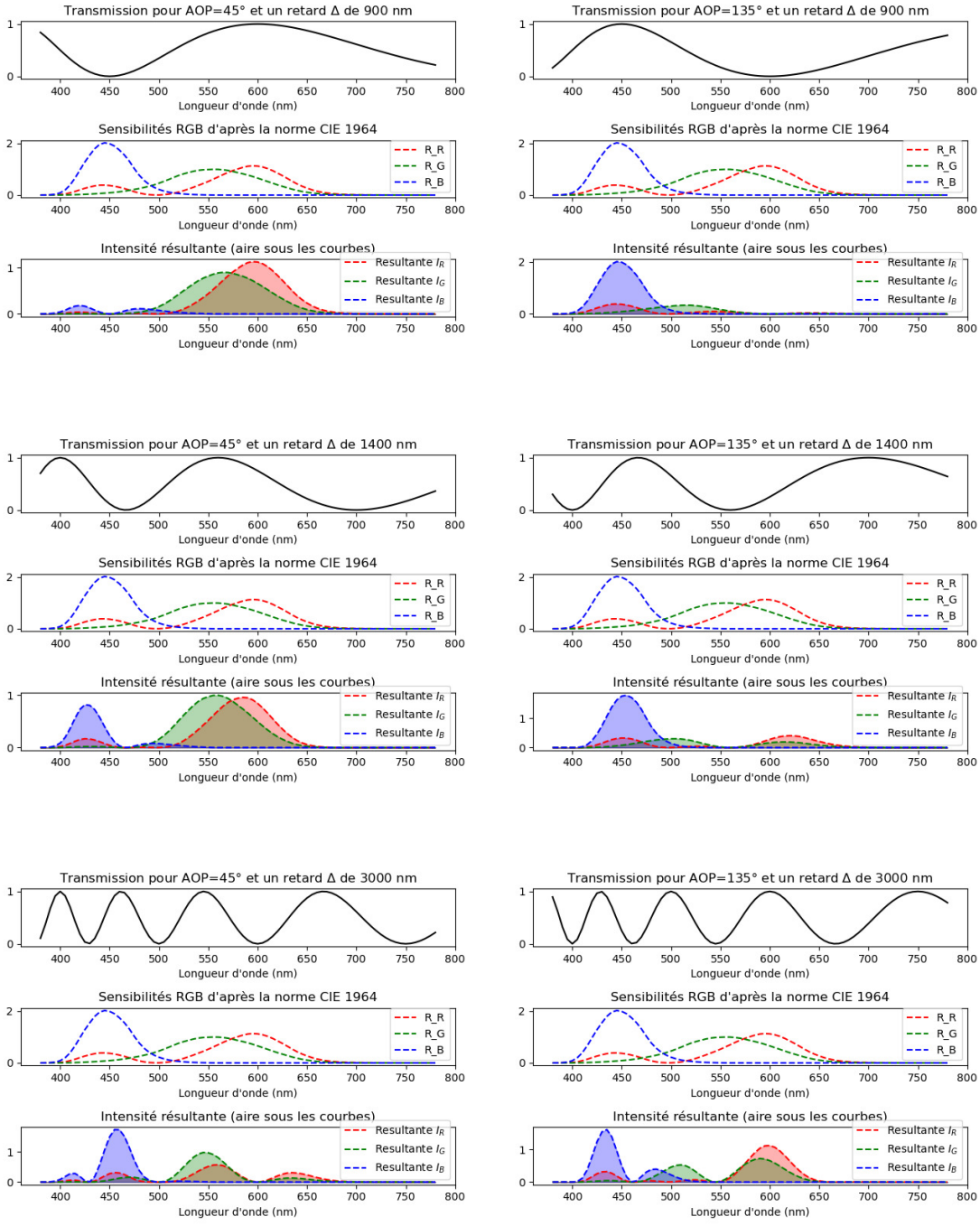



FIGURE 3.2 – Six exemples de points de fonctionnement avec un AOP à 45°/135° et un retard à 900 nm, 1400 nm, 3000nm, en lumière blanche.

Une fois ces formules obtenues, on peut calculer numériquement ces intégrales

pour obtenir l'échelle de teinte [1] apportée par la lame d'onde et le polariseur en fonction du retard et de l'AOP (figure 3.3). On observe alors que la modulation de l'intensité de chaque canal (pour chaque couleur R,G,B) en fonction du retard est complémentaire pour deux polarisations orthogonales (séparées de 90°), et que l'amplitude de modulation (c'est-à-dire l'apparence de teintes marquées ou non) est maximale pour un AOP de ±45° ou ±135° par rapport aux axes de la lame, et minimale pour un AOP de 0° ou 90° (c'est-à-dire qu'on n'aura plus de changement de couleur mais seulement une atténuation uniforme, c'est-à-dire du gris).

À retard constant, les teintes opposées d'un AOP de 90° seront complémentaires à la teinte incidente. Par ailleurs, si le retard est trop faible ($< 300nm$), on n'aura pas d'apparition de teinte, tandis que pour un retard trop élevé ($> 2500nm$) on aura des teintes moins contrastées tendant vers du turquoise/rose grisâtre puisque les oscillations dans la transmission en fonction de la longueur d'onde seront bien plus rapprochées que la bande de transmission de chaque canal couleur.

1. sorte de généralisation de l'échelle des teintes de Newton (ou de Auguste Michel-Levy) à centre noir ou à centre blanc selon que les polariseurs soient croisés ou parallèles

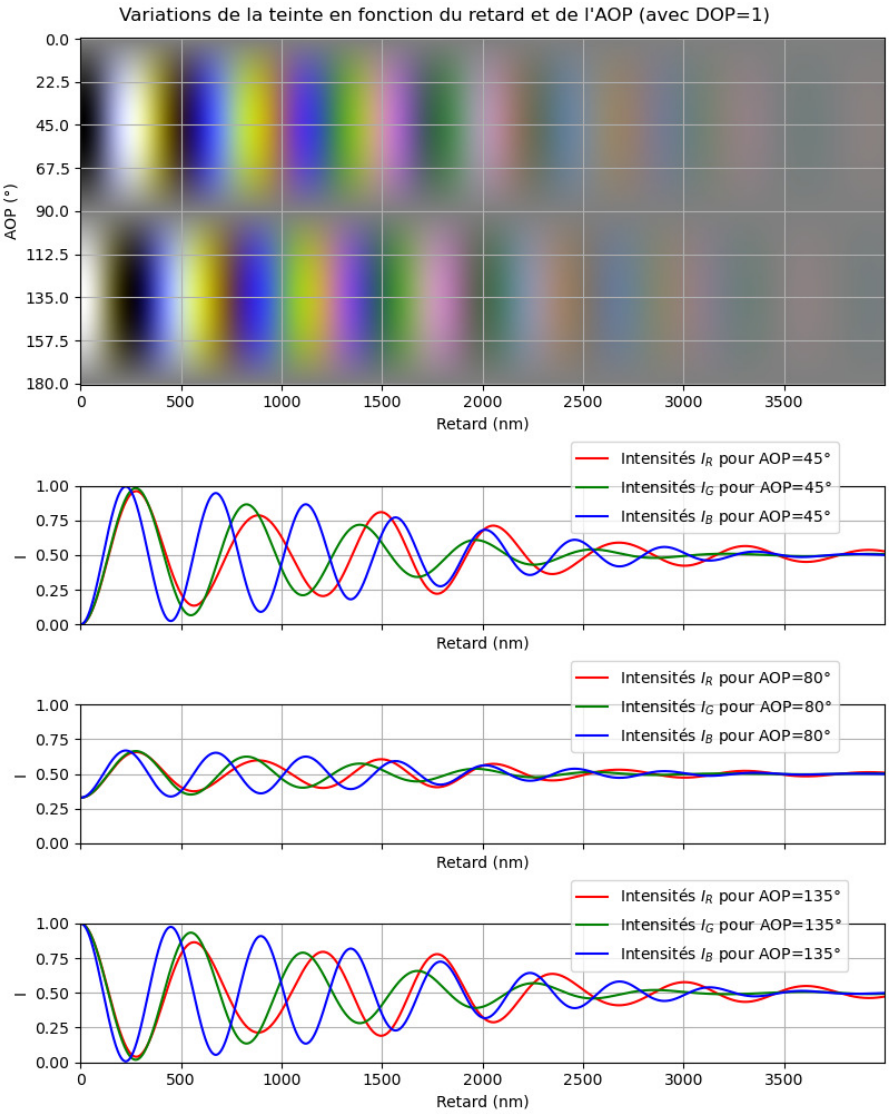



FIGURE 3.3 – Echelle de teintes en fonction de l'AOP et du retard de la lame d'onde, pour DOP= 1.

### 3.2.2.1 Les travaux pionniers de Lyot

Bernard Lyot utilisait ce principe d'interférences en lumière polarisée pour obtenir des filtres en longueur d'onde. Cela lui a permis notamment de faire des observations de la couronne solaire en l'adaptant sur le coronographe du Pic du Midi en 1941 [Lyo44] [2].

Pour cela, il utilisait plusieurs filtres biréfringents avec des lames d'onde d'épaisseurs différentes (en progression géométrique). Cela permettait alors d'obtenir des filtres très sélectifs en longueur d'onde, légèrement accordables en faisant varier la température. Lyot utilisait des combinaisons de matériaux différents pour les lames

2. Nous avons donc développé un capteur bio-inspiré, mais aussi Lyot-inspiré!

d'ondes pour compenser en partie la variation de biréfringence avec l'incidence afin d'obtenir un grand champ de vue, soit tout le contraire de ce que l'on compte faire dans cette thèse.

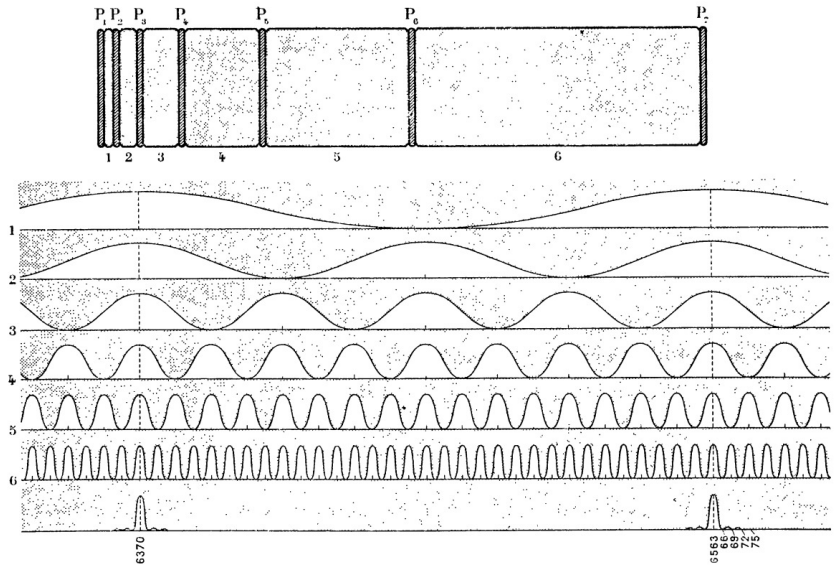


FIGURE 3.4 – Schéma et bandes transmises par étage d'un filtre réalisé par Lyot, d'après [Lyo44].

## 3.3 La biréfringence et ses fondements théoriques

Cette section explique la provenance de l'effet de variation des propriétés d'une lame d'onde (principalement sa retardance) en fonction de l'incidence et de l'azimut des rayons.

Pour cela, il va nous falloir réaliser un modèle de la propagation des ondes dans le matériau nous permettant de mieux comprendre leur origine théorique.

Ensuite, des mesures à l'ellipsomètre permettront d'estimer les indices optiques du milieu utilisé en pratique, et d'en déduire un modèle de son comportement en fonction de l'incidence.

Plusieurs cours [BKB65] [Fin24] et ouvrages permettent d'aller plus loin dans la compréhension de ces phénomènes qui ont historiquement été étudiés dès la fin du XIXe et au début du XXe siècle [shu60] [Olo13] [BW99] [SM94].

La biréfringence est une propriété apparaissant dans les matériaux optiques anisotropes. Dans le cas général, comme on pourra le voir par la suite, et pour une direction de propagation donnée, il existera deux ondes de directions de polarisation différentes pouvant se propager dans le matériau, ayant chacune une vitesse de propagation différente. Cette différence dans la vitesse de propagation engendrera alors un retard d'une des deux ondes par rapport à l'autre, et en sortie de lame une modification de l'état de polarisation.

### 3.3.1 Les Équations de Maxwell dans la Matière

Les équations de Maxwell décrivent le comportement des champs électromagnétiques. Dans un matériau, elles se formulent comme suit :

$$div(\vec{D}) = \rho \tag{3.13}$$

$$div(\vec{B}) = 0 \tag{3.14}$$

$$rot(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{3.15}$$

$$rot(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{3.16}$$

où $\mu_0$ et $\epsilon_0$ sont les perméabilités magnétiques et électriques du vide, $\vec{E}$ est le champ électrique, $\vec{D}$ est le déplacement (ou induction) électrique, $\vec{B}$ est l'induction magnétique, $\vec{H}$ est le champ magnétique, $\rho$ la densité de charges et $\vec{J}$ est la densité de courant.

Dans le cas de l'optique, il n'y a pas de courants ni de charges dans le matériau ($\rho = 0$ et $\vec{J} = 0$), et le matériau n'est pas magnétique ($\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$).

Les équations de Maxwell deviennent alors :

$$div(\vec{D}) = 0 \tag{3.17}$$

$$div(\vec{B}) = 0 \tag{3.18}$$

$$rot(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{3.19}$$

$$rot(\vec{H}) = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{3.20}$$

### 3.3.2 Propagation d'une onde plane dans un matériau biréfringent

On cherche à connaître les conditions sur $\vec{k}$ pour l'existence d'une onde plane de forme $\vec{A}(\vec{r}, t) = \vec{A}_0 exp(i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_0))$ se propageant dans un matériau biréfringent.

Une dérivation par rapport au temps sur une onde plane donne alors $\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -i\omega \vec{A}$ tandis que l'application des opérateurs divergence et rotationnel s'écrivent $div(\vec{A}) = i\vec{k} \cdot \vec{A}$ et $rot(\vec{A}) = i\vec{k} \wedge \vec{A}$

Les équations de Maxwell se réécrivent donc :

$$\vec{D}\cdot\vec{k}=0 \tag{3.21}$$
$$\vec{H}\cdot\vec{k}=0 \tag{3.22}$$
$$\vec{k}\wedge\vec{E}=\mu_0\omega\vec{H} \tag{3.23}$$
$$\vec{k}\wedge\vec{H}=-\omega\vec{D} \tag{3.24}$$

Il est alors possible d'en déduire que

$$\vec{D}=\frac{-1}{\omega}\vec{k}\wedge\vec{H} \tag{3.25}$$

soit

$$\vec{D}=\frac{-1}{\omega^2}\vec{k}\wedge(\vec{k}\wedge\vec{E}) \tag{3.26}$$

ou encore

$$\vec{D}=\frac{-1}{\omega^2}(-\vec{k}\cdot\vec{E}\vec{k}+\vec{k}\cdot\vec{k}\vec{E}) \tag{3.27}$$

En posant un vecteur normalisé $\vec{u}$ tel que $\vec{k}=k\vec{u}$, on obtient alors :

$$\vec{D}=\frac{\vec{k}^2}{\mu_0\omega^2}(\vec{E}-(\vec{u}\cdot\vec{E})\vec{u} \tag{3.28}$$

### 3.3.3 Le Tenseur de susceptibilité diélectrique

Pour un matériau anisotrope, $\vec{D}$ est relié à $\vec{E}$ par

$$\vec{D}=\epsilon_0\epsilon_r\vec{E} \tag{3.29}$$

La relation entre le champ électrique $\vec{E}$ et la polarisation $\vec{P}$ est donnée par :

$$\vec{P}=\epsilon_0\chi\vec{E} \tag{3.30}$$

où $\epsilon_0$ est la permittivité du vide et $\chi$ est un tenseur de rang 2. Dans un matériau biréfringent, $\chi$ n'est pas scalaire mais un tenseur qui dépend de la direction, ce qui signifie que les composantes de $\vec{P}$ ne sont pas nécessairement alignées avec celles de $\vec{E}$.

En optique, $\epsilon_r$ est symétrique et réel donc diagonalisable dans un repère d'axes propres que l'on peut nommer XYZ [3] auxquels on peut associer trois indices optiques $n_X^2$, $n_Y^2$, et $n_Z^2$ :

$$\epsilon_r=\begin{pmatrix}\epsilon_{r,x}&0&0\\0&\epsilon_{r,y}&0\\0&0&\epsilon_{r,z}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}n_X^2&0&0\\0&n_Y^2&0\\0&0&n_Z^2\end{pmatrix} \tag{3.31}$$

3. malgré la même notation, ce n'est pas necessairement le même repère que le repère associé à la caméra dans le chapitre prcédant par exemple ...

Si les trois indices sont différents, on a alors un milieu anisotrope dit "biaxe".

Si seulement deux d'entre eux sont égaux, alors il est dit uniaxe (si par exemple $n_X^2 = n_Y^2 \neq n_Z^2$ alors il sera uniaxe d'axe Z) et on notera les deux indices égaux indice "ordinaire" $n_O$ et le troisième indice "extraordinaire" $n_E$. Si on a $n_E > n_O$ le milieu est dit uniaxe positif, et si $n_E < n_O$ il est uniaxe négatif.

Enfin si le milieu est isotrope, on aura alors $n_X^2 = n_Y^2 = n_Z^2$ et $\epsilon_r$ devient un simple scalaire dans les équations.

En combinant les équations 3.28 et 3.29, on obtient alors [Fin24], après avoir remplacé le tenseur $\epsilon_r$, l'équation de Fresnel aux indices pour une onde se propageant selon une direction de propagation $\vec{u} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix}$ :

$$\frac{n_X^2 \alpha^2}{n^2 - n_X^2} + \frac{n_Y^2 \beta^2}{n^2 - n_Y^2} + \frac{n_Z^2 \gamma^2}{n^2 - n_Z^2} = 0 \tag{3.32}$$

Cette équation admet, dans le cas où au moins deux des indices sont différents (milieu anisotrope), deux solutions $\vec{D'}$ et $\vec{D''}$ dont on peut montrer qu'elles sont polarisées linéairement dans le milieu, et orthogonales entre elles.

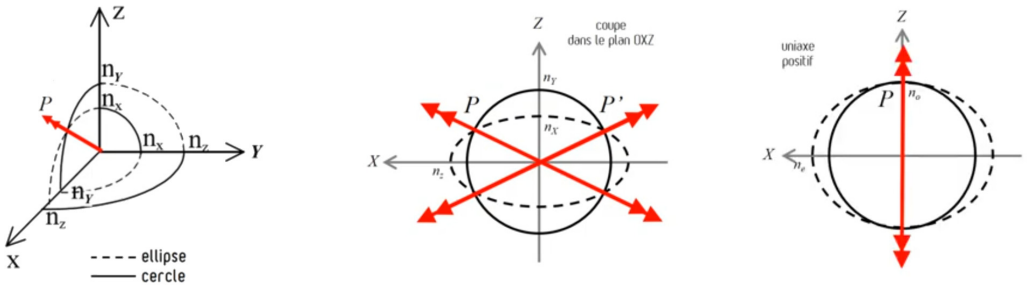
On peut alors définir ce qu'on nomme la surface des indices (lieu des points M tels que $\vec{OM} = n\vec{u}$) ou encore celle des vitesses (figure 3.6) en remplaçant $n$ par $v = \frac{c}{n}$.

Ainsi, la propagation d'une onde plane dans un matériau biréfringent est régie par les propriétés directionnelles de $\epsilon_r$. La relation de dispersion n'est alors pas isotrope et dépend de la direction de $\vec{k}$. L'indice de réfraction $n$ vu par l'onde est alors fonction de la direction de propagation et de la polarisation de l'onde.

On peut alors tracer dans un octant (un huitième de l'espace en trois dimensions, par exemple la zone telle que $X$, $Y$, et $Z > 0$) ou dans certains plans les surfaces des indices que verront les deux ondes se propageant dans le milieu.

Il existe un cas particulier où les deux indices vus par l'onde sont identiques, on nomme alors la direction dans laquelle cela se produit d'axe optique du matériau. Par exemple, figure 3.5a, on observe ce cas dans la direction notée "P". Dans ce cas, l'onde ne verra pas de déphasage d'une de ses composantes par rapport à l'autre, c'est-à-dire une retardance nulle et donc un matériau équivalent à un matériau isotrope dans cette direction de propagation.

Pour un matériau biaxe ($n_x \neq n_y \neq n_z$) on obtiendra deux directions dans lesquelles cela se produit (d'où le non de "biaxe") tandis que dans un matériau uniaxe, les deux axes optiques se confondent en un seul (figure 3.5c).




(a) Coupe de la surface des indices selon un octant pour un milieu biaxe

(b) Coupe dans le plan X-Z d'un milieu biaxe et axe optique

(c) Coupe dans le plan X-Z d'un milieu biaxe et axe optique

FIGURE 3.5 – Coupes des surfaces des indices optiques vus par une onde se propageant dans le matériau. Extrait de [Fin24].

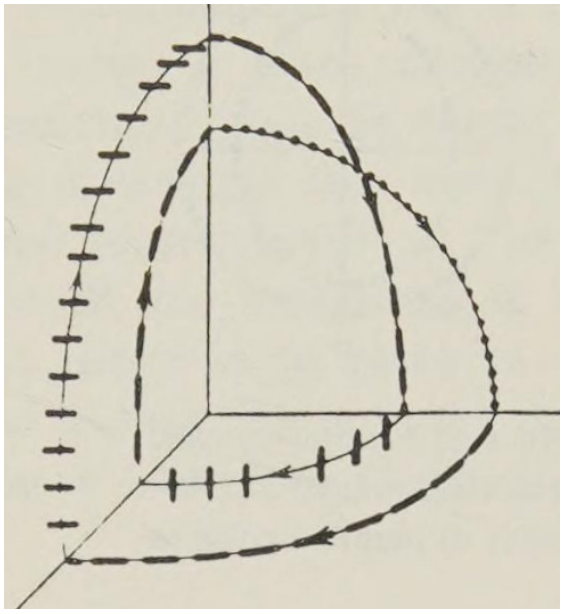


FIGURE 3.6 – Surfaces d'ondes et polarisations associées dans un milieu biaxe, d'après [shu60].

## 3.4 Mesures ellipsométriques et détermination des indices optiques de la lame d'onde

Les lames d'onde utilisées pour les expériences qui vont suivre sont des lames d'onde fabriquées par Anchor Optics, anciennement la division *bas coût* d'Edmund Optics, référence "27344 (QWEP)". Étant donné que ces produits ne sont plus fabriqués, il nous a été difficile de trouver des informations pertinentes à leur sujet, d'autant plus que les documents transmis (après demande) par Edmund Optics mentionnent

des épaisseurs de 70 ou 120 $\mu$m là où une mesure au micromètre donne plutôt une épaisseur de l'ordre de 88 $\mu$m. Quoi qu'il en soit, une lame d'onde est généralement conçue pour fournir une retardance donnée (dans notre cas 90° puisque c'est une lame quart d'onde) à une longueur d'onde donnée (généralement dans le vert, la documentation donnant une retardance à 90° pour $\lambda = 570nm$.

Peu d'informations complémentaires sont fournies, mis à part un unique indice de réfraction donné à $n = 1,485$.

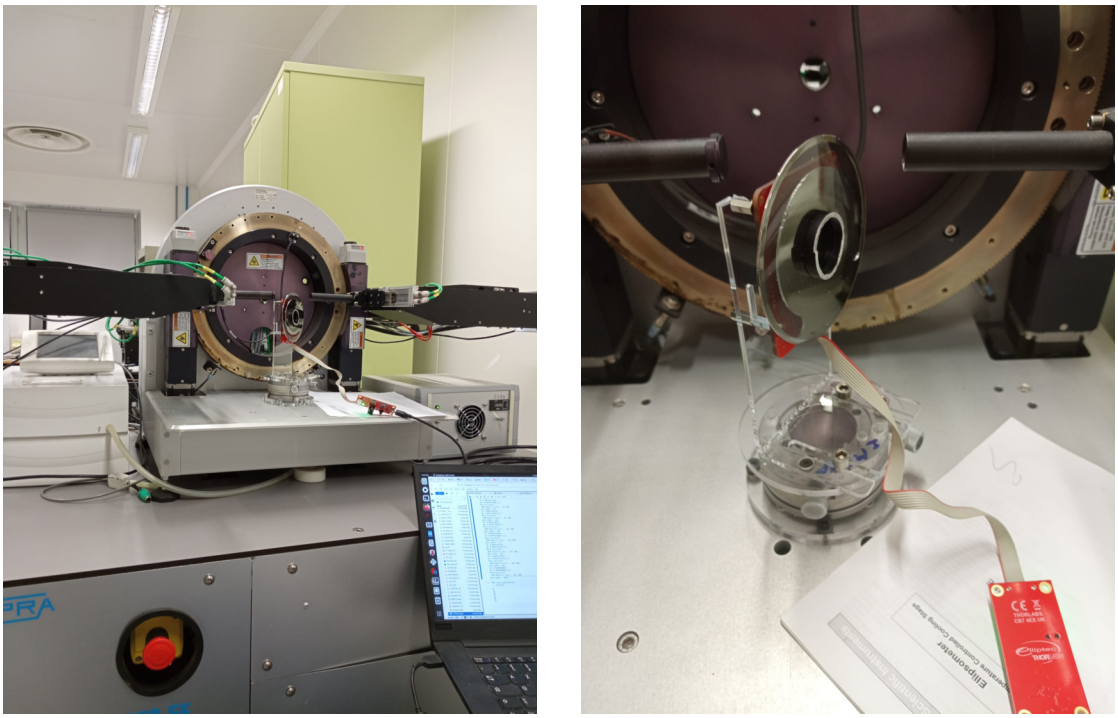
Il était donc nécessaire de réaliser des investigations supplémentaires pour obtenir le comportement détaillé de la lame d'onde en fonction de l'incidence, de la polarisation et de la longueur d'onde dans le spectre visible.

### 3.4.1 Mise en place d'une acquisition à l'ellipsomètre

Puisque le laboratoire partenaire de l'ISM, l'Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence (IM2NP) à Chateau-Gombert, disposait d'un ellipsomètre spectroscopique (figure 3.7) de marque SOPRA, référence GES5E, il a été possible d'étudier le comportement de la lame d'onde en incidence. Pour cela, un montage mécanique a été réalisé avec une monture rotative Thorlabs Elliptec ELL14 (la carte rouge sur la figure 3.7b) qui permettait de faire tourner l'azimut des rayons parvenant sur le filtre, tandis qu'une monture mécanique manuelle en contrôlait l'incidence. La lame d'onde plastique était découpée au laser et fixée à un disque en métal présentant une encoche oblongue circulaire laissant passer le faisceau de l'ellipsomètre y compris avec des incidences élevées.

L'ellipsomètre était configuré en mode "mesure de matrice de Mueller", en inclinant les bras pour les avoir face à face "en transmission", puis le montage mécanique était monté à la place du support habituel des échantillons. Quelques essais permettaient d'aligner grossièrement l'azimut mécanique de la lame d'onde (contrôlée par la monture mécanique) avec les axes de l'ellipsomètre pour définir l'incidence normale.

Enfin, un jeu de mesures étaient pris en faisant varier l'incidence pour les valeurs de 0°, 20°, 40°, 60° et 75° et l'azimut de 0°, 45°, 90°, et 135°. Quelques mesures supplémentaires ont aussi été prises avec une incidence de 10° et 30° et un azimut mécanique de 45° et 135°.



(a) Vue globale (b) Vue rapprochée

FIGURE 3.7 – Caractérisation du comportement optique d'un matériau en fonction de l'azimut et de l'incidence à l'ellipsomètre.

### 3.4.2 Extraction des matrices de Mueller et détermination des retardances mesurées

Une fois les mesures effectuées, on se retrouve avec des fichiers comportant pour chaque orientation et chaque longueur d'onde, une estimation de la matrice de Mueller effectuée par l'ellipsomètre.

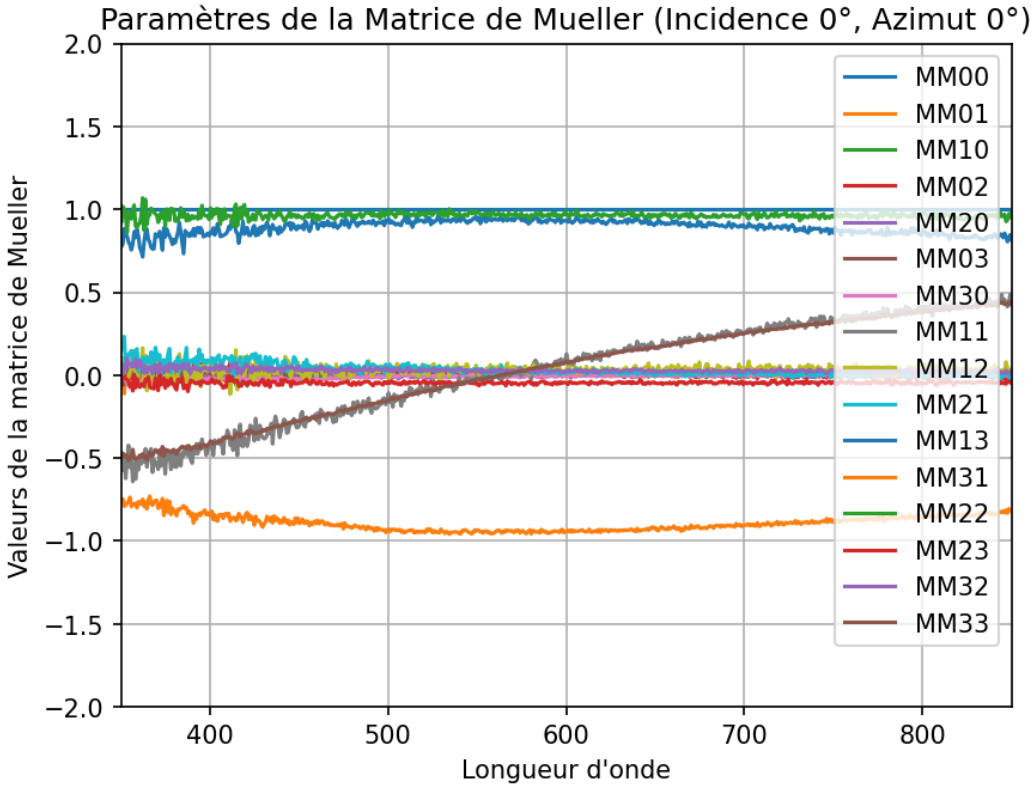



FIGURE 3.8 – Paramètres de la matrice de Mueller pour chaque longueur d'onde telle que fournie par l'ellipsomètre, pour une orientation d'azimut à 0° et en incidence normale

On peut montrer qu'une matrice de Mueller, si elle est physiquement réaliste, peut être décomposée comme l'action d'un diatténuateur, d'un retardeur et d'un dépolariseur [GWV08].

Un code Python dédié permet alors d'importer les fichiers bruts générés par l'ellipsomètre pour les convertir en objets *Numpy*, puis on utilise la librairie pySCATMECH du NIST [Ger20] afin d'obtenir cette décomposition pour chaque incidence (figures 3.9 et 3.10). On observe alors que notre composant optique se comporte effectivement surtout comme un retardeur puisque les matrices correspondant au diatténuateur et au dépolariseur sont généralement proches de la matrice identité. Lorsque les incidences deviennent très grandes, d'autres effets apparaissent (par exemple, les réflections aux interfaces dépendant de la polarisation, d'où l'apparition de diatténuation aux grandes incidences), mais cela ne sera pas abordé dans ce manuscript, puisqu'ils semblent négligeables à des incidences raisonnables inférieures à 45° telles que celles que le capteur utilisera en pratique (demi-champ de vue).

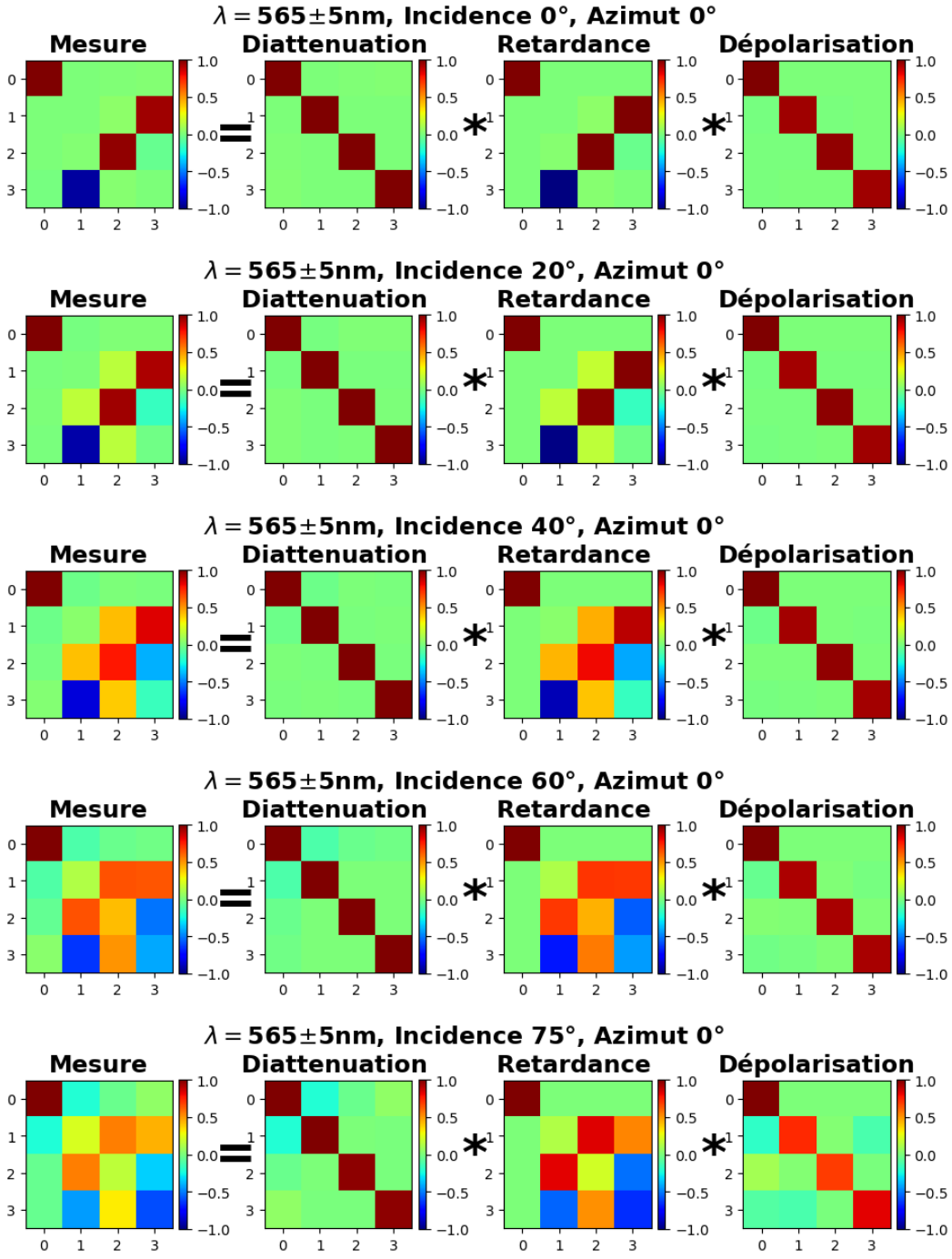



FIGURE 3.9 – Les matrices de Mueller des mesures effectuées à l'ellipsomètre pour diverses incidences d'angles, et un azimut mécanique de 0°.

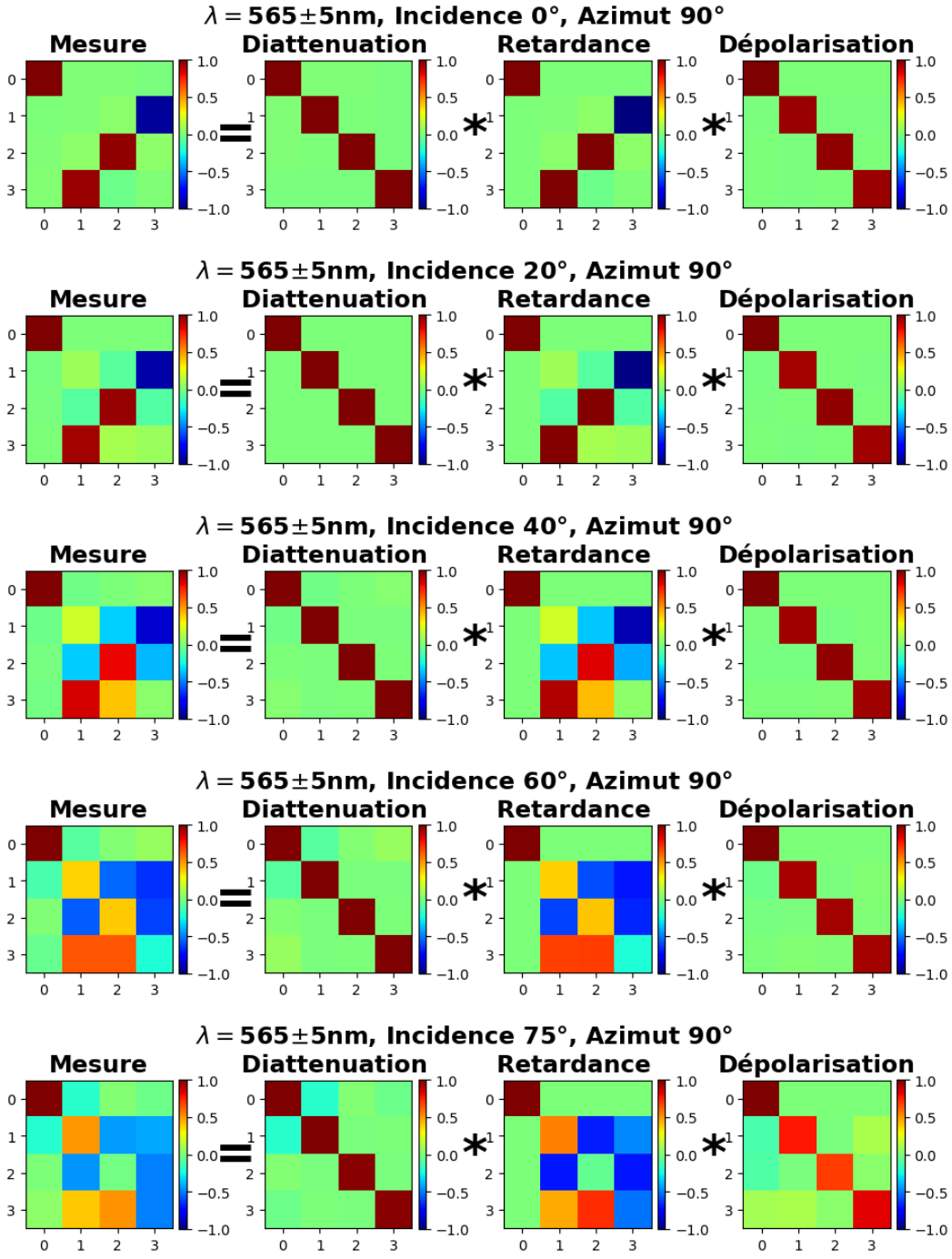



FIGURE 3.10 – Les matrices de Mueller des mesures effectuées à l'ellipsomètre pour diverses incidences d'angles, et un azimut mécanique de 90°.

A noter que cela est valable pour une longueur d'onde donnée (en pratique on intègre sur une bande réduite de $\pm 5nm$) que l'on choisit à 565 nm afin que la lame soit quart d'onde en incidence normale (figure 3.11)

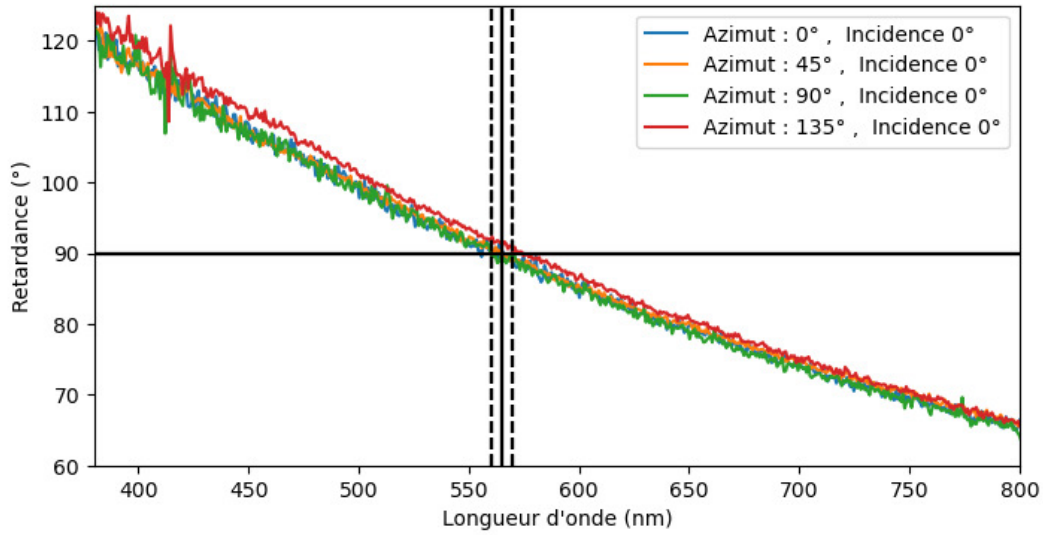



FIGURE 3.11 – Retardance estimée en fonction de la longueur d'onde, en incidence normale.

Enfin, une fois ce calcul effectué pour chaque longueur d'onde et chaque orientation, on obtient alors la figure 3.12

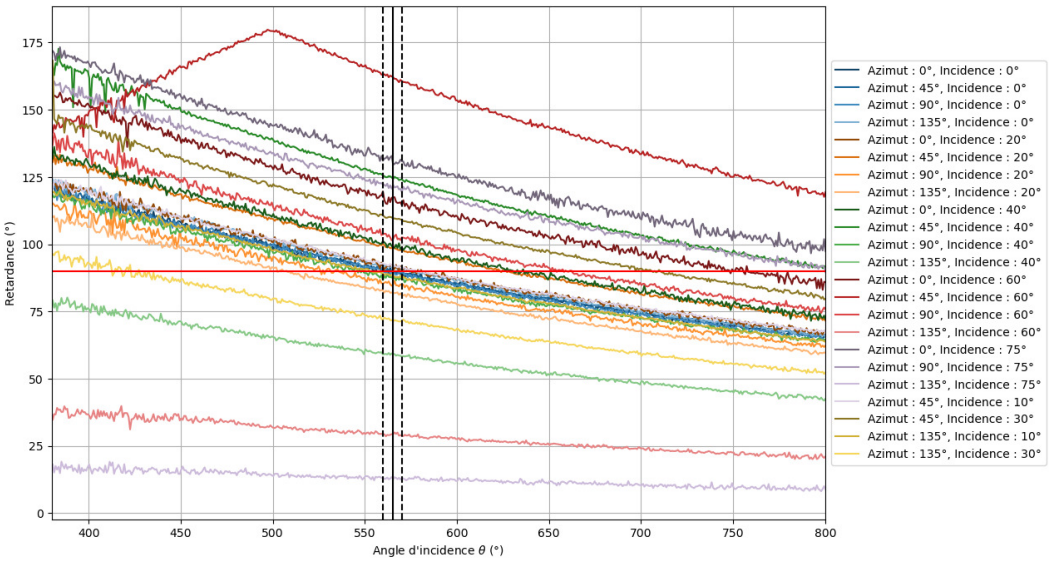



FIGURE 3.12 – Retardances estimées en fonction de la longueur d'onde, pour toutes les incidences.

On observe, par ailleurs, un repliement de phase pour les valeurs d'azimut 45° et d'incidence 60° et 75° pour les longueurs d'onde trop courtes, car la retardance dépasse 180°.

Dans certains cas, ces deux mesures seront ignorées par la suite pour ne pas perturber l'estimation des indices optiques dans un minimum local.

### 3.4.3 Modèle physique de la lame d'onde

Plusieurs modèles existent pour décrire le comportement d'une lame d'onde avec l'incidence. Le cas général en tenant compte de la réfraction exacte est très loin d'être simple puisqu'il implique pour chaque rayon de résoudre un système algébrique non linéaire [LSG12], le rayon n'étant généralement pas réfracté dans son plan d'incidence.

Nous nous contenterons donc d'utiliser des modèles approchés. On peut commencer par le plus simple en faisant l'hypothèse que notre lame d'onde est uniaxe avec son axe optique parallèle aux faces de la lame, comme dans [Gu+18]. Dans ce cas, une formule exacte est fournie.

Cependant, même après optimisation des paramètres par les moindres carrés (en fixant l'épaisseur optique, la différence d'indices $n_e - n_o$ que l'on obtient en incidence normale afin de garantir d'être quart d'onde à cet endroit, et en faisant varier l'indice ordinaire), il semble impossible d'effectuer une estimation meilleure de l'effet de l'incidence sur la retardance que celle présentée figure 3.13 par manque de degrés de liberté disponibles.

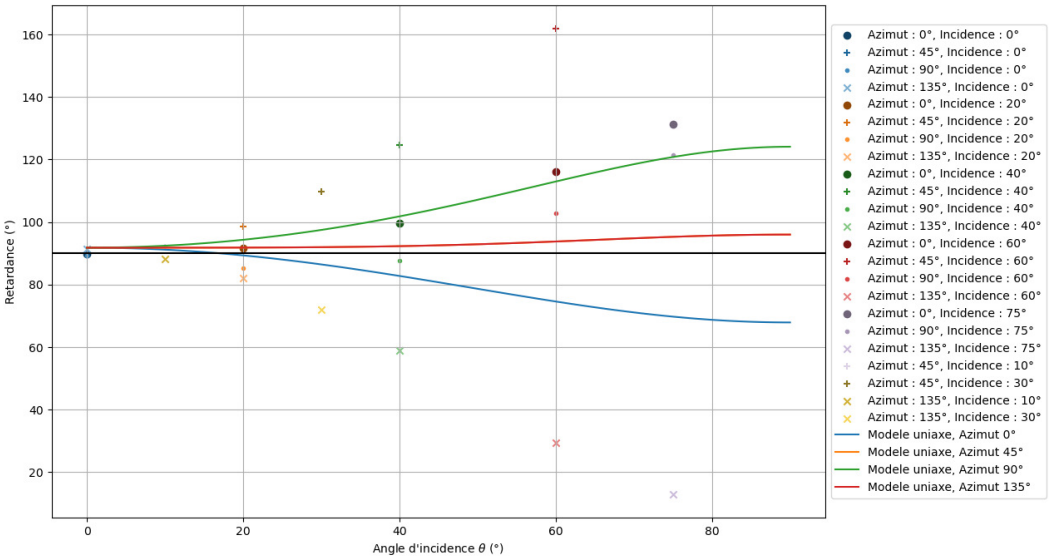



FIGURE 3.13 – Tentative de modélisation infructueuse par une lame uniaxe.

Il semble alors nécessaire d'utiliser un modèle de milieu biaxe, en partant du principe que les indices optiques sont proches, et donc qu'à la réfraction lors de l'entrée des rayons depuis l'air vers l'intérieur de la lame d'onde, ceux ci se comporteront à peu près comme si on avait un milieu isotrope d'indice valant l'indice moyen des trois. En pratique, les différences d'indices sont très réduites (inférieures au %) et l'approximation n'est pas gênante.

Dans la thèse de master de Gabriel Oluwatobi, la retardance est calculée pour pouvoir simuler les interférences en lumière convergente (ou divergente, dans notre cas) blanche, que l'on nomme interférences en éclairage conoscopique [Olo13].

Une approximation est alors reprise de l'ouvrage de Born & Wolf [BW99].

Cela consiste à calculer les angles $\theta_1$ et $\theta_2$ entre le rayon se propageant dans le milieu et chaque axe optique, et le chemin $\rho$ parcouru dans le milieu. On obtient alors le calcul de la retardance par la formule :

$$\delta = \frac{2\pi\rho(n_z - n_x)\sin(\theta_1)\sin(\theta_2)}{\lambda} \tag{3.33}$$

Après mise en place d'une estimation des paramètres là encore avec la bibliothèque LMFit [New+14] tout comme dans le chapitre précédant, l'ajustement donne enfin une estimation satisfaisante, pour une longueur d'onde de 565nm (figures 3.14 et 3.15).

On élimine juste le point à 75° d'incidence et 45° d'azimut mécanique parce qu'il présente un repliement à cette longueur d'onde là, mais on ajoute un *offset* variable entre l'azimut mécanique et l'azimut optique "vrai" des axes optiques.

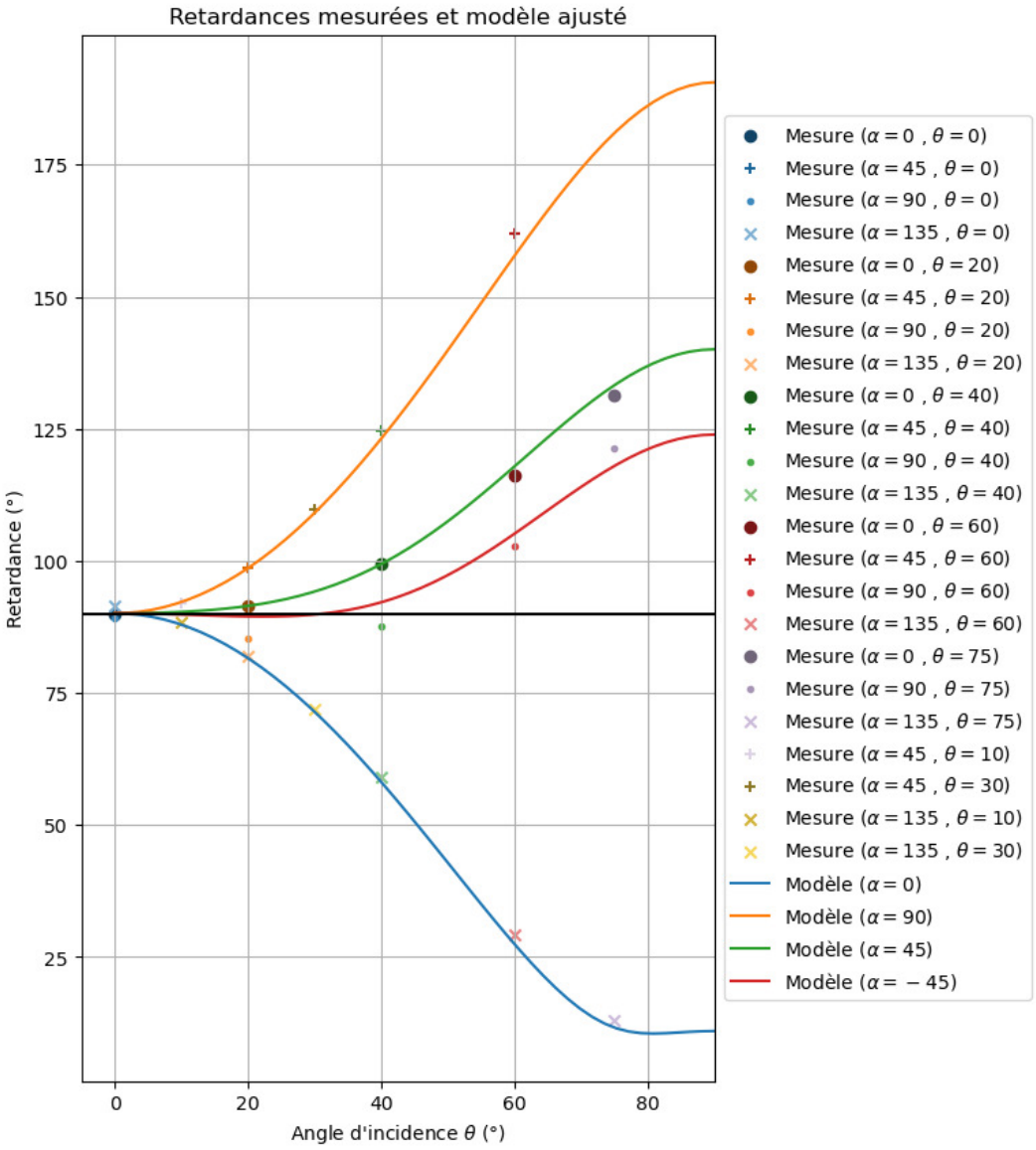



FIGURE 3.14 – Ajustement du modèle biaxe sur les données à 565 nm.

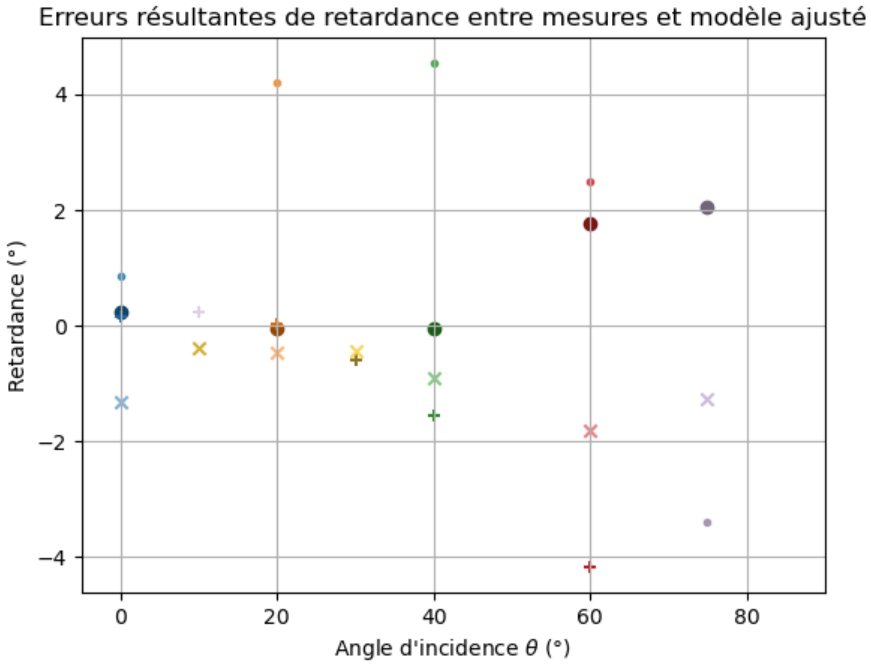



FIGURE 3.15 – Erreur du modèle biaxe sur les données à 565 nm.

On obtient alors les résultats suivants après ajustement :
— $d$ : 88.75 µm (fixé)
— $n_x$ : 1.485 (fixé)
— $n_{xy}$ : 0.00158967 ± 8.7535e-06 (0.55%) (init = 0.1)
— $n_{yz}$ : 0.00200528 ± 4.3049e-05 (2.15%) (init = 0.1)
— $\lambda$ : 0.565 µm(fixé)
— $\alpha_{offset}$ : 0.05859399 rad± 0.00731147 (12.48%) (init = 0)
— $n_y$ : 1.48658967 ± 8.7535e-06 (0.00%) == $n_x + n_{xy}$
— $n_z$ : 1.48859495 ± 4.3049e-05 (0.00%) == $n_y + n_{yz}$

Cela correspond à des axes optiques faisant un angle $V = 41.7°$ avec la normale aux faces dans le matériau, proche de l'angle limite atteint par les rayons réfractés, expliquant qu'on ne peut pas directement observer ces axes (dans l'air) dans la figure conoscopique 3.24.

Dans le cas de figure qui nous intéresse (axes optiques angulairement "loin" de la normale aux faces de la lame), les axes rapides et lents équivalents pour chaque direction de propagation du rayon voient leur direction varier relativement peu spatialement. Il est toutefois possible de les calculer en utilisant la règle dite de Biot-Fresnel [4] (Biot, 1820; Fresnel, 1827) qui indique que l'une des directions des vecteurs déplacement électrique dans le milieu $\vec{D}$ associée à la direction de propagation est la

4. Jean-Baptiste Biot a démontré expérimentalement la relation entre les directions de vibration et les axes optiques, tandis qu'Augustin Jean Fresnel en a fourni la preuve théorique. Il est ironique que ces deux noms soient associés dans la loi qui leur est attribuée, car Biot était un défenseur de la théorie corpusculaire de la lumière, tandis que Fresnel était le principal architecte de sa discréditation et de son remplacement par la théorie ondulatoire. Remarque traduite de [SM94] page 165.

bissectrice de l'angle formé par les deux plans contenant chacun un axe optique et la normale à la section. Ces plans sont illustrés dans la figure 3.16 reprise de [SM94] où ON est la direction de propagation de l'onde et OM et OM' les axes optiques. C'est cet écart qui explique l'apparition d'irisations sur la figure 3.23 (b) et (d) où le polariseur est aligné (pour un rayon d'incidence normale) avec les axes de la lame d'onde (donc pas d'interférences et teinte grise au centre de l'image), mais ne l'est plus tout à fait en dehors de ce cas particulier.

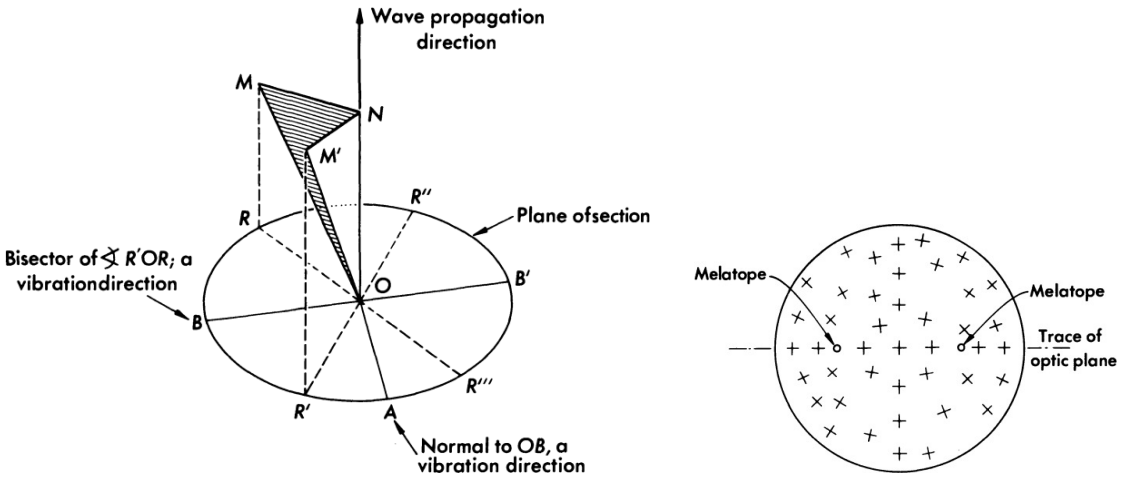



FIGURE 3.16 – Règle de Biot-Fresnel pour la détermination de la direction des vibrations propres dans un milieu biréfringent. Extrait de [SM94]

Grâce à cette règle ainsi qu'au modèle de distorsion de l'objectif obtenu plus loin figure 3.21, on peut alors déterminer l'orientation des axes neutres équivalents à chaque point de l'image (figure 3.17)

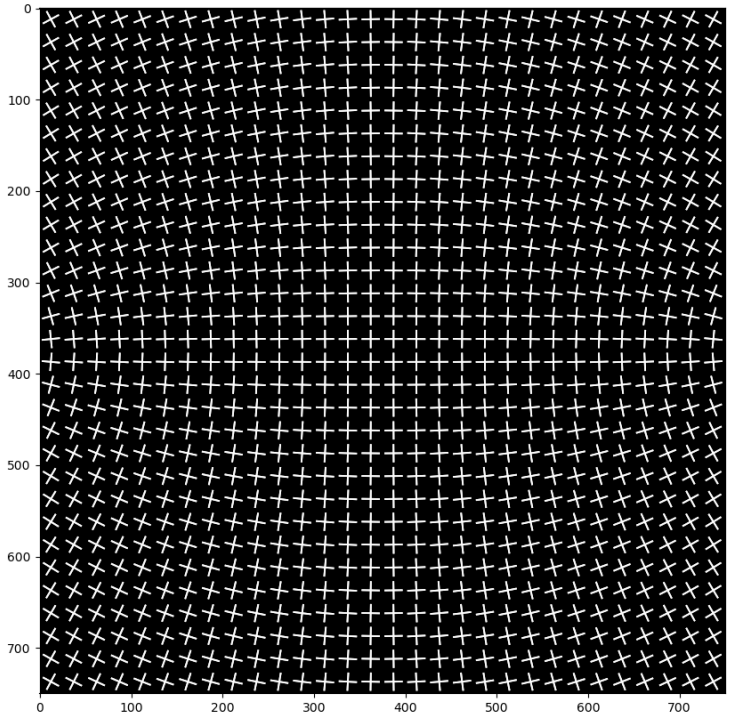



FIGURE 3.17 – Orientation locale des axes neutres équivalents au niveau du capteur dans le champ, obtenus avec la loi de Fresnel-Biot. Les axes optiques se trouvent de part et d'autre au delà de l'image.

Par la suite, on essaie d'ajuster ce modèle complet de retardances à chaque longueur d'onde. On obtient alors, en fixant $n_x$ (dont on ne connait pas simplement la variation avec la longueur d'onde), et en calculant $n_y$ en fonction de l'angle de l'axe optique (supposé fixe avec la longueur d'onde) et du dernier paramètre $n_z$, une courbe des valeurs estimée des différences d'indices pour chaque longueur d'onde. Afin de pouvoir choisir n'importe quelle longueur d'onde, on ajuste un modèle de Cauchy 3.18 sur les courbes de différences d'indices : cela permet donc de faire un modèle complet de la lame d'onde pour toutes les longueurs d'onde du spectre visible. Il parait cependant étonnant d'avoir une variation d'écart qui croit avec la longueur d'onde alors qu'en général les indices optiques (et donc on pourrait le supposer, leur écart) ont tendance à décroitre lorsque $\lambda$ augmente.

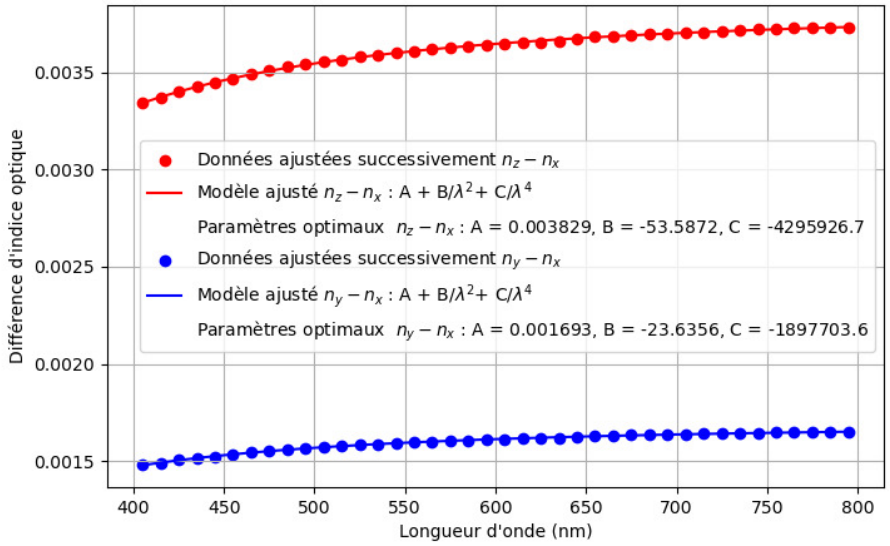



FIGURE 3.18 – Variations des différences d'indices avec la longueur d'onde.

### 3.4.4 Ecart d'azimut du polariseur vu avec l'incidence

Tout comme la lame d'onde, le polariseur peut voir ses propriétés changer avec l'incidence. En particulier, par un effet de projection de la direction du polariseur ou d'attenuations de certaines directions de polarisation, l'azimut que prend l'onde en sortie du polariseur et l'azimut mécanique du polariseur peuvent dévier avec l'incidence. Sans proposer de modèle cette fois, on se contente donc ici de rapporter (figure

Il se pourrait d'ailleurs que ce genre d'effet soit à l'origine des écarts observés lors de la calibration de certaines caméras polarimétriques (par exemple l'écart figure 6a de l'article [Rod+22]) où on observe une variation spatiale de l'erreur d'orientation de polarisation sur le capteur ; cela pourrait alors indiquer un changement de façon de définir l'angle de polarisation, soit défini dans le repère des micro-polariseurs de la caméra, soit défini par rapport à l'axe mécanique du polariseur tournant servant à la calibration et l'état correspondant de polarisation en sortie de celui ci. On pourrait peut être lever cette ambiguité en refaisant la calibration avec un faisceau collimaté et en enlevant l'objectif pour voir dans ce cas l'orientation estimée des micro-polariseurs.)

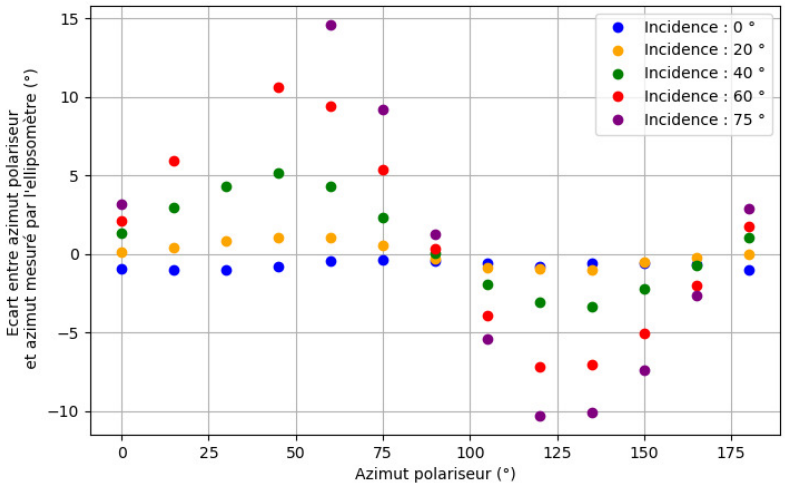


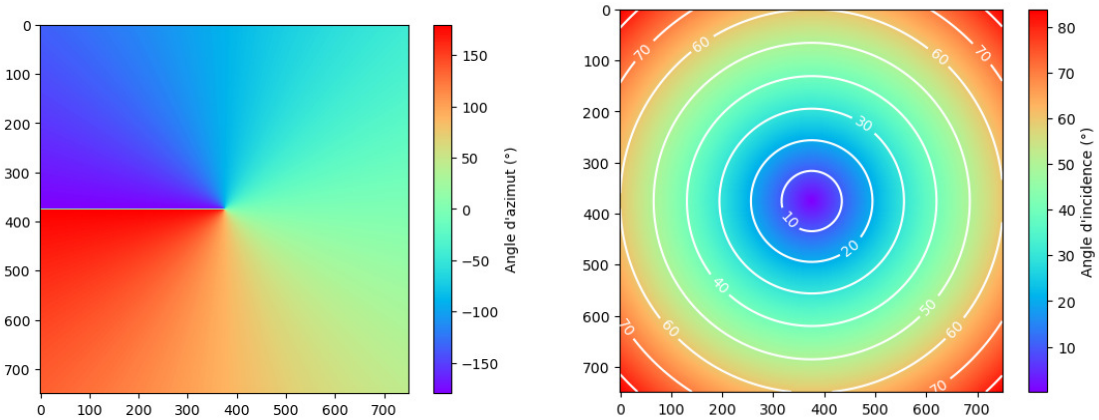

FIGURE 3.19 – Erreur azimutale du polariseur avec l'incidence.

## 3.4.5 Figure d'interférences conoscopiques

### 3.4.5.1 Caractérisation de la distorsion de l'objectif utilisé

La distorsion de la caméra grand angle utilisée par la suite est, elle encore, calibrée avec la bibliothèque Matlab de Scaramuzza (figure 3.21 et 3.20) [SMS06].

On en déduit alors, pour la caméra, l'orientation (azimut, incidence) des rayons associés à chaque pixel de la caméra après détourage de l'image.




(a) (b)

FIGURE 3.20 – Azimut et incidence des rayons associés à chaque pixel de l'image après calibration et détourage.

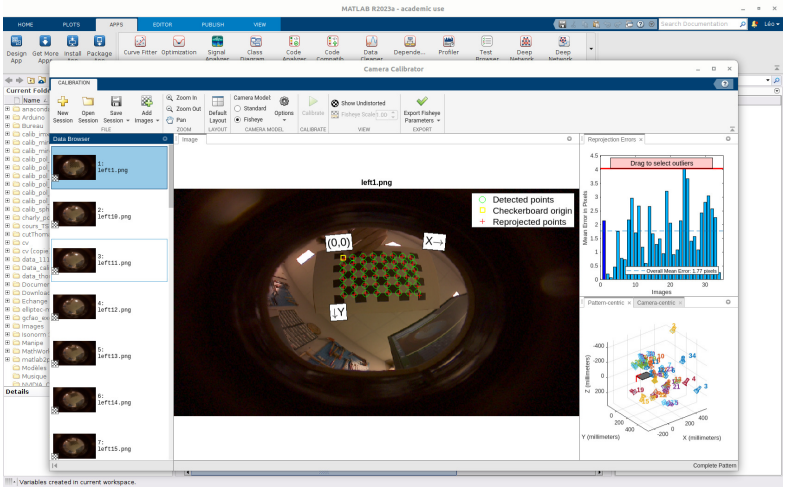
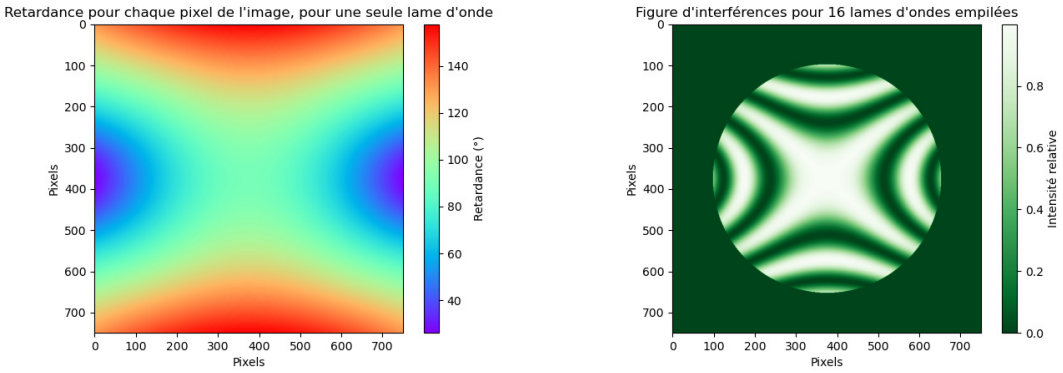



FIGURE 3.21 – Calibration de la distorsion et du centre optique du fisheye.

Une fois cette distorsion obtenue, il est possible de simuler une figure d'interférences vue pour un capteur complet surmonté d'un polariseur à 45° des axes rapides et lents des lames d'onde.

Par exemple, pour une longueur d'onde de 565nm, la figure 3.22 simulée donne (fausses couleurs) :




(a) Retardance pour une seule lame d'onde.

(b) Figure d'interférences associée à 565nm, pour un empilement de 16 lames d'onde.

FIGURE 3.22 – Simulation de la retardance et de la figure d'interférences en lumière monochromatique projetée sur le capteur.

En venant sommer sur toute la gamme de longueurs d'onde, en pondérant les couleurs avec la sensibiité présumée de la caméra en RGB et après normalisation, on obtient une simulation de la figure d'irisations en couleur pour un polariseur tournant devant notre capteur (figure 3.23).

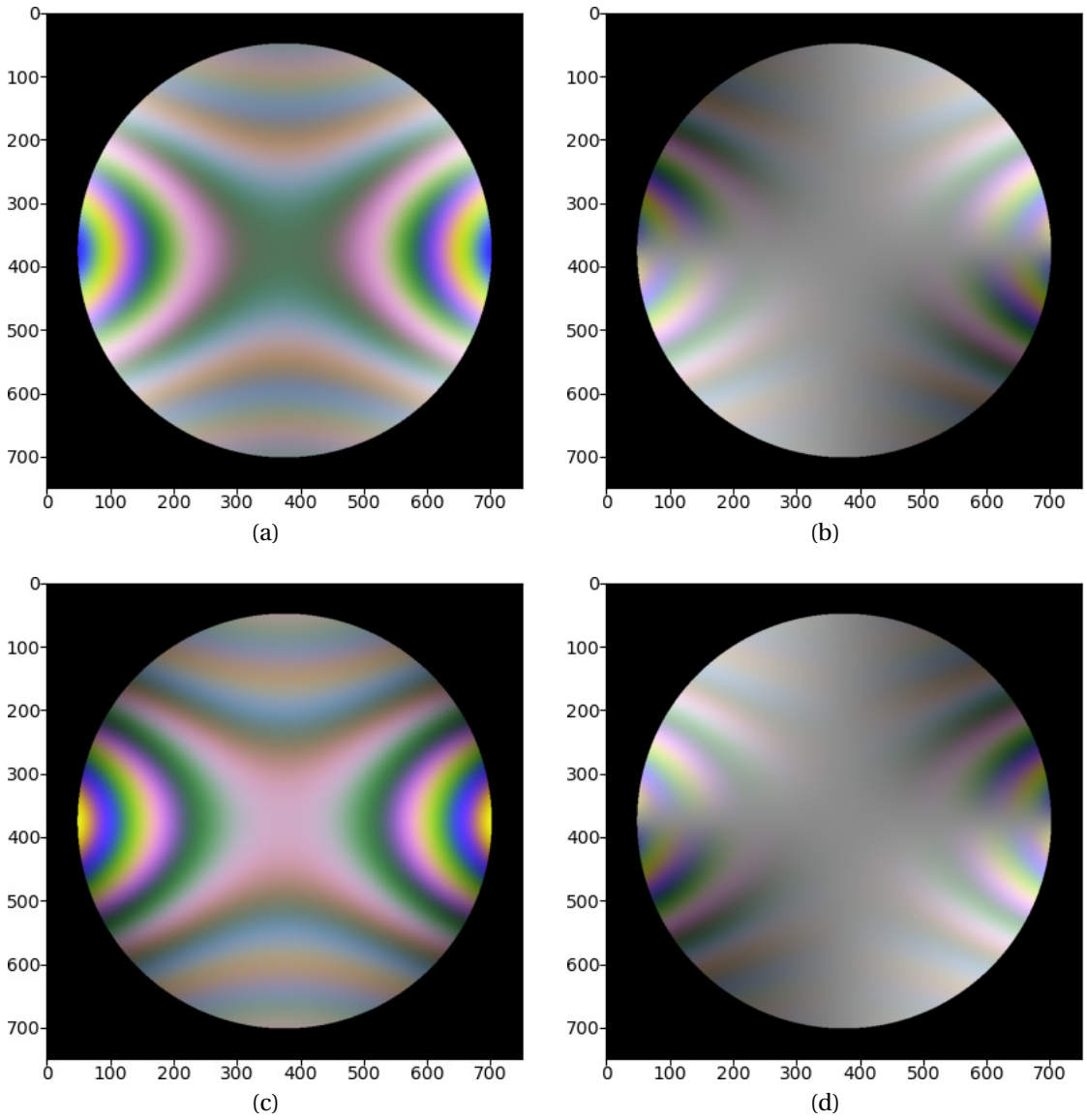
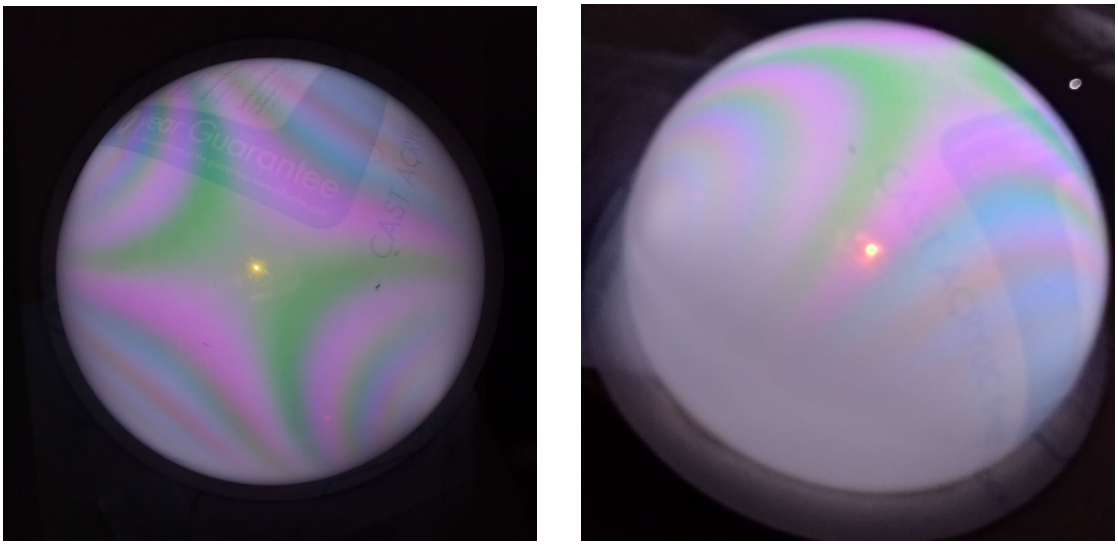



FIGURE 3.23 – Simulation en lumière blanche de la figure d'interférences en lumière monochromatique projetée sur le capteur pour 16 lames quart d'ondes, avec un analyseur à 0°, lames d'ondes à 45° et polariseur tournant devant l'ensemble à 0° (a), 45° (b), 90° (c) et, 135° (d).

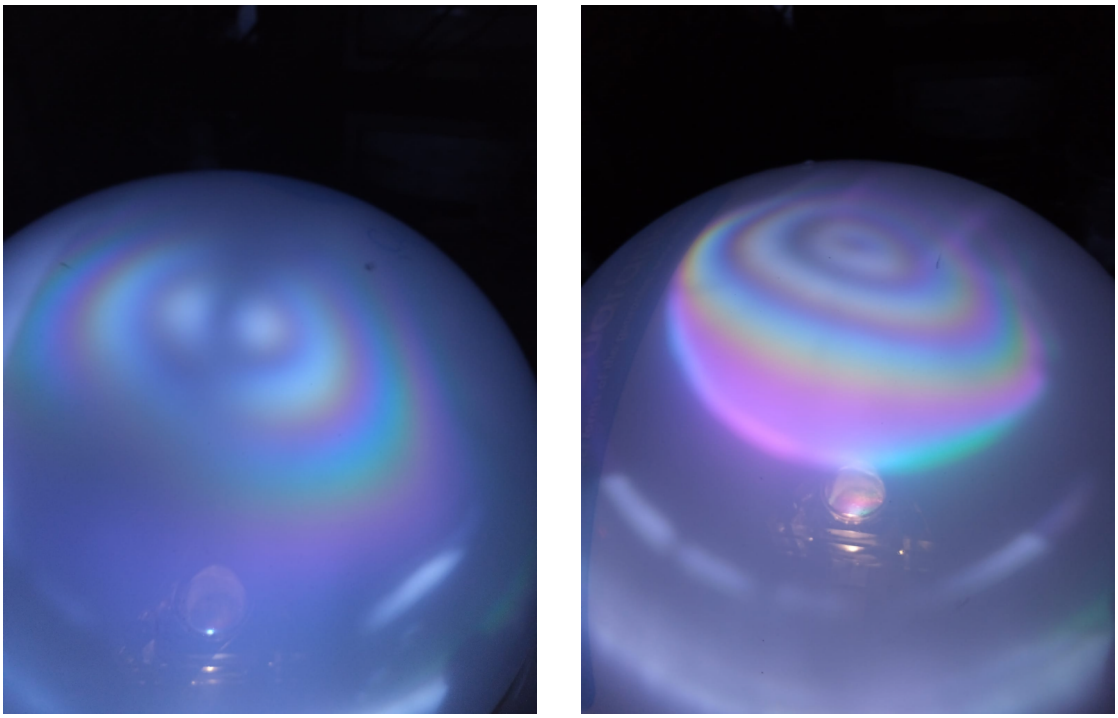
Il est également aisé d'observer dans la réalité ce phénomène en illuminant l'empilement polariseur/lames d'onde/polariseur par le bas par une source blanche ponctuelle, et en projetant l'ensemble sur un dôme translucide (figure 3.24, comparable à la simulation figure 3.23 (c) ).



(a) Vue de dessus (b) Vue de coté

FIGURE 3.24 – Projection de la figure d'interférences en lumière blanche entre polariseurs croisés, pour 16 lames quart d'onde, sur un dôme translucide.

Afin de confirmer l'hypothèse que notre matériau est bien biaxe, on peut tenter d'observer l'axe optique en inclinant le jeu de lames d'ondes. Cependant, l'axe optique dans le matériau est trop incliné et est quasiment identique au rayon le plus réfracté (air-matériau), d'angle maximal environ $arcsin(1/n) \approx arcsin(1/1.48)$. En plongeant l'ensemble des lames dans un récipient d'eau, et en les inclinant convenablement, on peut alors s'arranger pour qu'un rayon traversant le montage à la verticale (donc la lame d'onde immergée avec une incidence) coincide à l'intérieur du matériau avec l'axe optique. Le résultat est donné figure 3.25, où l'on observe bien une tache (nommée mélatope [SM94]) dans la figure d'interférences entre polariseurs linéaires (ou circulaires) croisés.



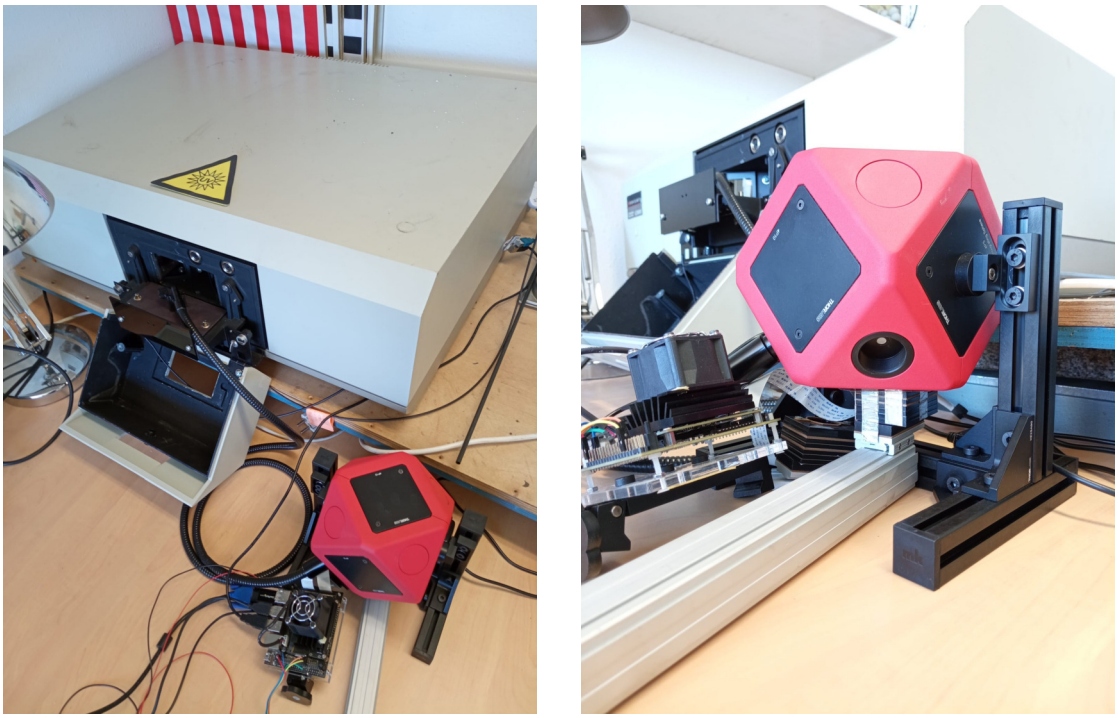
(a) Polariseurs linéaires (b) Polariseurs circulaires

FIGURE 3.25 – Projection de la figure d'interférences en lumière blanche entre polariseurs croisés, pour 16 lames quart d'onde, en immersion et avec une inclinaison adaptée pour observer un des des deux axes optiques.

#### 3.4.5.2 Caractérisation du capteur complet avec une source accordable

Une méthode un peu plus simple que d'utiliser un ellipsomètre serait d'utiliser une illumination monochromatique dans une sphère intégrante. Par la suite, de la même manière que [DDD09], il serait envisageable de situer chaque minimum local d'intensité des irisations selon un axe de coupe donné afin d'estimer les indices optiques de n'importe quel matériau. On pourrait ainsi remplacer les lames d'onde précédemment utilisées par des matériaux plus communs du commerce tels que des feuilles de transparent de projecteur, ou des pochettes plastiques, qui présentent des écarts d'indices plus importants, et donc des irisations plus reserrées. Peut être même serait il possible d'estimer directement les paramètres du modèle à partir d'une observation de la figure en lumière blanche.

Dans notre cas, nous disposions au laboratoire d'une petite sphère intégrante que nous éclairions avec un spectromètre de fluorescence récupéré et détourné pour servir d'illuminateur grâce à l'ajout d'une fibre optique (figure 3.26a), qui nous a malgré tout permis d'obtenir des images intéressantes (figure 3.27) et de pouvoir les comparer avec une simulation (figure 3.28, avec polariseur orienté à 157.5° et non plus 135° pour plus de vraisemblance.

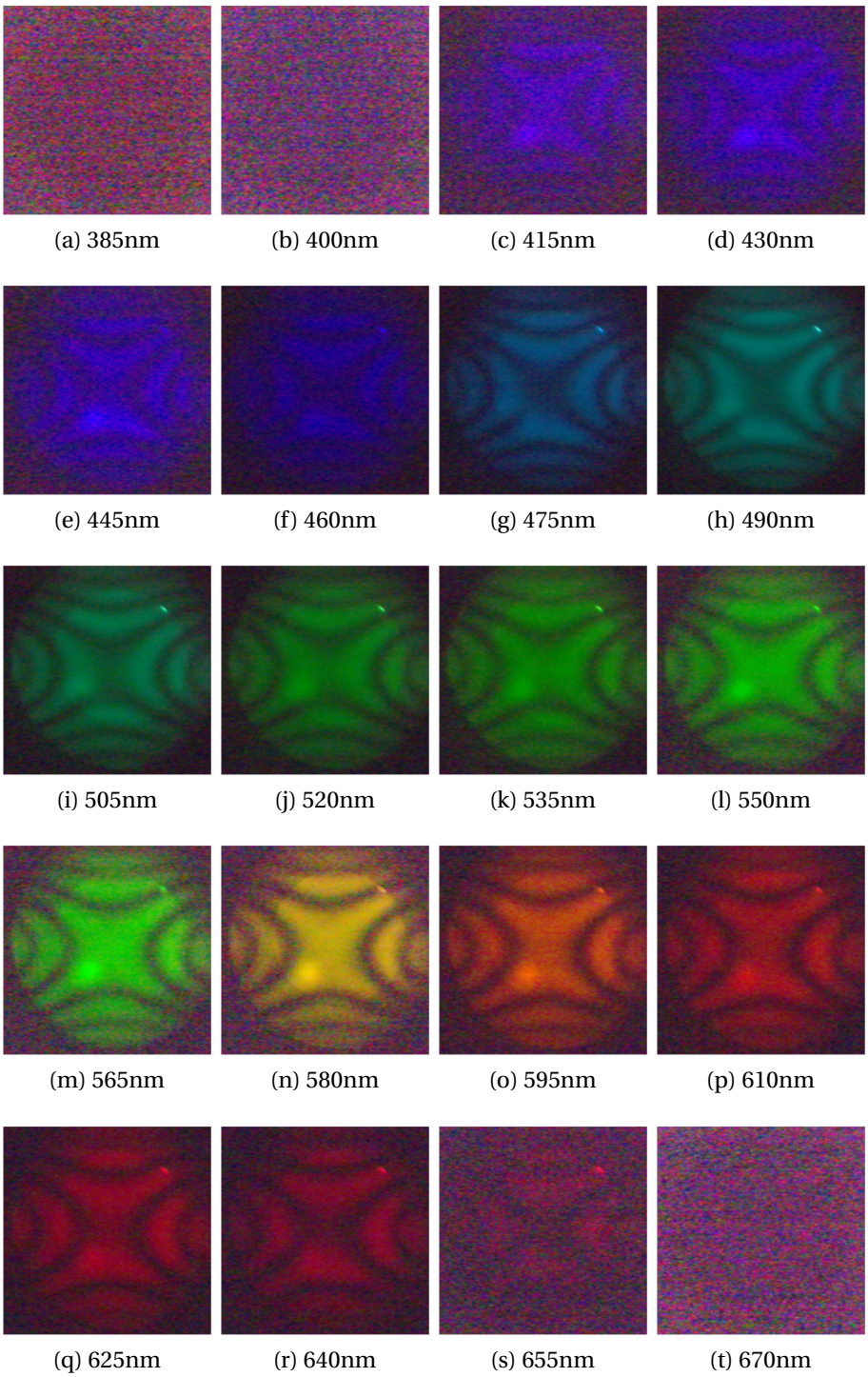


(a) Vue d'ensemble

(b) Vue du capteur sous la sphère intégrante

FIGURE 3.26 – Utilisation d'un demi-spectromètre de fluorescence comme source accordable et d'une sphère intégrante pour observer les irisations présentes dans l'image pour plusieurs longueurs d'ondes.

FIGURE 3.27 – Images mesurées avec une largeur de bande de 15nm.



(a) 385nm (b) 400nm (c) 415nm (d) 430nm

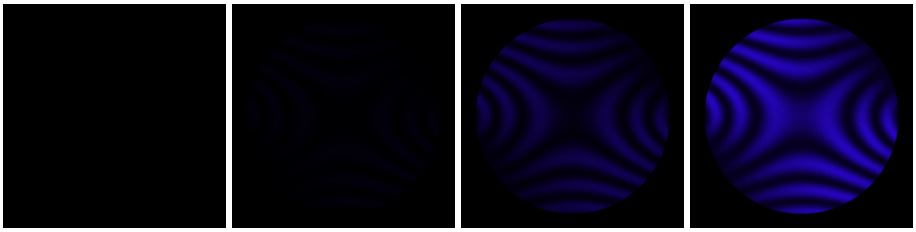
(e) 445nm (f) 460nm (g) 475nm (h) 490nm

(i) 505nm (j) 520nm (k) 535nm (l) 550nm

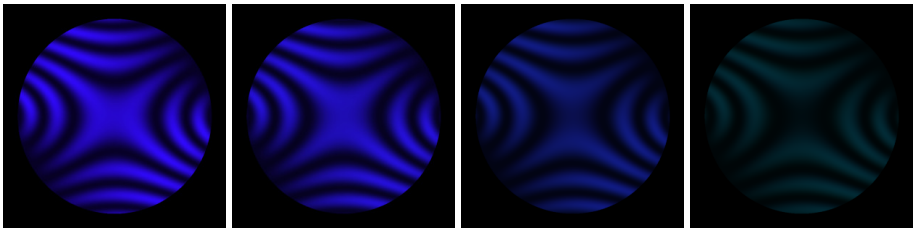
(m) 565nm (n) 580nm (o) 595nm (p) 610nm

(q) 625nm (r) 640nm (s) 655nm (t) 670nm

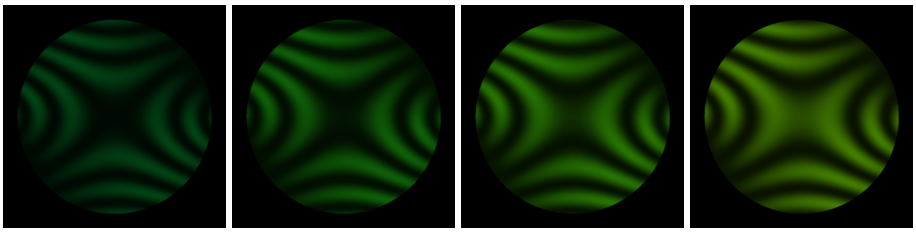
FIGURE 3.28 – Images simulées correspondantes.



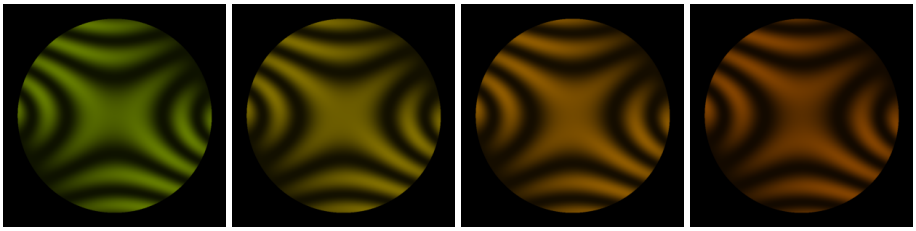
(a) 385nm (b) 400nm (c) 415nm (d) 430nm



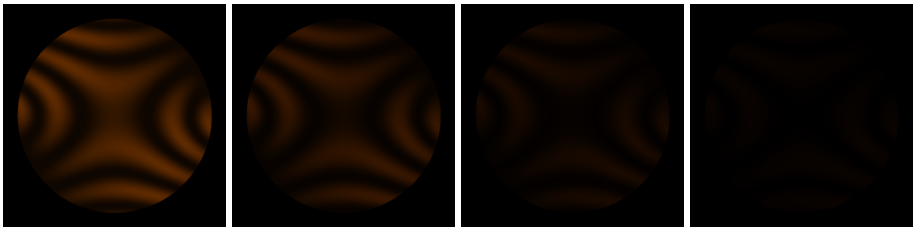
(e) 445nm (f) 460nm (g) 475nm (h) 490nm



(i) 505nm (j) 520nm (k) 535nm (l) 550nm



(m) 565nm (n) 580nm (o) 595nm (p) 610nm

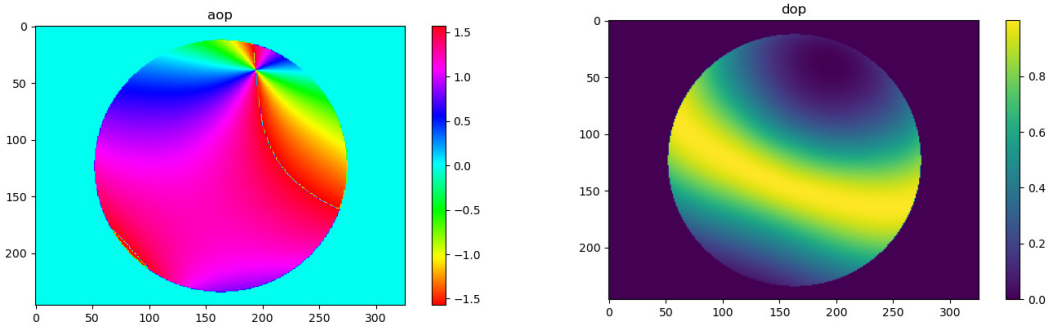


(q) 625nm (r) 640nm (s) 655nm (t) 670nm

### 3.4.6 La partie amont du capteur : le patron de polarisation du ciel

#### 3.4.6.1 Connexion avec un simulateur simple

Il serait possible, pour simuler la chaîne complète du capteur, de réaliser un modèle simple basé sur la diffusion Rayleigh. A noter que l'on pourrait, maintenant qu'il est disponible, utiliser le simulateur Opensky [Mou+24] pour obtenir les angles d'AOP et de DOP pour une position du Soleil donnée.




(u) AOP (v) DOP

FIGURE 3.29 – Simulation des AOP et DOP fournis par un modèle de Rayleigh projeté dans le plan du capteur.

Il aurait aussi été envisageable [5] d'employer les images polarimétriques obtenues au chapitre précédent pour simuler ce que verrait le capteur en conditions réelles, y compris avec des nuages. Dans ce cas, on aurait pu tenir compte du fait que la lumière diffusée du ciel n'est pas blanche mais bleue par beau temps avec une intensité variant en $\frac{1}{\lambda^4}$ pour calculer au mieux les intensités correspondantes, et tenir compte des intensités de chaque canal RGGB pour la simulation finale en considérant par exemple que l'intensité de longueur d'onde varie en $\frac{1}{\lambda^4}$ sur la plage d'intégration spectrale de chaque canal pour calculer au mieux l'impact final des modulations dues à la retardance. On aurait alors pu entrainer le réseau de neurones avec des images simulées, et le tester en conditions simulées et/ou réelles. Par ailleurs, dans un cadre industriel, il serait intéressant de pouvoir entrainer le réseau de neurones partir d'images dont les irisations sont générées par un modèle afin de pouvoir changer à volonté les composants du capteur (en cas de rupture de stock par exemple, pour pouvoir refaire un autre capteur avec une autre lame d'onde taillée dans un autre matériau) sans faire d'apprentissage "pour de vrai" à chaque fois en extérieur.

Une telle simulation avec des "vraies" données comprtant des nuages (de formes difficilement simulables) permettraient aussi au réseau d'être plus robuste à ceux ci qui, du fait de leur faible DOP, vont se rajouter sur l'image en plus des franges

5. c'était le but initial...

hyperboliques, en étant plus faiblement teintés par les interférences (un exemple réel issu des essais en extérieurs figure 3.30).

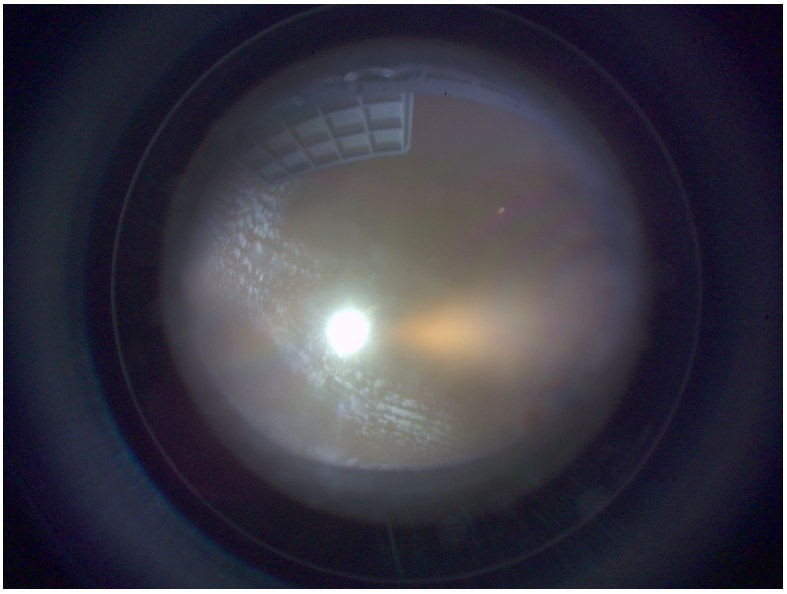


FIGURE 3.30 – Un exemple obtenu en extérieur, avec des nuages

## 3.5 Essais expérimentaux

Afin de valider expérimentalement le principe de ce nouveau capteur, un prototype a été réalisé, monté sur monture motorisée permettant d'obtenir une vérité terrain lors de l'acquisition.

Afin de s'affranchir de l'estimation des erreurs d'alignement des éléments optiques, et afin de prouver la validité du concept, un ensemble d'images a été pris avec le capteur par beau temps, avec une orientation connue, afin de créer une base de données pour laquelle on connaît dans le repère du capteur la position du Soleil. Par la suite, cela permet d'entraîner un réseau de neurones capable de retrouver cette position du Soleil par rapport au capteur grâce aux irisations, pour éventuellement estimer un cap en comparant aux éphémérides.

### 3.5.1 Dispositif expérimental utilisé

#### 3.5.1.1 Capteur optique

Le dispositif utilisé est composé d'une première caméra RP-VC1 ayant un objectif grand angle Entaniya RP-220L à large champ de vue (220°) et un capteur RGB IMX219. La caméra est surmontée d'un polariseur acheté en rouleau sur le site 3Dlens.com, ainsi qu'une lame d'onde réalisée en empilant successivement 16 lames quart d'onde en plastique évoquées précédemment. Ces éléments optiques sont découpés au laser

pour déterminer mécaniquement leur orientation (axe passant du polariseur, axes lents/rapides des lames d'ondes).

Un support mécanique permettant de maintenir ensemble le tout et de le fixer sur le barreau de la monture est réalisé en découpe laser. Cela a l'avantage de permettre de réaliser des pièces relativement précises et un prototypage très rapide, ainsi qu'une bonne planéité des différents éléments, puisque l'on vient empiler des plaques de plastique pré-extrudées en usine. Les lames d'ondes et le polariseur sont alors maintenus par une pièce plate de serrage qui les plaque au fond de leur logement tout comme on ferait du "clamping" pour d'autres éléments optiques [Ger17].

Une seconde caméra identique sans lame d'onde ni polariseur permet d'obtenir des images couleur en intensité uniquement, à des fins de comparaison (figure 3.31).



FIGURE 3.31 – Le couple de caméras avec et sans polariseur et lame d'onde.

#### 3.5.1.2 Monture rotative

La monture utilisée est une monture mécanique orange de marque Micro-Contrôle que nous avons *rétrofittée* au laboratoire. Elle est équipée de nouveaux codeurs Baumer codant un tour complet sur 12 bits soit une résolution angulaire de 0,0878°, et permet d'incliner un dispositif complet fixé sur une barre profilée Thorlabs X95 à la demande. L'azimut de l'ensemble est modifié via un moteur à courant continu entraînant une roue dentée, tandis que l'élévation est changée grâce à un vérin électrique comportant lui aussi un moteur à courant continu.

Un boîtier électronique réalisé sur mesure permet un asservissement de la position de l'ensemble. Une bibliothèque python dédiée permet enfin de choisir et obtenir les orientations des deux axes rotatifs de la monture.




FIGURE 3.32 – Photographie de la monture orange servant à orienter le capteur de manière connue en extérieur.

#### 3.5.1.3 Contrôle de l'expérience

Les caméras sont reliées à une carte Jetson Nano 4GB via des nappes CSI adaptées, qui est équipée d'un disque SSD pour le stockage des résultats. Cette carte est solidaire du barreau X95, ainsi qu'un écran LCD tactile et un clavier. Elle permet le pilotage de la monture orange via un cable USB.

### 3.5.2 Procédure d'acquisition

Lors des expériences, on s'assure que le dispositif utilisé pointe grossièrement à la verticale à l'aide d'un niveau à bulle, qui nous indique une précision en assiette de l'ordre du degré.

Le dispositif en extérieur permet de capturer régulièrement des images afin de s'assurer que les images ne soit ni surexposées ni sous-exposés : au cours de l'acquisition on vient ajuster le temps d'exposition tout en enregistrant de manière continue des images. Un code python dédié permet simultanément de faire tourner la monture de manière continue, d'enregistrer des images tout en récupérant les coordonnées instantanées du codeur en azimut, et d'afficher une interface graphique pour surveiller le bon avancement de l'acquisition. Pour que l'expérimentateur n'ait pas à souffrir de la chaleur pendant des heures, l'ensemble est téléopéré depuis l'intérieur de l'ex-soufflerie via une liaison SSH et un routeur Wi-Fi déployé pour l'occasion.

Lors de l'acquisition, la monture tourne lentement de manière continue de 0 à 360° en environ 15 minutes, puis revient rapidement à 0° afin d'obtenir un maximum d'images et de ne pas perdre de temps à attendre lors de l'enregistrement (d'où le découplage de trois scripts tournant en parallèle : pilotage monture, acquisition, et affichage). Le temps d'acquisition étant assez court (typiquement de l'ordre de 20 ms), on s'assure que le flou de bougé en rotation présent sur les images est négligeable à l'aller comme au retour de la monture.

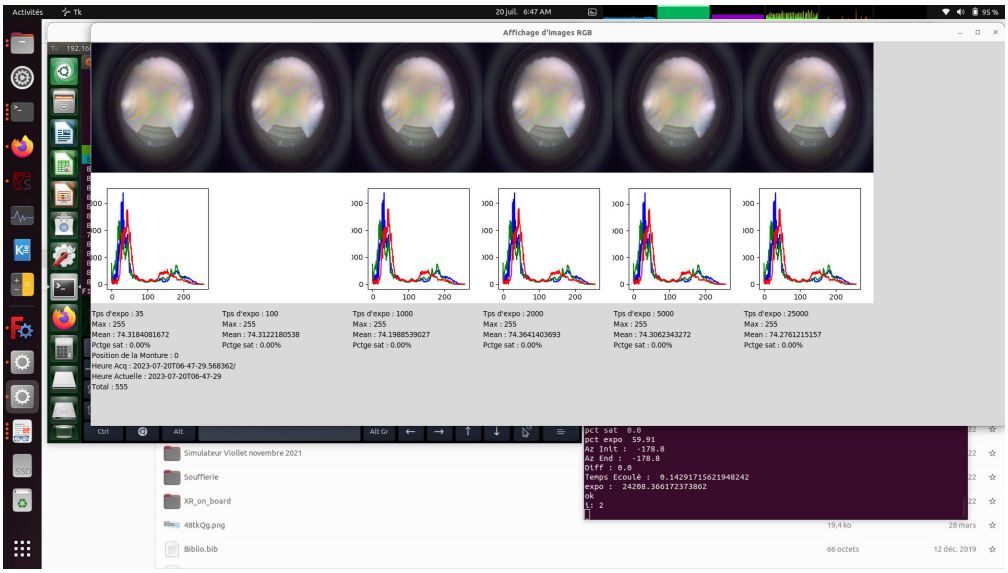



FIGURE 3.33 – L'interface du code utilisé pour gérer l'acquisition de données.

Les acquisitions ont lieu au cours d'une journée complète (le 10 Septembre 2023 en ce qui concerne les résultats présentés ici). L'expérience est effectuée de 7h22 jusqu'à 20h10, cela permet d'obtenir des élévations variées du Soleil dans le ciel (de l'horizon jusqu'à son apogée) et ainsi d'avoir des images les plus représentatives possibles vis-à-vis du cas idéal d'utilisation. Les images étaient prises par beau temps

en extérieur et le champ de vue de la caméra, réduit numériquement pour l'occasion, était quasiment dégagé (à noter la présence du haut de la halle de la soufflerie ; celle-ci n'est pas supposée être un biais lors de l'apprentissage puisque celui ci se fera sur les azimuts du Soleil vis-à-vis de la caméra, ainsi au cours de la rotation du Soleil le bâtiment viendra tourner dans le champ d'une même classe d'images).

Les images (capteur de cap et caméra de référence) sont enregistrées dans une base de données représentant 38495 doublets d'images, ainsi que l'heure locale (obtenue grâce à la carte embarquée et synchronisée via internet), la position angulaire de la monture, et l'exposition de l'image du premier capteur.

### 3.5.3 Prétraitement avant entraînement

Une fois ces images enregistrées, on vient les pré-traiter pour les préparer avant l'entraînement du réseau de neurones. On commence par éliminer les images trop saturées, sous-exposées ou qui se sont mal enregistrées, ce qui nous ramène à un total de 36128 images pour la journée. On applique ensuite les traitements décrits ci-après à l'aide du centre de calcul de l'université [6] en parallélisant le traitement sur plusieurs dizaines de CPU pour accélérer d'autant le calcul qui ne prend plus alors qu'une dizaine de minutes au lieu de quelques heures.

### 3.5.4 Recalage des deux caméras

Un modèle des rotations d'une caméra à l'autre et de rotation du barreau de la monture vers le repère ENU a été effectué par une minimisation équivalente à celle du chapitre 2 où on mesure directement la position du Soleil (quand on le voit) (figure 3.34). Cela permet d'estimer la position du Soleil sur le capteur même après son coucher ou s'il y avait eu des nuages (figure 3.35) et de positionner des ellipses pour le cacher (ou pas) pendant l'entraînement pour pousser le réseau à s'entrainer sur les irisations et non pas seulement sur le point lumineux du Soleil en vue directe.

6. le Mésocentre AMU

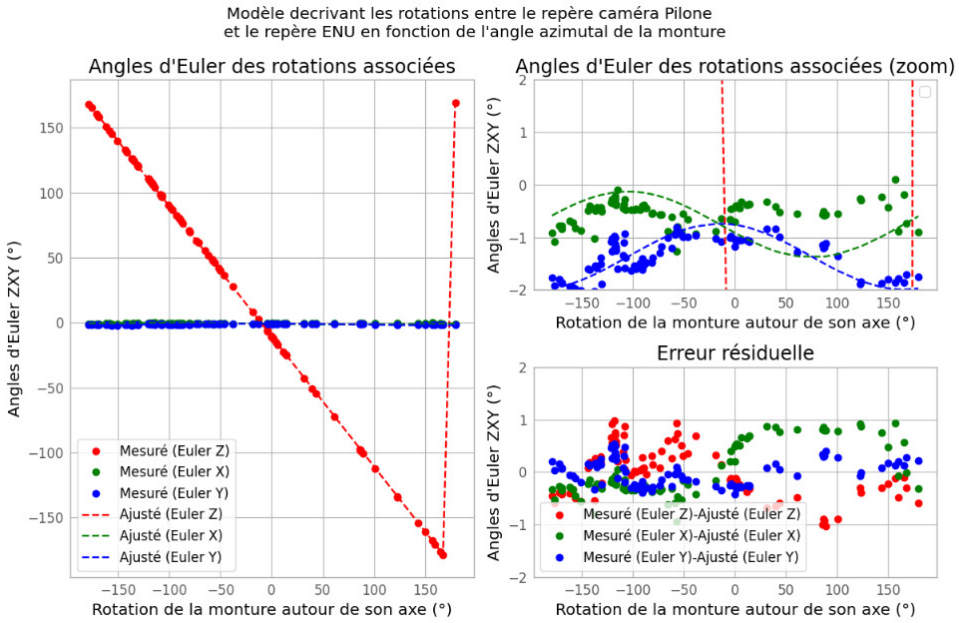



FIGURE 3.34 – Les rotations entre les repères des caméras et le repère ENU en fonction de l'angle d'azimut de la monture orange.

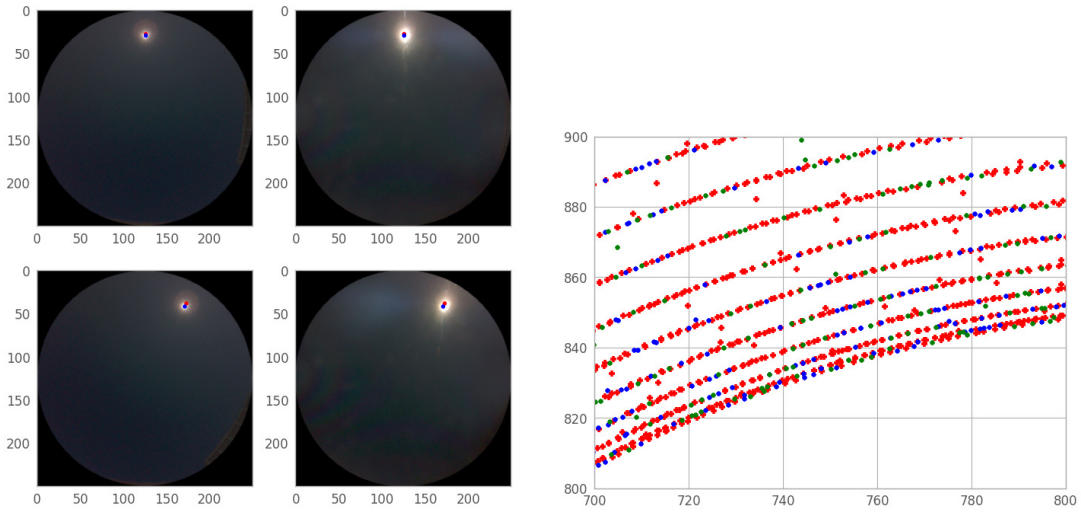
On estime alors que la transformation du repère caméra vers le repère ENU s'effectue en faisant une rotation R3 ZXY (alpha3, beta3, gamma3) du repère caméra vers un repère lié à l'axe de la monture, puis une rotation R2 ZXY de cet axe selon le Z local (correspondant à l'azimut de la monture fourni par le codeur), puis enfin une rotation R1 ZYX (alpha=0, beta, gamma) commune aux deux caméras fournissant la rotation entre monture et repère ENU.

Les résultats estimés sont les suivants, en degrés :

```
Valeurs ajustées Ref -
alpha: 0.0 beta: -0.044120797937846845 gamma: 0.6233301504000082
alpha3: -11.792931656433822 beta3: 0.231458763107252 gamma3: -0.19315346142102996

Valeurs ajustées Pil -
alpha: 0.0 beta: -0.044120797937846845 gamma: 0.6233301504000082
alpha3: -10.534580193283524 beta3: -1.36520479879578 gamma3: -0.7538741439817933
```

Les caméras ont donc grossièrement un écart d'azimut de -10,5° et -11,8° par rapport au Nord quand le codeur de la monture est à zéro, et des inclinaisons à la verticale de l'ordre du degré.




(a) (b)

FIGURE 3.35 – Les positions XY du Soleil affichées sur chacune des deux caméras (point bleu pour celle de gauche sans lame d'onde, point rouge pour celle de droite avec), estimée pour deux positions de la monture par rotation inverse des éphémérides par le modèle estimé (a). On peut ensuite (b) afficher ces positions dans le plan XY pour une des caméras et choisir si les images seront utilisées pour l'entrainement (point rouge), la validation (point vert) ou le test (point bleu).

## 3.5.5 Traitement des images avec une méthode d'apprentissage

### 3.5.5.1 Traitement des images (données d'entrée du réseau de neurone)

Les images sont détourées en limitant le champ de vue à $\frac{\pi}{3}$ soit 60 degrés de demi-champ de vue.

Afin d'empêcher que le réseau se base directement sur la position du Soleil perçue au lieu d'utiliser les irisations dues aux interférences, on vient pour chaque image ajouter une ellipse de couleur uniforme et aléatoire (en nuances de gris), de position aléatoire recouvrant systématiquement (ou non) et avec des positions et tailles variables et plus ou moins aléatoires. On se retrouve ainsi avec chaque image de base qui est représentée sept fois (donc 7 types d'images), avec sur la première des sept (type 0) l'image brute où il n'y a pas d'ellipse, puis les quatre suivantes (types 1 à 4) qui ont des ellipses cachant à peu près le Soleil avec des tailles croissantes, tandis que les deux dernières (types 5 et 6) ont un positionnement aléatoire).

A noter le biais du fait que les images, quand le Soleil est hors champ de vue, présenteront peu d'ellipses d'occultation qui seront, mécaniquement, hors du champ de vue.

Les images sont enfin pré-mélangées en gardant bien chaque série d'images côte à

cote, ce qui permet de ne pas avoir de mélange lors du partage de la base de données entre jeux de données d'apprentissage ("train"), et d'évaluation pendant l'étape d'apprentissage ("validation") et pour l'estimation de performance par la suite ("test"). La base d'apprentissage, une fois isolée des autres, sera remélangée par la suite pendant l'apprentissage. Cette distinction permet d'éviter que certaines des images d'apprentissage avec certaines ellipses se retrouvent avec d'autres ellipses dans les jeux de validation et de test.

On se retrouve alors avec deux jeux de données (capteur complet et caméra seule) pris au même moment, au temps d'exposition proportionnel, et avec les mêmes occultations entre les deux jeux. Ce jeu, réduit à des images de 150 pixels de coté, est alors enregistré.

Ce jeu est ensuite sous-échantillonné (dans l'exemple proposé on a des images de 30 par 30 pixels) afin de réduire la taille de la base de données et faciliter l'entrainement. Il y a un compromis à faire entre avoir trop peu de pixels (ce qui réduit la résolution et peut trop flouter les irisations au point de ne plus pouvoir les distinguer) et en avoir beaucoup trop avec un réseau de neurones alors d'autant plus lourd.

Enfin, on convertit éventuellement les images couleur d'une représentation RGB vers une représentation HSV (figure 3.36), ce qui permet de bien faire ressortir la teinte sur les images et de mieux voir des variations de teintes faibles.

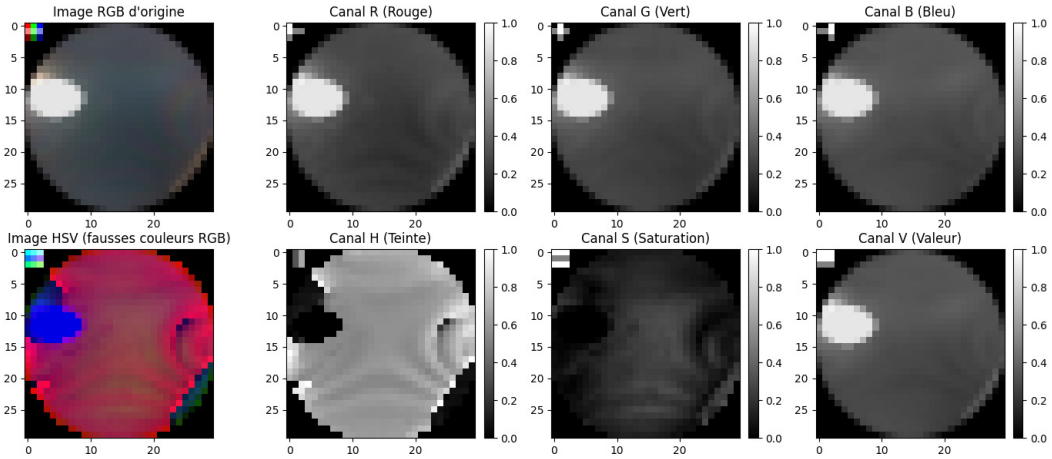



FIGURE 3.36 – Un exemple d'image RGB une fois convertie en HSV.

On se retrouve alors avec quatre jeux de données augmentées avec les ellipses. Sur la figure 3.37, on voit un exemple à partir d'une acquisition de base avec les quatres jeux de données en colonne de gauche à droite (nommés respectivement PilRGB, RefRGB, PilHSV et RefHSV en fonction de s'il s'agit d'une des images d'origine avec et sans lame d'onde et polariseur, en RGB ou HSV), et de haut en bas, les sept types d'images.

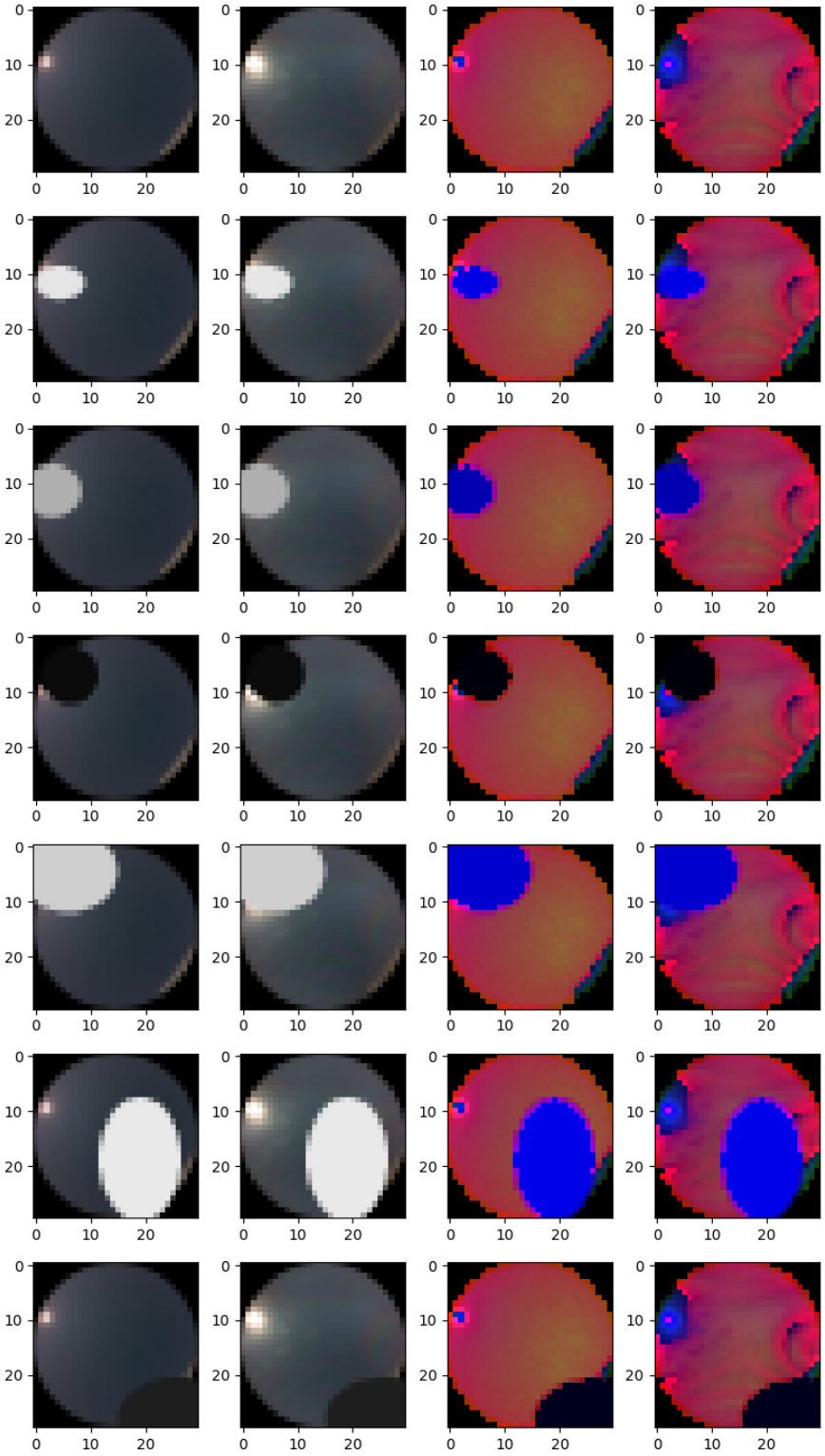


FIGURE 3.37 – Augmentation de données avec l'ajout d'ellipses. En ligne, le type (de 0 à 6 de haut en bas). En colonne, les jeux (RefRGB, PilRGB, RefHSV et PilHSV de gauche à droite).

#### 3.5.5.2 Traitement de l'angle (données à prédire par le réseau de neurone)

Afin de prédire l'azimut du Soleil vis à vis du capteur, on vient soustraire l'angle $azimut_{capteur/sol}$ (obtenu avec le codeur de la monture) à l'angle $azimut_{Soleil/sol}$ (obtenu avec les éphémérides) pour obtenir l'angle $azimut_{Soleil/capteur}$ qui nous servira pour l'entraînement du réseau.

## 3.6 Entraînement d'un réseau de neurones

Une fois la base de données obtenue et labellisée en fonction des orientations du Soleil par rapport au capteur, on vient entraîner un réseau de neurones convolutif pour essayer de reconnaître la position du Soleil sur les images. Cet apprentissage est fait avec la bibliothèque Tensorflow en utilisant là encore les ressources du mésocentre, ce qui nous permet de réaliser un entraînement dans les temps raisonnables en pouvant faire varier au choix la structure du réseau de neurones employé.

### 3.6.1 Architecture du réseau

On choisit un réseau séquentiel avec les couches suivantes :

| **Couche (type)** | **Dimension de sortie** | **Nombre de paramètres** |
|---|---|---|
| conv2d (Convolution 2D) | (23, 23, 128) | 24 832 |
| dropout (Abandon 10%) | (23, 23, 128) | 0 |
| conv2d_1 (Convolution 2D) | (16, 16, 128) | 1 048 960 |
| dropout_1 (Abandon 10%) | (16, 16, 128) | 0 |
| conv2d_2 (Convolution 2D) | (9, 9, 128) | 1 048 960 |
| dropout_2 (Abandon 10%) | (9, 9, 128) | 0 |
| flatten (Aplatissement) | (10 368) | 0 |
| dense (Dense) | (64) | 663 616 |
| dense_1 (Dense) | (64) | 4 160 |
| dense_2 (Dense) | (64) | 4 160 |
| dense_3 (Dense) | (1) | 65 |
| | **Total des paramètres :** | 2 794 753 |
| | **Paramètres entraînables :** | 2 794 753 |
| | **Paramètres non entraînables :** | 0 |

TABLEAU 3.1 – Modèle séquentiel avec une image de 30x30 en entrée.

Cela permet d'effectuer une régression avec en sortie, l'azimut du Soleil dans le repère du capteur.

### 3.6.2 Résultats

Après entrainement sur les images avec le Soleil souvent caché par des ellipses, avec et sans lame d'onde et polariseur, et en les convertissant en HSV ou en les laissant en

RGB, on obtient les résultats suivants (figure 3.38 pour l'évolution des estimations au cours de l'apprentissage, figure 3.39 pour deux histogrammes d'erreurs, et 3.40 pour un diagramme à moustache des résultats de chacun des jeux de données). Beaucoup de paramètres pourraient être encore optimisés tels que la taille des images en entrée, le nombre de couches, etc.

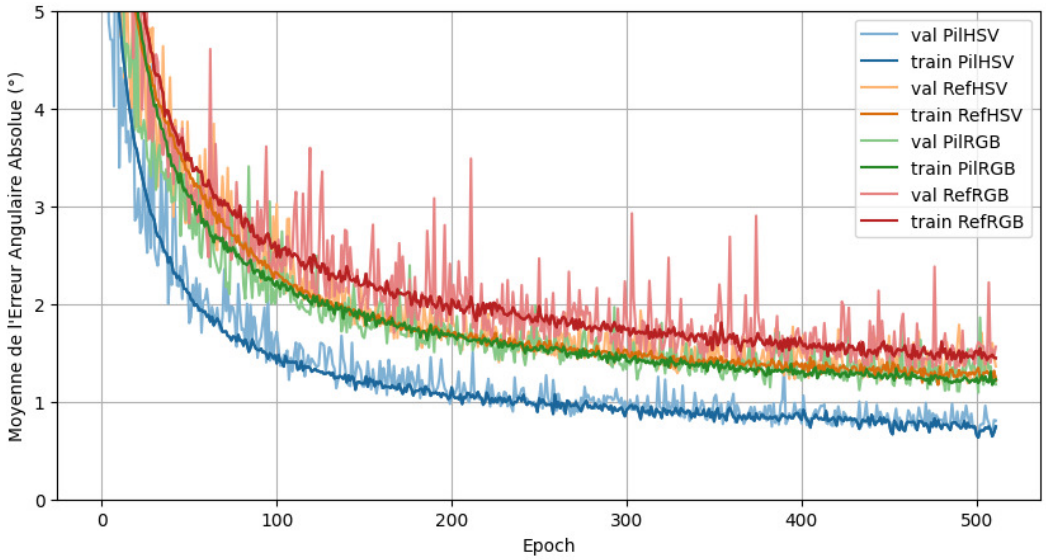



FIGURE 3.38 – Précision moyenne des réseaux lors de l'apprentissage.

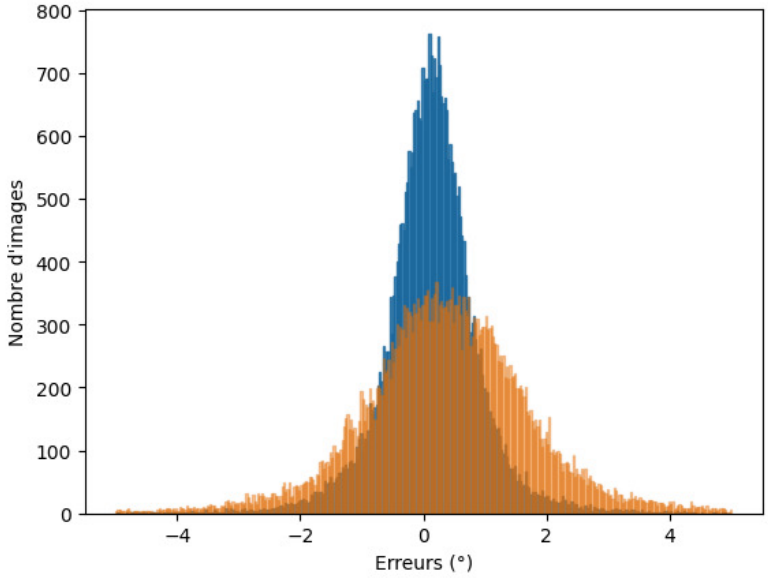
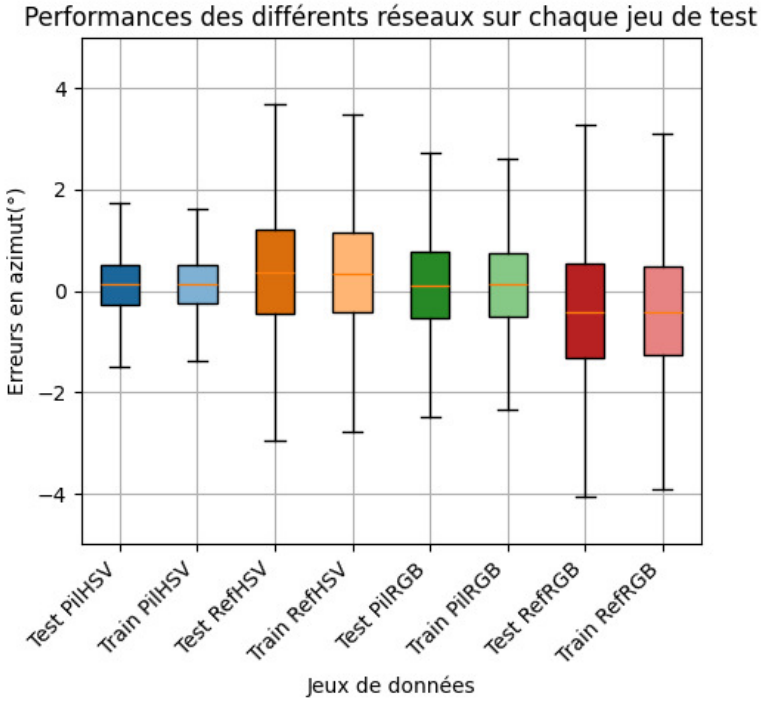
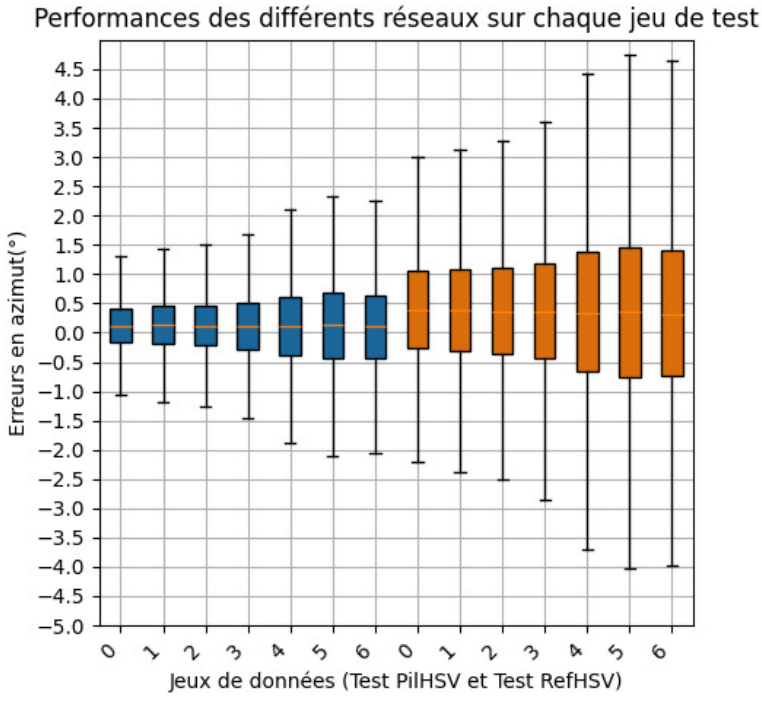



FIGURE 3.39 – Histogramme des erreurs sur le jeu de données de test, PilHSV (en bleu) versus RefHSV (en orange).




(a)




(b)

FIGURE 3.40 – Répartitions statistiques de l'erreur en fonction du réseau et de son jeu de test, en fonction du type du jeu (a) et pour deux d'entre eux en fonction du type d'ellipses d'obstruction ajoutées (b).

# Discussion

L'ajout de la lame d'onde et du polariseur devant l'objectif semble permettre un apprentissage plus aisé (et donc, on peut le supposer, une meilleure robustesse) par rapport à une caméra qui regarderait uniquement l'intensité du ciel. Cependant, par beau temps et même avec des occultations, il semble qu'une caméra couleur suffise pour obtenir son cap (puisque l'intensité du ciel n'est pas constante en pratique mais varie radialement autour du Soleil). Il serait intéressant de modéliser la chaîne complète d'acquisition en prenant en compte les vraies données du chapitre 2 en fonction de la météo, de faire apprendre au réseau des images simulées qui auraient été vues par un capteur Pilone sous le même ciel, et de voir numériquement le résultat en fonction de la couverture nuageuse afin de se faire une idée.

Les données du chapitre 2 mentionnent une caméra d'orientation constante, ce qui fait que le Soleil a toujours des trajectoires similaires dans le ciel. Afin de pouvoir piocher des images avec la position du Soleil tout à fait choisie en azimut et élévation, on pourrait prendre une image de météo choisie et d'élévation correcte, et la tourner pour avoir l'azimut choisi. Cette étape de *data augmentation* a pu être expérimentée lors du stage de Fauzi Akbar que j'ai pu co-encadrer à la fin de ma thèse.

Pour répondre avec les éléments à notre disposition à la question sur l'utilité potentielle d'un tel capteur pour une application automobile en l'état, on peut se reporter aux courbes dans l'introduction (figure 14) pour estimer si on peut faire de l'estimation de position par intégration d'odométrie et de cap. Il faut alors regarder l'écart-type de l'erreur de l'estimation sur notre jeu de données.

En se plaçant dans le cas du capteur avec lames d'onde et polariseur et avec conversion RGB vers HSV, sur le jeu de données de test, on obtient l'histogramme suivant (figure 3.41). Un calcul de l'écart-type des erreurs donne une valeur aberrante (de l'ordre de $\sigma_{brut} = 13,3°$) à cause de certaines valeurs extrêmes dont les écarts sont ponctuellement très grands.

On observe (figure 3.42) que la plupart des valeurs aberrantes sont proche de zéro. Cela s'explique par la discontinuité lors de l'apprentissage du réseau de neurones qui calcule un angle en sortie du dernier neurone compris entre 0 et 1 soit de 0 à 360°. Cette discontinuité entre 359.99 et 0° fait qu'il est difficile pour le réseau de prédire les valeurs proches de zéro mais c'est uniquement un effet numérique. On pourrait, par exemple, entrainer un autre réseau qui viendrait encoder les angles avec un offset (par exemple 90° est représenté en 0, et 480 en 1) qui aurait le même problème autour de 90°, puis quand on estime le cap si l'un des capteurs renvoie la "zone aveugle" de l'autre on pourrait choisir uniquement sa valeur à lui. On pourrait aussi, par exemple, estimer les position X et Y du Soleil sur le capteur au lieu de son angle pour ne pas avoir cette discontinuité, et recalculer l'azimut (et au passage l'élévation) du Soleil

dans le repère capteur.

En ôtant toutes les valeurs d'azimut proches de zéro (monture orientée entre -3° et +3°) et en recalculant l'écart type sur les données restantes on obtient $\sigma_{angles} = 1,52°$.

On pourrait aussi imaginer que les valeurs aberrantes n'arrivent que rarement et pas consécutivement. Dans ce cas, on pourrait coupler une IMU et un filtre particulaire pour enlever les valeurs variant trop rapidement. En imaginant que cela revienne à ne pas avoir de valeur aberrante supérieure à 5° par exemple, on se retrouve alors avec un écart standard $\sigma_{clip} = 0,85°$.

Dans ce cas, en se reportant à la figure 14 l'ordre de grandeur de la distance parcourable pour avoir une erreur latérale de l'ordre de 20 cm serait de l'ordre de la dizaine de mètres (à 50 km/h, cela est fait en environ une seconde soit une acquisition). Il parait vraisemblable qu'on pourrait atteindre des fréquences d'échantillonage bien plus élevées que le Hertz, le capteur étant capable de fournir des images à une cadence de l'ordre de la dizaine d'images par secondes, et l'estimation de cap avec le réseau de neurones prenant de l'ordre de quelques millisecondes par images sur GPU (à noter qu'on a un petit GPU à disposition sur la carte Jetson Nano). Avec une estimation à 10 Hz par exemple, et toujours une vitesse à 50 km/h, les abaques se décalent (équation 0.4) et on obtient alors une distance longitudinale maximale de l'ordre de 200 m, plus intéressante. Il faut néanmoins garder à l'esprit que ce ne sont que des intervalles de confiance à 95% ...

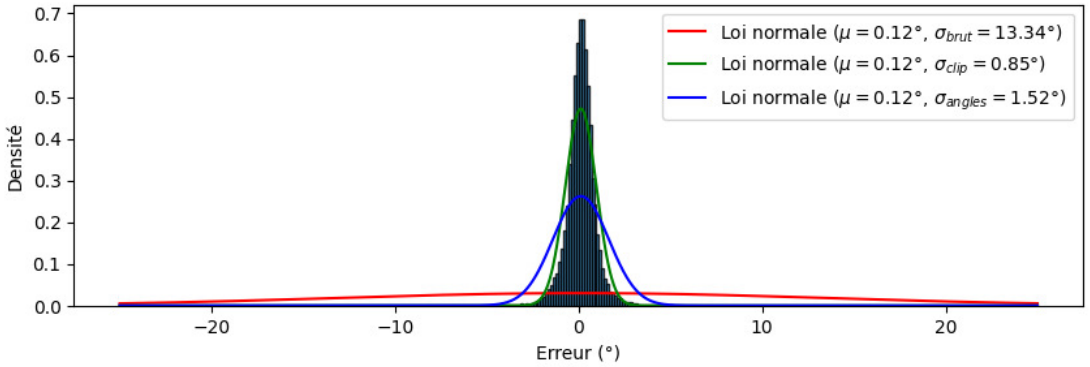
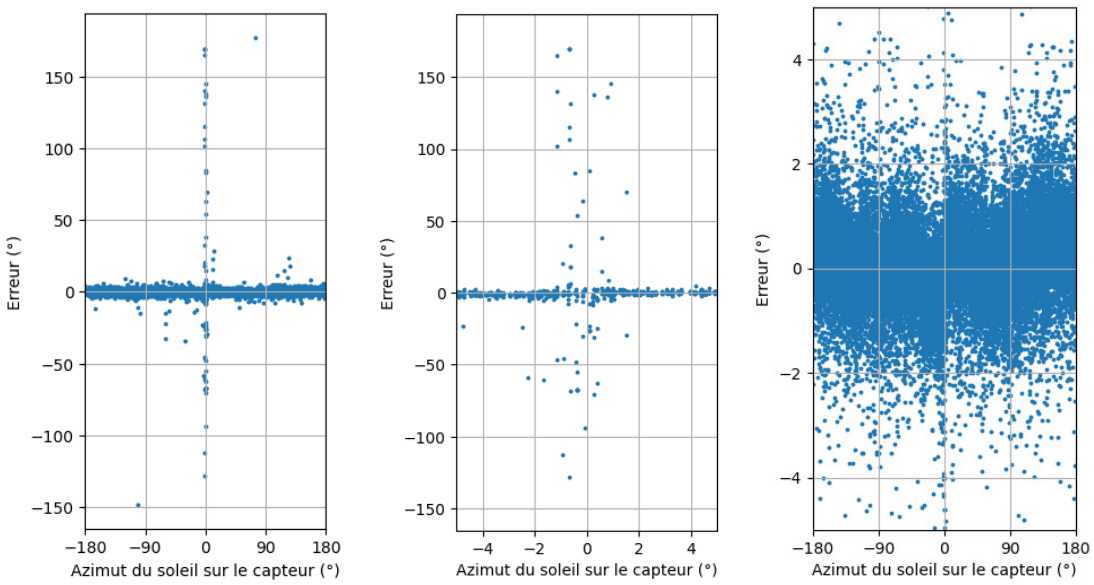



FIGURE 3.41 – Histogramme des erreurs sur le jeu de données de test et lois normales ajustées.




(a) (b) (c)

FIGURE 3.42 – Répartitions statistiques de l'erreur en fonction de l'angle d'azimut du Soleil sur l'image. Après zoom sur la vue large (a), on observe beaucoup de valeurs aberrantes de part et d'autre de l'azimut zéro (b) et des erreurs de l'ordre du degré pour la plupart (c).

# Pistes d'éventuelle intégration sur véhicule

Plusieurs contraintes se posent pour une éventuelle intégration sur véhicule. Il semblerait souhaitable de placer le capteur polarimétrique sous le pare-brise mais on ne sait pas exactement l'impact que celui-ci pourrait avoir sur la polarisation.

## Influence du pare-brise sur la polarisation

Afin de pouvoir mieux toucher du doigt les contraintes qui pourraient arriver, sont recueillies ici des informations obtenues après discussions avec une personne spécialiste des vitrages automobiles au sein du groupe, M. Frédéric Guidez.

Dans le temps, les pare-brise étaient vérifiés en surveillant les contraintes internes avec une méthode polarimétrique. Le pare-brise était monté avec un cordon de colle, puis avec un polariseur, on mesurait la figure d'interférences en transmission (source à l'extérieur, caméra dans le véhicule) pour voir les tensions du verre. En règle générale, on observait que, dans une même campagne de pare-brise, les tensions étaient assez identiques, mais étaient différents d'une campagne à l'autre. Il y avait une limite admissible fixée de contrainte (par exemple 40MPa), seuil au-delà duquel le pare-brise était rejeté. En règle générale, vers le bord, il y avait plus de contraintes, de même qu'au niveau du rétroviseur. Les fissures ont d'ailleurs tendance à démarrer du bord,

et remonter dans le pare-brise.

Au niveau de la composition, les vitrages en verre feuilleté sont plutôt faits d'un « sandwich » de deux couches de verre (borosilicate, parfois aluminosilicate) entre lesquelles on vient mettre une couche de polymère qui tient les morceaux ensemble en cas d'impact (en général, du PVB (Polyvinyle Butyral) d'épaisseur typique 0,76mm, parfois de l'EVA, ou d'autres plastiques plus exotiques pour du vitrage blindé). L'ensemble est assemblé par autoclavage (sous vide et à chaud) qui permet au plastique d'assemblage de dé-buller et de tenir les deux vitres par succion naturelle. Le surplus est ensuite ébavuré.

Un pare-brise a une épaisseur assez contrôlée, un exemple donné est 4,45 +/- 0,04 mm dans une même campagne de production.

Les verres sont fabriqués par flottage sur bain d'étain pour en faire un verre plat. Puis, ils sont montés sur un « squelette », un outillage périphérique après découpe. L'ensemble est chauffé à 800°, se ramollit, et vient prendre sa forme finale par gravité sous son propre poids. Dans certains cas, il y a une contre-forme en face (par exemple dans le cas d'un montage de *Head Up Display*, le pare-brise est alors pressé). Comme la fabrication est faite en feuille à feuille, il y a un gap potentiel entre verre intérieur et extérieur (de l'ordre de 0,1mm). Certains utilisent de la poudre de talc (dans le cas du feuilleté semi-trempé) entre deux feuilles lors de la fabrication, pour faire des verres qui sont alors appairés.

Les pare-brise sont ensuite montés sur véhicule avec de la colle polyuréthane (sur une surface de l'ordre de $50mm^2$). La colle se déforme un peu, et absorbe les dilatations du métal plus importantes que celles du verre. Le comportement reste bon dans une plage de température de -30° à +100°. Il y a aussi un « finisher » en TPE qui fait un joint visuel sur les bords du vitrage.

Certains véhicules ont un Cielo (toit transparent), en verre feuilleté. Il est présent sur une gamme de 0 à 50% sur les véhicules, et il n'est pas toujours propre, ce qui ne représente donc pas forcément une bonne idée pour notre application. L'épaisseur des verres feuilletés peut aller de 3,76mm à 4,96mm. Il y a déjà des capteurs embarqués sous les vitrages : par exemple le capteur de pluie, qui utilise la réflexion totale interne air-verre extérieur. À la différence du verre feuilleté (utilisé sur certains vitrages, pare-brise, pavillon), on trouve aussi du verre monolithique. Un verre « trempé » lors de la fabrication est mécaniquement en compression à l'extérieur et en tension à l'intérieur. En pratique, le but est de réduire la tension et maximiser la compression : cela permet d'augmenter la résistance au gravillonnage. Cependant, compression et tension sont alors inhomogènes, ce qui peut être gênant dans notre application puisque les contraintes mécaniques créent de la biréfringence additionnelle [7]. Les verres trempés ne concernent pas le pare-brise, (parfois les vitres mobiles non plus) mais souvent le fenestron, la lunette et la custode.

Il peut par ailleurs y avoir un problème lors du roulage à cause du vent : plus on va vite, plus on a de la convection à l'extérieur donc le verre extérieur refroidit plus vite. La différence de température avec le verre intérieur engendre une différence de

7. voir, par exemple, la figure page 3 du livre de Chipman [Chi19]

dilatation mécanique entre vitrages. La couche intermédiaire de PVB absorbe alors la déformation mécanique, ce qui pourrait encore perturber la polarisation des rayons.

En plus de ces trois gros constituants de verre feuilleté, il y a aussi parfois une couche mince d'argent « basse émissivité » qui sert à bloquer la transmission des IR, servant alors de bouclier thermique. Avec la généralisation des véhicules électriques et l'économie de chauffage (donc d'énergie) nécessaire pour augmenter autant que possible l'autonomie du véhicule, ce genre de couche pourrait devenir de plus en plus présent.

Au niveau de la transmission aux UV, un vitrage trempé en laisse passer de l'ordre de 50%, là où ils seront fortement absorbés dans le cas du vitrage feuilleté par la couche en PVB.

En général, les pare-brise ne sont pas patternés, mais il peut exister des épargnes de couches au niveau du badge télépéage, notamment en France et au Japon, pour que la couche d'argent n'absorbe pas les ondes radio. En tout cas, il y aurait toujours une possibilité de faire du marouflage en cas de déploiement industriel de systèmes de cap polarimétrique.

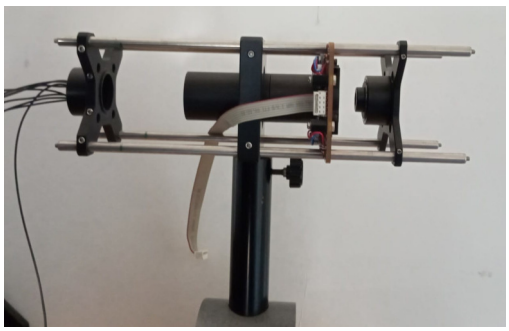
## Essais en soufflerie aéroclimatique

Il a été proposé à un moment de la thèse de vérifier expérimentalement l'effet de la chaleur et de la pression aérodynamique appliquée sur le pare-brise en condition de roulage sur les contraintes mécaniques que celui-ci subit, ces contraintes mécaniques étant, par la suite, responsables d'une modification locale de la biréfringence du pare-brise, donc de l'impact de celui-ci sur la polarisation. Il aurait été intéressant de savoir le niveau de biréfringence atteint pour qu'il soit pris en compte et/ou compensé, ainsi que sa stabilité dans le temps en fonction de la dilatation mécanique/thermique du pare-brise.

Une expérience a été envisagée dans la chambre aéroclimatique de Vélizy (figure 3.43a) où on aurait, sur un véhicule en essais, éclairé depuis l'extérieur le pare-brise avec une source d'AOP connu (figure 3.43b), puis estimé l'état de polarisation derrière la vitre avec la caméra polarimétrique employée précédemment. On aurait alors fait tourner le polariseur de Rochon (au centre de l'image) éclairé par la gauche par une diode électroluminescente RGBW, afin de mesurer l'intensité reçue sur les micro-polariseurs de la caméra pour chaque orientation. Cela aurait permis de déterminer la teinte reçue pour différentes orientations du polariseur (liée à la retardance du pare-brise) et de voir si celle-ci changeait de manière significative avec la variation de paramètres tels que la température dans la chambre (-30°/+55°C) ou la vitesse du vent (de 0 à 160 km/h).



(a) Un véhicule en cours d'essais dans la veine de la soufflerie aéroclimatique de Vélizy



(b) Illuminateur polarisé

FIGURE 3.43 – Essais envisagés en soufflerie

Ces essais n'ont finalement pas pu être réalisés par faute de temps et après le départ de nombreux personnels dans cette unité ayant suivi la fusion PSA-FCA, dont les personnes avec qui j'étais en contact. D'autres souffleries existent en France avec des paramètres plus étendus, comme celle de Valéo La Verrière (température : -40°C/+85°C, vitesse du vent : 0 à 180km/h, humidité : 0 à 100%) ou celle du CSTB à Nantes (température : -32°C/+55°C, vitesse du vent : 0 à 280km/h).

## Impact de la présence de glace en amont du capteur

En plus des salissures qui pourraient, comme pour tout capteur optique, gêner la mesure de position du Soleil, on peut aussi noter que la présence de givre pourrait être très gênante. En effet, les cristaux de glace sont aussi, selon leur anisotropie, des matériaux biréfringents. Afin de se rendre compte qualitativement de l'effet de cristaux de glace sur la polarisation, il est par exemple possible d'en déposer quelques millimètres sur une vitre en verre isotrope, puis d'observer l'ensemble entre polariseurs croisés en lumière blanche. On obtient alors le résultat visible sur la figure 3.44 où il y a des irisations qui se créent.




FIGURE 3.44 – Des cristaux de glace déposés sur une vitre, vus entre polariseurs croisés en lumière blanche

# Perspectives

Plusieurs pistes d'amélioration du capteur Pilone ont été imaginées. Tout d'abord, les composants pourraient être optimisés : utilisation d'une seule lame d'onde d'épaisseur adéquate au lieu d'un empilement de seize lames quart d'ondes à l'orientation délicate et qui rajoutent un peu de diffusion sur l'image, nombre de franges adapté, fixations plus robustes (une lame d'onde faite en scotch serait ainsi collée de manière robuste à un polariseur, et en étant plus grande elle pourrait maintenir l'ensemble fixe par rapport à la caméra), capteur grand angle avec une focale un peu moins courte pour que le champ de vue du ciel recouvre l'ensemble du capteur, ajustement du temps d'intégration optimal pour avoir un bon compromis entre fréquence d'échantilonage et dynamique adéquate de l'image avec peu de bruit. Des essais en température permettraient aussi de voir la variation du comportement de la lame d'onde à l'échauffement.

D'un point de vue algorithique, l'entrainement de réseaux de neurones permet un développement relativement rapide dans le cadre d'une thèse. D'autres approches ont été testées rapidement (comme ajuster un modèle (avec des moindres carrés avec les positions du soleil comme paramètres) avec une image à traiter) mais nécessiteraient d'être beaucoup plus rapides pour être utilisables en embarqué. Concernant l'estimation de la précision, nous n'avons dans ce travail que mesuré des écarts-type d'erreurs de manière empirique en comparant nos sorties de capteurs à la vérité terrain fournie par la monture et les éphémérides. Pour une application pratique, il serait souhaitable d'obtenir en plus de la valeur de cap une estimation de l'incertitude de mesure. Peut-être que des méthodes d'inversions matricielles sur des images de dimensions très réduites pourraient s'appliquer ; les matrices d'information de Fisher pourraient être un outil intéressant. Quelles que soient les méthodes employées, elles pourraient être testées en simulant la réponse du capteur avec en entrée la base de données complète du chapitre 2 (éventuellement augmentée) afin d'estimer la robustesse vis-à-vis des dégradations météo, ou encore d'un bruit ajouté artificiellement. Cela pourrait permettre au passage d'optimiser certains paramètres géométriques du capteurs tels que le champ de vue optimal ou l'écart spatial des irisations.

Une expérience relativement peu couteuse (et abandonnée par manque de temps ...) aurait pu être de monter la caméra sur une voiture grand public (à coté du rétroviseur par exemple) et de combiner les informations du capteur de cap obtenu avec l'information d'odométrie du véhicule (on trouve sur le marché pour une dizaine d'euros des adaptateurs OBD II permettant de récupérer via une liaison Bluetooth les informations du véhicule, y compris celle de l'odomètre des roues) pour les comparer avec celles d'un GNSS.

Par ailleurs, nous avons fait le pari dans cette thèse de proposer un nouveau type

de capteur très peu cher. Cependant, ils se pourrait que les caméras DoFP voient leur prix baisser dans les prochaines années. Des travaux tels que ceux que réalise la start-up *SolNIL*[8] capable de déposer par nano-impression à moindre coût des nanostructures sur des surfaces pourraient, peut être, permettre de réduire le coût de cette technologie en fonctionnalisant des capteurs matriciels commerciaux pour permettre une adoption à plus grande échelle.

Au sein du groupe Stellantis, nous avons eu l'opportunité d'embarquer une caméra DoFP identique à celle du toit sur un véhicule d'essais instrumenté de l'équipe de M. Mathieu Mika, afin de faire un roulage sur le site de La Ferté-Vidame. Le véhicule était équipé d'une centrale inertielle/GNSS, permettant d'avoir une vérité terrain sur l'orientation du véhicule (figure 3.45b). Nous avons ainsi pu collecter quelques images du ciel, non publiées pour des raisons de confidentialité liées au site d'essais, associées au roulage.

Ces données pourraient aussi servir à mieux connaitre les conditions d'illumination du véhicule pour une application en réalité virtuelle/réalité augmentée. En effet, lorsqu'on effectue de la réalité augmentée, on vient projeter dans un casque adapté des images de synthèse se superposant à la scène observée. Afin d'obtenir des images les plus réalistes possible, on pourrait éclairer virtuellement ces objets de synthèse avec la même illumination que celle en extérieur et en tenant compte de la polarisation dans le rendu. Par exemple, par ciel couvert, on aura une illumination diffuse et peu polarisée, mais grise/blanche, tandis qu'au matin on aura un ciel rougeâtre et, qu'en cas de beau temps, on aura la voute céleste qui illuminera en bleu polarisé la scène, plus une source ponctuelle forte non polarisée représentée par le Soleil.

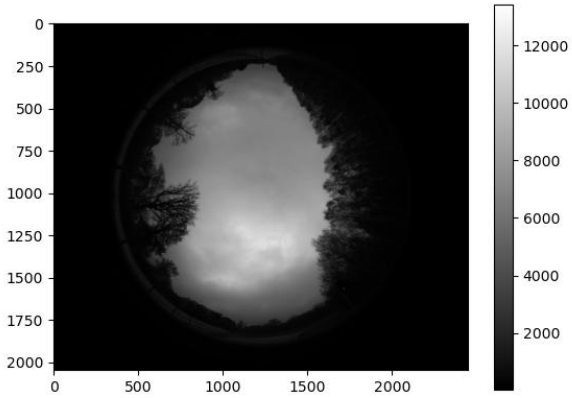
8. https://solnil.com/



(a) Une photo du véhicule avec la caméra embarquée et son boitier de protection.




(b) Parcours GPS (nombre de points décimé) du véhicule lors d'une acquisition. La couleur des points représente le cap du véhicule obtenu avec la vérité terrain.




(c) Un exemple d'image observée sur le site (temps couvert), le 06 décembre 2022 à 12h37.

FIGURE 3.45 – Essais véhicule sur le site de la Ferté-Vidame

Dans ce contexte, une caméra polarimétrique telle que celle qui est sur le toit permettrait de connaitre l'état du ciel en direct et d'en déduire l'illumination à choisir sur le moment pour obtenir un rendu des objets de synthèse dont l'éclairage colle avec ceux vus "en vrai".

Enfin, même si on n'utilise le capteur de cap que comme tel, cette information couplée à une connaissance cartographique de l'environnement du véhicule pourrait permettre d'aider l'utilisateur à identifier la prochaine sortie lorsqu'elle est proche (par exemple dans un rond point) en signalant sur une interface sa direction et le cap à suivre en temps réel.

# Conclusion

Ce travail de thèse a permis deux avancées principales dans le domaine de la navigation par lumière polarisée.

D'une part, cela a permis de proposer une base de données caractérisant la polarisation de la lumière du ciel dans diverses conditions météo sur une période étendue, avec annotations manuelles de la couverture nuageuse. Une calibration de l'orientation de la caméra couplée à des éphémérides permet, par ailleurs, d'estimer la position du Soleil sur ces images même lorsqu'il n'est pas directement visible comme en cas de couverture nuageuse.

Ces données pourraient permettre de valider certains modèles de diffusion de la lumière du ciel, tester des algorithmes d'obtention de cap sur ces images, ou de s'en servir pour faire de l'entrainement de réseaux de neurones. D'autres communautés scientifiques telles que celles travaillant autour de la météo ou du rendu graphique pourraient aussi s'en servir. Plusieurs équipes de recherche nous ont d'ailleurs déjà demandé un accès aux données.

D'autre part un nouveau type de capteur a été proposé, basé sur les variations des propriétés optiques d'un composant biréfringent nommé lame d'onde avec l'angle d'incidence et d'azimut des rayons. Un modèle physique a été réalisé, basé sur l'estimation des paramètres optiques de la lame d'onde, et un démonstrateur réalisé par beau temps montre que ce genre de capteur pourrait avoir de l'intérêt. Par ailleurs, un brevet a été déposé au niveau national.

Il reste encore du travail avant d'obtenir une application concrète avec ce type précis de capteurs, d'autant plus sur un marché de masse tel que celui de l'automobile. Cependant, ce genre de solutions pourrait avoir une importance croissante avec la montée des tensions géopolitiques qui pouraient un jour provoquer une menace pour l'exploitation permanente et fiable des sytèmes GNSS. D'autres applications que l'automobile pourraient aussi bénéficier de cette technologie, telles que le suivi du Soleil pour l'orientation de panneaux solaires, ou de miroirs dans des centrales solaires à concentration, pour la production d'énergie peu carbonée. On pourrait aussi imaginer [9] d'adapter le système Pilone avec polariseur et lame d'onde sur un téléphone portable (comme pour les tout premiers essais que j'ai pu faire ...) pour rendre sa caméra frontale sensible à la lumière polarisée, et ainsi estimer la position relative du Soleil, en déduire le cap, et pourquoi pas même se géo-localiser en transformant le téléphone en un sextant moderne. À suivre ...

9. idée originale de Stéphane Viollet

# Bibliographie


[Aud+18] Clément AUDIBERT, Julien CHAVES-JACOB, Jean-Marc LINARES et al. « Bio-Inspired Method Based on Bone Architecture to Optimize the Structure of Mechanical Workspieces ». In : *Materials & Design* 160 (déc. 2018), p. 708-717. ISSN : 0264-1275. DOI : 10.1016/j.matdes.2018.10.013. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127518307688 (visité le 28/02/2024) (cf. p. 26).

[Bel87] C. BELLVER. « Influence of Particulate Pollution on the Positions of Neutral Points in the Sky at Seville (Spain) ». In : *Atmospheric Environment (1967)* 21.3 (jan. 1987), p. 699-702. ISSN : 0004-6981. DOI : 10.1016/0004-6981(87)90051-5. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0004698187900515 (visité le 07/02/2024) (cf. p. 59).

[BDL04] M V BERRY, M R DENNIS et R L LEE. « Polarization Singularities in the Clear Sky ». In : *New Journal of Physics* 6 (nov. 2004), p. 162-162. ISSN : 1367-2630. DOI : 10.1088/1367-2630/6/1/162. URL : https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/6/1/162 (visité le 09/12/2022) (cf. p. 59).

[BMW] BMW. *Capteurs automobiles : organes sensoriels des systèmes d'assistance | BMW.com*. URL : https://www.bmw.com/fr/innovation/les-capteurs-automobiles.html (visité le 10/01/2024) (cf. p. 24).

[BW99] Max BORN et Emil WOLF. *Principles of Optics : Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. 7e éd. Cambridge : Cambridge University Press, 1999. DOI : 10.1017/CBO9781139644181. URL : https://www.cambridge.org/core/books/principles-of-optics/D12868B8AE26B83D6D3C2193E94FFC32 (visité le 08/07/2024) (cf. p. 84, 92, 103).

[Bri87] Michael H. BRILL. « Seeing the Light : Optics in Nature, Photography, Color, Vision, and Holography, By David S. Falk, Dieter R. Brill, and David G. Stork, Harper and Row, New York, 1986, 446 Pp. Price : $35.50 ». In : *Color Research & Application* 12.3 (1987), p. 156-157. ISSN : 1520-6378. DOI : 10.1002/col.5080120310. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/col.5080120310 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 56).

[BG] Michael L BRINES et James L GOULD. « SKYLIGHT POLARIZATION PATTERNS AND ANIMAL ORIENTATION ». In : () (cf. p. 26).

[BKB65] Georges BRUHAT, Alfred KASTLER et Patrick BOUCHAREINE. *Optique : Cours de Physique Générale*. Paris : Milan : Barcelone : Masson, 1965. ISBN : 978-2-225-82652-8 (cf. p. 92).

[C4A19] C4ADS. *Extensive Russian GPS Spoofing Exposed in Report*. Avr. 2019. URL : https://www.rtl-sdr.com/extensive-russian-gps-spoofing-exposed-in-report/ (visité le 07/01/2024) (cf. p. 30).

[CS11] Nicole CAREY et Wolfgang STÜRZL. « An Insect-Inspired Omnidirectional Vision System Including UV-sensitivity and Polarisation ». In : *2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*. Nov. 2011, p. 312-319. DOI : 10.1109/ICCVW.2011.6130258. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/6130258 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 42).

[CM12] Javaan CHAHL et Akiko MIZUTANI. « Biomimetic Attitude and Orientation Sensors ». In : *IEEE Sensors Journal* 12.2 (fév. 2012), p. 289-297. ISSN : 1558-1748. DOI : 10.1109/JSEN.2010.2078806. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/5585652 (visité le 24/01/2024) (cf. p. 41).

[Chi19] CHIPMAN. *Polarized Light and Optical Systems | Russell Chipman, Wai Sze Tiffany*. 2019. URL : https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781351129121/polarized-light-optical-systems-russell-chipman-garam-young-wai-sze-tiffany-lam (visité le 08/07/2024) (cf. p. 84, 134).

[Chu+08] Jinkui CHU, Kaichun ZHAO, Qiang ZHANG et al. « Construction and Performance Test of a Novel Polarization Sensor for Navigation ». In : *Sensors and Actuators A : Physical* 148.1 (nov. 2008), p. 75-82. ISSN : 0924-4247. DOI : 10.1016/j.sna.2008.07.016. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424708004081 (visité le 14/06/2024) (cf. p. 41).

[Col+18] The Astropy COLLABORATION, A. M. PRICE-WHELAN, B. M. SIPŐCZ et al. « The Astropy Project : Building an Inclusive, Open-Science Project and Status of the v2.0 Core Package ». In : *The Astronomical Journal* 156.3 (sept. 2018), p. 123. ISSN : 0004-6256, 1538-3881. DOI : 10.3847/1538-3881/aabc4f. arXiv : 1801.02634 [astro-ph]. URL : http://arxiv.org/abs/1801.02634 (visité le 02/03/2024) (cf. p. 67).

[Col+22] The Astropy COLLABORATION, Adrian M. PRICE-WHELAN, Pey Lian LIM et al. *The Astropy Project : Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project and the Latest Major Release (v5.0) of the Core Package*. Juin 2022. DOI : 10.3847/1538-4357/ac7c74. arXiv : 2206.14220 [astro-ph]. URL : http://arxiv.org/abs/2206.14220 (visité le 02/03/2024) (cf. p. 67).

[Col05] COLLETT. *Field Guide to Polarization | (2005) | Collett | Publications | Spie*. 2005. URL : https://spie.org/publications/book/626141#_=_ (visité le 29/01/2024) (cf. p. 47).

[CCS10] C. CORNET, L. C-LABONNOTE et F. SZCZAP. « Three-Dimensional Polarized Monte Carlo Atmospheric Radiative Transfer Model (3DMCPOL) : 3D Effects on Polarized Visible Reflectances of a Cirrus Cloud ». In : *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 111.1 (jan. 2010), p. 174-186. ISSN : 0022-4073. DOI : 10.1016/j.jqsrt.2009.06.013. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407309002246 (visité le 07/02/2024) (cf. p. 59).

[Cou+22] Guillaume COURTIER, Ronan ADAM, Pierre-Jean LAPRAY et al. « Image-Based Navigation System Using Skylight Polarization for an Unmanned Ground Vehicle ». In : *Unmanned Systems Technology XXIV*. T. 12124. SPIE, mai 2022, p. 172-181. DOI : 10.1117/12.2616833. URL : https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12124/121240H/Image-based-navigation-system-using-skylight-polarization-for-an-unmanned/10.1117/12.2616833.full (visité le 14/06/2024) (cf. p. 45, 84).

[Cou+23] Guillaume COURTIER, Pierre-Jean LAPRAY, Ronan ADAM et al. « Ground Vehicle Navigation Based on the Skylight Polarization ». In : *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. Avr. 2023, p. 1373-1379. DOI : 10.1109/PLANS53410.2023.10140044. URL : https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10140044 (visité le 14/06/2024) (cf. p. 45, 84).

[Du+20] Tao DU, Yun Hao ZENG, Jian YANG et al. « Multi-Sensor Fusion SLAM Approach for the Mobile Robot with a Bio-Inspired Polarised Skylight Sensor ». In : *IET Radar, Sonar & Navigation* 14.12 (2020), p. 1950-1957. ISSN : 1751-8792. DOI : 10.1049/iet-rsn.2020.0260. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-rsn.2020.0260 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 41).

[Dua+13] Jin DUAN, Qiang FU, Chunhe MO et al. « Review of Polarization Imaging for International Military Application ». In : *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013 : Imaging Sensors and Applications*. T. 8908. SPIE, août 2013, p. 276-281. DOI : 10.1117/12.2033042. URL : https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/8908/890813/Review-of-polarization-imaging-for-international-military-application/10.1117/12.2033042.full (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[DDD09] L. DUMITRASCU, I. DUMITRASCU et D. O. DOROHOI. « Conoscopic Method for Determination of Main Refractive Indices and Thickness of a Uniaxial Crystal Cut out Parallel to Its Optical Axis ». In : *Journal of Applied Crystallography* 42.5 (oct. 2009), p. 878-884. ISSN : 0021-8898. DOI :

10.1107/S0021889809025709. URL : https://journals.iucr.org/j/issues/2009/05/00/ce5061/ (visité le 10/07/2024) (cf. p. 114).

[Dup] Julien DUPEYROUX. *An Ant-Inspired Celestial Compass Applied to Autonomous Outdoor Robot Navigation - ScienceDirect*. URL : https://www-sciencedirect-com.lama.univ-amu.fr/science/article/pii/S092188901830263X (visité le 11/03/2024) (cf. p. 33, 42).

[ES18] Laura ESHELMAN et Joseph SHAW. « The VIS–SWIR Spectrum of Skylight Polarization ». In : *Applied Optics* 57 (sept. 2018), p. 7974. DOI : 10.1364/AO.57.007974 (cf. p. 58).

[Fan+18] Chen FAN, Xiaoping HU, Xiaofeng HE et al. « Integrated Polarized Skylight Sensor and MIMU With a Metric Map for Urban Ground Navigation ». In : *IEEE Sensors Journal* 18.4 (fév. 2018), p. 1714-1722. ISSN : 1558-1748. DOI : 10.1109/JSEN.2017.2786404. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/8234571 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 43, 84).

[Fan+21] Yuanyi FAN, Ran ZHANG, Ze LIU et al. « A Skylight Orientation Sensor Based on S-Waveplate and Linear Polarizer for Autonomous Navigation ». In : *IEEE Sensors Journal* 21.20 (oct. 2021), p. 23551-23557. ISSN : 1558-1748. DOI : 10.1109/JSEN.2021.3106951. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/9521192 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[Fin24] FINOT. *(2605) Optique Ond. - Chapitre 7 - Polarisation de La Lumière et Optique Anisotrope - YouTube*. 2024. URL : https://www.youtube.com/playlist?list=PL8gtD5Z9eATdgZUBbpEL--Ih3Jkfu0Qh8 (visité le 04/06/2024) (cf. p. 92, 95, 96).

[Fri13] Karl von FRISCH. « The Dance Language and Orientation of Bees ». In : *The Dance Language and Orientation of Bees*. Harvard University Press, oct. 2013. ISBN : 978-0-674-41877-6. DOI : 10.4159/harvard.9780674418776. URL : https://www.degruyter.com/document/doi/10.4159/harvard.9780674418776/html (visité le 11/03/2024) (cf. p. 27).

[Fuja] FUJIFILM. *Série FE185 | Fujifilm [France]*. URL : https://www.fujifilm.com/fr/fr/business/optical-devices/mvlens/fe185 (visité le 13/12/2023) (cf. p. 63).

[Fujb] FUJINON. *Documentation Constructeur Fujinon* (cf. p. 63).

[Gat+23] Gabriel GATTAUX, Roxane VIMBERT, Antoine WYSTRACH et al. « Antcar : Simple Route Following Task with Ants-Inspired Vision and Neural Model ». Fév. 2023. URL : https://hal.science/hal-04060451 (visité le 28/02/2024) (cf. p. 26).

[Ger17] Christoph GERHARD. *Optics Manufacturing : Components and Systems*. Boca Raton : CRC Press, déc. 2017. ISBN : 978-1-351-22836-7. DOI : 10.1201/9781351228367 (cf. p. 120).

[Ger20] Thomas A. GERMER. « pySCATMECH : A Python Interface to the SCATMECH Library of Scattering Codes ». In : 11485 (août 2020), 114850J. DOI : 10.1117/12.2568578. URL : https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020SPIE11485E..0JG (visité le 10/07/2024) (cf. p. 99).

[GWV08] Nirmalya GHOSH, Michael F. G. WOOD et I. Alex VITKIN. « Mueller Matrix Decomposition for Extraction of Individual Polarization Parameters from Complex Turbid Media Exhibiting Multiple Scattering, Optical Activity, and Linear Birefringence ». In : *Journal of Biomedical Optics* 13.4 (2008), p. 044036. ISSN : 1083-3668. DOI : 10.1117/1.2960934 (cf. p. 99).

[Gol17] Dennis H. GOLDSTEIN. *Polarized Light*. 3e éd. Boca Raton : CRC Press, jan. 2017. ISBN : 978-1-315-21778-9. DOI : 10.1201/b10436 (cf. p. 84).

[Gova] UK GOV. *Report : The Economic Impact on the UK of a Disruption to GNSS*. URL : https://www.gov.uk/government/publications/report-the-economic-impact-on-the-uk-of-a-disruption-to-gnss (visité le 01/02/2024) (cf. p. 29).

[Govb] UK GOV. *The Economic Impact on the UK of a Disruption to GNSS - Executive Summary*. URL : https://www.gov.uk/government/publications/report-the-economic-impact-on-the-uk-of-a-disruption-to-gnss/the-economic-impact-on-the-uk-of-a-disruption-to-gnss-executive-summary (visité le 01/02/2024) (cf. p. 29).

[Gu+18] Honggang GU, Xiuguo CHEN, Chuanwei ZHANG et al. « Study of the Retardance of a Birefringent Waveplate at Tilt Incidence by Mueller Matrix Ellipsometer ». In : *Journal of Optics* 20.1 (jan. 2018), p. 015401. ISSN : 2040-8978, 2040-8986. DOI : 10.1088/2040-8986/aa9b05. URL : https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2040-8986/aa9b05 (visité le 10/07/2024) (cf. p. 103).

[Gua+22] Chuanlong GUAN, Ran ZHANG, Jinkui CHU et al. « Integrated Real-Time Polarization Image Sensor Based on UV-NIL and Calibration Method ». In : *IEEE Sensors Journal* 22.4 (fév. 2022), p. 3157-3163. ISSN : 1558-1748. DOI : 10.1109/JSEN.2022.3141049. URL : https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9673785 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[Ham17] Moshe HAMAOUI. « Polarized Skylight Navigation ». In : *Applied Optics* 56.3 (jan. 2017), B37-B46. ISSN : 2155-3165. DOI : 10.1364/AO.56.000B37. URL : https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-56-3-B37 (visité le 09/09/2024) (cf. p. 45).

[Han+17] Guoliang HAN, Xiaoping HU, Junxiang LIAN et al. « Design and Calibration of a Novel Bio-Inspired Pixelated Polarized Light Compass ». In : *Sensors* 17.11 (nov. 2017), p. 2623. ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s17112623. URL : https://www.mdpi.com/1424-8220/17/11/2623 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[Hec10] Jeff HECHT. « The First Half-Century of Laser Development ». In : *Laser Technik Journal* 7.4 (2010), p. 20-25. ISSN : 1863-9119. DOI : 10.1002/latj.201090052. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/latj.201090052 (visité le 14/02/2024) (cf. p. 19).

[Heg+07] Ramón HEGEDÜS, Susanne ÅKESSON, Rüdiger WEHNER et al. « Could Vikings Have Navigated under Foggy and Cloudy Conditions by Skylight Polarization? On the Atmospheric Optical Prerequisites of Polarimetric Viking Navigation under Foggy and Cloudy Skies ». In : *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 463.2080 (fév. 2007), p. 1081-1095. DOI : 10.1098/rspa.2007.1811. URL : https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2007.1811 (visité le 14/06/2024) (cf. p. 40).

[Hor14] Gábor HORVÁTH, éd. *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2014. ISBN : 978-3-642-54717-1 978-3-642-54718-8. DOI : 10.1007/978-3-642-54718-8. URL : https://link.springer.com/10.1007/978-3-642-54718-8 (visité le 05/01/2024) (cf. p. 26).

[Hor+11] Gábor HORVÁTH, András BARTA, István POMOZI et al. « On the Trail of Vikings with Polarized Skylight : Experimental Study of the Atmospheric Optical Prerequisites Allowing Polarimetric Navigation by Viking Seafarers ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 366.1565 (mars 2011), p. 772-782. DOI : 10.1098/rstb.2010.0194. URL : https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2010.0194 (visité le 14/06/2024) (cf. p. 40).

[Hor+02] Gábor HORVÁTH, Balázs BERNÁTH, Bence SUHAI et al. « First Observation of the Fourth Neutral Polarization Point in the Atmosphere ». In : *JOSA A* 19.10 (oct. 2002), p. 2085-2099. ISSN : 1520-8532. DOI : 10.1364/JOSAA.19.002085. URL : https://opg.optica.org/josaa/abstract.cfm?uri=josaa-19-10-2085 (visité le 07/02/2024) (cf. p. 58).

[HV04] Gábor HORVÁTH et Dezső VARJÚ. *Polarized Light in Animal Vision*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2004. ISBN : 978-3-642-07334-2 978-3-662-09387-0. DOI : 10.1007/978-3-662-09387-0. URL : http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-09387-0 (visité le 07/02/2024) (cf. p. 58).

[Hu+22] Pengwei HU, Jian YANG, Lei GUO et al. « Solar-Tracking Methodology Based on Refraction-Polarization in Snell's Window for Underwater Navigation ». In : *Chinese Journal of Aeronautics* 35.3 (mars 2022), p. 380-389. ISSN : 1000-9361. DOI : 10.1016/j.cja.2021.02.011. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936121000704 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[Hua94] Serge HUARD. *Polarisation de la lumière*. Masson, 1994. ISBN : 978-2-225-84300-6 (cf. p. 84).

[ISM] ISM. *Team SBI | ISM*. URL : https://ism.univ-amu.fr/en/SBI (visité le 07/01/2024) (cf. p. 26).

[Jes] JESUS DEL HOYO AND LUIS MIGUEL SANCHEZ BREA. *Welcome to Python Polarization's Documentation! — Python Polarization 1.1.3 Documentation*. URL : https://py-pol.readthedocs.io/en/master/ (visité le 11/03/2024) (cf. p. 53).

[Jon42] R. Clark JONES. « A New Calculus for the Treatment of Optical Systems. IV. » In : *JOSA* 32.8 (août 1942), p. 486-493. DOI : 10.1364/JOSA.32.000486. (Visité le 21/11/2023) (cf. p. 47).

[Jue+23] Wang JUE, Hu PENGWEI, Qian JIANQIANG et al. « Confocal Ellipse Hough Transform for Polarization Compass in the Nonideal Atmosphere ». In : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 72 (2023), p. 1-8. ISSN : 1557-9662. DOI : 10.1109/TIM.2023.3256476. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/10068277 (visité le 07/02/2024) (cf. p. 59).

[KDG12] Salmah B. KARMAN, S. Zaleha M. DIAH et Ille C. GEBESHUBER. « Bio-Inspired Polarized Skylight-Based Navigation Sensors : A Review ». In : *Sensors* 12.11 (nov. 2012), p. 14232-14261. ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s121114232. URL : https://www.mdpi.com/1424-8220/12/11/14232 (visité le 09/01/2024) (cf. p. 41).

[Kha+21] Mohammed Asadullah KHAN, Jian SUN, Bodong LI et al. « Magnetic Sensors-A Review and Recent Technologies ». In : *Engineering Research Express* 3.2 (juin 2021), p. 022005. ISSN : 2631-8695. DOI : 10.1088/2631-8695/ac0838. URL : https://dx.doi.org/10.1088/2631-8695/ac0838 (visité le 06/01/2024) (cf. p. 21).

[Kon23] KONG. *Review on Bio-Inspired Polarized Skylight Navigation - ScienceDirect*. 2023. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936123001814 (visité le 11/01/2024) (cf. p. 41).

[Kro+23] Thomas KRONLAND-MARTINET, Léo POUGHON, Marcel PASQUINELLI et al. « SkyPole—A Method for Locating the North Celestial Pole from Skylight Polarization Patterns ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 120.30 (juill. 2023), e2304847120. DOI : 10.1073/pnas.2304847120. URL : https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2304847120 (visité le 27/03/2024) (cf. p. 46, 61, 81).

[Lab88] Thomas LABHART. « Polarization-Opponent Interneurons in the Insect Visual System ». In : *Nature* 331.6155 (fév. 1988), p. 435-437. ISSN : 1476-4687. DOI : 10.1038/331435a0. URL : https://www.nature.com/articles/331435a0 (visité le 24/01/2024) (cf. p. 41).

[Lam+97] Dimitrios LAMBRINOS, Hiroshi KOBAYASHI, Rolf PFEIFER et al. « An Autonomous Agent Navigating with a Polarized Light Compass ». In : *Adaptive Behavior* 6.1 (juin 1997), p. 131-161. ISSN : 1059-7123. DOI : 10.1177/105971239700600104. URL : https://doi.org/10.1177/105971239700600104 (visité le 14/06/2024) (cf. p. 41).

[Lam+00] Dimitrios LAMBRINOS, Ralf MÖLLER, Thomas LABHART et al. « A Mobile Robot Employing Insect Strategies for Navigation ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 30.1 (jan. 2000), p. 39-64. ISSN : 0921-8890. DOI : 10.1016/S0921-8890(99)00064-0. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889099000640 (visité le 09/01/2024) (cf. p. 41).

[LRR22] Connor LANE, David RODE et Thomas RÖSGEN. « Calibration of a Polarization Image Sensor and Investigation of Influencing Factors ». In : *Applied Optics* 61.6 (fév. 2022), p. C37. ISSN : 1559-128X, 2155-3165. DOI : 10.1364/AO.437391. URL : https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ao-61-6-C37 (visité le 21/07/2024) (cf. p. 67).

[LSG12] Pedro LATORRE, Francisco J. SERON et Diego GUTIERREZ. « Birefringence : Calculation of Refracted Ray Paths in Biaxial Crystals ». In : *The Visual Computer* 28.4 (avr. 2012), p. 341-356. ISSN : 1432-2315. DOI : 10.1007/s00371-011-0619-2. URL : https://doi.org/10.1007/s00371-011-0619-2 (visité le 10/07/2024) (cf. p. 103).

[Li+23] Qianhui LI, Liquan DONG, Yao HU et al. « Skylight Polarization Pattern Simulator Based on a Virtual-Real-Fusion Framework for Urban Bionic Polarization Navigation ». In : *Sensors* 23.15 (jan. 2023), p. 6906. ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s23156906. URL : https://www.mdpi.com/1424-8220/23/15/6906 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[Lia+20] Huaju LIANG, Hongyang BAI, Ning LIU et al. « Polarized Skylight Compass Based on a Soft-Margin Support Vector Machine Working in Cloudy Conditions ». In : *Applied Optics* 59.5 (fév. 2020), p. 1271. ISSN : 1559-128X, 2155-3165. DOI : 10.1364/AO.381612. URL : https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ao-59-5-1271 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[Lia20] LIANG ET AL. *[2007.13081] Polarized Skylight Navigation Simulation (PSNS) Dataset*. 2020. URL : https://arxiv.org/abs/2007.13081 (visité le 05/03/2024) (cf. p. 62).

[Lyo44] Bernard LYOT. « Le Filtre Monochromatique Polarisant et Ses Applications En Physique Solaire ». In : *Annales d'Astrophysique* 7 (jan. 1944), p. 31. ISSN : 0365-0499. URL : https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1944AnAp....7...31L (visité le 07/02/2024) (cf. p. 91, 92).

[MSR16] Stefano MAFRICA, Alain SERVEL et Franck RUFFIER. « Minimalistic Optic Flow Sensors Applied to Indoor and Outdoor Visual Guidance and Odometry on a Car-like Robot ». In : *Bioinspiration & Biomimetics* 11.6 (nov. 2016), p. 066007. ISSN : 1748-3190. DOI : 10.1088/1748-3190/11/6/066007. URL : https://dx.doi.org/10.1088/1748-3190/11/6/066007 (visité le 11/07/2024) (cf. p. 33).

[Max97] James Clerk MAXWELL. « VIII. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155 (jan. 1997), p. 459-512. DOI : 10.1098/rstl.1865.0008. URL : https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstl.1865.0008 (visité le 21/11/2023) (cf. p. 47).

[Miy+09] Daisuke MIYAZAKI, Mahdi AMMAR, Kawakami REI et al. « Estimating Sunlight Polarization Using a Fish-eye Lens ». In : *Ipsj Transactions on Computer Vision and Applications* 1 (déc. 2009), p. 288-300. DOI : 10.2197/ipsjtcva.1.288 (cf. p. 42).

[mol24] MOL-1. *Mol-1/A-2-month-long-annotated-skylight-polarization-images-database—associated-code*. Juin 2024. URL : https://github.com/mol-1/A-2-month-long-annotated-skylight-polarization-images-database---associated-code (visité le 17/06/2024) (cf. p. 63).

[Moo50] Alton B. MOODY. « The Pfund Sky Compass ». In : *The International Hydrographic Review* (1950). ISSN : 0020-6946. URL : https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/26936 (visité le 15/06/2024) (cf. p. 41).

[Mou+24] Antoine MOUTENET, Léo POUGHON, Bruno TOULON et al. « OpenSky : A Modular and Open-Source Simulator of Sky Polarization Measurements ». In : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 73 (2024), p. 1-16. ISSN : 1557-9662. DOI : 10.1109/TIM.2024.3374965. URL : https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10474144/references#references (visité le 16/06/2024) (cf. p. 46, 55, 118).

[New+14] Matthew NEWVILLE, Till STENSITZKI, Daniel B. ALLEN et al. *LMFIT : Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python*. Zenodo. Sept. 2014. DOI : 10.5281/zenodo.11813. URL : https://zenodo.org/records/11813 (visité le 02/03/2024) (cf. p. 68, 104).

[Olo13] Oluwatobi Gabriel OLORUNSOLA. « Understanding Conoscopic Interference Patterns in Anisotropic Crystals ». Thèse de doct. Jan. 2013. URL : https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013PhDT.....67O (visité le 08/07/2024) (cf. p. 92, 103).

[Pan+23] Peifeng PAN, Xin WANG, Tian YANG et al. « High-Similarity Analytical Model of Skylight Polarization Pattern Based on Position Variations of Neutral Points ». In : *Optics Express* 31.9 (avr. 2023), p. 15189-15203. ISSN : 1094-4087. DOI : 10.1364/OE.489534. URL : https://opg.optica.

org/oe/abstract.cfm?uri=oe-31-9-15189 (visité le 07/02/2024) (cf. p. 59).

[Pan+24] Shuixin PAN, Jinmao LIN, Yueqiang ZHANG et al. « Image-Registration-Based Solar Meridian Detection for Accurate and Robust Polarization Navigation ». In : *Optics Express* 32.2 (jan. 2024), p. 1357-1370. ISSN : 1094-4087. DOI : 10.1364/OE.510283. URL : https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-32-2-1357 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[19] *Plastic Shrink Wrap Inspection Using LUCID Polarization Camera - LUCID Vision Labs*. Jan. 2019. URL : https://thinklucid.com/polarized-camera-resource-center/plastic-wrap-polarization-inspection/ (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[Pou24] Léo POUGHON. *Mol-1/Long-Term-Skylight-Polarization-Measurement-Device*. Fév. 2024. URL : https://github.com/mol-1/Long-Term-Skylight-Polarization-Measurement-Device (visité le 28/02/2024) (cf. p. 62).

[POU] Leo POUGHON. *1 Month-long skylight polarization images dataset*. DOI : 10.57745/610QTS. URL : https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.57745/610QTS (visité le 28/02/2024) (cf. p. 62).

[POU+24] Leo POUGHON, Vincent AUBRY, Jocelyn MONNOYER et al. *A 2 month-long annotated skylight polarization images database*. Juin 2024. DOI : 10.57745/9L2YUB. URL : https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.57745/9L2YUB (visité le 17/06/2024) (cf. p. 63, 81).

[Pou+23a] Leo POUGHON, Stefano MAFRICA, Jocelyn MONNOYER et al. « Procédé et système pour déterminer des données caractérisant un cap suivi par un véhicule automobile à un instant courant ». FR3128528A1. Avr. 2023. URL : https://patents.google.com/patent/FR3128528A1/fr#patentCitations (visité le 22/07/2024) (cf. p. 83).

[Pou+23b] Léo POUGHON, Vincent AUBRY, Jocelyn MONNOYER et al. « A Stand-Alone Polarimetric Acquisition System for Producing a Long-Term Skylight Dataset ». In : *2023 IEEE SENSORS*. Oct. 2023, p. 1-4. DOI : 10.1109/SENSORS56945.2023.10325176. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/10325176 (visité le 28/02/2024) (cf. p. 62).

[Ras+18] Mojdeh RASTGOO, Cedric DEMONCEAUX, Ralph SEULIN et al. « Attitude Estimation from Polarimetric Cameras ». In : *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Oct. 2018, p. 8397-8403. DOI : 10.1109/IROS.2018.8593575. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/8593575 (visité le 09/09/2024) (cf. p. 44).

[Reg19] REGULUS. *Tesla Model 3 Spoofed off the Highway - Regulus Navigation System Hack Causes Car to Turn On Its Own | Regulus Cyber*. Juin 2019. URL : https://web.archive.org/web/20190620200011/https://www.regulus.com/blog/tesla-model-3-spoofed-off-the-highway-regulus-researches-hack-navigation-system-causing-car-to-steer-off-road/ (visité le 07/01/2024) (cf. p. 30).

[Ren+20] Haonan REN, Jian YANG, Xin LIU et al. « Sensor Modeling and Calibration Method Based on Extinction Ratio Error for Camera-Based Polarization Navigation Sensor ». In : *Sensors* 20.13 (jan. 2020), p. 3779. ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s20133779. URL : https://www.mdpi.com/1424-8220/20/13/3779 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[Rob+13] Thomas P. ROBITAILLE, Erik J. TOLLERUD, Perry GREENFIELD et al. « Astropy : A Community Python Package for Astronomy ». In : *Astronomy & Astrophysics* 558 (oct. 2013), A33. ISSN : 0004-6361, 1432-0746. DOI : 10.1051/0004-6361/201322068. URL : https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2013/10/aa22068-13/aa22068-13.html (visité le 02/03/2024) (cf. p. 67).

[Rod+22] Joaquin RODRIGUEZ, Lew LEW-YAN-VOON, Renato MARTINS et al. « A Practical Calibration Method for RGB Micro-Grid Polarimetric Cameras ». In : *IEEE Robotics and Automation Letters* 7.4 (oct. 2022), p. 9921-9928. ISSN : 2377-3766. DOI : 10.1109/LRA.2022.3192655. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/9834097 (visité le 10/09/2024) (cf. p. 109).

[Rop+11] Guy ROPARS, Gabriel GORRE, Albert LE FLOCH et al. « A Depolarizer as a Possible Precise Sunstone for Viking Navigation by Polarized Skylight ». In : *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 468.2139 (nov. 2011), p. 671-684. DOI : 10.1098/rspa.2011.0369. URL : https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2011.0369 (visité le 14/06/2024) (cf. p. 40).

[RSS08] Martin RUFLI, Davide SCARAMUZZA et Roland SIEGWART. « Automatic Detection of Checkerboards on Blurred and Distorted Images ». In : *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Sept. 2008, p. 3121-3126. DOI : 10.1109/IROS.2008.4650703. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/4650703 (visité le 07/11/2023) (cf. p. 67).

[Saa+17] Yassine SAADLAOUI, Jean-Louis MILAN, Jean-Marie ROSSI et al. « Topology Optimization and Additive Manufacturing : Comparison of Conception Methods Using Industrial Codes ». In : *Journal of Manufacturing Systems* 43 (avr. 2017), p. 178-186. ISSN : 0278-6125. DOI : 10.1016/j.jmsy.2017.03.006. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612517300353 (visité le 28/02/2024) (cf. p. 26).

[Sar+11] Mukul SARKAR, David SAN SEGUNDO BELLO, Chris VAN HOOF et al. « Integrated Polarization-Analyzing CMOS Image Sensor for Detecting the Incoming Light Ray Direction ». In : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 60.8 (août 2011), p. 2759-2767. ISSN : 1557-9662. DOI : 10.1109/TIM.2011.2130050. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/5746643 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[Sca07] Davide SCARAMUZZA. « Omnidirectional Vision : From Calibration to Root Motion Estimation ». In : ETH Zurich, 2007, 1 Band. DOI : 10.3929/ETHZ-A-005567197. URL : http://hdl.handle.net/20.500.11850/14333 (visité le 07/11/2023) (cf. p. 67).

[SMS06] Davide SCARAMUZZA, Agostino MARTINELLI et Roland SIEGWART. « A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras ». In : *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Oct. 2006, p. 5695-5701. DOI : 10.1109/IROS.2006.282372. URL : https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4059340 (visité le 07/11/2023) (cf. p. 67, 110).

[Ser+24] Julien R. SERRES, Pierre-Jean LAPRAY, Stéphane VIOLLET et al. « Passive Polarized Vision for Autonomous Vehicles : A Review ». In : *Sensors* 24.11 (jan. 2024), p. 3312. ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s24113312. URL : https://www.mdpi.com/1424-8220/24/11/3312 (visité le 13/06/2024) (cf. p. 41).

[Shi90] Keith SHINE. « Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere. By Kinsell L. Coulson. A. Deepak Publishing. Pp. Xxv+596. Hardback US$90.00 ». In : *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 116.492 (1990), p. 521-521. ISSN : 1477-870X. DOI : 10.1002/qj.49711649214. URL : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49711649214 (visité le 07/02/2024) (cf. p. 59).

[shu60] SHUBNIKOV. *Principles of Optical Crystallography*. 1960. URL : https://link.springer.com/book/9781489948830 (visité le 08/07/2024) (cf. p. 92, 96).

[Škr+20] A. ŠKROBONJA, I. JURDANA, I. PANIĆ et al. « Marine Fiber Optic and Spinning Mass Gyrocompasses ». In : *2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*. Sept. 2020, p. 1899-1903. DOI : 10.23919/MIPRO48935.2020.9245348. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/9245348/references#references (visité le 07/01/2024) (cf. p. 20).

[Sona] SONY. *Polarization Image Sensor Technology Polarsens™ | Technology*. URL : https://www.sony-semicon.com/en/technology/industry/polarsens.html (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[Sonb] SONY. *Sony Semiconductor Solutions Co., Ltd. | Download*. URL : https://info.sony-semicon.com/en/cameralist-file-polarization (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[SM94] Richard E. STOIBER et Stearns A. MORSE. *Crystal Identification with the Polarizing Microscope*. Boston, MA : Springer US, 1994. ISBN : 978-0-412-04831-9 978-1-4615-2387-1. DOI : 10.1007/978-1-4615-2387-1. URL : http://link.springer.com/10.1007/978-1-4615-2387-1 (visité le 17/07/2024) (cf. p. 92, 106, 107, 113).

[Str71] J.W. STRUTT. « XV. On the Light from the Sky, Its Polarization and Colour ». In : *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 41.271 (fév. 1871), p. 107-120. ISSN : 1941-5982. DOI : 10.1080/14786447108640452. URL : https://doi.org/10.1080/14786447108640452 (visité le 09/12/2022) (cf. p. 55).

[SC12] Wolfgang STÜRZL et Nicole CAREY. « A Fisheye Camera System for Polarisation Detection on UAVs ». In : *Computer Vision – ECCV 2012. Workshops and Demonstrations*. Sous la dir. d'Andrea FUSIELLO, Vittorio MURINO et Rita CUCCHIARA. Berlin, Heidelberg : Springer, 2012, p. 431-440. ISBN : 978-3-642-33868-7. DOI : 10.1007/978-3-642-33868-7_43 (cf. p. 43).

[Sun+13] Chen SUN, Huawei LIANG, Tao MEI et al. « An Image-Based Three-Camera Real-Time Synchronous Skylight Polarization Pattern Measurement System ». In : *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. Déc. 2013, p. 1677-1682. DOI : 10.1109/ROBIO.2013.6739708. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/6739708?denied= (visité le 16/06/2024) (cf. p. 43).

[Sun+19] Shaobo SUN, Jun GAO, Daqian WANG et al. « Improved Models of Imaging of Skylight Polarization Through a Fisheye Lens ». In : *Sensors* 19.22 (jan. 2019), p. 4844. ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s19224844. URL : https://www.mdpi.com/1424-8220/19/22/4844 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 43).

[Tyo+06] J. Scott TYO, Dennis L. GOLDSTEIN, David B. CHENAULT et al. « Review of Passive Imaging Polarimetry for Remote Sensing Applications ». In : *Applied Optics* 45.22 (août 2006), p. 5453-5469. ISSN : 2155-3165. DOI : 10.1364/AO.45.005453. URL : https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-45-22-5453 (visité le 13/06/2024) (cf. p. 41).

[Uni] Encyclopædia UNIVERSALIS. *BOUSSOLE*. URL : https://www.universalis.fr/encyclopedie/boussole/ (visité le 13/12/2023) (cf. p. 22).

[URC01] Kane USHER, Peter RIDLEY et Peter CORKE. « A Camera as a Polarized Light Compass : Preliminary Experiments ». In : *Proceedings of the 2001 Australian Conference on Robotics and Automation*. Sydney, NSW : Australian Robotics and Automation Association, 2001, p. 116-120. ISBN : 978-0-

7803-6475-2. URL : https://eprints.qut.edu.au/24885/ (visité le 16/06/2024) (cf. p. 42).

[VMV23] Anna VERBE, Dominique MARTINEZ et Stéphane VIOLLET. « Sensory Fusion in the Hoverfly Righting Reflex ». In : *Scientific Reports* 13.1 (avr. 2023), p. 6138. ISSN : 2045-2322. DOI : 10.1038/s41598-023-33302-z. URL : https://www.nature.com/articles/s41598-023-33302-z (visité le 28/02/2024) (cf. p. 26).

[Vin20] ABADIE VINCENT. *Cours Vehicules Autonomes R&D, Document Interne Stellantis*. 2020 (cf. p. 24, 25).

[Vir+20] Pauli VIRTANEN, Ralf GOMMERS, Travis E. OLIPHANT et al. « SciPy 1.0 : Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python ». In : *Nature Methods* 17.3 (mars 2020), p. 261-272. ISSN : 1548-7105. DOI : 10.1038/s41592-019-0686-2. URL : https://www.nature.com/articles/s41592-019-0686-2 (visité le 02/03/2024) (cf. p. 67).

[Wah65] Grace WAHBA. « A Least Squares Estimate of Satellite Attitude ». In : *SIAM Review* 7.3 (juill. 1965), p. 409-409. ISSN : 0036-1445. DOI : 10.1137/1007077. URL : https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/1007077 (visité le 18/03/2024) (cf. p. 69).

[Wan+15] Yinlong WANG, Jinkui CHU, Ran ZHANG et al. « A Novel Autonomous Real-Time Position Method Based on Polarized Light and Geomagnetic Field ». In : *Scientific Reports* 5.1 (avr. 2015), p. 9725. ISSN : 2045-2322. DOI : 10.1038/srep09725. URL : https://www.nature.com/articles/srep09725 (visité le 15/06/2024) (cf. p. 41).

[WW86] R. WEHNER et S. WEHNER. « Path Integration in Desert Ants. Approaching a Long-Standing Puzzle in Insect Navigation ». In : *Monitore Zoologico Italiano - Italian Journal of Zoology* 20.3 (jan. 1986), p. 309-331. ISSN : 0026-9786. DOI : 10.1080/00269786.1986.10736505. URL : https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00269786.1986.10736505 (visité le 09/01/2024) (cf. p. 27).

[WW90] R. WEHNER et S. WEHNER. « Insect Navigation : Use of Maps or Ariadne's Thread ? » In : *Ethology Ecology & Evolution* 2.1 (mai 1990), p. 27-48. ISSN : 0394-9370. DOI : 10.1080/08927014.1990.9525492. URL : https://doi.org/10.1080/08927014.1990.9525492 (visité le 09/01/2024) (cf. p. 27, 28).

[WS81] Rüdiger WEHNER et Mandyam V. SRINIVASAN. « Searching Behaviour of Desert Ants, genusCataglyphis (Formicidae, Hymenoptera) ». In : *Journal of comparative physiology* 142.3 (sept. 1981), p. 315-338. ISSN : 1432-1351. DOI : 10.1007/BF00605445. URL : https://doi.org/10.1007/BF00605445 (visité le 11/01/2024) (cf. p. 27).

[wik24] WIKIPEDIA. « Random Walk ». In : *Wikipedia* (juin 2024). URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random_walk&oldid=1228892949#Gaussian_random_walk (visité le 16/06/2024) (cf. p. 35).

[Wit19] Alexandra WITZE. « Earth's Magnetic Field Is Acting up and Geologists Don't Know Why ». In : *Nature* 565.7738 (jan. 2019), p. 143-144. ISSN : 1476-4687. DOI : 10.1038/d41586-019-00007-1 (cf. p. 21).

[Xia+14] Zhiwen XIAN, Xiaoping HU, Junxiang LIAN et al. « A Novel Angle Computation and Calibration Algorithm of Bio-Inspired Sky-Light Polarization Navigation Sensor ». In : *Sensors* 14.9 (sept. 2014), p. 17068-17088. ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s140917068. URL : https://www.mdpi.com/1424-8220/14/9/17068 (visité le 15/06/2024) (cf. p. 41).

[Xu+23] Yuan XU, Xingshuo HAN, Gelei DENG et al. *SoK : Rethinking Sensor Spoofing Attacks against Robotic Vehicles from a Systematic View*. Mars 2023. DOI : 10.48550/arXiv.2205.04662. arXiv : 2205.04662 [cs]. URL : http://arxiv.org/abs/2205.04662 (visité le 05/01/2024) (cf. p. 29).

[Yan+18] Jian YANG, Tao DU, Ben NIU et al. « A Bionic Polarization Navigation Sensor Based on Polarizing Beam Splitter ». In : *IEEE Access* 6 (2018), p. 11472-11481. ISSN : 2169-3536. DOI : 10.1109/ACCESS.2018.2794524. URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/8262635 (visité le 15/06/2024) (cf. p. 42).

[Yan+17] Zhongguang YANG, Jun ZHOU, He HUANG et al. « Measuring Solar Vector with Polarization Sensors Based on Polarization Pattern ». In : *Optik* 141 (juill. 2017), p. 147-156. ISSN : 0030-4026. DOI : 10.1016/j.ijleo.2017.03.122. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402617306125 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 42).

[Zha+21a] Qingyun ZHANG, Jian YANG, Panpan HUANG et al. « Bionic Integrated Positioning Mechanism Based on Bioinspired Polarization Compass and Inertial Navigation System ». In : *Sensors* 21.4 (jan. 2021), p. 1055. ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s21041055. URL : https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1055 (visité le 15/06/2024) (cf. p. 42).

[Zha+21b] Teng ZHANG, Jian YANG, Lei GUO et al. « A Bionic Point-Source Polarisation Sensor Applied to Underwater Orientation ». In : *The Journal of Navigation* 74.5 (sept. 2021), p. 1057-1072. ISSN : 0373-4633, 1469-7785. DOI : 10.1017/S0373463321000308. URL : https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-navigation/article/abs/bionic-pointsource-polarisation-sensor-applied-to-underwater-orientation/DDC6BCD730BEC4C22F3D17101340B8E3 (visité le 15/06/2024) (cf. p. 41).

[Zha+15] Wenjing ZHANG, Yu CAO, Xuanzhe ZHANG et al. « Sky Light Polarization Detection with Linear Polarizer Triplet in Light Field Camera Inspired by Insect Vision ». In : *Applied Optics* 54.30 (oct. 2015), p. 8962-8970. ISSN : 2155-3165. DOI : 10.1364/AO.54.008962. URL : https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-54-30-8962 (visité le 05/01/2024) (cf. p. 43).

[Zha+16] Wenjing ZHANG, Xuanzhe ZHANG, Yu CAO et al. « Robust Sky Light Polarization Detection with an S-wave Plate in a Light Field Camera ». In : *Applied Optics* 55.13 (mai 2016), p. 3518-3525. ISSN : 2155-3165. DOI : 10.1364/AO.55.003518. URL : https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-55-13-3518 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 44).

[Zha+14] Ying ZHANG, Huijie ZHAO, Ping SONG et al. « Ground-Based Full-Sky Imaging Polarimeter Based on Liquid Crystal Variable Retarders ». In : *Optics Express* 22.7 (avr. 2014), p. 8749-8764. ISSN : 1094-4087. DOI : 10.1364/OE.22.008749. URL : https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-22-7-8749 (visité le 16/06/2024) (cf. p. 43).