

# Conception de la détection d'un gonioreflectomètre métrologique pour mesurer la BRDF des surfaces

Shiraz Ouarets

▶ **To cite this version:**

Shiraz Ouarets. Conception de la détection d'un gonioreflectomètre métrologique pour mesurer la BRDF des surfaces. Méthodes et statistiques. Conservatoire national des arts et metiers - CNAM, 2015. Français. NNT : 2015CNAM0995 . tel-01292622

**HAL Id: tel-01292622**

**https://theses.hal.science/tel-01292622**

Submitted on 23 Mar 2016

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

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

le cnam

ÉCOLE DOCTORALE SMI : SCIENCE DS METIERS DE L'INGENIEUR

[Laboratoire commun de métrologie (EA 2367)]

# THÈSE

Présentée par :

Shiraz OUARETS

Soutenue le : 03 Juin 2015.

Pour obtenir le grade de : Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers

Discipline/ Spécialité : Lasers, nanosciences et métrologie.

# CONCEPTION DE LA DETECTION D'UN GONIOREFLECTOMETRE METROLOGIQUE POUR MESURER LA BRDF DES SURFACES

THÈSE dirigée par :

| | |
|---|---|
| Directrice de thèse : Mme Annick Razet | Professeur, Laboratoire Commun de Métrologie (EA 2367). |
| Directeur de travaux : Mr Gaël Obein | Maitre de Conférences, Laboratoire Commun de Métrologie (EA 2367). |

RAPPORTEURS :

| | |
|---|---|
| Mme Christine Andraud | Professeur, Muséum National d'Histoire Naturelle. |
| Mr Fréderic Du Burck | Professeur, Laboratoire de Physique des Lasers. Université de Paris 13. |

EXAMINATEUR :

| | |
|---|---|
| Mr Yasser Alayli | Professeur, Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles (LISV). |
| Mr Marc Himbert | Laboratoire Commun de Métrologie (EA 2367). |

# Remerciements

Je tiens dans un premier temps à remercier Mr Gaël Obein, pour m'avoir confié ce travail de recherche.
Je remercie Mme Annick Razet, pour m'avoir fait découvrir la passion d'enseigner.
Merci à Mr Bernard Orsal pour m'avoir transmis la passion de l'optique.
J'aimerais adresser un remerciement particulier à Zaccaria Silvestri, Patrick Juncar, Mark Plimmer et Bernard Rougié pour leur aide et leur patience.
J'adresse une pensée particulière à Fatima, Stéphane, Patrick, Saber et tous mes collègues du Cnam, ainsi qu'à Émilie, Nolwenn, Frédérique, Andréa, Guillaume, David et Vincent, mes collègues du LNE qui m'ont permis de travailler dans un cadre particulièrement agréable.
Mes dernières pensées iront à mes parents, mes frères et à mon cher mari.

# Résumé en français

Le but de ce travail de thèse est de doter la métrologie française d'un instrument de référence dédié à la caractérisation métrologique des propriétés réflectives des objets qui, du point de vue de l'apparence, sont à l'origine des sensations de couleur, de brillant, de texture, de translucidité…etc. Ce mémoire décrit la conception, la réalisation et la mise au point d'un dispositif de mesure de la fonction de distribution bidirectionnelle du facteur de luminance d'une surface plane (BRDF). La BRDF est la grandeur physique qui caractérise intégralement la réflexion lumineuse à la surface d'un matériau. En cela, sa mesure s'inscrit comme un outil indispensable pour la mesure de l'apparence car elle permet de connaître en détail le signal qui entre dans l'œil.

Certaines surfaces présentent une apparence pigmentée, métallisée, nacrée ou encore interférentielle, ces surfaces, dites "goniochromatiques", ont la capacité de changer d'apparence en fonction de l'angle d'illumination ou d'observation. Pour les caractériser, il est impératif d'effectuer une mesure de BRDF sous plusieurs conditions d'observation et d'illumination. L'outil de mesure de la BRDF est un gonioréflectomètre, dédié à des mesures dans le domaine UV - Visible (250 nm – 900 nm).

Le montage expérimental consiste en deux voies distinctes. La première, appelée voie spectrale, est dédiée à l'étude de la couleur. Elle est constituée d'une illumination fixe assurée par une lampe à décharge au xénon filtrée par un monochromateur puis focalisée sur la surface étudiée. La détection, mobile, est assurée par un système optique constitué de lentilles et de miroirs qui servent à renvoyer la lumière réfléchie par la surface sur la photodiode.

La deuxième voie, appelée voie spatiale, est dédiée à l'étude du brillant. Elle requière une résolution angulaire qui égale l'acuité visuelle de l'œil humain (0,03°) c'est cette partie qui introduit l'originalité de notre instrument. Sur cette voie, la détection est fixe et est basée sur la combinaison d'une optique de Fourier et d'une caméra CCD (512 x 512 pixels). L'illumination est mobile et est assurée par une lampe incandescente à filament de tungstène collimatée sur l'échantillon. Les deux voies partagent un bras robot pour porter l'échantillon offrant six dégrées de liberté permettant de reproduire toutes les directions d'illumination et d'observation comprises dans le demi-espace au-dessus de l'échantillon.

Mots clés : Couleur, Brillant, BRDF, Goniochromatisme, Pic spéculaire.

# Résumé en anglais

The aim of this thesis is to provide the French Metrology with a reference instrument that can be used for measuring the appearance of objects. Several physical properties of object appearance are used not only to identify the object itself but also determine its quality. These include color, gloss, texture and translucency. This work describes the design, characterization and the implementation of an instrument that has been built particularly to measure the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of planar surfaces. BRDF is a physical quantity that enables measuring the surface color and gloss. Accordingly it is important to ensure accurate and traceable measurements of such a quantity in order for a comprehensive understanding of surface properties to be fulfilled.

Some surfaces show pigmented, metallic, sparkling or pearlescent appearance. These surfaces, called goniochromatic surfaces, have the ability to change their appearance depending on the viewing angle. To characterize them, it is necessary to deliver surface reflectance measurements at several directions and under different illumination conditions. The instrument that enables these measurements is called gonioreflectometer.

The experimental setup we have designed consists of two separate detection lines. The first line, called "spectral line", is used to study the color. It consists of a stationary illumination source that uses a xenon lamp spectrally resolved by a monochromator. The light coming out from the source is focused on the surface under investigation. The reflected light by the surface is collected by using a lens and directed onto a photodiode by a mirror. This detection system can be moved over a wide angular range so as to measure the BRDF.

The second line, called "spatial line", is used to measure the gloss of the surface. In order to be very close to the average human observer, high angular resolution is required. In this line the detection part is stationary. It consists of a Charged Coupled Device (CCD) camera of 512 x 512 pixels. The source used to illuminate the surface is an incandescent tungsten lamp. Angular measurements in this line are provided by the movement of the illumination source itself. Both color and gloss lines share a robot sample-holder that provides six degrees of freedom. This of course facilitates measurements over varies detection and illumination directions of the sample.

Key words: Color, Gloss, BRDF, Goniochromatisme, Specular pic.

# Table des matières

Remerciements ... 1
Résumé en français ... 3
Résumé en anglais ... 4
Table des matières ... 5
Liste des tableaux ... 8
Liste des figures ... 9
Introduction ... 13
CHAPITRE I L'apparence ... 21
1.1 Radiométrie et photométrie ... 23
1.2 Les grandeurs radiométriques ... 23
1.2.1 Le flux énergétique ... 25
1.2.2 L'intensité énergétique ... 25
1.2.3 L'éclairement énergétique ... 25
1.2.4 L'exitance ... 25
1.2.5 La luminance énergétique ... 26
1.2.6 Fonction de distribution bidirectionnelle du coefficient de luminance (BRDF) ... 26
1.2.7 Relation entre les grandeurs ... 27
1.3 Définition des grandeurs photométriques ... 28
1.3.1 Efficacité lumineuse spectrale ... 29
2. La mesure de l'apparence ... 31
2.1 Les attributs de l'apparence ... 33
2.1.1 La couleur ... 33
2.1.2 La translucidité ... 33
2.1.3 La texture ... 34
2.1.4 Le brillant ... 35
CHAPITRE II Le gonioréflectomètre ... 39
1. Cahier des charges du gonioréflectomètre du LNE-CNAM ... 43
1.1 Champ d'observation ... 43
1.2 Pas de déplacement angulaire en réflexion et en illumination ≤ 0,1° ... 43
1.3 Résolution angulaire ... 43
1.4 La résolution spectrale ≤ 0,5 nm ... 44
1.5 Diamètre maximal du faisceau en incidence normale ... 45
1.6 Autoriser les mesures photométriques ... 45
1.7 Temps de mesure ... 45
1.8 Possibilité de mesurer des échantillons volumineux ... 46

1.9 S'autoriser les mesures de la fonction de distribution bidirectionnelle du facteur de transmission (BTDF) ..... 46
2. Etude bibliographique des instruments de mesures ..... 47
2.1 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) ..... 47
1.2 NIST (National Institute of Standards and Technology) ..... 50
1.3 NPL (National Physical Laboratory) ..... 52
1.4 CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Cientificas) ..... 53
1.5 Université Paris 7 (Institut de physique du globe) : ..... 55
1.6 Le gonioréflectomètre de l'ONERA (Office National d'études et de Recherches Aérospatiales) ..... 56
2.7 Le gonioréflectomètre du laboratoire de planétologie de Grenoble ..... 58
2.7 L 'EZ-Contrast, le diffusomètre d'ELDIM ..... 59
3. Etude et comparaison ..... 62
4. Design général ..... 70
5. Réalisation mécanique du gonioréflectomètre du LNE-CNAM ..... 72
5.1 Le support d'échantillon ..... 72
5.1.1 Un bras robot pour déplacer l'échantillon ..... 72
5.1.2 Le plateau porte échantillon ..... 74
5.2 La couronne ..... 75
5.3 Le châssis commun ..... 75
5.4 Programme de calcul des angles ..... 76
CHAPITRE III La voie spectrale ..... 77
1. Rappel du cahier des charges de la ligne spectrale ..... 79
2. L'illumination ..... 80
2.1 La lanterne ..... 80
2.2 Le monochromateur ..... 80
2.3 Le système optique d'illumination ..... 81
3. La détection ..... 83
3.1 La taille du champ d'observation ..... 83
3.2 Diamètre du diaphragme d'ouverture ..... 83
3.3 Conceptions non retenues ..... 85
3.4 Conception retenue ..... 88
3.5 Réalisation mécanique ..... 89
3.5.1 Réalisation mécanique du diaphragme d'ouverture ..... 89
3.5.2 Réalisation mécanique du boitier contenant les optiques ..... 90
4. Caractérisation de la voie spectrale ..... 92
4.1 Restauration du monochromateur ..... 92
4.2 Programme de pilotage du monochromateur pour l'étalonnage ..... 93
4.3 Restauration des fentes ..... 94
4.4 Etalonnage en longueur d'onde ..... 96
4.4.1 Principe général ..... 96

4.4.2 Calcul de la longueur d'onde mesurée $\lambda mes$ pour une raie donnée $\lambda théo$ ..... 97
4.4.3 Calcul de l'incertitude $u\lambda mes$ ..... 98
4.4.4 Calcul de l'incertitude sur la longueur d'onde de travail ..... 103
4.4.5 Incertitude sur la longueur d'onde de travail $\lambda T$ ..... 103
5. Protocole de mesure ..... 105
6. Résultat ..... 107
CHAPITRE IV La voie spatiale ..... 109
1. Rappel du cahier de charges ..... 111
2. L'illumination ..... 113
3. La détection ..... 117
3.1 La caméra ..... 117
3.1.1 La caméra CCD, principe général ..... 117
3.1.2 Etude théorique du flux disponible ..... 119
3.1.3 Cahier des charges pour la caméra ..... 123
3.2 Le conoscope ..... 127
4. Mise en œuvre de la détection ..... 130
4.1 Alignement de la caméra dans le plan focal de l'optique de Fourier: ..... 130
4.2 Résolution ..... 132
5. Caractérisation de la voie spatiale ..... 134
5.1 Détermination de la zone d'exploitation du CCD ..... 137
5.2 Caractérisation de la multi-exposition temporelle : ..... 138
5.3 Caractérisation de la multi-exposition spatiale ..... 141
Conclusion ..... 153
Annexes ..... 155
i. Annexe I : Principe de fonctionnement du CCD, du convertisseur charge-tension et du convertisseur analogique-numérique. ..... 157
Le détecteur CCD : ..... 157
Le convertisseur charge-tension (CAV) ..... 161
Le convertisseur analogique-numérique ..... 162
ii. Annexe II: Puissance équivalente au bruit pour une caméra CCD. ..... 163
Références ..... 165

# Liste des tableaux

Tableau 1 : Etude comparatifs de la mécanique adopté et la maitrise de la configuration, pour les gonioréflectomètres de référence. 69
Tableau 2 : Valeurs des pentes et des ordonnées à l'origine pour la raie verte du mercure. 98
Tableau 3 : Valeurs de l'incertitude sur la pente l'ordonnées à l'origine ainsi que la covariance pour les deux droites. 102
Tableau 4 : Ecarts entre les longueurs d'onde théoriques de raie d'émission d'une lampe à vapeur de mercure et les longueurs d'ondes mesurées. 103
Tableau 5 : Résolution du faisceau d'illumination en fonction de l'ouverture du sténopé et de la focale du collimateur. 114
Tableau 6 : Cahier des charges de la caméra. 125
Tableau 7 : Puissance équivalente au bruit en fonction du temps d'exposition. 126
Tableau 8 : Position angulaire des neuf mesures pour couvrir la zone (45°,0°) à ± 2,5°. 142

# Liste des figures

Figure 1 : Schéma représentatif de la notion d'angle solide. ..... 24
Figure 2 : Représentation de l'étendue géométrique formée par la surface émettrice en violet et la surface réceptrice en rose séparées par une distance *d*. ..... 24
Figure 3 : Notations angulaires pour décrire une BRDF. ..... 26
Figure 4 : Valeurs de l'efficacité lumineuse relative spectrale en vision photopique (λ). ..... 29
Figure 5: Construction d'un modèle de perception permettant de mettre en relation une sensation et une mesure physique. ..... 32
Figure 6 : Réflexion surfacique et réflexion sub-surfacique. ..... 34
Figure 7 : Illustration de l'expérience d'évaluation visuelle du brillant. ..... 35
Figure 8 : Evolution du facteur de Fresnel en fonction de l'indice de réfraction et de l'angle d'incidence [40]. . 36
Figure 9 : Résolution angulaire de l'observateur humain. ..... 44
Figure 10 : Schéma de principe du Robot-based gonioréflectomètre de la PTB. ..... 48
Figure 11 : Schéma représentatif du gonioréflectomètre ARGon3 de la PTB. ..... 49
Figure 12 : STAAR, le gonioréflectomètre du NIST. ..... 50
Figure 13 : Le gonioréflectomètre du NIST constitué d'un bras fixe pour l'illumination un bras mobile pour la détection et d'un support d'échantillon. ..... 51
Figure 14 : Le goniospectrophotomètre du NPL [45]. ..... 53
Figure 15 : Le gonioréflectomètre du CSIC [46] . ..... 54
Figure 16 : Le gonioréflectomètre de L'IPG. ..... 56
Figure 17 : Le gonioréflectomètre de l'ONERA [57]. ..... 57
Figure 18 : Le gonioréflectomètre de Grenoble [58]. ..... 58
Figure 19 : Schéma de principe de l'EZ contrast [44]. ..... 60
Figure 20 : Un exemple d'optique de Fourier. ..... 61
Figure 21 : Schéma représentatif du principe de fonctionnement du spectroradiomètre à CCD. ..... 65
Figure 22 : Cas d'une surface éclairée $SI$ (cercle jaune) inférieure à la surface observée $SR$ (surface entouré du cercle noir). ..... 66
Figure 23 : Cas d'une illumination large $SI$ (cercle jaune) et une observation à l'intérieur de la zone éclairée $SR$ (surface entouré du cercle noir). ..... 66
Figure 24 : Illustration des problèmes de vignetage. ..... 67
Figure 25 : Schéma général du gonioréflectomètre. ..... 71
Figure 26 : Le bras robot. ..... 73
Figure 27 : Le support d'échantillon. ..... 74
Figure 28 : Couronne utilisée au laboratoire du LNE-CNAM. ..... 75
Figure 29 : Croquis de l'équipement. ..... 76
Figure 30 : Monochromateur Bentham M300 [61]. ..... 80

Figure 31 : Schéma de principe de l'illumination spectrale de notre gonioréflectomètre. ..... 82
Figure 32 : Schéma descriptif de la voie d'illumination spectrale ..... 82
Figure 33: Représentation schématique de la géométrie servant au calcul du diamètre du diaphragme d'ouverture. ..... 84
Figure 34 : Première configuration du gonioréflectomètre du LNE-CNAM. ..... 85
Figure 35 : Principe de la chaine de détection. ..... 86
Figure 36 : Premier système optique imaginé pour la détection. ..... 87
Figure 37 : Deuxième système optique imaginé pour la détection. ..... 87
Figure 38 : Détection retenue. ..... 88
Figure 39 : Schéma représentatif du design du diaphragme d'ouverture. ..... 89
Figure 40 : Photo du diaphragme d'ouverture monté. ..... 90
Figure 41 : Réalisation mécanique du boîtier contenant la détection spectrale. ..... 91
Figure 42 : Schéma du montage d'étalonnage. ..... 93
Figure 43 : Face avant du programme Labview destiné au contrôle du monochromateur. ..... 94
Figure 44 : Tension (V) en fonction de la longueur d'onde. ..... 95
Figure 45 : Tension de sortie en fonction de la longueur d'onde après ajustement des fentes. Les verniers sont décalés de 0,5mm. ..... 95
Figure 46 : Tension en fonction de la longueur d'onde ($\lambda théorique$=546,074 nm). ..... 97
Figure 47 : Mesure de la raie à $\lambda théo = 546{,}074\text{nm}$. ..... 101
Figure 48 : Illustration de la zone d'incertitude à l'intersection des deux droites calculées au sens des moindres carrées (k=1), pour la raie verte de notre lampe à vapeur de mercure. ..... 102
Figure 49 : Cycle de mesure de la BRDF. ..... 106
Figure 50 : BRDF dans le plan d'incidence d'un échantillon de spectralon®Labsphère. ..... 107
Figure 51: Représentation schématique des paramètres de calcul de la divergence. ..... 114
Figure 52 : Schéma descriptif de l'optique d'illumination ..... 115
Figure 53 : Image de l'illumination de la ligne spatiale. En jaune le trajet du faisceau. ..... 116
Figure 54 : La chaine de détection d'une caméra. ..... 119
Figure 55 : Représentation de la partie illumination pour le calcul de la luminance sur l'échantillon. ..... 120
Figure 56: Densité spectrale de luminance du corps noir et de la lampe QTH ainsi que la luminance de lampe filtrée en fonction de la longueur d'onde λ. ..... 121
Figure 57 : Représentation schématique de la partie détection pour le calcul des flux sur un pixel. ..... 123
Figure 58 : Puissance équivalente au bruit en fonction de la longueur d'onde. ..... 125
Figure 59 : Conception de la détection basée exclusivement sur l'utilisation de miroirs sphériques par Y. Candela [71]. ..... 127
Figure 60 : Plan de la détection extrait du rapport de conception présentant la vue générale. Le système optique est en noir, la caméra en vert. ..... 129
Figure 61 : Image de la détection montée sur la table optique. ..... 129
Figure 62 : Schéma principe de fonctionnement du conoscope. Le système optique $L3$ réalise la transformation dans le plan de Fourier. Le système optique $L4$ reporte ce plan sur le CCD. ..... 130
Figure 63 : La connexion entre l'arrière du conoscope (noire) et la caméra (gris et beige). ..... 130

Figure 64 : Evaluation de la largeur à mi-hauteur du pic spéculaire. ..... 131
Figure 65 : Largeur à mi-hauteur (Pixels) en fonction de la distance (conoscope-caméra). ..... 132
Figure 66 : Fonction de transfert de la détection spatial pour un sténopé de 200µm. ..... 132
Figure 67 : Pic spéculaire de 0,012° de résolution obtenu en utilisant un sténopé de 75 µm. ..... 133
Figure 68: Schéma du montage de caractérisation du CCD. ..... 134
Figure 69 : Mesure de la réflexion d'un spectralon®. ..... 136
Figure 70 : Schéma représentant le post traitement des résultats. ..... 136
Figure 71 : Nombre de charges en fonction de la luminance pour différents temps d'exposition. ..... 138
Figure 76 : Principe de la reconstruction d'un pic à partir de trois temps d'exposition. ..... 140
Figure 77 : Reconstruction du pic spéculaire à partir de trois clichés. Mesure réalisée sur un échantillon noir brillant. ..... 141
Figure 78 : Pic spéculaire d'un échantillon brillant. ..... 142
Figure 79 : Position angulaire de la zone observée dans le plan de Fourier pour couvrir la zone (45°,0°) à ± 2,5°. ..... 143
Figure 80 : Principe de la multi-exposition spatiale. ..... 143
Figure 81 : Les 9 clichés utilisés pour reconstruire le pic spéculaire d'un échantillon de papier noir brillant. ..... 144
Figure 82 : Représentation des différents vecteurs unitaires utilisés $OI, OS$ et $OR$. ..... 145
Figure 83 : les points A, B, B' et S dans le repère du laboratoire. ..... 145
Figure 84: Représentation des points utiles au calcul. ..... 146
Figure 85: Représentation permettant de visualiser le point A défini par entre la droite $OS$ passant par A et le plan orthogonal à $OS$ contenant B et B'et R. ..... 146
Figure 86 : Illustration du plan (P) contenant $O\,I\,, OS$ ainsi que les point A, B et B'. ..... 147
Figure 87 : Illustration des vecteurs ( $I \wedge S) \wedge S$ et $AB$ ..... 148
Figure 88 : Représentation schématique du vecteur $ER$. ..... 149
Figure 89 : Pic spéculaire recombiné à partir de 9 clichés. ..... 151
Figure 90 : Schéma représentatif d'un MOS. ..... 157
Figure 91 : représentation du régime d'accumulation dans le transistor MOS. ..... 158
Figure 92: Schéma d'un MOS dopé P auquel on applique une tension à la grille Vg positive. ..... 158
Figure 93: Schéma représentatif de la création de la couche d'inversion contenant les électrons dans un MOS. 159
Figure 94 : Représentation schématique des lignes et des colonnes constituant un CCD. ..... 159
Figure 95: Schéma représentatif du principe du transfert de charge [81] ..... 160
Figure 96 : Schéma représentatif du transfert de charge entre deux portes adjacentes [19] ..... 161
Figure 97: Convertisseur charge-tension. ..... 161

# Introduction

Le Laboratoire Commun de Métrologie est une entité résultant d'une convention entre le Laboratoire national de métrologie et d'essais et le Conservatoire national des arts et métiers (ci-après LCM : LNE-Cnam). Le LNE est le laboratoire primaire de métrologie française et comporte à la fois une branche scientifique et une branche commerciale. Le Cnam, fondé en 1794, a trois missions fondamentales : l'enseignement supérieur, la recherche et le développement et aussi la diffusion de la culture scientifique et technique à travers son musée. Le laboratoire Commun de Métrologie se décline en trois pôles de recherche et de développement. Le pôle métrologie thermique avec les trois départements de basses, moyennes et hautes températures. Le pôle métrologie mécanique avec le département dimensionnel-Lasers et le département masse et grandeurs associées et enfin le pôle rayonnements optiques.

Le LCM est responsable de quatre grandeurs du système international (SI) d'unités : longueur, masse, température et intensité lumineuse. Cette dernière grandeur est maintenue par l'équipe "rayonnements optiques" qui, en plus du maintien des références nationales, pilote et coordonne plusieurs projets de recherches en radiométrie et en photométrie tels que :

- L'étalonnage des détecteurs :

Il est effectué à l'aide du radiomètre cryogénique à quelques longueurs d'onde laser du domaine visible. Ces détecteurs étalonnés sont ensuite utilisés comme références secondaires ou de transfert sur d'autres bancs de mesure.

- L'étude de l'éclairement énergétique :

Il s'agit de réaliser des nouvelles références d'éclairement énergétique spectrique raccordées au radiomètre cryogénique pour améliorer la stabilité actuelle et augmenter le nombre de longueurs d'onde de mesure.

- La caractérisation du rendu des couleurs des LED :

L'utilisation généralisée des diodes électroluminescentes émettant une lumière blanche aussi bien en éclairage intérieur qu'extérieur permettrait de faire des économies d'énergie substantielles. Cependant, les caractéristiques de ces sources lumineuses posent problème dans le domaine du rendu des couleurs. L'indice de rendu des couleurs ne s'applique pas de manière satisfaisante aux LED. La recherche d'un nouvel (ou de plusieurs) indice(s) paraît nécessaire.

- L'étude de l'apparence visuelle

Parmi les grandeurs-clefs permettant de caractériser de façon objective, l'apparence des surfaces des objets, figure la fonction de distribution bidirectionnelle du facteur de luminance

(BRDF). Pour déterminer la BRDF des surfaces, l'équipe "rayonnements optiques" a pour mission de doter la métrologie française d'un instrument de référence dédié à la mesure de l'apparence. C'est dans ce projet dédié à l'étude de l'apparence des surfaces qu'est inclus mon travail de recherche et de développement.

Nous voyons les objets parce qu'ils reflètent la lumière qui les éclaire. Au premier abord, le processus d'observation et d'identification des objets parait simple: au contact de la matière, la lumière peut être réfléchie, absorbée ou transmise; la lumière réfléchie transporte l'information, qui après avoir été captée par notre système visuel est transmise au cerveau. Le cerveau, en se basant sur ses acquis visuels et cognitifs, analyse le signal reçu et procède à l'identification de l'objet observé. Hélas, la connaissance des informations les plus importantes sur lesquelles le cerveau se base pour reconnaitre un objet n'est aujourd'hui pas complètement maitrisée et est un sujet de recherche très actif.

Les informations contenues dans la lumière réfléchie par la surface sont appelées les attributs d'apparence visuelle souvent divisés en deux catégories [1]. La première concerne les attributs d'apparence du premier ordre tels que le contraste, le mouvement, la couleur… Ces attributs sont codés très tôt dans la chaine visuelle, au niveau de la rétine. Ils sont immédiatement accueillis par le cerveau. La deuxième catégorie concerne les attributs d'apparence du second ordre, ils interviennent en second lieu et sont plus complexes car le cerveau doit tenir compte d'une multitude de paramètres, et nécessitent le traitement de plusieurs informations à la fois. Dans cette catégorie, nous retrouvons le brillant, la texture et la translucidité [2].

L'apparence visuelle d'un objet permet non seulement de l'identifier mais elle est aussi un critère subjectif sur lequel nous nous appuyons pour juger la qualité, la beauté ou la finition d'un produit [3].

Aujourd'hui, l'importance de mesurer l'apparence se ressent dans plusieurs domaines que ce soit en synthèse d'image, pour la modélisation d'images réalistes, en restauration, où souvent la couleur permet d'évaluer la fraîcheur des produits, en cosmétiques (maquillage, teinture pour cheveux,…), en industrie automobile (peintures et texture) ou encore dans l'industrie du textile,…

Des efforts importants ont été fait par les fabricants afin de proposer de nouveaux effets visuels sophistiqués, comme des peintures métalliques, goniochromatiques, des finitions très mates ou des effets d''éclat et de scintillement. En conséquence, de nouvelles méthodes de mesure sont mises en place dans le but de fournir des données quantitatives, d'une part pour

assurer la répétabilité et le contrôle qualité, et d'autre part pour assurer la corrélation entre les résultats visuels et instrumentaux afin de faire avancer la recherche de nouveaux effets visuels, de nouvelles générations de colorants et de pigments ainsi que de nouveaux traitements de surfaces.

Maitriser l'apparence globale d'un objet revient à mesurer chacun des attributs d'apparence. L'apparence d'un objet dépend de l'objet lui-même, de ses caractéristiques optiques et géométriques. Elle dépend aussi de l'illuminant, de sa géométrie angulaire et spatiale, et de sa distribution spectrale. Elle dépend enfin de l'observateur, de son état psychique et physiologique, de sa mémoire, de son patrimoine culturel ou de sa localisation géographique. Il en découle que pour mesurer l'apparence, il est indispensable de prendre en compte tous les éléments constituant le triplet illuminant, objet et détecteur.

L'attribut d'apparence le plus maîtrisé à ce jour est la couleur. La colorimétrie est aujourd'hui une science mûre et bien documentée. Des instruments dédiés à la mesure de la couleur de plus en plus performants ont vu le jour. Au cours du dernier siècle, de nombreux laboratoires nationaux de métrologie ont développé des instruments de référence qui permettent d'assurer la traçabilité des mesures [4]. De nombreuses sociétés développent et vendent des colorimètres sur une large gamme permettant d'effectuer une activité de recherche, ou une activité de contrôle en production.

En second lieu après la couleur vient le brillant. D'un point de vue visuel, le brillant est le deuxième attribut d'apparence le plus important. Durant les trois dernières décennies, il n'a cessé de susciter l'intérêt des industriels soucieux de la qualité de leurs produits et des scientifiques tentant de comprendre le cerveau [5]. En effet, comprendre les étapes d'analyse du brillant par le cerveau et savoir exactement quels sont les critères sur lesquels ce dernier se base pour juger le brillant d'une surface pourraient permettre de concevoir un instrument capable de fournir des résultats en concordance avec les résultats obtenus avec des sujets humains.

D'un point de vue normatif, la mesure de la couleur et du brillant se fait dans des géométries bien précises. En effet, pour la couleur, on utilise les angles d'éclairement et/ou d'observation 0°/45°[6]. Pour le brillant, on adopte conventionnellement les angles 20°, 60° et 85° [7][8]. Aujourd'hui, ces géométries, bien que fondamentales ne sont plus adéquates pour l'étude des surfaces modernes, comme par exemple les surfaces gonioréflectomètriques, dont l'apparence change en fonction de l'angle d'observation et/ou d'illumination [9]. Ce type de surface nécessite une étude plus complète des propriétés spectrales de réflexion, en faisant varier la

direction d'observation et la direction d'illumination, incluant les géométries dans et en dehors du plan d'incidence.

D'un point de vue formel, pour une direction d'illumination **I**, on peut mesurer la lumière réfléchie par la surface dans une direction d'observation **R**. On définit alors la fonction de distribution bidirectionnelle du facteur de luminance plus connu sous l'acronyme BRDF (Bidirectionnal Reflectance Distribution Function).

La BRDF est le rapport de la luminance réfléchie dans la direction **R** régie par un angle zénithal $\theta_{\mathbf{R}}$ et azimutal $\varphi_{\mathbf{R}}$, sur l'éclairement d'une surface dans la direction **I** aussi identifiée par un angle zénithal $\theta_{\mathbf{I}}$ et azimutal $\varphi_{\mathbf{I}}$. La BRDF permet de mesurer la couleur et le brillant. C'est une grandeur radiométrique qui dépend de la longueur d'onde. La BRDF se mesure avec un gonioréflectomètre.

La mesure de la BRDF est une opération relativement complexe, longue et très redondante. Une mesure de BRDF complète peut prendre plusieurs heures voir plusieurs jours et plus la résolution est grande plus le temps s'allonge. Un bon instrument doit prendre en compte les contraintes de temps de mesure. Nous verrons que l'utilisation des techniques classiques (rotations) et modernes (conoscope et caméra CCD) peuvent permettre de gagner du temps tout en réalisant des mesures absolues de BRDF.

Le travail développé dans cette thèse s'insère dans un projet d'envergure, visant à doter la métrologie française d'un instrument de référence primaire pour la mesure absolue de la BRDF au sein du laboratoire LNE-CNAM. Cet instrument devra présenter des performances adaptées à l'étude de l'apparence des surfaces et spécialement la couleur et le brillant. Parmi les différentes tâches de conception, la mienne était de développer la détection. Nous allons voir dans ce document que l'exercice a consisté dans la pratique à développer deux détections et par extension deux illuminations. Pour cela, nous avons commencé par établir un cahier des charges regroupant les besoins et les performances de l'instrument. Nous avons ensuite réalisé cet équipement et validé sa conception.

Ce document est articulé autour de quatre chapitres. Je commencerai le premier chapitre par quelques rappels de grandeurs radiométriques et photométriques indispensables à la compréhension de ce manuscrit, telles que la luminance et l'éclairement ainsi que des notions géométriques comme l'angle solide et l'étendue géométrique.

Je présenterai ensuite la définition de l'apparence visuelle et de l'intérêt que celle-ci suscite dans différents domaines industriels. La maîtrise de l'apparence visuelle passe par la maîtrise des attributs d'apparence, je reviendrai brièvement sur la couleur, la translucidité, la texture et

les grandeurs physiques qui permettent de les mesurer. Je m'attarderai particulièrement sur le brillant et le pic spéculaire dont la mesure est un des objectifs de la détection développée dans cette thèse.

Dans le chapitre II, je commencerai par poser le cahier des charges du gonioréflectomètre à concevoir. De ce cahier des charges découle une série de contraintes mécaniques et géométriques sur la détection et l'illumination à développer pour une mesure absolue de la BRDF. Je détaillerai chaque élément du cahier de charges et je justifierai les choix adoptés.
Une fois le cahier des charges élaboré, je présenterai l'étude bibliographique des équipements existants. Cette étude permet à la fois de comparer les différents instruments et de juger leurs performances et leurs points faibles.
Suite à l'étude bibliographique, Je présenterai le design général du gonioréflectomètre du LNE-CNAM. Celui-ci est composé d'une ligne spectrale pour la mesure de la couleur et une ligne spatiale pour la mesure du brillant. Ces deux lignes se partagent une partie commune : le châssis, la couronne et le support d'échantillon dont je montrerai brièvement la réalisation mécanique.

Le chapitre III est consacré à la conception, l'implémentation et la caractérisation de la ligne spectrale. Il se termine par une mesure effectuée au laboratoire.
Le chapitre IV décrit la conception et la réalisation de la ligne spatiale avec son illumination et sa détection innovante. Il se termine par la caractérisation de ligne et la mesure d'un pic spéculaire avec une résolution qui n'avait jamais été atteinte jusqu'à aujourd'hui.

# CHAPITRE I

# L’apparence

Avant de décrire l'apparence, je propose ici, un bref rappel sur les définitions des grandeurs radiométriques et photométriques qui nous seront utiles dans la suite de ce document.

## 1.1 Radiométrie et photométrie

Les définitions rappelés ici sont extraites du Vocabulaire International de la CIE [10].
La photométrie concerne "la mesure des grandeurs se rapportant au rayonnement tel qu'il est évalué selon une fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale donnée, par exemple V($\lambda$) ou V'($\lambda$)" [11]. Elle se divise en deux parties : la photométrie visuelle, définie comme étant "la photométrie dans laquelle l'œil est utilisé pour faire des comparaisons quantitatives entre des stimulus de lumière "[12] et la photométrie physique " photométrie dans laquelle des récepteurs physiques sont utilisés pour faire les mesures "[13].
La radiométrie est définit comme étant "la mesure des grandeurs relatives à l'énergie rayonnante" [14].

## 1.2 Les grandeurs radiométriques

Une des particularités de la radiométrie est qu'elle inclut un nombre important de grandeurs. Le métrologue des températures ne doit mesurer que la température. Le métrologue en radiométrie doit mesurer le flux, l'éclairement, la luminance, l'intensité et à peu près autant de facteurs que de liens possibles entre ces différentes grandeurs. La mesure de ces grandeurs radiométriques s'appuie sur des paramètres géométriques tels que l'angle solide et l'étendue géométrique. Voici un bref rappel de ces deux grandeurs géométriques avant de définir les grandeurs radiométriques.

- L'angle solide

Soit un objet de surface élémentaire *dA* observé depuis un point O (Figure 1). Dans l'espace tridimensionnel, l'angle solide est défini comme étant le rapport de la projection de la surface $dA$ sur une sphère de rayon R centrée sur O et du carré du rayon R de cette sphère. Son unité est le stéradian [sr]. 1 sr correspond à un angle solide défini par une surface projetée de 1 $m^2$ sur une sphère de 1 m de rayon.
Soit $dS$ la projection de la surface $dA$ sur la sphère. L'angle solide $d\Omega$ en stéradian s'écrit :

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2} \qquad \text{unité : stéradian [sr]} \tag{1}$$

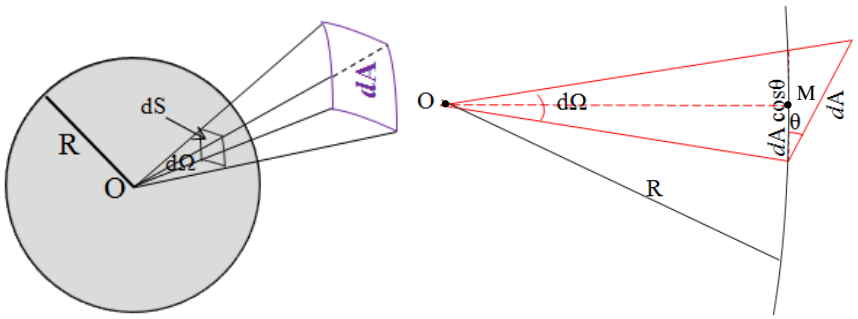



Figure 1 : Schéma représentatif de la notion d'angle solide.
A gauche, on définit l'angle solide $d\Omega$ formé par le point O et la surface $d$A, par $d\Omega = \frac{dS}{R^2}$. où $dS$ est la projection de la surface $dA$ sur la sphère centrée en O, et de rayon R. A droite, si la surface $dA$ n'est pas orthogonale à la direction OM, la surface projetée est $dS = dA \cdot \cos\theta$ , où θ est l'angle entre dA et la tangente à la sphère.

- L'étendue géométrique :

Soit S une source étendue éclairant un récepteur noté R. Si l'on considère $dS$, un élément de la surface de la source, et $dR$, un élément de la surface du récepteur, on peut alors définir $d\Omega_S$ l'angle solide formé par le point $O_s$ et la surface située sur le récepteur $dR$ projetée sur la sphère de rayon d (Figure 2).

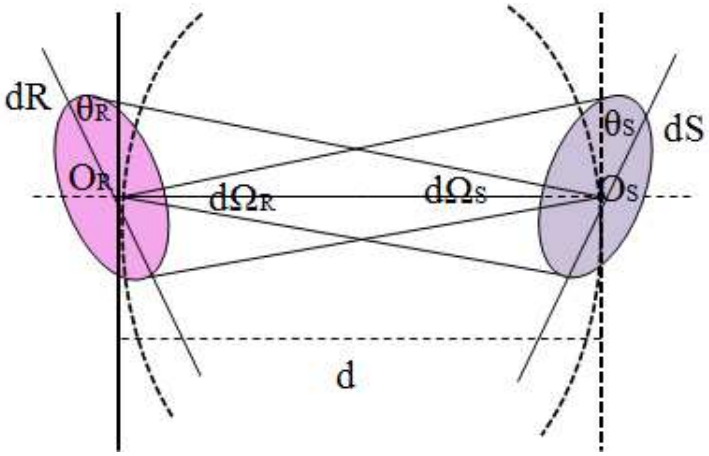



Figure 2 : Représentation de l'étendue géométrique formée par la surface émettrice en violet et la surface réceptrice en rose séparées par une distance $d$.

On écrit :

$$d\Omega_S = \frac{dR.cos\theta_R}{d^2} \qquad (2)$$

De la même manière, on peut définir $d\Omega_R$, l'angle solide formé par la surface située sur $dS$, et projetée sur la sphère de rayon $d$ vue du point $O_R$ qui lui est situé sur le récepteur.

$$d\Omega_R = \frac{dS.cos\theta_s}{d^2} \qquad (3)$$

On définit enfin l'étendue géométrique, entre les surface $dS$ et $dR$, telle que :

$$d^2G = dS \cdot cos\theta_s \cdot d\Omega_S = dR \cdot cos\theta_R \cdot d\Omega_R \quad (4)$$

$$d^2G = \frac{dR \cdot dS \cdot cos\theta_R \cdot cos\theta_s}{d^2} \quad (5)$$

A l'aide de ces grandeurs géométriques, on définit maintenant les grandeurs radiométriques [15].

### 1.2.1 Le flux énergétique

Le flux énergétique, $\phi_e$, d'un rayonnement électromagnétique correspond à un débit d'énergie, c'est-à-dire la quantité d'énergie rayonnée par une source, par unité de temps. L'énergie étant en joule, le temps en seconde, l'unité du flux énergétique selon le système international est le watt.

### 1.2.2 L'intensité énergétique

L'intensité énergétique est définie par le quotient du flux énergétique $d\phi_e$émis par une source et se propageant dans l'élément d'angle solide d$\Omega$ contenant la direction de propagation et dont le sommet est sur la surface de la source, par cet élément d'angle solide. On note :

$$I_e = \frac{d\phi_e}{d\Omega} \qquad \text{unité: } [\mathrm{W.\,sr^{-1}}] \quad (6)$$

### 1.2.3 L'éclairement énergétique

L'éclairement énergétique $E_e$ en un point P d'une surface élémentaire $dS$ correspond au flux énergétique $d\phi_e$ reçu, divisé par l'aire $dS$ de cette surface, soit :

$$E_e = \frac{d\phi_e}{dS} \qquad \text{unité: } [\mathrm{W.\,m^{-2}}] \quad (7)$$

### 1.2.4 L'exitance

L'exitance $M_e$ est définie comme étant le rapport entre le flux énergétique total $d\Phi_e$ émis par une surface élémentaire d'aire $ds$, et l'élément de cette surface.

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad \text{unité: } [\mathrm{W \cdot m^{-2}}] \quad (8)$$

L'exitance a la même dimension que l'éclairement. La différence entre les deux grandeurs réside dans le sens du flux. En effet, l'éclairement considère le flux reçu par la surface, tandis que l'exitance considère le flux émis par la surface.

### 1.2.5 La luminance énergétique

La luminance $L_e$ est le quotient du flux $d\phi_e$ quittant un élément de surface $dS$ et se propageant dans l'élément d'angle solide d$\Omega$ contenant la direction donnée, par le produit de l'élément d'angle solide et de l'aire de la projection orthogonale de l'élément de surface sur un plan perpendiculaire à la direction donnée. On écrit :

$$L_e = \frac{d^2\phi_e}{dG^2} \qquad \text{unité: } [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}}] \tag{9}$$

### 1.2.6 Fonction de distribution bidirectionnelle du coefficient de luminance (BRDF)

La fonction de distribution bidirectionnelle du coefficient de luminance (BRDF) est la fonction qui décrit les propriétés géométriques de la réflexion de la lumière dans tout le demi-espace au-dessus de la surface éclairée.

La première définition radiométrique de la BRDF a été donnée par F.E. Nicodemus et al en 1977 [16]. La BRDF est le quotient de la luminance énergétique $L_{\mathbf{R}}$, mesurée dans une direction d'observation **R** définie par un angle zénithal $\theta_{\mathbf{R}}$ et azimutal $\varphi_{\mathbf{R}}$, à l'éclairement $E_{\mathbf{I}}$ provenant de la direction d'illumination **I** définie aussi par un angle zénithal $\theta_{\mathbf{I}}$ et azimutal $\varphi_{\mathbf{I}}$.

La BRDF dépend de la longueur d'onde λ. Elle s'exprime en stéradian moins un.

La Figure 3, illustre les directions d'illumination et d'observation.

$$f_r(\theta_I, \varphi_I, \theta_R, \varphi_R, \Omega, \lambda) = \frac{dL_R(\theta_I,\varphi_I,\theta_R,\varphi_R,\Omega,\lambda)}{dE_I(\theta_I,\varphi_I,\lambda)} \qquad \text{unité: } [\mathrm{sr^{-1}}] \tag{10}$$

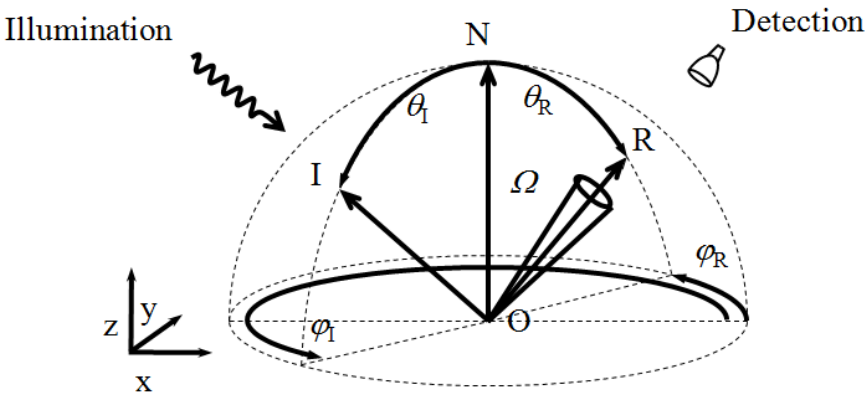



Figure 3 : Notations angulaires pour décrire une BRDF.
L'illumination est décrite par l'angle zénithal $\theta_{\mathbf{I}}$ et l'angle azimutal $\varphi_{\mathbf{I}}$. La direction de réflexion est décrite par les angles ($\theta_{\mathbf{R}}$ , $\varphi_{\mathbf{R}}$). La mesure dépend de l'angle solide Ω et de la longueur d'onde $\lambda$.

La BRDF est une grandeur radiométrique. Elle n'a pas d'équivalent formel en photométrie. Il est cependant possible de décrire une BRDF visuelle comme suit :

$$f_{r_v} = \mathrm{k}_M \int_0^{\infty} V(\lambda) \, . f_r \, (\lambda) \, d\lambda \tag{11}$$

Ou encore :

$$f_{r_v} = \frac{L_v(\theta_{\mathbf{R}}, \varphi_{\mathbf{R}})}{E_v(\theta_{\mathbf{I}}, \varphi_{\mathbf{I}})} \tag{12}$$

Avec $L_v$ en $\mathrm{cd} \cdot \mathrm{m}^{-2}$ , et $E_v$ en lx.

- Propriété de la BRDF

- Réciprocité : La fonction de distribution bidirectionnelle du facteur de luminance est une fonction symétrique. Elle suit le principe de réciprocité d'Helmholtz ou loi du retour inverse de la lumière. C'est-à-dire que la lumière emprunte le même chemin en interchangeant les directions **I** et **R**.

$$f_r \, (\mathbf{I} \rightarrow \mathbf{R}) = f_r \, (\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{I}). \tag{13}$$

L'écriture **I** → **R** indique que la lumière arrive de la direction **I** et est réfléchie dans la direction **R**. Inversement pour l'écriture **R** → **I**.

- Invariance des longueurs d'onde : après contact avec la surface, un rayon lumineux de longueur d'onde λ, peut être absorbé, réfléchi ou réfracté, mais sa longueur d'onde ne subit aucune modification.

### 1.2.7 Relation entre les grandeurs

- Intensité et éclairement, la loi de Bouguer :

Soit une source ponctuelle émettant un flux $\phi_e$dans le cas particulier où la source éclaire une surface élémentaire $dS$ perpendiculaire à la direction de propagation de la lumière. On note R, la distance entre la source et la surface réceptrice. On peut alors exprimer l'éclairement en fonction de l'intensité énergétique et de la distance R. En effet le flux étant défini par $d\phi_e = I_e \cdot d\Omega$ et l'angle solide par $d\Omega = \frac{dS}{R^2}$ , on écrit :

$$E_e = \frac{d\phi_e}{dS} = \frac{I_e d\Omega}{dS} = \frac{I_e}{R^2} \quad \text{unité: } [\mathrm{W.m^{-2}}] \tag{14}$$

Nous constatons que l'éclairement d'une surface est proportionnel à l'intensité lumineuse de la source et inversement proportionnel au carrée de la distance entre la source et le récepteur [17]. C'est la loi de Bouguer.

- luminance-exitance (Loi de Lambert) :

La loi de Lambert permet d'établir un lien de proportionnalité entre la luminance $L_e$ et l'exitance $M_e$ d'une source parfaitement isotrope (source ayant la même luminance quelle que soit la direction d'observation). Pour ce type de surface:

$$M_e = \pi \cdot L_e \tag{15}$$

- Luminance -Eclairement-Intensité

Il est possible d'exprimer la luminance $L_e$ en fonction de l'intensité de l'émetteur, ou de l'éclairement du récepteur.

$$\begin{cases} L_e = \dfrac{d^2\,\phi_e}{dG^2} = d\left(\dfrac{d\,\phi_e}{d\Omega_{\mathbf{S}}} \cdot \dfrac{1}{dS\,\cos\theta_{\mathbf{S}}}\right) = \dfrac{d\mathrm{I}}{dS\,\cos\theta_{\mathbf{S}}} \\ L_e = \dfrac{d^2\,\phi_e}{dG^2} = d\left(\dfrac{d\phi_e}{d\mathrm{R}\cos\theta_{\mathrm{R}}} \cdot \dfrac{1}{d\Omega_{\mathbf{R}}\cos\theta_{\mathbf{R}}}\right) = \dfrac{d\mathrm{E}}{d\Omega_{\mathbf{R}}\cos\theta_{\mathbf{R}}} \end{cases} \tag{16}$$

## 1.3 Définition des grandeurs photométriques

Le passage des unités radiométriques aux unités photométriques est possible en tenant compte d'une part de la sensibilité de l'œil humain aux différentes longueurs d'onde de la lumière, et d'autre part de l'environnement lumineux. La CIE définit deux fonctions d'efficacité lumineuse relative spectrale : V(λ) associée à la vision photopique (diurne), et V'(λ) associée à la vision scotopique (nocturne), qui représentent respectivement la sensibilité spectrale de l'observateur humain moyen de jour et en vision de nuit.

L'efficacité lumineuse relative spectrale d'un rayonnement monochromatique de longueur d'onde $\lambda$ est définie comme étant le rapport du flux énergétique $\phi_e$ maximal de longueur d'onde $\lambda_{max}$ au flux de longueur d'onde $\lambda$, les deux rayonnements produisant des sensations lumineuses également intenses dans des conditions photométriques spécifiées. $\lambda_{max}$ est choisie de façon à ce que la valeur maximale de ce rapport soit égale à 1 [18]. Les valeurs utilisées pour tracer la courbe V($\lambda$) en vision photopique sont en vigueur depuis 1924. Pour la vision scoptopique, la CIE a adopté les valeurs de la courbe V'($\lambda$) en 1951.

La Figure 4 représente les valeurs de l'efficacité lumineuse relative spectrale en vision photopique et scotopique comprises entre 380 nm et 780 nm, ces valeurs sont données pour un pas de 10 nm [18].

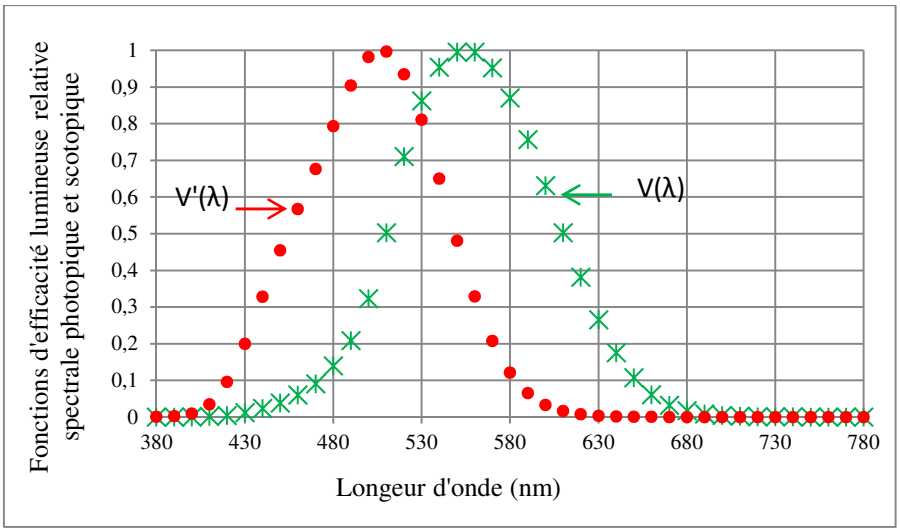



Figure 4 : Valeurs de l'efficacité lumineuse relative spectrale en vision photopique (λ). $\lambda_M = 555\ nm$ (Jaune-vert) et scotopique V'(λ) avec $\lambda_M = 507\ nm$ (Bleu-vert) [19].

### 1.3.1 Efficacité lumineuse spectrale

La CIE définit l'efficacité lumineuse spectrale d'un rayonnement, $K$, comme étant le quotient du flux lumineux $\Phi_v$ par le flux énergétique $\phi_e$ correspondant [20].

$$K = \frac{\phi_v}{\phi_e} \qquad \text{unité: } [\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}] \tag{17}$$

- En vision photopique, la sensibilité atteint son maximum dans le jaune-vert situé à la longueur d'onde 555 nm. Un flux énergétique $\phi_e$ d'une puissance égale à 1W à λ=555 nm engendre un flux lumineux de $\Phi_v$=683 lm. On définit $K_M$, l'efficacité lumineuse maximale de $K(\lambda)$ pour $\lambda$=555 nm tel que pour une efficacité lumineuse relative spectrale V($\lambda$)=1 :

$$K_M(555) = 683\ \text{lm} \cdot \text{W}^{-1} \tag{18}$$

Pour les autres longueurs d'onde, l'efficacité lumineuse spectrale est le produit de l'efficacité lumineuse spectrale maximale $K_M$ et de l'efficacité lumineuse relative V(λ) :

$$K(\lambda) = K_M \cdot V(\lambda) \tag{19}$$

- En vision scotopique, la sensibilité se décale vers les courtes longueurs d'onde pour atteindre son maximum à la longueur d'onde $\lambda$=507 nm où V'($\lambda$) = 1.

$$K'_M = K(507nm) = 1700{,}05\ \text{lm} \cdot \text{W}^{-1} \tag{20}$$

- La vision mesopique correspond à la zone de transition entre la vision photopique et la vision scotopique. Cette dernière fait actuellement l'objet de nombreuses études afin d'établir une courbe $V''(\lambda)$ et déterminer l'efficacité lumineuse maximale $K''_M(\lambda)$.

A partir de ces dernières équations, on peut retrouver n'importe quelle grandeur photométrique $G_v$, à partir la grandeur énergétique équivalente $G_e$, tel qu'en vision photopique :

$$G_v = \mathrm{K}_M \int_{380}^{780} \mathrm{V}(\lambda) . \frac{dG_e}{d\lambda} d\lambda \tag{21}$$

En vision scotopique nous obtenons :

$$G_v = \mathrm{K'}_M \int_{380}^{780} \mathrm{V'}(\lambda) . \frac{dG_e}{d\lambda} d\lambda \tag{22}$$

On définit notamment :

La luminance lumineuse en $\mathrm{cd} \cdot \mathrm{m}^{-2}$:

$$L_v = \mathrm{K}_M \int_{380}^{780} \mathrm{V}(\lambda) . L(\lambda) d\lambda \tag{23}$$

Le flux lumineux en lumen [lm]:

$$\Phi_v = \mathrm{K}_M \int_{380}^{780} \mathrm{V}(\lambda) . \Phi(\lambda) d\lambda \tag{24}$$

# 2. La mesure de l'apparence

Le système visuel capte la lumière réfléchie par les objets de la scène, convertit le flux lumineux en influx nerveux et transmet l'information au cerveau, qui l'analyse et établit l'aspect visuel de l'objet observé. C'est alors que la scène " apparait ". L'apparence est donc l'aspect que l'on perçoit visuellement d'un objet [21]. La CIE, Commission Internationale de l'Eclairage, en donne la définition suivante "L'apparence est la sensation visuelle par laquelle un objet est perçu pour avoir des attributs tels que la taille, la forme, la couleur, la texture, le brillant, la transparence, l'opacité, etc."[22].

Parmi les nombreuses possibilités de séparer les attributs de l'apparence, le physicien ira presque naturellement les séparer en deux catégories : des attributs d'apparence qui dépendent de la distribution spectrale de la lumière réfléchie comme la couleur, la texture et la translucidité et les attributs d'apparence géométriques qui dépendent de la répartition spatiale ou angulaire de la lumière, comme le brillant ou encore la texture.

Les attributs d'apparence visuelle ne sont pas indépendants, ils s'influencent les uns les autres ce qui rend la mesure globale de l'apparence d'un objet plus difficile [23].

Mais pourquoi mesurer l'apparence ?

L'apparence visuelle est le premier critère sur lequel on s'appuie pour juger la qualité d'un produit. Les industriels l'ont bien compris. Aujourd'hui, ils dépensent des sommes importantes dans l'aspect visuel de leurs produits afin de séduire le plus grand nombre de consommateurs. Mais il ne suffit pas de produire un produit qui suscite l'envie d'acheter. Il faut pouvoir assurer sa répétabilité et le contrôle qualité et qui dit contrôle dit mesure. Dans la pratique, la mesure de l'apparence intéresse de nombreux domaines :

- En synthèse d'image, les mesures d'apparence vont servir à la modélisation d'images réalistes appliquées au cinéma, aux jeux vidéos ou aux simulateurs de vol.
- En restauration, la caractérisation de certains attributs tels que la couleur et le brillant permettent d'évaluer la fraîcheur des fruits, des légumes ou de la viande [24].
- Dans le domaine de l'agriculture, la mesure de la BRDF est utilisée, par exemple, pour surveiller par satellite l'évolution des champs de thé et à partir de la mesure déterminer la taille et la qualité des feuilles [25].

- Dans certains domaines industriels, le contrôle de l'apparence est crucial comme pour les cosmétiques (maquillage, teinture pour cheveux…), pour l'industrie automobile (peintures texture, et textile…) ou pour l'orfèvrerie.
- Dans le domaine de la conservation et de la restauration d'œuvres d'art, l'apparence constitue la matière première des artistes. La mesure de l'apparence permet de contrôler la couleur ainsi que l'aspect brillant ou transparent d'une œuvre. Pour la conservation préventive, elle permet de suivre les variations de l'apparence au cours du temps [21].
- Enfin pour la recherche, l'étude des attributs de l'apparence permet de mieux comprendre le fonctionnement du cerveau humain afin de fournir la matière première des systèmes d'imagerie de demain.

Comment mesurer l'apparence ?

L'apparence visuelle est une propriété subjective inaccessible directement à la mesure. La quantification de l'apparence nécessite d'établir des corrélations entre une ou plusieurs grandeur(s) physique(s) pertinente(s) et la réponse de l'observateur obtenue par des mesures visuelles. Cette réponse humaine est évaluée sur un stimulus par un panel d'observateurs via des expériences psychophysiques [26]. La Figure 5 [27] décrit la méthode utilisée.

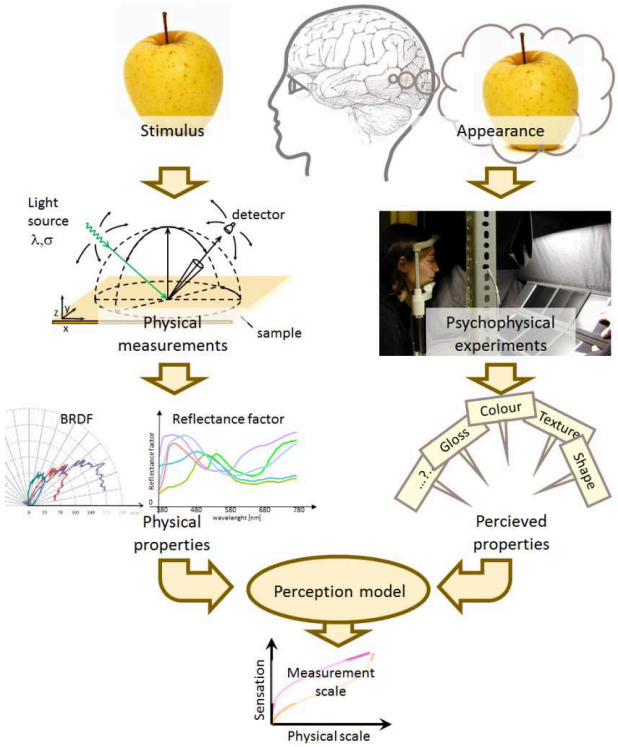



Figure 5: Construction d'un modèle de perception permettant de mettre en relation une sensation et une mesure physique.
A gauche la caractérisation physique avec la mesure de la BRDF à l'aide d'un gonioréflectomètre.
A droite la caractérisation psychophysique qui nécessite un ensemble d'artéfacts présentés dans des conditions parfaitement contrôlées, et un observateur [28].

## 2.1 Les attributs de l'apparence

### 2.1.1 La couleur

La couleur est l'attribut d'apparence qui a été le plus étudié. Elle prend son origine dans la répartition spectrale de lumière réfléchie par une surface, mais elle est aussi le résultat d'une interprétation du système visuel. La colorimétrie, science qui étudie la couleur, est à présent bien maitrisée. Elle dispose depuis les années 1931 de normalisations établie par la CIE. Ces normes ont permis le développement de toute une gamme d'équipements qui va du colorimètre portable au spectroradiomètre de laboratoire. La quantité physique qui permet de mesurer la couleur est le facteur de réflexion spectrique [29] mesuré avec un spectroradiomètre ou un colorimètre à filtre. Ce type de mesure passe souvent par une mesure sur un échantillon blanc spectralement. A cet effet, les laboratoires nationaux de métrologie et certains industriels proposent différents étalons à base de Teflon, ou de Sulfate de Baryum $BaSO_4$ par exemple [30].

La CIE a standardisé deux configurations géométriques pour la mesure de la couleur. La configuration d : 0 (éclairement diffus et détection à 0°) et la configuration 0 : 45 (éclairement directionnel à 45° et détection à 0° ou inversement) [31]. Aujourd'hui, il faut reconnaitre que ces deux configurations sont devenues très insuffisantes pour la caractérisation de la couleur des matériaux sophistiqués de type goniochromatiques et que la tendance va vers une augmentation du nombre de géométries, en utilisant un goniospectrophotomètre. Ce type de mesures nécessite le développement d'étalons secondaires caractérisés pour des géométries de mesures plus nombreuses. C'est pour cette raison que nous allons développer un étalon primaire qui permettra de caractériser la réflexion d'un artefact de transfert pour n'importe quelles géométries de mesure dans le demi-espace au-dessus de l'échantillon.

### 2.1.2 La translucidité

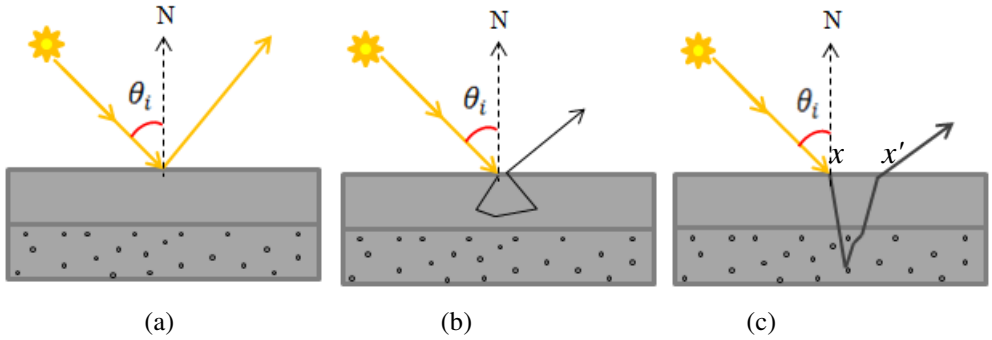
Il est possible de séparer la réflexion en deux types : une réflexion surfacique et une réflexion sub-surfacique. La réflexion surfacique concerne les réflexions spéculaire et diffuse qui comme nous le verrons sont à l'origine du brillant et de la couleur. Dans le cas de la réflexion spéculaire, on considère que la lumière interagit avec la surface de l'objet en un point $x$ et est réfléchie en ce même point (Figure 6a). Pour la réflexion diffuse on considère que le point d'entrée et de sortie est le même, même si la lumière est déviée à cause de l'interaction avec la surface (Figure 6b) [32][33].

Les matériaux translucides tels que le marbre, le tissu, le papier, la peau, le lait, etc. présentent un autre type de réflexion appelée réflexion sub-surfacique. La lumière incidente en un point *x*, interagit plus en profondeur avec les atomes constituant l'objet. Elle subit alors une translation et ne sort plus au point *x* mais au point *x*' (Figure 6c).

Dans ce type de réflexion, qui est à l'origine de la translucidité, le transport de la lumière dans le volume du matériau est déterminé par la géométrie de celui-ci, des propriétés optiques des éléments le constituant ainsi que leur répartition spatiale dans ce volume [33].

D'un point de vue métrologique ce type de propriété est quantifié par la BSSRDF de l'anglais bidirectional scatering surface reflectance distribution function donné en $m^{-2}sr^{-1}$.

La BSSRDF est la fonction qui relie la luminance réfléchie au point $x'$au flux incident au point $x$ [16][34]. Il existe peu d'équipement capable de mesurer la BSSRDF. Il serait pourtant intéressant d'en développer car la translucidité est un attribut d'apparence important et sur lequel beaucoup de progrès restent à faire.




(a) (b) (c)

Figure 6 : Réflexion surfacique et réflexion sub-surfacique.
Les figures (a) et (b) représentent la réflexion surfacique : la figure (a) représente la réflexion spéculaire responsable du brillant. La figure (b) représente la réflexion diffuse responsable de la couleur. Pour ces deux types de réflexion, le point d'impact et de rebond de la lumière est considéré le même. La figure (c) représente la réflexion sub-surfacique responsable de la translucidité. Le point d'impact et de rebond n'est pas le même car l'interaction de la lumière avec les particules sub-surfaciques la dévie de sa trajectoire.

### 2.1.3 La texture

La fonction de texture bidirectionnelle BTF est la grandeur physique qui décrit la texture d'une surface en fonction des angles d'illumination et d'observation [35]. La BTF peut être assimilée à une BRDF à laquelle on a rajouté la dimension spatiale de la surface étudiée définie par les coordonnées x, y. La texture est un attribut de très haut niveau cognitif [36]. Dans ce contexte la mesure physique n'est qu'une petite partie de la mesure de la texture. Les études les plus couramment menées sur la mesure de la texture sont dédiées à améliorer les techniques de modélisation des objets dans le domaine de la synthèse d'image afin d'avoir un rendu le plus réaliste possible [37]. Cependant, si une peau de serpent peut paraitre réaliste à

l'écran, il suffit de regarder la chevelure des personnages synthétiques pour comprendre qu'il reste encore beaucoup de progrès à faire dans ce domaine.

### 2.1.4 Le brillant

Le brillant est l'attribut pour lequel nous allons développer une voie de mesure particulière sur notre équipement (Chapitre IV). C'est aussi l'attribut sur lequel notre laboratoire a son expertise. Pour cette raison, nous allons développer un peu plus longuement les connaissances afférentes à cet attribut.

- Définition du brillant

Le brillant est définit par la CIE [38] comme étant "l'aspect dans lequel on perçoit des reflets lumineux d'objets comme superposés à la surface par suite des propriétés directionnelles sélectives de cette surface". La quantité physique qui permet d'étudier le brillant est la BRDF.

- Brillant et pic spéculaire

Le brillant est avant tout une sensation. Cependant, si l'on s'intéresse à l'approche optique du brillant, il est intéressant de tendre à un observateur deux échantillons, et de lui demander de les classer selon leur niveau de brillant. Immédiatement, le sujet se tourne vers une source d'éclairage et déplace l'échantillon afin de positionner son regard dans la direction miroir à la direction d'illumination, que l'on appelle la direction spéculaire. Ensuite, l'observateur bouge la tête ou l'objet pour analyser la lumière réfléchie autour de la direction spéculaire.

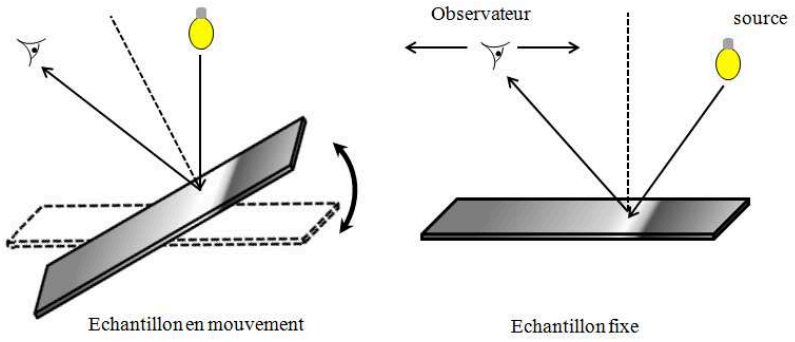



Figure 7 : Illustration de l'expérience d'évaluation visuelle du brillant.
A gauche, l'échantillon est mobile. A droite, l'échantillon est fixe. Dans les deux cas, l'observateur analyse la lumière réfléchie dans et autour de la direction spéculaire pour évaluer le brillant.

Cette expérience révèle que le brillant se trouve dans la direction spéculaire et que notre système visuel a besoin de récolter des informations provenant de la répartition géométrique de la lumière dans et autour de la direction spéculaire lors de son analyse du brillant.

La répartition de la lumière réfléchie par une surface autour d'une direction spéculaire peut avoir des formes variables décrites par le pic spéculaire. Pour des surfaces brillantes, le pic peut avoir une forme Gaussienne ou Lorenztienne. En 2004 Vienot et al. [39] comparent les pics spéculaires mesurés entre une chambre à air et du papier enduit noir. Les résultats obtenus montrent que les deux pics ont la même aire mais ont des formes différentes. De son côté, l'observateur est capable de faire facilement la différence et de classer les surfaces selon leur niveau de brillant.

Il parvient même, si on le lui demande à retrouver la nature du matériau à partir uniquement de cette information spéculaire.

On comprend alors que le système visuel n'analyse pas juste la hauteur ou l'aire du pic mais aussi sa forme. Il sera donc important, pour la mesure du brillant, de mesurer la forme du pic spéculaire. La hauteur et la forme du pic spéculaire dépendent avant tout de l'état de surface, de l'indice de réfraction et des angles d'illumination.

- Le pic spéculaire

**– Etude de l'évolution de la hauteur du pic spéculaire en fonction de l'angle d'incidence et de l'indice de réfraction relatif *n* de la surface réfléchissante**

En optique géométrique, le facteur de Fresnel permet de calculer la proportion du flux réfléchi $\phi_{\mathbf{R}}$ par rapport au flux incident $\phi_{\mathbf{I}}$. Ce rapport augmente en fonction de l'angle d'incidence $\psi$ et de l'indice de réfraction relatif $n$ de la surface réfléchissante selon l'équation (25) dans le cadre restreint d'une surface diélectrique d'indice réel.

$$F = \frac{\phi_{\mathbf{R}}}{\phi_{\mathbf{I}}} = \left[ \left( \frac{\cos\psi - \sqrt{n^2 - sin^2\psi}}{\cos\psi + \sqrt{n^2 - sin^2\psi}} \right)^2 + \left( \frac{n^2\cos\psi - \sqrt{n^2 - sin^2\psi}}{n^2\cos\psi + \sqrt{n^2 - sin^2\psi}} \right)^2 \right] \quad (25)$$

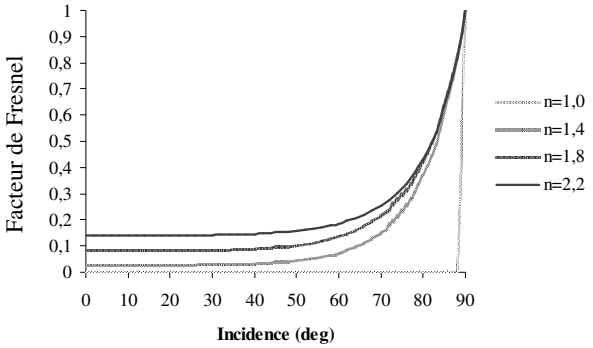



Figure 8 : Evolution du facteur de Fresnel en fonction de l'indice de réfraction et de l'angle d'incidence [40].

Ainsi la hauteur du pic spéculaire augmente avec l'indice de réfraction pour un angle d'incidence fixe. Elle augmente aussi pour un indice fixe avec l'angle d'incidence (Figure 8).

— **Etude de l'évolution de la hauteur du pic en fonction de l'état de surface :**

Leloup et al. [41] ont mesuré la BRDF de deux échantillons noirs en polyuréthane présentant des textures différentes et dont l'étude de la surface indique que l'échantillon 1 est plus lisse que l'échantillon 2. Après avoir mesuré le brillant des deux surfaces pour un angle d'incidence de 85°, l'échantillon 1 affiche un niveau de brillant plus élevé que l'échantillon 2. Obein [42] a mesuré la hauteur du pic spéculaire pour 5 échantillons de l'échelle de brillant NCS. Cette étude a montré que plus le brillant de l'échantillon est élevé, plus la hauteur du pic est importante. Ces expériences confirment ce que l'on ressent intuitivement, à savoir que la hauteur du pic spéculaire est directement liée à l'état de surface. Plus la surface est lisse, plus le pic est grand.

— **Etude de l'évolution de la largeur à mi-hauteur (**en anglais full width at half maximum abrégé en FWHM**) du pic spéculaire en fonction de l'angle d'incidence :**

L'évolution de la largeur à mi-hauteur du pic en fonction de l'angle est un sujet de recherche actuel. Sur les surfaces mates (dont le brillant mesuré au glossmètre à 60° est inférieur à 10 gloss unit (g.u), la FWHM augmente avec l'angle d'incidence dans le plan d'incidence. Pour les surfaces brillantes, la réponse est moins claire. Quelques mesures pourraient plaider pour une stabilité de la FWHM du pic [43]. Néanmoins, ce type de résultats doit être confirmé par des études réalisées avec un équipement disposant d'une résolution adaptée à ce type de surfaces. En effet, pour des surfaces brillantes, la FWHM du pic spéculaire descend rapidement à moins de 2°, ce qui rend son étude difficile car peu d'équipements affichent une résolution angulaire aussi fine.

— **Conclusion sur le brillant :** Les expériences menées sur des observateurs nous indiquent que pour évaluer le brillant d'une surface, le système visuel explore la forme du pic spéculaire. Cette forme dépend de l'état de surface, de l'indice de réfraction du matériau et de l'angle d'incidence. Si nous voulons progresser dans ce domaine, il est donc nécessaire de réaliser des mesures qui permettent d'apprécier la forme du pic spéculaire. Mais la tâche est difficile. En effet, la largeur à mi-hauteur du pic spéculaire varie de 15° pour les surfaces mates à moins de 1° pour les surfaces brillantes. Aujourd'hui, la mesure du pic spéculaire ne se fait qu'à l'aide d'instruments dont la résolution est au mieux de 0,4° pour les meilleurs [44]. A cause de leur résolution angulaire, ces instruments ne sont adaptés qu'à l'étude de pics spéculaires larges, et ne permettent pas l'étude du pic spéculaire sur les surfaces brillantes. C'est l'une des raisons pour lesquelles nous allons développer une ligne de détection spécifique à très haute résolution angulaire qui permettra l'étude des surfaces brillantes.

L'apparence des surfaces est cruciale aujourd'hui pour l'industrie car elle entre très vite dans la relation client-objet. La mesure de l'apparence passe par l'évaluation physique des attributs visuels de l'apparence: la couleur, le brillant, la translucidité et la texture. Pour cela, des instruments ont été développés. On parle de colorimètre, de glossmètre, spectroradiomètre…etc.

L'étalonnage des instruments de mesure se fait généralement pour des géométries bien précises. En effet, pour la couleur, on utilise les angles d'éclairement et/ou d'observation 0°/45°. Pour le brillant, on adopte conventionnellement les angles 20°, 60° et 85°[45]. Aujourd'hui, ces géométries ne sont pas adéquates pour l'étude des surfaces dites gonioréflectomètriques, dont l'apparence change en fonction de l'angle d'observation et/ou d'illumination. Ce type de surface nécessite une mesure de la BRDF mesurée à l'aide d'un gonioréflectomètre dans toutes les directions d'observation et d'illumination [46].

À cet effet un gonioréflectomètre doit avoir autant de degrés de liberté que la BRDF possède de variantes.

L'instrument que nous cherchons à développer servira de référence primaire nationale pour la mesure de la BRDF. Il doit être conçu avec tout le sérieux mécanique et optique qui permettra de garantir les angles solides et les flux mesurés.

Il doit également permettre l'étude de la couleur et du brillant. Il doit donc présenter une résolution spectrale et angulaire adaptée à ces mesurandes.

Le chapitre II se consacre à ce point. J'y poserai le cahier des charges de l'équipement et y réaliserai une étude bibliographique sur les gonioréflectomètres existants, pour m'inspirer de leurs points forts et éviter leurs faiblesses. Il doit pouvoir mesurer de la répartition spectrale et spatiale de lumière réfléchie.

# CHAPITRE II

# Le gonioréflectomètre

Comme nous l'avons vu au chapitre I, la BRDF est définie comme étant le rapport de la luminance dans une direction d'observation **R** définie par un angle zénithal $\theta_{\mathbf{R}}$ et azimutal $\varphi_{\mathbf{R}}$ et l'éclairement dans une direction d'illumination **I** comprise dans le demi-espace au-dessus de l'échantillon définie par les angles $\theta_{\mathbf{I}}$ et $\varphi_{\mathbf{I}}$ . La BRDF est fonction de la longueur d'onde. Reprenons à cet effet la Figure 3 page 26.

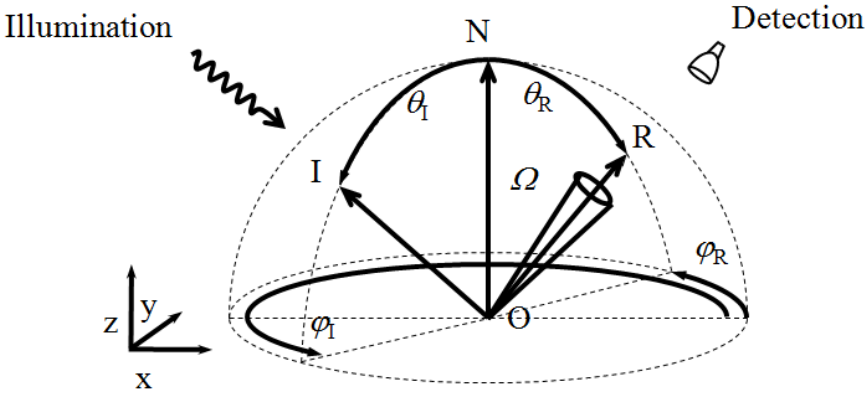



Figure 3 : Notations angulaires pour décrire une BRDF.
L'illumination est décrite par l'angle zénithal $\theta_{\mathbf{I}}$ et l'angle azimutal $\varphi_{\mathbf{I}}$. La direction de réflexion est décrite par les angles ($\theta_{\mathbf{R}}$ , $\varphi_{\mathbf{R}}$). La mesure dépend de l'angle solide Ω et de la longueur d'onde $\lambda$.

Dans la pratique, pour réaliser une mesure de BRDF, il est nécessaire d'éclairer la surface avec une source et de détecter la lumière réfléchie avec un détecteur. Les détecteurs que nous utilisons sont sensibles au flux. Il est cependant possible d'écrire le rapport luminance à éclairement en faisant apparaitre les flux énergétiques. Nous avons :

$$f_r(\theta_I, \varphi_I, \theta_R, \varphi_R, \Omega, \lambda) = \frac{L(\theta_R, \varphi_R, \lambda)}{E(\theta_I, \varphi_I, \lambda)} = \frac{\Phi(\theta_R, \varphi_R, \lambda)}{S_R\, \Omega\, \cos\theta_R} \cdot \frac{S_I}{\Phi(\theta_I, \varphi_I, \lambda)} \qquad (26)$$

Où : $S_I$ est la surface illuminée de l'échantillon.

$S_R$ est la surface observée par la détection.

$\Phi(\theta_R, \varphi_R, \lambda)$ le flux dans la direction d'observation.

$\Phi(\theta_I, \varphi_I, \lambda)$ le flux dans la direction d'illumination.

$\Omega$ l'angle solide d'observation qui pointe sur l'échantillon et dont la surface est délimitée par la détection.

Notons que cette expression n'est valable que dans le cas où les surfaces en cause sont petites devant les dimensions du montage.

Pour $S_I = S_R$ l'expression se simplifie encore et donne :

$$f_r(\theta_{\mathbf{I}}, \varphi_{\mathbf{I}}, \theta_{\mathbf{R}}, \varphi_{\mathbf{R}}, \Omega, \lambda) = \frac{\Phi(\theta_{\mathbf{R}}, \varphi_{\mathbf{R}}, \lambda)}{\Phi(\theta_{\mathbf{I}}, \varphi_{\mathbf{I}}, \lambda)} \cdot \frac{1}{\Omega\, cos\theta_{\mathbf{R}}} \qquad (27)$$

Dans ce cas particulier,  mesurer de la BRDF revient à réaliser une mesure du rapport des flux énergétiques dans les directions **I** et **R**, et à maitriser l'angle solide Ω.

C'est là le rôle d'un gonioréflectomètre.

Ce chapitre est consacré à l'établissement du cahier des charges qui regroupera les objectifs et performances auxquels nous aspirons pour le gonioréflectomètre du LNE-CNAM. J'effectuerai par la suite une étude bibliographique des instruments de mesures de BRDF existants. J'étudierai leur conception mécanique, leurs atouts et leurs faiblesses.

A l'issue de cette étude je présenterai le schéma de conception général de notre gonioréflectomètre.

# 1. Cahier des charges du gonioréflectomètre du LNE-CNAM

L'objectif de l'équipement est de mesurer la BRDF des surfaces avec comme application la mesure de la couleur et du brillant, en se réservant la possibilité de mesurer la translucidité et la texture. De ce besoin, est né le cahier des charges suivant. Les différents choix sont argumentés.

## 1.1 Champ d'observation

Le champ sous lequel une surface est observée a une forte influence sur la perception de sa couleur par l'œil humain. La CIE a défini en 1931, un observateur dit de référence ou standard qui décrit une vision des couleurs sous un angle de 2°. Cet angle est considéré suffisant selon la CIE pour les applications de télévision. C'est cet angle d'observation qui sera retenu pour notre système de détection.

## 1.2 Pas de déplacement angulaire en réflexion et en illumination ≤ 0,1°

La BRDF est une grandeur continue. Réaliser une mesure réelle de cette grandeur passe par une opération de discrétisation. Pour choisir le pas de déplacement nous sommes soumis à deux contraintes. D'un côté le temps de mesure car celui-ci est inversement proportionnel au pas de déplacement. De l'autre côté nous devons cibler, pour les directions d'illumination et de réflexion, un pas d'échantillonnage angulaire minimal qui ne nous limitera pas dans nos recherches.

En conséquence, nous souhaitons que le pas de déplacement pour la direction d'illumination et la direction d'observation pour la ligne spectrale puisse descendre à 0,1°.

## 1.3 Résolution angulaire

Le choix de la résolution angulaire découle des deux contraintes suivantes :

- Pour des matériaux très brillants l'essentiel de l'information est contenu dans le pic spéculaire. Comme nous l'avons montré dans le chapitre 1, l'étude du pic spéculaire requiert

un pas d'échantillonnage fin. A titre d'exemple, dans le cas de surface type peinture automobile, il est classique de trouver des pics ayant une largeur à mi-hauteur inférieure à 0,4°.

➢ Au sein du laboratoire LNE-CNAM, nous souhaitons comparer des expériences psychophysiques aux résultats physiques que fournit l'instrument de mesure. Pour cela, il semble logique que la résolution angulaire de notre instrument soit au moins équivalente à celle de l'œil humain afin de se rapprocher le plus possible des résultats psychophysiques.

Le pouvoir de résolution angulaire de l'œil est défini comme étant la plus petite distance angulaire qui existe entre deux objets contigus que l'œil peut discerner. La résolution angulaire dépend de l'éclairage des objets et des sujets eux-mêmes.

Dans la pratique, on teste la résolution à l'aide d'une mire de Foucault. La Figure 9 montre un exemple de mire de pas $x$ où $x$ est l'écart entre le centre de deux bandes de même couleur successives. On place l'observateur face à la mire. On éloigne la mire. Lorsque l'observateur ne discrimine plus les bandes blanches des bandes noires, la distance D est relevée. La résolution angulaire est alors donnée par :

$$\alpha = \frac{x}{D} \tag{28}$$

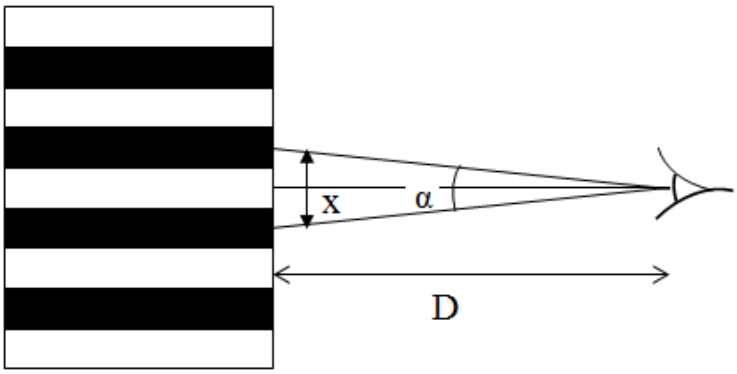



Figure 9 : Résolution angulaire de l'observateur humain.

En éclairage diurne, pour un observateur normal la résolution angulaire est en moyenne de 0,03° [47]. Nous recherchons à atteindre cette résolution pour notre instrument de mesure.

## 1.4 La résolution spectrale ≤ 0,5 nm

La résolution spectrale de l'instrument doit permettre de mesurer la couleur de l'échantillon dans n'importe quelle direction d'observation. Nous nous sommes inspirés des performances spectrales du colorimètre de référence du NIST (National Institute of Standards and Technology) pour définir nos spécifications [48]. Nous souhaitons un pas spectral de 1nm, et

une incertitude type sur la longueur d'onde de 0,10 nm, sur le domaine (PUV, VIS et PIR) 250-900 nm.

## 1.5 Diamètre maximal du faisceau en incidence normale

La taille du faisceau d'illumination est directement liée au type de surface étudiée. En effet, il faut s'assurer que la surface éclairée est représentative de la surface étudiée. Ce n'est pas toujours le cas. Prenons par exemple le cas des textiles. L'apparence des textiles dépend beaucoup de la distance d'observation. Dans le cas d'un velours, de loin, le matériau a un aspect mat et moelleux, dont les couleurs vont changer avec la direction d'observation. De près, le velours est constitué de petits poils qui n'ont rien à voir avec son apparence visuelle. Ainsi, si nous voulons étudier l'apparence des velours, la surface illuminée doit être grande devant la taille des poils du textile car c'est l'apparence globale qui nous intéresse. Cette remarque vaut pour tous les textiles. Sur un jean, la taille d'une maille de coton est de 0,2 mm, nous adoptons une taille maximale de faisceau 100 fois supérieure à cette maille, soit 20 mm.

Ce choix est important car il conditionne la taille du support de l'échantillon. En effet, lorsque l'angle d'illumination $\theta_I$ augmente, la surface éclairée devient une ellipse avec un grand axe qui varie en cos $(\theta_I)^{-1}$. Le lustre des textiles se mesure aux angles rasants. La valeur typique est de 85°. Pour être confortable à 85° il nous faut pouvoir atteindre 88°. Pour un spot de 20 mm de diamètre, cela donne une ellipse dont le grand axe fait 57 cm. Le dispositif devra pouvoir accepter un support d'échantillon de 60 cm de diamètre.

## 1.6 Autoriser les mesures photométriques

Aujourd'hui, la BRDF est une grandeur exclusivement radiométrique. Néanmoins, il est probable qu'une définition photométrique voit le jour dans les années futures, notamment grâce à l'engouement des mesures liées à l'apparence. Il peut donc s'avérer utile d'anticiper ces évolutions. Nous avons souhaité doter cet équipement d'une possibilité de mesure d'un "équivalent photométrique" de la BRDF. Cela nous impose de garder une place pour pouvoir glisser un filtre $V(\lambda)$ quelque part dans le dispositif et de prévoir une illumination large bande.

## 1.7 Temps de mesure

Nous l'avons dit, la BRDF est une fonction continue. Réaliser une mesure complète nécessite, pour chaque direction d'illumination du demi-espace, de mesurer la luminance de

l'échantillon dans toutes les directions du demi-espace, et cela pour toutes les longueurs d'onde du visible. Il apparaît clairement que le nombre de mesures devient très vite prohibitif. Par exemple, pour un pas d'échantillonnage angulaire de 1° et un pas spectral de 5 nm entre 250-900 nm , réaliser une mesure complète de la BRDF génèrerait *n* point de mesure, avec :

$$n = (90 \times 360)^2 \times (130) \approx 1{,}36 \times 10^{11} \text{ points de mesure.}$$

Nous devons être vigilants sur nos choix d'échantillonnage mais surtout, nous devons penser un système rapide dans ses déplacements angulaires et spectraux pour réduire les temps de mesure, qui sont actuellement un point limitant dans ce domaine. Nous devons aussi concevoir un instrument entièrement automatisé afin de poursuivre les mesures pendant la nuit. Nous avons fixé à 48 heures le temps maximal de mesure.

## 1.8 Possibilité de mesurer des échantillons volumineux

La mesure de l'apparence recouvre tous les domaines industriels, impliquant une large panoplie d'objets à étudier. Ces objets sont différents par leur couleur, leur brillant, leur translucidité… mais aussi par leur forme et leur volume qui peut aller du petit bijou de joaillier à la portière de voiture. L'équipement doit pouvoir réaliser des mesures de BRDF sur des matériaux variés qui peuvent s'avérer volumineux. L'industrie automobile étant clairement un moteur de l'innovation dans ce domaine, nous leur laissons la priorité et décidons qu'une portière de voiture doit pouvoir tenir sur notre équipement.

## 1.9 S'autoriser les mesures de la fonction de distribution bidirectionnelle du facteur de transmission (BTDF)

La BTDF est l'équivalent de la BRDF en transmission. Dans ce domaine, la demande est en pleine expansion, notamment depuis l'apparition des LED, qui, par leurs petites tailles et leur faible consommation énergétique, permettent d'éclairer les objets de l'intérieur. Connaitre la BTDF des matériaux permet de prédire l'apparence de l'objet dans ce cas de figure. Sans que cela soit notre priorité, nous gardons la possibilité de réaliser, au moins partiellement, des mesures de BTDF.

# 2. Etude bibliographique des instruments de mesures

Nous avons réalisé une étude bibliographique qui s'est voulue sélective des équipements existants en ne nous concentrant que sur les gonioréflectomètres bien établis, équipant les instituts nationaux de métrologie (PTB, NIST, CSIC, NPL). A cette liste nous avons ajouté quelques équipements développés par des universités de renom. Après une présentation de ces équipements, une étude synthétique est proposée.

## 2.1 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)

La PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), institut national de métrologie en Allemagne a déjà construit deux différents gonioréflectomètres.

Le premier, développé en 2004, nommé « robot-based gonioreflectometer » sert d'étalon national pour les mesures de BRDF pour des géométries arbitraires dans le demi-espace au-dessus de l'échantillon et dans le domaine spectral allant de 250 nm à 1700 nm [49]. Le second gonioréflectomètre, nommé ARGon3 développé en 2009 est utilisé pour la recherche scientifique, et notamment la mesure physique des surfaces goniochromatiques, ou présentant des effets étincelants (Sparkle) ou granuleux (graininess) très en vogue dans l'industrie automobile.

- Etude du gonioréflectomètre 1 (robot-based gonioréflectomètre) :

L'illumination est assurée par une lampe quartz tungstène halogène de 400 W montée à l'intérieur d'une sphère munie d'un réflecteur [50]. La sphère est ensuite montée à son tour sur une couronne de 1,5 m de diamètre et offre une rotation de 360° autour de l'échantillon.

La source présente une ouverture de 1,5° et est lambertienne.

Le support d'échantillon est un robot qui possède cinq degrés de liberté. L'ensemble robot et illumination mobile permet de produire toutes les directions d'observation et d'illumination voulues.

La détection est fixe et est composée d'un miroir de renvoi et d'un monochromateur pour la sélection spectrale de la longueur d'onde. L'angle solide de détection est celui préconisé par la CIE et vaut $9{,}96 \cdot 10^{-4}$ sr [51].

La zone d'observation est de 20 mm de diamètre et la fente d'entrée du monochromateur de 2 mm, la PTB utilise un miroir elliptique dont le grossissement est de 10 :1 pour diminuer la

taille du faisceau réfléchi d'un facteur 10 et le rediriger vers la fente d'entrée du monochromateur. Quatre détecteurs sont utilisés pour la détection. Chacun des détecteurs est dédié à une bande de longueurs d'onde précise, ce qui permet de couvrir toute la bande spectrale comprise entre 300 nm et 1700 nm. On trouve deux photomultiplicateurs à canaux. Le premier travaille dans la plage 250 nm-350 nm et le second entre 300 nm et 450 nm. Une photodiode au silicium mesure entre 400 nm et 1100 nm et enfin une photodiode InGaAs mesure entre 1000 nm et 1700 nm. Le schéma général du gonioréflectomètre est représenté Figure 10.

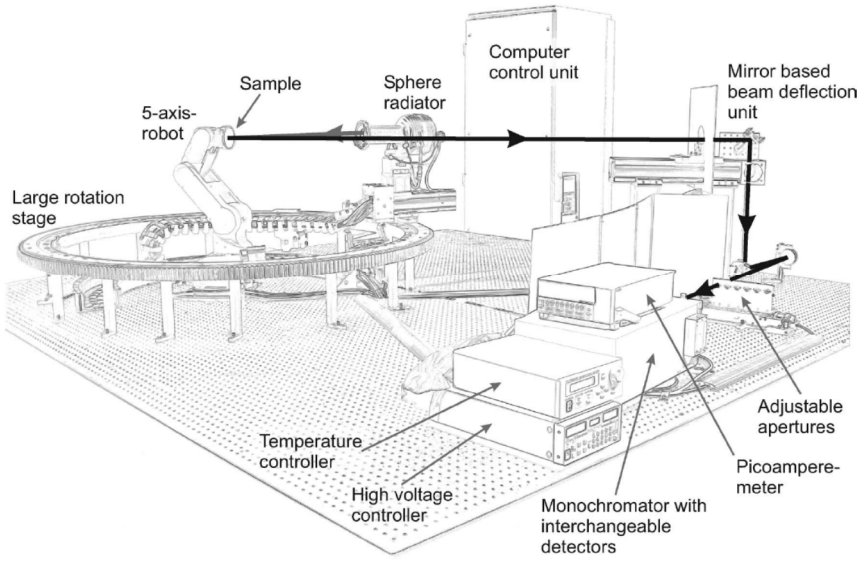



Figure 10 : Schéma de principe du Robot-based gonioréflectomètre de la PTB.
En arrière plan, l'illumination mobile montée sur la couronne, et le robot porte échantillon. Au premier plan, la chaine de détection et de sélection de longueur d'onde. La lumière provenant de la sphère éclaire l'échantillon, celui-ci la réfléchie dans la direction de la détection où un monochromateur procède à la sélection d'onde. Les détecteurs sont échangeables au niveau de la sortie du monochromateur selon la longueur d'onde de travail [50].

- Etude du gonioréflectomètre 2 (ARGon3)

Ce gonioréflectomètre a été développé après le premier. On peut donc s'attendre à ce qu'il soit plus abouti.

L'illumination est assurée par deux sources QTH de 50 W et 400 W montées dans des sphères intégrantes combinées à des filtres pour reproduire au mieux l'illuminant D65 de la CIE de température de couleur proximale de 6500 K. L'utilisation de l'une ou l'autre des lampes dépend de l'application. En effet lors de l'utilisation de la caméra en détection, la PTB utilise la lampe à 50 W pour éviter la saturation du CCD [52]. Le support d'échantillon est identique à celui du gonioréflectomètre 1 (robot-based gonioréflectomètre).

Pour la détection, deux caméras sont utilisées. La première dédiée à la mesure spectrale de la lumière réfléchie, elle est constituée d'une barrette CCD de 1036 pixels associée à un réseau

de diffraction. La barrette CCD ne couvre qu'une largeur spectrale de 290 nm et est insuffisante pour mesurer la lumière réfléchie dans tout le spectre du visible en une seule fois. La PTB utilise le réseau de diffraction pour régler la longueur d'onde de 500 nm au centre de la barrette ce qui permet à l'aide d'un premier cliché de couvrir la zone 500 $\pm$ (290/2) nm, puis décale le réseau pour placer la longueur d'onde de 700 nm au centre de la barrette ainsi un second cliché couvre la zone 700 $\pm$ (290/2) nm. Ces deux clichés permettent de couvrir la zone spectrale comprise entre 360 nm et 830 nm avec une zone de recouvrement de 90 nm. Le temps de mesure pour un spectre complet est d'environ 2 min.

La deuxième camera est un CCD de 1364×1030 pixels. Elle est utilisée pour des études de variations spatiales de la luminance réfléchie par l'échantillon. Cette caméra permet de réaliser des mesures de luminance L(x,y) sur une zone observée sur l'échantillon de 38 mm × 28 mm [9]. Compte tenu de la résolution de la caméra cela donne une résolution spatiale de $7{,}57 \cdot 10^{-4}$ mm/pixel.

La Figure 11 montre un schéma général du gonioréflectomètre de la PTB.

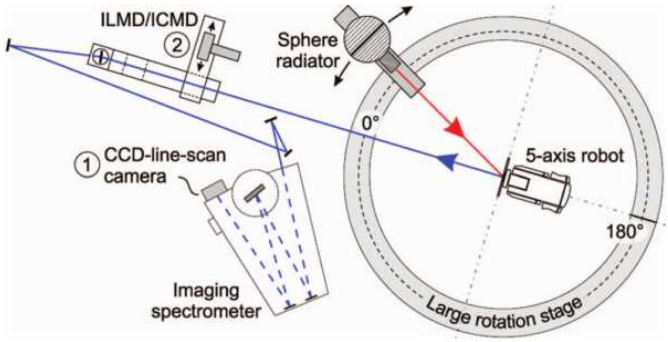



Figure 11 : Schéma représentatif du gonioréflectomètre ARGon3 de la PTB.
On voit les trois parties importantes du gonioréflectomètre de la PTB. A droite, la couronne avec à son milieu le robot qui porte l'échantillon. La lumière sort de la sphère montée sur la couronne et vient éclairer l'échantillon. Une étude spectrale est possible via le monochromateur et le CCD (1). Une étude spatiale est possible grâce à la caméra (2) qui vient se mettre sur le faisceau par translation [52].

Cette détection se justifie pleinement pour les études d'effets visuels tels que l'éclat ou le scintillement (Sparkle ou graininess) des surfaces complexes quasiment impossible à mesurer à l'aide de la BRDF. En effet, utiliser une mesure de BRDF reviendrait à effectuer une mesure sur une surface infinitésimale puis se décaler d'un angle infiniment petit pour mesurer la surface adjacente jusqu'à balayer l'intégralité de la surface. Cette technique n'est pas très judicieuse et demande un temps de mesure énorme si toutefois on arrive à éclairer et/ou observer des surfaces aussi petites. En revanche, un cliché fait avec une caméra CCD permet d'avoir une valeur de la luminance en x, y pour chaque point de la surface. Ces études sont très utilisées aujourd'hui dans la peinture automobile ou dans la cosmétique.

## 1.2 NIST (National Institute of Standards and Technology)

Le NIST possède également deux instruments de mesure de BRDF. Le premier est un goniospectromètre nommé STARR (Spectral tri-function automated reference réflectometer) Le STARR est le premier équipement ayant réalisé une mesure absolue de BRDF. C'est l'étalon national de mesure de BRDF pour les Etats Unis d'Amérique [53]. Le second développé en 2004 a été conçu pour répondre à la demande croissante de mesure de BRDF hors plan d'incidence. Ce dernier s'appuie sur un équipement plus ancien qui est le colorimètre de référence du NIST [54]. La partie illumination est commune aux deux équipements.

- Etude du gonioréflectomètre 1 (STARR) :

L'illumination est faite à l'aide de deux sources différentes pour couvrir le domaine spectral de l'UV-VIS-IR entre 200 nm et 2500 nm. La première source est une lampe quartz-tungstène-halogène (QTH) de 100 W utilisée pour le domaine de longueurs d'onde de 400 nm à 2500 nm. La deuxième source est une lampe Xe de 150 W utilisée pour les longueurs d'onde comprises entre 200 nm et 400 nm [53]. A la sortie du boitier pour éviter les problèmes de lumière parasite et d'ordres supérieurs, la lumière est filtrée par un des cinq filtres séparateur d'ordre montés sur une roue. Une lentille focalise le faisceau sur l'entrée du monochromateur. En sortie du monochromateur, le faisceau lumineux est dépolarisé et collimaté, sa taille est d'environ 14 mm et sa divergence est inferieur à 1°. Un second détecteur est installé pour contrôler les variations de la lampe. L'ensemble constituant la source et le monochromateur est monté sur une table fixe stabilisé sur coussin d'air pour limiter les variations.

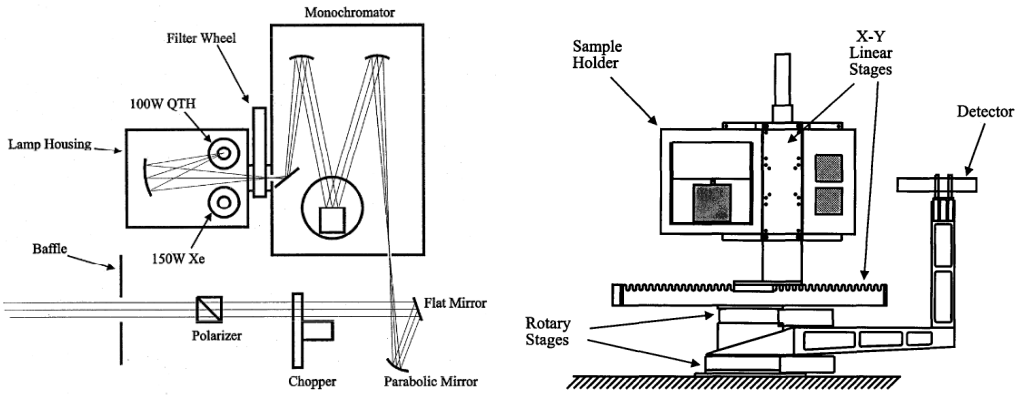



Figure 12 : STAAR, le gonioréflectomètre du NIST.
A gauche la partie illumination avec les deux sources QTH et Xénon et le monochromateur. A droite, le porte échantillon et le bras mobile pour la détection [53].

Le support d'échantillon est monté sur un système de positionnement linéaire qui offre une translation selon l'axe horizontal *x* et vertical *y*. Le système de déplacement en (*x, y*) est lui-même monté sur un étage rotatif, de sorte que l'ensemble (translations et rotation) permet de positionner l'échantillon en vue du faisceau incident et d'effectuer le balayage de la surface de l'échantillon, ou de mettre l'échantillon hors du faisceau pour la mesure du flux incident. La rotation de l'échantillon n'est possible qu'autour de l'axe vertical. Le STARR ne peut réaliser des mesures de BRDF que dans le plan de l'illumination.

Du côté de la détection, un miroir parabolique focalise le flux réfléchi sur l'un des trois détecteurs interchangeable manuellement. Le premier détecteur est une photodiode en silicium qui détecte dans le domaine spectral comprise entre 200 nm à 1100 nm. Le deuxième est une photodiode en germanium (Ge) refroidie à -20°C montée à l'intérieur d'une sphère et couvre la gamme comprise entre 800 nm et 1600 nm. Enfin une photodiode en arséniure d'indium (InAs) refroidie couplée avec une sphère intégrante détecte dans la bande comprise entre 900 nm et 2500 nm. Le bras de détection peut tourner de 360° autour de l'échantillon.

- Etude du second instrument du NIST :

Ce gonioréflectomètre utilise deux sources différentes, une source xénon et une source QTH. Le faisceau lumineux provenant de la source passe par une roue à filtres identique à celle du STARR, et rentre dans un monochromateur à double réseau. Ce monochromateur possède une résolution de 0,05 nm dans la bande spectrale comprise entre 360 nm et 780 nm. Un miroir de renvoi dirige le faisceau vers l'ensemble support d'échantillon-détection qui est un ensemble indépendant situé ailleurs dans la pièce [55] comme le montre la Figure 13.

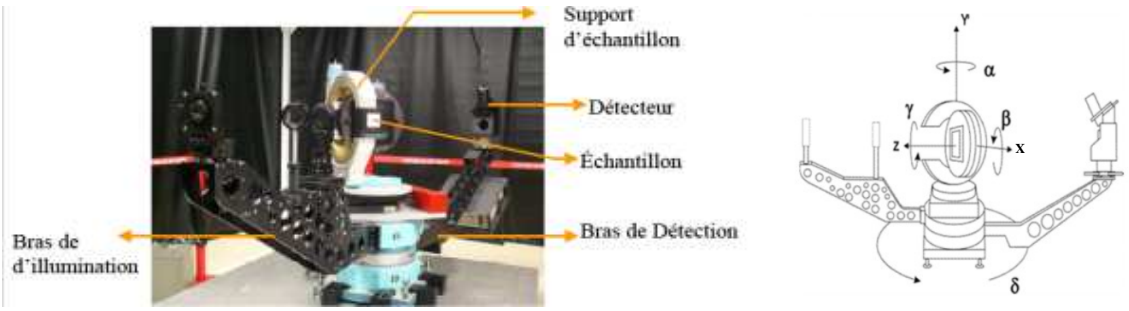



Figure 13 : Le gonioréflectomètre du NIST constitué d'un bras fixe pour l'illumination un bras mobile pour la détection et d'un support d'échantillon.

Le support d'échantillon possède quatre degrés de liberté qui consistent en trois rotations autour des trois axes X, Y et Z et une translation le long de l'axe X qui permet de déplacer l'échantillon hors du faisceau pour la mesure du flux incident.

Le système de détection se trouve sur l'extrémité d'un bras mobile qui présente un mouvement de rotation de 360° autour de l'échantillon. Un miroir parabolique focalise le flux réfléchi sur le détecteur. Le gonioréflectomètre du NIST dispose de trois systèmes de détection :

- Une photodiode en silicium pour des mesures classiques dans le domaine 200-900 nm.
- Un spectroradiomètre doté d'une barrette CCD pour des mesures avec une source blanche. Ce détecteur réduit fortement le temps de mesure permettant d'effectuer un spectre visible en un seul cliché.
- Une caméra CCD utilisée en combinaison avec une source blanche ou monochromatique permet de prendre en photo la surface étudiée lorsque celle-ci est de texture complexe, notamment pour les études du scintillement.

## 1.3 NPL (National Physical Laboratory)

Le NPL laboratoire national de métrologie anglais dispose d'un gonioréflectomètre ancien qui lui sert de référence pour la mesure de la BRDF.

L'illumination est assurée par une lampe tungstène halogène de 250 W, associée à un réflecteur et un système optique pour collimater le faisceau sur l'échantillon. L'illumination est montée sur un bras mobile qui offre un degré de liberté [45].

Le porte échantillon est construit de manière à porter des échantillons de 105 mm² ; il est fixé à l'extrémité d'un bras motorisé dont la translation verticale, la translation horizontale et la rotation sont contrôlées.

Le NPL utilise un spectroradiomètre commercial (CS-1000). Sa bande spectrale est comprise entre 380 nm et 780 nm avec un pas de 1 nm. La détection est montée sur un bras lui permettant une rotation de 270° autour de l'échantillon. Les angles de mesure sont donc limités entre 0° et 75° [45]. Outre le CS-1000, le NPL utilise une caméra couleur montée sur le même bras de détection à 10° du spectroradiomètre. Une première mesure est effectuée à l'aide du spectromètre puis le bras de détection tourne de 10° plaçant la caméra dans les mêmes conditions que la première mesure. Un cliché de la surface étudiée est fait et les données sont comparées. Cette méthode est pratique pour l'étude de l'effet paillette et l'effet métallisé, impossible à caractériser avec la BRDF.

L'originalité de ce gonioréflectomètre vient de la couronne ouverte qui facilite l'accès aux optiques lors des réglages. Par contre, cette couronne est partagée entre l'illumination et la

détection ce qui limite la possibilité d'illumination aux angles compris entre 0° et 75° pour une détection comprise entre 0° et 270°.

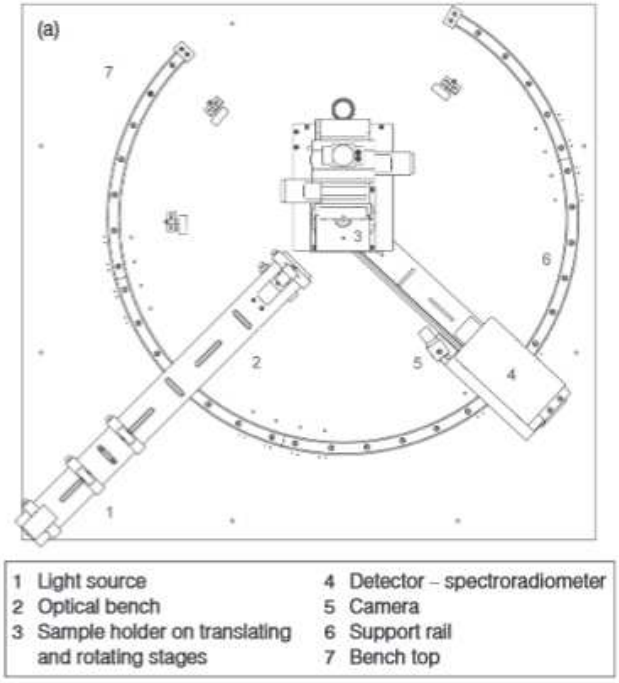



Figure 14 : Le goniospectrophotomètre du NPL [45].
La source (1) est montée sur un bras (2). La détection est composée du spectroradiomètre (4) et d'une caméra (5). L'ensemble est monté sur un deuxième bras mobile. Les deux bras partagent la même couronne et tournent autour du porte échantillon (3).

## 1.4 CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Cientificas)

Le gonioréflectomètre du CISC, laboratoire national de métrologie d'Espagne, a une construction qui lui permet de réaliser des mesures en réflexion pour la BRDF et en transmission pour la BTDF. Les mesures absolues sont restreintes au domaine du visible [46]. Le schéma de principe est proposé sur la Figure 15.

L'illumination est assurée par une lampe Xénon de 150W, dont le spectre est compris entre 185 nm et 2000 nm. Cette lampe est munie d'un collimateur intégré qui limite la lumière parasite en sortie du boitier.

Le faisceau est ensuite collimaté proprement avec une divergence de 1° à l'aide d'un système optique de collimation. Un diaphragme (P1) monté derrière la première lentille (L1) sert à modifier la taille du faisceau. Une lame semi-transparente (S) placée dans le faisceau renvoie une partie du flux vers un détecteur (Mon) qui permet de contrôler la stabilité du flux incident. Le diaphragme (P2) placé devant la lentille (L2) sert d'une part à diminuer la lumière parasite et d'autre part à modifier l'angle solide d'illumination. Une roue (FW) à densités neutres permet de régler l'intensité du faisceau. Le faisceau est dévié grâce à un périscope constitué

d'un miroir et d'une lame semi-transparente (BS) vers l'échantillon. L'utilisation d'une lame semi-transparente permet de pouvoir continuer la mesure même dans la direction d'illumination grâce à la retroréflexion, là où généralement la mesure est impossible car le détecteur passe devant la source.

Le support d'échantillon est un robot monté au centre de la couronne. Il offre six degrés de liberté dont trois translations selon les axes X, Y, Z et trois rotations autour de ces axes. Le pas de déplacement angulaire annoncé est de 0,0002°[46]. Les outils permettant de vérifier cette valeur sont en cours de développement.

La détection est faite à l'aide d'un spectroradiomètre (CS-2000 A : Konica-Minolta) qui couvre le visible (entre 380 nm et 780 nm). Il possède trois ouvertures angulaires (0.1°, 0.2° et 1°). La résolution spectrale du détecteur CCD est de 0.9 nm/pixel. La détection est montée sur une couronne de 1,03 m de diamètre.

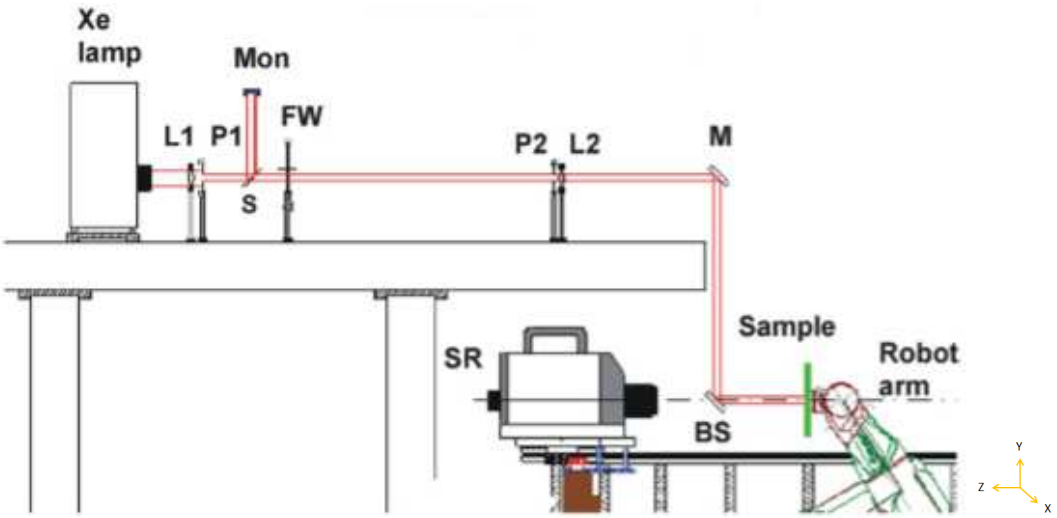



Figure 15 : Le gonioréflectomètre du CSIC [46] .
Le CSIC utilise une illumination collimatée faite à l'aide d'un système optique à base de lentilles (L1, L2) et de diaphragmes (P1, P2). Un périscope qui se termine par une lame semi-transparente (BS) renvoie le faisceau sur l'échantillon monté sur le robot. Le détecteur est un spectroradiomètre commercial (CS2000.Minolta).

Le gonioréflectomètre du CSIC réalise des mesures de BRDF absolues dans et en dehors du plan d'incidence grâce au robot. Son originalité vient principalement de l'utilisation d'une lame semi-transparente et d'un périscope ce qui permet d'effectuer des mesures dans la direction d'illumination. L'utilisation d'un spectroradiomètre bien qu'elle présente un gain de temps considérable, limite à la fois la gamme et la résolution spectrale.

## 1.5 Université Paris 7 (Institut de physique du globe) :

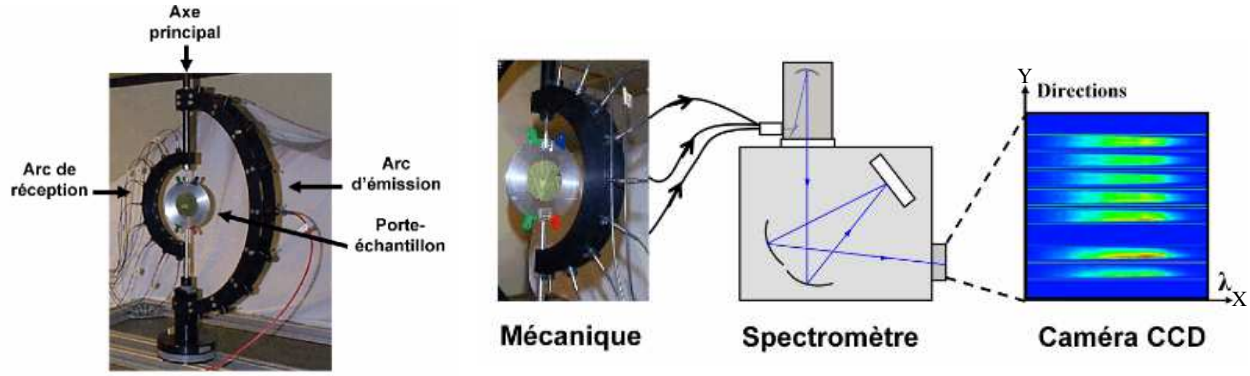
Le gonioréflectomètre de l'IPG développé dans l'ex-laboratoire environnement et développement, a été conçu pour des mesures de réflexion, de transmission et d'absorption des feuilles dans le domaine du visible et du proche infrarouge (domaine spectral entre 400 nm et 900 nm). Il est constitué de deux arcs de rayon de courbures différents tournant autour d'un axe vertical commun. Un arc sert à l'illumination, l'autre à la détection. Au centre des arcs, se trouve le support d'échantillon monté verticalement (Figure 16)[56].

La source utilisée pour l'illumination est une lampe halogène émettant dans le visible et l'infrarouge. En sortie de la lampe, le faisceau est injecté dans une fibre optique se terminant par une lentille convergente qui collimate ou focalise le faisceau sur l'échantillon. Le diamètre du faisceau d'illumination est de 7 mm dans le cas d'un faisceau collimaté. L'ensemble lentille et fibre est fixé sur l'un des sept trous d'un demi-arc métallique mobile d'émission.

Le support d'échantillon est horizontal, sa rotation autour de l'axe du gonioréflectomètre combinée à la mobilité du demi-arc d'émission permet de maitriser l'angle d'illumination en zénith et en azimut. Une fois cet angle réglé, le support d'échantillon est fixé à l'arc d'émission et les deux tournent au même temps pour réaliser les différents angles d'observation pour une direction d'éclairement fixe.

La détection est constituée d'un second demi-arc de réception muni de neufs trous séparés d'un angle de 20° les uns par rapport aux autres. Ces trous servent à fixer les neuf fibres de détection. Dans la pratique, seuls les sept trous centraux sont utilisés, les deux autres trous situés aux extrémités représentent des angles trop rasants. La lumière provenant de l'échantillon est recueillie par les fibres optiques puis acheminée jusqu'à l'entrée d'un coupleur à miroir. A la sortie du coupleur, le spectromètre muni d'un capteur CCD (512 x 512 pixels) refroidi effectue la mesure [56].

Le spectromètre décompose la lumière provenant de chacune des fibres en fonction de la longueur d'onde sur un axe X. En sortie, la caméra fournit une image matriciel en (X, Y). Sur l'axe X, on trouve alors la décomposition spectrale de la lumière en fonction de la longueur d'onde pour une fibre donnée, tandis que sur l'axe Y, on trouve la position des fibres (de 1 à 7, voir Figure 16 (b)).




(a) (b)

Figure 16 : Le gonioréflectomètre de L'IPG.
(a) : L'échantillon est au milieu des deux arcs. A droite l'arc d'émission muni de neuf trous de montage de fibre optique. A gauche l'arc de détection avec les neufs trous. En (b), l'arc de réception avec les différentes fibres optiques, qui servent à collecter le signal et à le renvoyer à l'entrée d'un spectromètre qui procède à la décomposition du faisceau. En sortie du spectromètre, le CCD affiche la décomposition spectrale de la lumière provenant de chaque fibre sur l'axe des x et la direction d'observation en y.

Si ce gonioréflectomètre ne présente pas les caractéristiques métrologiques que nous recherchons, il n'est pas moins intéressant pour plusieurs raisons. D'une part l'utilisation de fibres optiques permet une réduction de l'encombrement que nous ne retrouvons pas dans des gonioréflectomètres classiques. D'autre part, le couplage d'une caméra avec un réseau et des fibres permet en un seul cliché d'obtenir l'information spectrale pour autant de direction d'observation qu'il n'y a de fibres présentes en détection, ce qui réduit le temps de mesure.

## 1.6 Le gonioréflectomètre de l'ONERA (Office National d'études et de Recherches Aérospatiales)

Le gonioréflectomètre de l'ONERA du département "Optique théorique et appliquée" est transportable, adapté à des mesures tant à l'extérieur qu'à l'intérieur d'un laboratoire. Tout comme les autres gonioréflectomètres il est constitué de trois parties : un premier bras pour porter la source, un second bras pour la détection et une couronne sur laquelle sont fixés les deux bras (Figure 17).

Côté illumination, la source utilisée est un projecteur de 650 W en QTH (choisie pour son uniformité et son domaine spectral visible et infrarouge.

Côté détection, il s'agit d'un système qui couvre le domaine spectral de 420 nm à 950 nm, avec une résolution spectrale de 3 nm. La lumière réfléchie est collectée par un objectif à deux focales qui permet de faire varier la taille de la surface observée. Un ensemble de 59 fibres optiques d'une longueur de 5 m, assure le cheminement du faisceau vers le spectromètre.

En sortie du spectromètre, l'ONERA utilise une camera CCD de 1024 x 256 pixels refroidie à

-30°C.

Le demi-arc soutenant la source est fixé sur le support, tandis que le demi-arc soutenant la détection est monté sur la couronne. La source se déplace d'un angle zénithal qui varie de 0 à 60° sur le demi-arc, tandis que le détecteur se déplace sur le demi-arc opposé avec la même plage d'angles en plus de sa rotation autour de l'échantillon d'un angle zénithal compris entre 0° et 180°[57].

Ce gonioréflectomètre n'a pas le niveau métrologique que nous recherchons (limitation angulaire, pas de mesure directe du flux incident). Il en n'est pas moins intéressant car il présente une construction qui permet de réaliser des mesures sur des surfaces horizontales. Ceci peut être particulièrement pertinent dans le cas d'études sur les textiles, qui supportent parfois assez mal d'être tendus verticalement. Même remarque pour l'étude des crèmes ou liquides ou de certaines denrées alimentaires qui pourraient un jour être étudiées dans notre laboratoire.

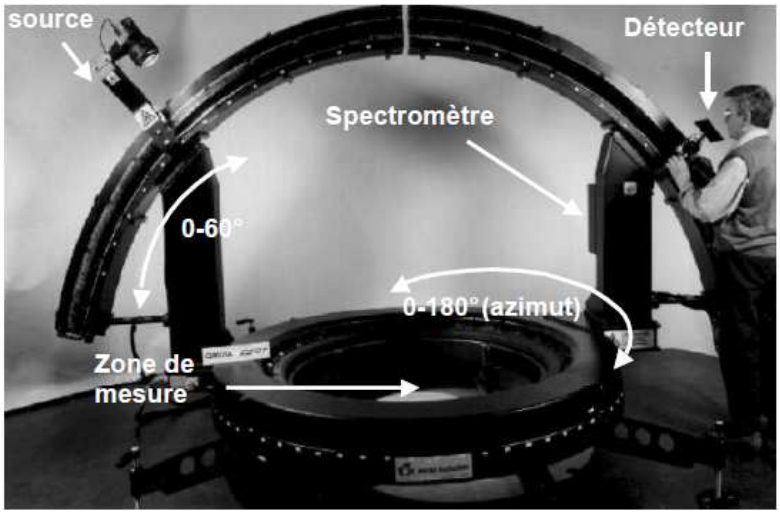



Figure 17 : Le gonioréflectomètre de l'ONERA [57].
L'échantillon est au centre de la couronne, la source est montée sur un premier arc fixe lui permettant de se déplacer d'un angle zénithal compris entre 0 et 60°. La détection est montée sur le second demi-arc mobile monté sur la couronne. Le détecteur se déplace sur le demi-arc opposé avec la même plage d'angle en plus de sa rotation autour de l'échantillon d'un angle zénithal compris entre 0° et 180°.

## 2.7 Le gonioréflectomètre du laboratoire de planétologie de Grenoble

Ce dispositif a été développé au sein du laboratoire de planétologie de Grenoble – Centre National de la Recherche Scientifique – pour mesurer la BRDF de différents types de roches pour la bande spectrale comprise entre 310 nm à 4800 nm [58] . Le banc est composé de deux bras rotatifs, l'un pour l'illumination et l'autre pour la détection et un support d'échantillon.

L'illumination est assurée par une partie fixe comportant une lampe QTH de 250 W, un monochromateur couplé en sortie à une fibre optique. Le boîtier de la lampe inclut une photodiode stabilisée en température, qui mesure en permanence la lumière en sortie de lampe et ajuste l'alimentation afin de compenser toute variation d'intensité lumineuse. La longueur d'onde est sélectionnée spectralement par le monochromateur dont la gamme spectrale est comprise entre 220 et 9000 nm. A la sortie du monochromateur, les ordres supérieurs sont filtrés. La lumière restante est collectée par un miroir sphérique et focalisée à l'entrée d'une fibre optique.

La fibre optique achemine le faisceau jusqu'au support de fibre montée sur le bras d'illumination mobile. A la sortie de la fibre, le faisceau est polarisé puis collimaté sur l'échantillon avec une divergence inferieur à 1° à l'aide d'un miroir sphérique. La taille du faisceau d'illumination est de 200 mm.

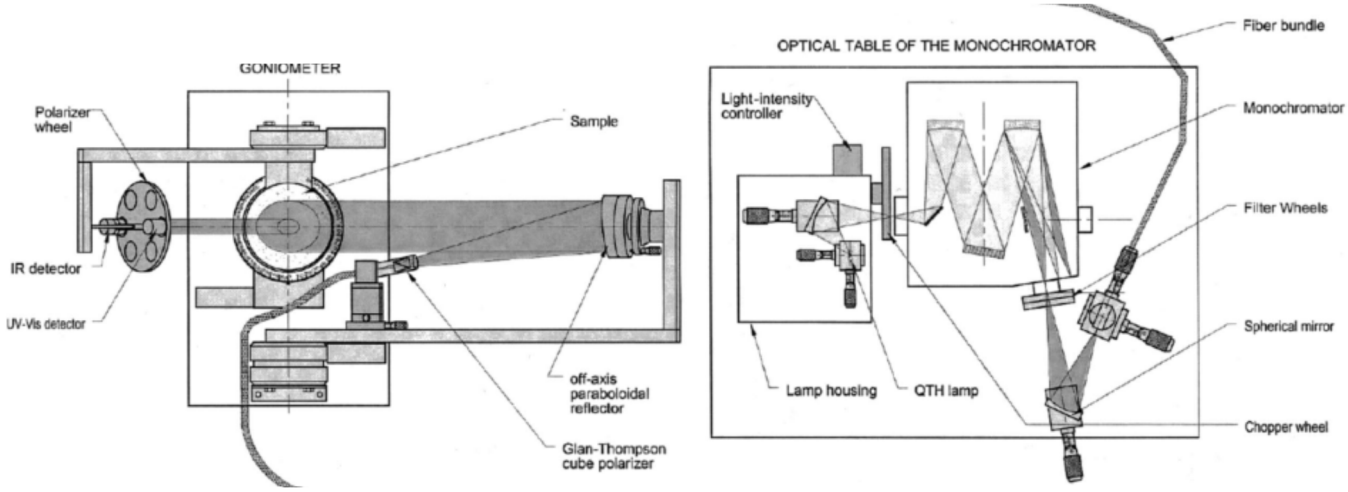



Figure 18 : Le gonioréflectomètre de Grenoble [58].
A droite, la partie illumination avec la source QTH, le monochromateur et l'optique de focalisation vers la fibre. A gauche, la partie mécanique composée de deux bras rotatifs permettant de générer les angles d'illumination et d'observation et les deux détecteurs placés sur une roue permettent de couvrir la gamme 185-4800 nm.

Un bras consacré à l'illumination assure la rotation autour de l'échantillon avec un angle zénithal $\theta_i$ compris entre 0° et 90° et une résolution de 0,1°. Le bras de la détection offre deux

degrés de liberté (rotations) : l'angle zénithal $\theta_R$ compris entre 0° et 90° et l'angle azimutal $\varphi_R$ compris entre 0° et 180°.

Le système de détection est composé de deux détecteurs. Une photodiode au silicium couvre la bande spectrale comprise entre 185 nm et 1200 nm et un détecteur photovoltaïque (InSb) refroidi à 80 K couvre la bande spectrale comprise entre 800 nm et 4800 nm.

A nouveau, l'utilisation d'une fibre optique permet de réduire la mécanique en rotation pour l'illumination de l'échantillon. Bien que relativement simple dans sa construction, ce gonioréflectomètre couvre la gamme UV-VIS-IR avec seulement une lampe, deux détecteurs et une détection synchrone, ce qui est très encourageant. La mise en forme des faisceaux est réalisée par des miroirs sphériques utilisés hors d'axe et est compétitive du point de vue angulaire avec les gonioréflectomètres précédents. Le contrôle de l'intensité lumineuse de la source permet de limiter les variations à moins de 0,1% pendant 24 heures.

## 2.7 L 'EZ-Contrast, le diffusomètre d'ELDIM

Pour finir la bibliographie des différents instruments de mesure de BRDF, nous présentons ici un instrument commercial qui utilise une toute autre approche, L'EZ-Contrast, fabriqué par la société Eldim.

Cet équipement n'est pas initialement dédié à la mesure de la BRDF des échantillons. Il a été développé pour l'étude de la répartition directionnelle de la luminance lumineuse émise par les écrans. Néanmoins en utilisation détournée, il peut fournir une mesure approchant la BRDF.

L'EZ-contrast est un équipement compact. L'optique d'illumination et de détection sont embarquées dans le même boitier. Le fonctionnement s'appuie sur le principe de l'optique de Fourier [59]. Une vue en coupe de l'équipement est proposée sur la Figure 19.

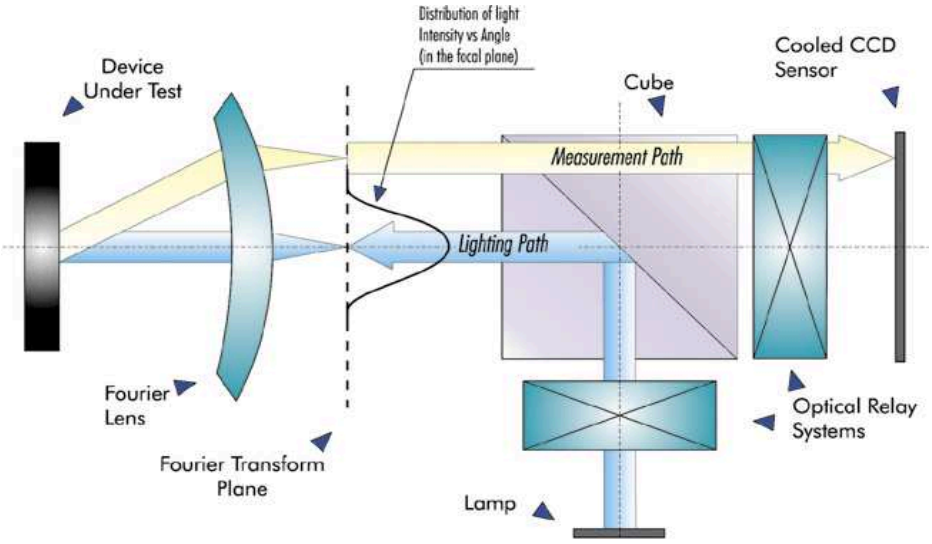



Figure 19 : Schéma de principe de l'EZ contrast [44]
La détection (jaune) et l'illumination (bleu) utilisent le principe de l'optique de Fourier. Un cube séparateur permet d'illuminer l'échantillon. Deux systèmes optiques permettent de régler le plan de Fourier sur un CCD pour la détection et l'extrémité d'une fibre optique mobile pour l'illumination.

La détection s'appuie sur la combinaison d'une optique de Fourier et d'un CCD refroidi. Le principe de l'optique de Fourier est que tous les rayons réfléchis parallèlement les uns par rapport aux autres dans une direction donnée, par exemple $\theta_R$, après passage dans la lentille de Fourier de focale $f_0$ , se retrouvent focalisés en un point $x_R$ dans le plan focal. La relation entre la coordonnée $x_R$ du point de focalisation et l'angle de zénith $\theta_R$ est donnée par :

$$x_R = f_0 \tan \theta_R \tag{29}$$

Une optique de Fourier permet de passer d'une distribution angulaire de la lumière réfléchie dans une direction ($\theta_R$, $\varphi_R$) à une distribution planaire en (X, Y). ELDIM met en œuvre ce principe dans l'EZ-Contrast au prix d'un exercice optique élaboré. L'optique de Fourier est réalisée par un jeu de plusieurs lentilles qui forme un oignon (Figure 20) pour ramener la lumière réfléchie aux angles rasants dans le plan focal. La dernière lentille est enveloppante et doit être placée à moins d'un millimètre de la surface à mesurer.

Un second système optique permet d'imager ce plan de Fourier sur le capteur CCD (512 x 512 pixels). L'analyse de l'image capturée par le CCD permet de mesurer la répartition de la luminance $L(x_R, y_R)$ pour n'importe quelle direction de réflexion du demi-espace jusqu'à des zéniths de 88°, en un seul cliché. Ceci présente un gain de temps considérable.

L'information spectrale est obtenue en plaçant devant le CCD une roue à filtres contenant plusieurs filtres colorés ou interférentiels. L'utilisation de ces filtres ne permet pas de tracer un spectre très fin mais est suffisante pour une étude colorimétrique.

Un diaphragme placé devant la roue à filtres permet de définir la surface mesurée afin d'éviter les problèmes de vignettage.

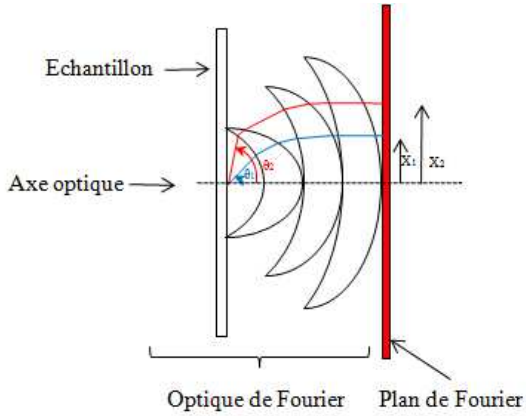



Figure 20 : Un exemple d'optique de Fourier.
Le système de détection est une combinaison de lentilles à rayon croissant qui collectent les rayons provenant de l'échantillon [59].

Pour l'illumination, l'EZ-Contrast utilise une lampe à arc Xénon de 125 W qui correspond grossièrement à l'illuminant D65 de la CIE. La lumière est acheminée à l'aide d'une fibre optique jusqu'à une sphère intégrante dans laquelle un trou de 100 µm de diamètre est percé. Cette étendue induit une dispersion du pinceau lumineux qui éclaire l'échantillon de 0,33°.
La source est positionnée sur le côté de l'équipement (Figure 19). Un système de relais optique combiné à un cube séparateur de faisceau permet de conjuguer le plan dans lequel se déplace la source avec le plan de Fourier de l'appareil.
En déplaçant la source dans ce plan conjugué, on illumine l'échantillon par un faisceau lumineux parallèle dont l'angle d'incidence, en zénith et en azimut dépend des coordonnées $x_i$, $y_i$ de la source dans le plan de Fourier d'illumination.
Un diaphragme est placé devant le plan de Fourier d'illumination pour définir le champ. Le diamètre maximal du faisceau en incidence normale est de 2 mm.

L'EZ-contrast mesure des luminances mais ne permet pas de mesurer l'éclairement. En cela, il ne permet pas d'acquérir une mesure de BRDF absolue. D'autre part, l'information spectrale est limitée au nombre et au type de filtres utilisés, ce qui n'est pas acceptable pour des mesures de références. L'optique de l'EZ-Contrast est très enveloppante et est placée très proche de l'échantillon. Cette position impose de limiter le diamètre d'illumination à 2 mm en incidence normale. Cependant, ces limitations ne sauraient effacer le formidable atout de cet équipement qui consiste à mesurer, en un seul cliché (soit en moins de deux minutes), la répartition de la luminance dans tout le demi-espace, avec une résolution angulaire de 0.4°, soit un peu plus de deux millions de points de mesures.

# 3. Etude et comparaison

Un gonioréflectomètre est systématiquement constitué de trois éléments : une source lumineuse, un support d'échantillon et un récepteur. Les instruments cités dans ce chapitre peuvent être classés en deux groupes :

- Des instruments dits métrologiques dont la conception est orientée pour la mesure de BRDF absolue des matériaux et qui servent d'étalon primaire dans leur pays (voir PTB1, NIST, NPL, CSIC).
- Des instruments dont la réalisation répond à une application qui requiert une acquisition de BRDF, souvent partielle (minéralogie pour Grenoble, végétale pour IPG)

Même si notre but est de concevoir un instrument purement métrologique, il a été intéressant d'étudier la conception adoptée par un grand nombre d'instruments de la catégorie appliquée car ils présentent souvent des astuces pratiques qui sont intelligentes et instructives.

Nous proposons maintenant de confronter ces différents instruments dans une étude comparative. Nous nous intéresserons aux points suivants :

- **Type de mesure à réaliser :**

La mesure de la BRDF peut être absolue ou relative. C'est souvent ce critère qui va déterminer la vocation de l'équipement. Des mesures absolues nécessitent l'utilisation d'un gonioréflectomètre de référence, tandis que pour des mesures relatives on adopte un gonioréflectomètre appliqué.

En effet, réaliser une mesure de BRDF absolue nécessite d'évaluer l'éclairement et la luminance de manière directe et traçable aux références métrologiques. Cette opération nécessite de disposer à la fois d'un luminancemètre et d'un illuminancemètre traçables aux références, ce qui est contraignant dans la pratique. La solution est finalement de réaliser un rapport entre le flux incident et le flux réfléchi tout en maitrisant la surface éclairée $S_I$, la surface observée $S_R$ et l'angle solide Ω de détection ou d'illumination.

Mais hormis les difficultés conceptuelles pour la maitrise de $S_I$, $S_R$, et Ω que nous verrons plus loin, le fait de devoir accéder au flux incident impose de prévoir une optique d'illumination qui entre dans la détection, et une conception mécanique qui permette de placer la détection en face de la source .

Pour ces deux raisons, la majorité des gonioréflectomètres de référence vont adopter des faisceaux incidents plutôt collimatés pour entrer dans la détection, et un support d'échantillon dans un plan vertical pour pouvoir passer derrière l'échantillon et mettre la détection face à l'illumination. C'est le cas du NIST, NPL et CSIC.

Un cas particulier est celui de la PTB, qui choisit d'utiliser une source lambertienne. Dans ce cas, c'est la détection qui est collimatée et qui regarde dans un cône très étroit qui entre dans la sphère de la source.

Les gonioréflectomètres appliqués quand à eux n'ont pas cette contrainte. Souvent l'accès à l'éclairement se fait en mesurant un échantillon blanc diffusant de type spectralon® ou sulfate de baryum ($BaSO_4$). Une valeur étalon est attribuée à cet échantillon. Le plus souvent, cette valeur s'appuie sur une hypothèse de lambertianité et on lui attribut une valeur $f_{R_{blanc}=1/\pi}$ pour chaque longueur d'onde et chaque direction d'observation pour une illumination à angle zénithal nul. Ceci peut mener à des erreurs de plus de 300% dans des configurations défavorables [60].

L'autre solution est de faire étalonner cette surface par un institut national de métrologie puis d'utiliser cette mesure pour calibrer l'appareil. La BRDF de la surface à étalonner est déduite des mesures successives sur l'échantillon et l'étalon, en faisant une hypothèse de linéarité du détecteur.

- **Domaine spectral**

Les sources utilisées sur les gonioréflectomètres étudiés sont des QTH, des arcs xénons et des sources plasma de type LDLS (Laser-Driven Light Source). Le choix de la source est lié au domaine spectral pour lequel on veut mesurer la BRDF. En effet les sources émettent dans des domaines spectraux différents. Les lampes xénon rayonnent dans l'ultraviolet et le visible, les lampes QTH rayonnent dans le visible et dans l'infrarouge. Les lampes LDLS, utilisée par la PTB, rayonnent dans tout le domaine ultraviolet visible et infrarouge. Elles sont en cela très intéressantes et d'ailleurs de nombreux laboratoires commencent à s'en équiper.

Le choix du détecteur est lié à la source. En effet si le domaine exploité est l'ultraviolet, les photomultiplicateurs sont les plus appropriés pour couvrir ce domaine. Pour le visible c'est bien évidemment un détecteur en silicium qui est utilisé. Enfin pour l'infrarouge, on trouve des détecteurs en Pbs (NIST), Ge (NIST), InGaAs (PTB), InSB (IPG).

Les sources LDLS, outre le fait qu'elles couvrent un large domaine spectral, présentent une exitance élevée. Ceci est une qualité importante car la plupart des équipements présentés requièrent une illumination collimatée qui impose de réduire considérablement la surface du

point lumineux. Dans ce contexte, une source à exitance élevée présente l'avantage de pouvoir conserver un flux incident élevé. Mais une telle source peut engendrer de la lumière parasite et la saturation du détecteur CCD.

- **Maitrise spectrale**

Comme nous l'avons vu au chapitre I, la BRDF est une grandeur radiométrique. Elle est fonction de la longueur d'onde λ d'où la nécessité d'utiliser un système pour la décomposition spectrale et la sélection de la longueur d'onde.

Pour des mesures de BRDF absolue, la sélection spectrale peut se faire de différentes manières :

1. Avec un monochromateur :

Cette méthode permet une maitrise totale de la longueur d'onde mais au prix d'un temps de mesure long, surtout si l'objectif de la mesure est de réaliser des spectres, ou de mesurer la couleur de l'échantillon.

L'autre contrainte vient du fait qu'un monochromateur est un instrument fragile qui supporte mal d'être déplacé. Pour cette raison, il sera toujours immobile dans le dispositif. Cela aura des répercussions sur la conception mécanique globale de l'instrument. Si l'on décide de faire la sélection spectrale en illumination, c'est l'illumination qui sera fixe et vice versa si on décide de faire la sélection spectrale en détection.

Parmi tous les instruments étudiés, seule la PTB a placé le monochromateur en détection. Les autres l'ont placé en illumination. Ceci se justifie essentiellement par le fait qu'il n'est pas évident, d'un point de vue optique, de faire rentrer tant de flux réfléchi par l'échantillon dans la fente d'entrée du monochromateur.

2. Avec un spectroradiomètre commercial ou l'association d'un réseau et d'un détecteur à CCD matriciel ou linéaire:

Le spectromètre est doté d'un réseau qui décompose la lumière avec une résolution connue, cette lumière est ensuite captée par la barrette ou la matrice CCD. Chaque pixel correspond à une longueur d'onde que l'on peut retrouver en connaissant le nombre et la taille des pixels (cf. Figure 21). Le spectromètre du CSIC, par exemple, présente une résolution de 0.9 nm/pixel dans la bande spectrale comprise entre 380 nm et 780 nm.

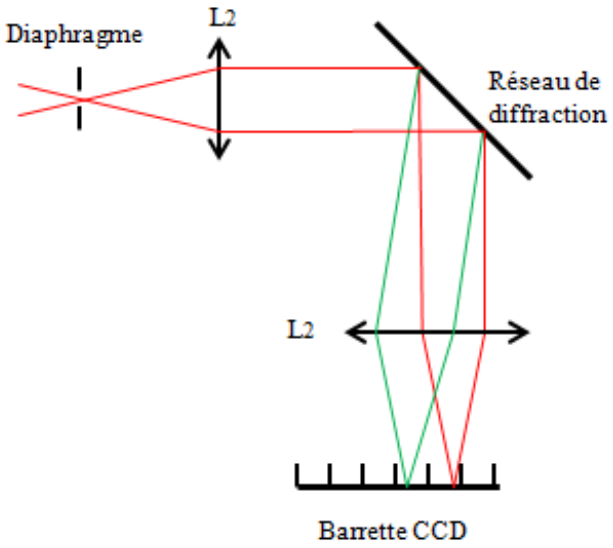



Figure 21 : Schéma représentatif du principe de fonctionnement du spectroradiomètre à CCD.
Le faisceau lumineux est diffracté par le réseau de diffraction. Les faisceaux monochromatiques sont ensuite détectés par une barrette CCD ou une matrice.

Cette méthode est intéressante en ce qui concerne le temps de mesure, car en un ou deux clichés, on mesure souvent un spectre complet. L'inconvénient de ce type de détection est que la sélection de longueur d'onde n'est pas aussi fine qu'avec un monochromateur. La résolution dépend du réseau et de la taille des pixels. Dans ce domaine, les valeurs classiques sont de l'ordre de 1 nm/pixel. On peut néanmoins augmenter la résolution en juxtaposant des clichés comme nous l'avons vu sur le gonioréflectomètre de la PTB.

A cette limitation spectrale vient s'ajouter les problèmes de non linéarité du CCD en flux sur lequel nous reviendrons dans le chapitre IV.

- **Choix de l'étendue géométrique**

Reprenons l'équation de la BRDF exprimée en rapport de flux

$$f_r(\theta_I, \varphi_I, \theta_R, \varphi_R, \Omega, \lambda) = \frac{L(\theta_R, \varphi_R, \lambda)}{E(\theta_I, \varphi_I, \lambda)} = \frac{\Phi(\theta_R, \varphi_R, \lambda)}{S_R\ \Omega \cos\theta_R} \cdot \frac{S_I}{\Phi(\theta_I, \varphi_I, \lambda)} \qquad (30)$$

L'équation (30), montre que la BRDF est fonction de la surface éclairée $S_I$, la surface observée $S_R$ et l'angle solide Ω. Le choix de la taille des surfaces $S_I$ et $S_R$ n'est pas anodin et va avoir des conséquences sur la conception générale du gonioréflectomètre. Il existe deux cas possibles :

- **Cas 1 :** cas d'une détection à champ large. La surface observée $S_R$ est supérieure à la surface éclairée $S_I$ (Figure 22).

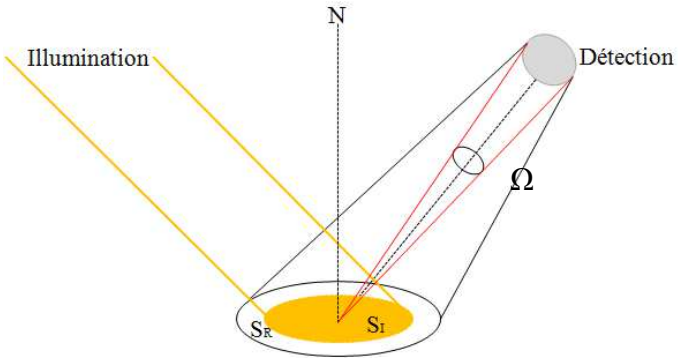



Figure 22 : Cas d'une surface éclairée $S_I$ (cercle jaune) inférieure à la surface observée $S_R$ (surface entouré du cercle noir).

Dans cette configuration la surface éclairée notée $S_I$ est incluse dans la surface observée quelque soit l'angle d'éclairement ou d'observation. Vu du côté de la détection, le champ est délimité par $S_I$ , à condition de faire le noir partout ailleurs.

Dans ce cas on peut écrire que: $S_I = S_R$, ce qui permet de simplifier l'équation de la BRDF à :

$$f_r(\theta_I, \varphi_I, \theta_R, \varphi_R, \Omega, \lambda) = \frac{\Phi(\theta_R, \varphi_R, \lambda)}{\Omega \cdot \Phi(\theta_I, \varphi_I, \lambda)} \quad (31)$$

Ainsi, la mesure de la BRDF ne dépend plus que du rapport de flux et de l'angle solide Ω, ce qui est un avantage non négligeable. Un autre avantage de cette configuration est qu'elle maximise le flux mesuré en intégrant tout le flux provenant de la surface éclairée quelque soit la direction d'illumination et d'observation. En revanche, comme la surface observée est plus large que la surface éclairée, la lumière provenant de l'ambiant et réfléchie par la partie non éclairée peut entrer dans la détection et affecter la mesure. Dans ce type de configuration, il est donc essentiel de réduire la lumière parasite au maximum en faisant le noir complet lors des mesures, et/ou d'utiliser une détection synchrone. Cette configuration est celle adoptée par le NIST.

- **Cas 2 :** La surface observée $S_R$ est incluse dans la surface éclairée $S_I$.

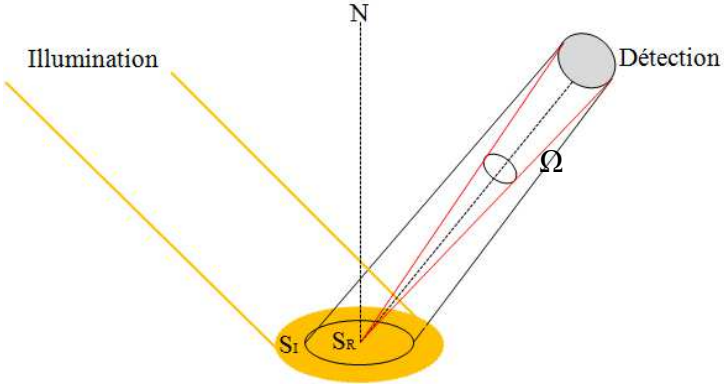
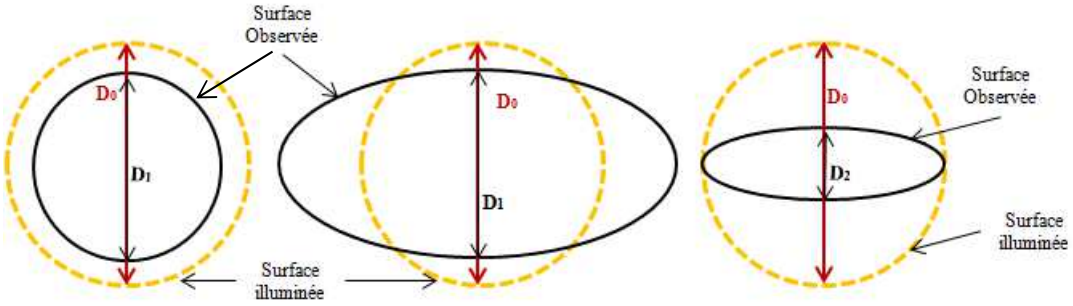



Figure 23 : Cas d'une illumination large $S_I$ (cercle jaune) et une observation à l'intérieur de la zone éclairée $S_R$ (surface entouré du cercle noir).

Dans cette configuration, c'est le champ de la détection qui limite la surface $S_R$ et qui est différent de $S_I$. L'équation (BRDF en flux) ne peut donc plus être simplifiée.

Ce mode de mesure permet de limiter fortement l'effet de la lumière parasite. Il permet aussi d'utiliser un luminancemètre commercial qui fonctionne avec un champ de détection fixe.

L'inconvénient de cette configuration est qu'elle est sujette au problème de vignetage dû à la déformation de la surface éclairée et/ou observée en fonction de l'angle d'observation, de l'angle d'illumination ou des deux simultanément (Figure 24).




(a) (b) (c)

Figure 24 : Illustration des problèmes de vignetage.
Dans les trois cas, l'éclairement est réalisé en direction normale, avec un diamètre $D_0$.
(a) détection dans la direction normale, avec un champ de diamètre $D_1$. $S_R$ est incluse dans $S_I$.
(b) détection dans la direction rasante. $S_R$ se transforme en ellipse et sort de $S_I$, on vignette.
(c) on diminue le diamètre du champ à la valeur $D_2 < D_1$. L'ellipse est à nouveau incluse dans $S_I$, on ne vignette plus, mais le flux détecté a diminué.

- La Figure 24 (a), montre le cas d'un éclairement et une observation circulaire à incidence normale à la surface de l'échantillon. Les deux surfaces ont la forme d'un disque avec la surface observée incluse dans la surface éclairée.

- La Figure 24 (b), montre le cas d'un éclairement circulaire à incidence normale à l'échantillon et une détection pour un angle zénithal $\theta_R = 60°$. La surface éclairée a la forme d'un disque de diamètre $D_0$. La surface observée qui devient elliptique avec un grand axe qui évolue en $D_1/\cos\theta_R$. A partir d'un certain angle $\theta_R$ , on a $D_1/\cos\theta_R > D_0$. L'ellipse sort de la zone observée. On vignette.

- La Figure 24 (c), pour corriger le problème de vignetage, il faut réduire le diamètre $D_1$ à une valeur $D_2$.

Une telle conception impose d'ajuster à chaque fois le champ d'observation en fonction de la direction d'illumination c'est le choix qu'ont fait la PTB, ELDIM, le CSIC et le NPL. Il est nécessaire de bien maitriser $S_I$, $S_R$ et l'angle solide Ω. Compte tenu des pertes de flux liées au

fait qu'on ne mesure que les rayons réfléchis par une partie seulement de la surface éclairée, il est nécessaire de disposer de beaucoup de flux.

- **Mécanique et maitrise des configurations**

Le Tableau 1, présente un récapitulatif de la mécanique utilisée, de la maitrise des configurations pour une BRDF complète ainsi que les avantages et les inconvénients pour les gonioréflectomètres de référence étudiés.

| | Mécanique et maitrise des configurations | avantages | Inconvénients |
|---|---|---|---|
| NIST | • Mesure complète de la BRDF grâce aux degrés de liberté :<br>➢ Du support d'échantillon : offre trois rotations et une translation.<br>➢ De la détection : offre une rotation supplémentaire.<br>• Accès au flux incident par translation de l'échantillon. | • Programmation facile.<br>• Précision de déplacement élevée.<br>• Les bras facilitent l'accès aux optiques. | • Taille d'échantillon limitée.<br>• Mesure de BRDF longue. |
| CSIC | • Mesure complète de la BRDF grâce aux degrés de liberté :<br>➢ Du robot: trois rotations et trois translations.<br>➢ De la détection : une rotation supplémentaire. | • L'utilisation d'une lame semi-réfléchissante et d'un périscope permet de réaliser des mesures en rétro-réflexion, ce qui est rare.<br>• Mesures rapides au niveau spectral grâce à l'emploi d'un spectroradiomètre. | • L'utilisation d'un spectroradiomètre limite la finesse spectrale. |
| PTB | • Mesure complète de la BRDF grâce aux degrés de liberté :<br>➢ Du robot : procure trois rotations et trois translations.<br>➢ L'illumination : une rotation sur la couronne. | • Vitesse de déplacement rapide.<br>• Adapté aux échantillons volumineux.<br>• résolution angulaire élevée. | • Nécessite des connaissances en robotique pour manier le robot.<br>• La couronne rend l'accès à l'échantillon moins |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | • Accès au flux incident en couchant le robot au sol. | | confortable. |
| NPL | • Mesure complète de la BRDF grâce aux degrés de liberté :<br>➢ Echantillon possède deux rotations.<br>➢ La détection et l'illumination possèdent chacune une rotation sur couronne ouverte.<br>• Accès au flux incident par translation de l'échantillon. | • Programmation facile.<br>• Résolution angulaire élevée.<br>• Accès à l'échantillon facile grâce à la couronne ouverte. | • La couronne partagée par l'illumination et la détection limite le nombre de configurations angulaires possibles.<br>• Vitesse de déplacement longue. |

Tableau 1 : Etude comparatifs de la mécanique adopté et la maitrise de la configuration, pour les gonioréflectomètres de référence.

- **Extras**

Les gonioréflectomètres que nous venons d'étudier s'ils ont tous une base commune qui permet de faire des mesures de BRDF, présentent en outre chacun une originalité. Nous en avons retenue quelques unes qui peuvent nous inspirer par la suite.

Une couronne ouverte comme celle du NPL permet un accès facile aux optiques et au robot.

Le périscope muni de la lame semi-transparente utilisé sur le gonioréflectomètre du CSIC permet d'éclairer et de détecter dans la même direction et d'étudier la retroréflexion des surfaces.

L'utilisation d'une caméra à haute résolution comme celle du NIST, de la PTB et du NPL pour l'étude des surfaces difficiles à caractériser pour une mesure de la BRDF ne peut qu'être bénéfique étant donnée la demande croissante de caractérisation optique de surface présentant des effets visuels sophistiqués.

L'utilisation d'une illumination blanche et un spectroradiomètre en détection (La PTB : Argon, CSIC, NPL) permet de faire des mesures appliquées rapidement.

# 4. Design général

Suite à l'étude bibliographique, nous avons réalisé le design de l'équipement. Nous avons décidé de construire un modèle hybride, qui alliera les déplacements mécaniques que l'on retrouve sur les gonioréflectomètres de références de la PTB, du NIST ou du NPL, la maitrise spectrale totale d'un monochromateur et une détection de type conoscopique qui réalise l'optique de Fourier et d'une caméra CCD. Les déplacements mécaniques nous offrirons la maitrise des angles d'illumination et d'observation et la partie conoscope permettra, en un seul cliché, de mesurer la luminance dans plusieurs milliers de directions d'observation très proches en un temps record.

Ce choix de gonioréflectomètre hybride nous impose d'emblée la géométrie globale. En effet, nous avons des éléments sensibles aux vibrations qui ne pourront pas être déplacés. Ces éléments sont :

- le monochromateur, qui se situe au niveau de la partie source et permet de maitriser la longueur d'onde pour les mesures spectrales.
- la détection conoscopique, qui se situe au niveau de la détection et qui sera sollicité pour les mesures à haute résolution spatiale.

Seul un élément pouvant rester fixe sur ce type d'équipement, nous sommes contraints de développer 2 lignes de mesure séparées. La première ligne, appelée par la suite **voie spectrale**, est la ligne dédiée à l'étude de la couleur. Elle requière une bonne résolution spectrale, et une résolution angulaire non critique. La partie sensible aux alignements est le monochromateur. Ce dernier sera donc posé sur une table optique fixe. La détection sera mobile.

La deuxième ligne, appelée **voie spatiale**, est la ligne dédiée à l'étude du brillant. Elle requière une haute résolution angulaire mais peut se passer d'information spectrale. La partie sensible est la détection. Sur cette voie, la détection sera posée sur une table optique fixe. La source sera mobile.

Les deux voies sont indépendantes. Elles pourraient presque fonctionner simultanément. Malheureusement, nous devrons nous interdire cela à cause de la lumière parasite, générée par les deux sources qui se retrouvent plus ou moins face à face.

Dans ce contexte, nous n'avons plus de choix pour le design général de l'équipement. Nous ferons le minimum en termes de déplacement de la source de la voie brillant et de la détection de la voie couleur, c'est-à-dire de les déplacer selon une seule rotation, dans un plan horizontal, afin qu'elle reste toujours en position verticale. C'est l'échantillon qui tourne autour de 3 axes pour garantir les 4 degrés de libertés requis. La figure suivante résume ces choix et permet de visualiser la structure générale de l'équipement

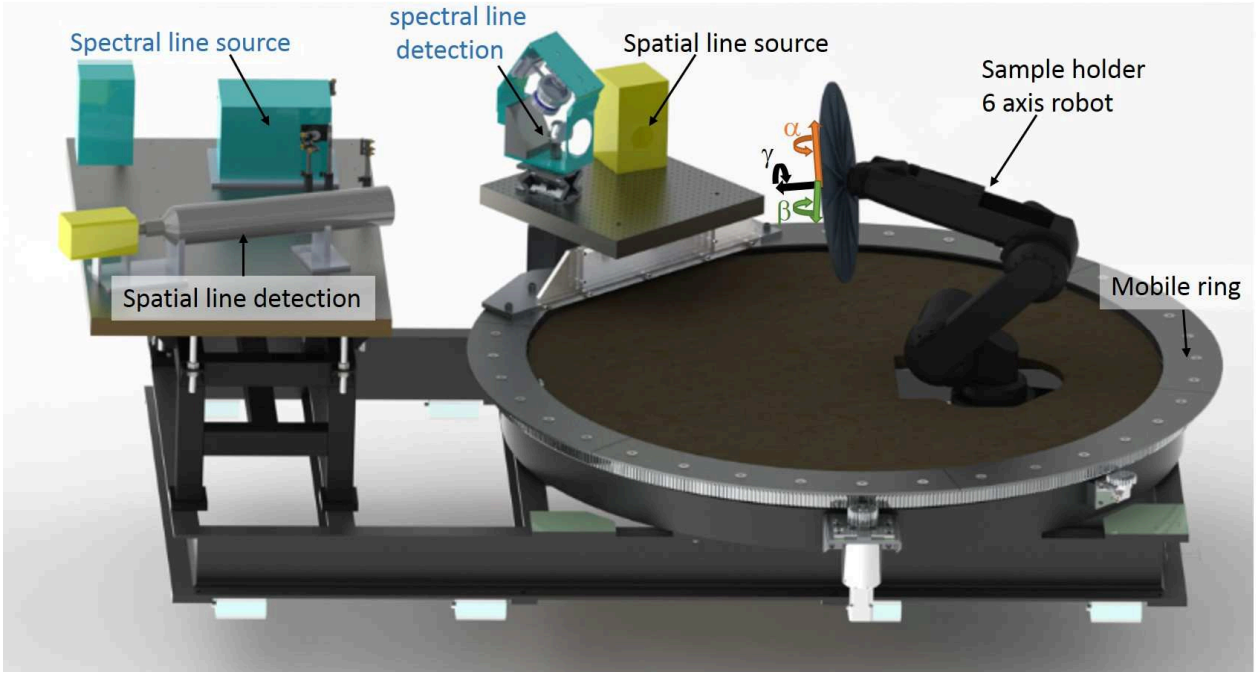



Figure 25 : Schéma général du gonioréflectomètre.
La voie spectrale est colorée en vert, la voie spatiale en jaune.

Ainsi le gonioréflectomètre sera constitué d'une ligne pour la mesure spectrale dotée d'une détection classique pour la mesure de la couleur. Une ligne spatiale dotée d'une détection innovante pour l'étude du pic spéculaire et une partie commune aux deux lignes comportant le support d'échantillon et la couronne.

# 5. Réalisation mécanique du gonioréflectomètre du LNE-CNAM

Cette partie englobe tous les éléments communs aux deux lignes spectrale et spatiale. En effet ces deux lignes partagent le même support d'échantillon constitué du robot et du plateau porte échantillon; ils partageront aussi la même structure mécanique de couronne châssis et faux plancher. Dans ce qui suit nous rappellerons le cahier des charges pour chacun de ces éléments et nous commenterons les choix faits.

## 5.1 Le support d'échantillon

Compte tenu de la configuration retenue pour le gonioréflectomètre, le support d'échantillon est un élément crucial. Il doit fournir trois rotations de l'échantillon et permettre son alignement au centre du dispositif. Il doit aussi être en mesure de basculer pour permettre l'illumination directe du détecteur pour l'acquisition du flux incident. Nous avons émis la volonté de réaliser des mesures sur des échantillons volumineux. Ainsi, le support doit être suffisamment dégagé pour manipuler ces objets et pour supporter des charges d'environ 10 kg. Rappelons également que nos exigences en termes de résolution sont de 0,1° pour les trois rotations, et de 0,1 mm pour l'alignement des échantillons.

### 5.1.1 Un bras robot pour déplacer l'échantillon

Une visite suivie d'une longue discussion avec l'ingénieur chargé du fonctionnement du gonioréflectomètre de la PTB (Allemagne), nous ont amené à nous diriger vers une solution robotique clef en main pour le support d'échantillon. Nos homologues allemands ont fait ce choix et en sont satisfaits.

Ainsi, le support d'échantillon est principalement constitué d'un bras robot 6 axes qui supporte un plateau de 60 cm de diamètre. Ce type de bras est largement exploité dans l'industrie et sa fiabilité et sa robustesse sont éprouvées. Durant l'exercice 2009, le cahier des charges du bras robot a été écrit et diffusé. Les caractéristiques principales demandées étaient :

- Charge emportée jusqu'à 10 kg.
- Répétabilité de positionnement inférieure à 0,05 mm.

- Possibilité de piloter l'automate via une interface Labview.

#### 5.1.1.1 Choix du bras robot

Le robot -Mitsubishi Electric (Figure 26)- peut porter une charge de 12 kg en mouvement. Il est robuste mais souple, sa vitesse de déplacement est ajustable. Ce type de support nous permet d'aligner facilement des échantillons de tailles différentes et de gagner un temps de mesure précieux.




Figure 26 : Le bras robot.
Fabriqué par Mitsubishi Industrial Robot : RV-12SD/12SDL Series Standard Specifications Manual (CR3D-701M/CR3D-701 Controller)

Les programmes de pilotage du robot pour déplacer l'échantillon ont été développés en interne.

#### 5.1.1.2 Pilotage du robot.

Pour le pilotage du robot nous avons fait le choix d'acquérir une bibliothèque de codes permettant d'interfacer le langage propriétaire de l'automate directement sous LabVIEW. Cet ensemble de programmes est développé par la société italienne Imaging Lab. spécialisée dans la vision par machines et nous a donné satisfaction.

De nombreux paramétrages sont nécessaires afin de réaliser le déplacement de la charge du robot de façon optimale. L'automate doit notamment connaître les spécificités mécaniques de l'outil qu'il emporte pour y adapter ses mouvements. Ces données ainsi que les réglages fins de position initiale sont entrés au moyen de la télécommande fournie avec l'automate. Une

fois la position initiale définie, le programme LabVIEW prend le relais et déplace le robot en accord avec la couronne pour égrener les grilles de mesures angulaires souhaitées par l'utilisateur et converties par le programme de calcul des angles.

### 5.1.2 Le plateau porte échantillon

Le porte échantillon doit être plan. Il doit permettre de fixer des échantillons variables. Il doit se déformer peu et doit être le plus léger possible. Rappelons que le robot n'embarque que 10 kg en dynamique. Il n'est donc pas question d'en monopoliser 5 kg uniquement pour le plateau. Rappelons enfin que nous souhaitons travailler avec des faisceaux incidents de 20 mm (voir cahier des charges page 45). Pour un zénith de 88°, un tel faisceau projeté sur l'échantillon donne une ellipse dont le grand axe mesure 58 cm. Le plateau doit donc avoir un diamètre supérieur. Nous adoptons 60 cm. Enfin, il doit s'adapter à l'extrémité du robot.

Nous avons choisi de l'aluminium pour la réalisation du plateau, matériau qui présente un très bon rapport poids/rigidité. Sa planéité est renforcée par six équerres extradées pour gagner du poids. La surface est percée de trous filetés M6 placés à des pas variables selon le rayon du plateau pour permettre de fixer des clamps qui maintiennent les échantillons.

Un axe vient se fixer dans la rotation J6 du robot (Figure 26). Ce support, fourni par la société Philippe Vullermoz, est noir et pèse au finale 3,6 kg. La Figure 27 (a) présente le support seul, et La Figure 27 (b) montre une photo du support monté sur le bras robot.

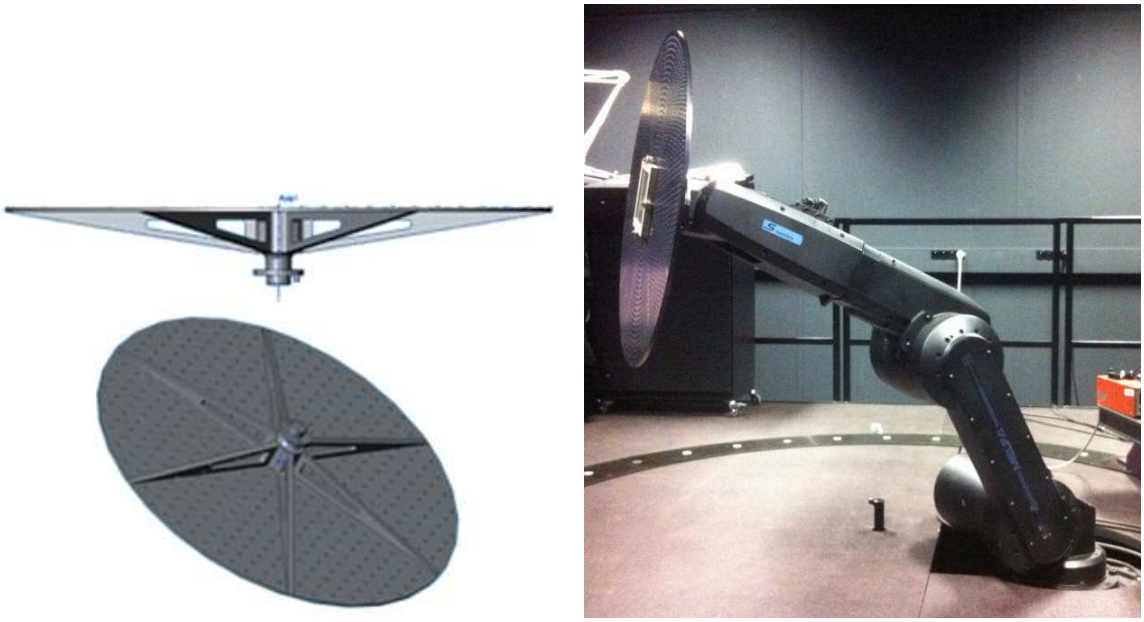


Figure 27 : Le support d'échantillon.
(a) représente le plateau, et (b) montre une photo du plateau monté sur le bras robot

## 5.2 La couronne

Nous avons décidé d'utiliser une couronne fermée. Bien que séduit par la couronne ouverte du NPL, l'étude bibliographique plaidait largement pour une couronne fermée afin de garantir la circularité de déplacement.

Nous avons opté pour un diamètre de 2 m ce qui permet de tourner autour du support confortablement et d'envisager la mesure sur des échantillons volumineux.

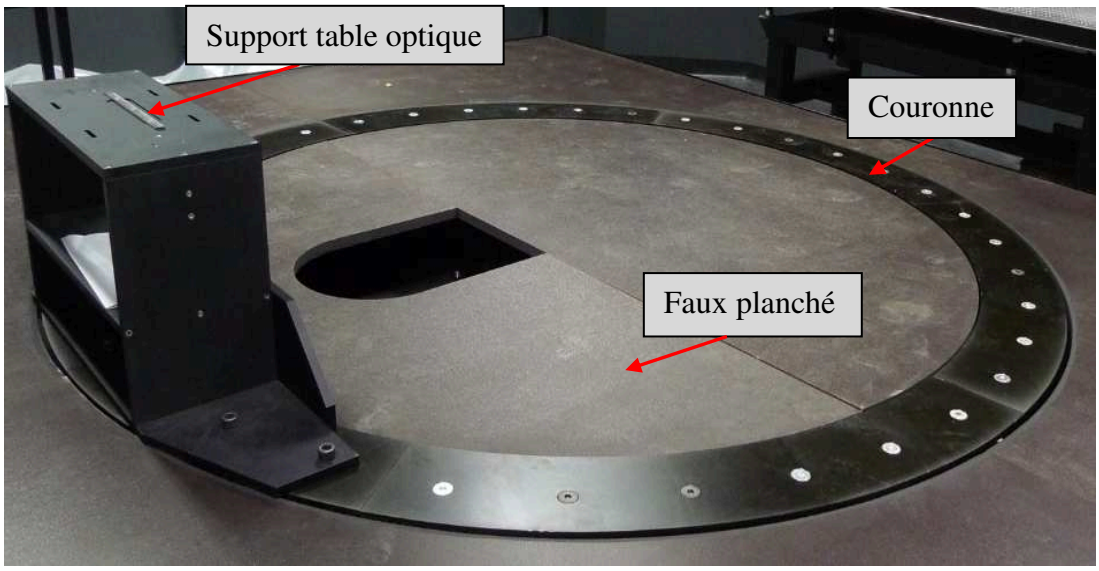



Figure 28 : Couronne utilisée au laboratoire du LNE-CNAM.

## 5.3 Le châssis commun

Pour supporter l'ensemble des éléments, la solution mécanique retenue a été de réaliser une structure en IPN (des poutrelles en forme de I à profil normal) sur laquelle est boulonnée un anneau fondu d'une seule pièce. La couronne est fixée sur cet anneau. La table optique sur laquelle seront montées les parties fixes est aussi raccordée au châssis.

La société Eberlé a été retenue pour réaliser ce travail et nous a livré l'équipement sur le site du LNE Trappes en septembre 2011. Les tests réalisés à la suite de cette livraison à l'aide d'un lasertracker, ont montré que la partie mécanique est dans les spécifications exigées pour tenir un positionnement angulaire de 0,01° sur la direction d'illumination et la direction d'observation.

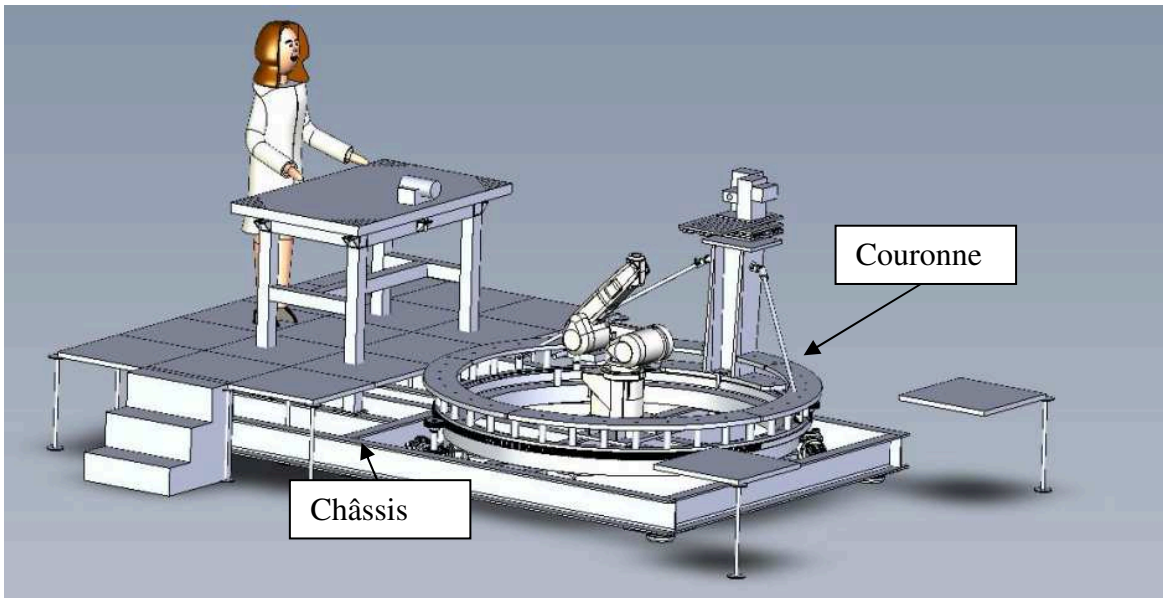



Figure 29 : Croquis de l'équipement.
Un châssis en IPN soutient l'anneau, la couronne, la table optique et le robot. Pour éviter les vibrations et les problèmes de désalignement lors des déplacements de l'opérateur, le faux planché est relié au sol, et est désolidarisé du châssis.

## 5.4 Programme de calcul des angles

Nous avons l'habitude d'exprimer la BRDF en fonction de deux couples d'angles, un zénith et un azimut en illumination ($\theta_I$, $\varphi_I$) ainsi qu' un zénith et un azimut en détection ($\theta_R$, $\varphi_R$). Dans la pratique, nous devons fournir au robot les angles de tangage, lacet et roulis ($\alpha$, $\beta$, $\gamma$) pour décrire les mouvements de l'échantillon. A ces trois angles s'ajoute l'angle de déplacement de la couronne ($\delta$). Le passage du quadruplet $(\theta_I, \varphi_I, \theta_R, \varphi_R)$ vers le quadruplet ($\alpha$, $\beta$, $\gamma$, $\delta$) est donné par :

$$\alpha = arctan\left(\frac{\cos\theta_R - \cos\theta_I \cos\delta}{\cos\theta_I \sin\delta}\right) \quad (32)$$

$$\beta = arcsin\left(\frac{-\sin\theta_I \sin\theta_R \sin(\varphi_R - \varphi_I)}{\sin\delta}\right) \quad (33)$$

$$\gamma = arctan\left(\frac{\sin\theta_I \sin\theta_R \sin\varphi_I - \sin\theta_R \cos\theta_I \sin\varphi_R}{\sin\theta_R \cos\theta_I \sin\varphi_R - \sin\theta_I \sin\theta_R \sin\varphi_I}\right) \quad (34)$$

$$\delta = arccos(\sin\theta_I \sin\theta_R \cos(\varphi_R - \varphi_I) + \cos\theta_I \cos\theta_R) \quad (35)$$

Ce calcul est implémenté dans un programme de calcul des angles.

# CHAPITRE III

# La voie spectrale

# La couleur



# 1. Rappel du cahier des charges de la ligne spectrale

La voie spectrale a pour objectif la mesure de la BRDF absolue de l'échantillon, avec comme application l'étude de l'évolution de la couleur en fonction de la géométrie d'illumination et d'observation. A partir du moment où l'on s'intéresse à l'étude de la couleur de l'échantillon, la finesse spatiale n'est plus critique. En effet, même sur des surfaces goniochromatiques, la variation de la couleur en fonction de l'angle d'observation est assez "molle". Nous allons développer une voie couleur très «classique ». La maitrise de la longueur d'onde se fera dans la partie source grâce à un monochromateur. La détection sera composée d'une optique de collection et d'une photodiode en Silicium associée à un convertisseur courant tension. L'optique retenue est celle d'un champ large de manière à ce que celui-ci soit délimité, dans la pratique, par la surface illuminée. L'utilisation d'une détection synchrone permettra de réduire l'effet de la lumière parasite. Rappelons que d'après le cahier des charges l'angle solide de la détection est fixé à $9{,}57\times10^{-4}$ sr, ce qui correspond à un champ d'observation de ± 1° recommandé par la CIE.

La dimension du faisceau incident doit être de 20 mm de diamètre. Compte tenu du fait que le faisceau sort du monochromateur, la géométrie du faisceau sera donc carrée de 20 mm de côté. En cas d'illumination rasante, ce faisceau donnera un trapèze, dont la grande diagonale pourra aller jusqu'à 580 mm.

Dans ces conditions, la configuration angulaire la plus défavorable est la situation où l'observation est normale à la surface et l'illumination est rasante. La détection doit avoir un angle de champ qui lui permet de visualiser 600 mm au niveau de l'échantillon.

Un diaphragme de champ permettra de réduire celui-ci en cas de mesure moins critique, afin de limiter la lumière parasite

Le domaine spectral que nous visons est compris entre 250 et 900 nm, avec une résolution spectrale de 0,1 nm.

# 2. L'illumination

L'illumination est composée de trois parties, une lampe, un monochromateur et un système optique de mise en forme du faisceau. Elle est localisée sur la table optique et est fixe.

## 2.1 La lanterne

La source choisie est un arc xénon -Newport 6263- sa puissance est de 75 W. Elle permet de couvrir confortablement la zone 250-900 nm confortablement.

## 2.2 Le monochromateur

Le monochromateur utilisé est un Bentham M300, de type Czerny-Turner simple. Ce monochromateur est équipé d'un réseau de diffraction carré de 69 mm de côté relié à un moteur pas à pas pour permettre de sélectionner la longueur d'onde en sortie. La résolution d'un monochromateur est caractérisée par son nombre de traits par millimètre, plus ce nombre est élevé plus le réseau disperse. Le monochromateur Bentham comprend 1200 traits par millimètre, et permet de mesurer des radiations électromagnétiques de longueurs d'onde comprises entre 200 nm et 1,4 µm. Pour notre utilisation nous nous limiterons au domaine des longueurs d'onde du visible.

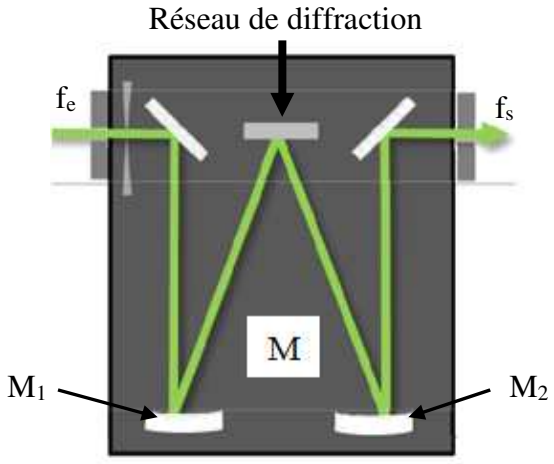



Figure 30 : Monochromateur Bentham M300 [61]
Il est constitué d'un réseau de diffraction et d'un jeu de miroirs sphériques et plans. Le faisceau polychromatique provenant de la source rentre dans le monochromateur à travers la fente d'entrée ($f_e$), située au plan focal du premier miroir sphérique $M_1$. Le miroir réfléchit et collimate le faisceau sur le réseau de diffraction qui le diffracte en plusieurs faisceaux monochromatiques collectés par un deuxième miroir $M_2$. Ce dernier les focalise sur la fente de sortie ($f_s$). L'angle du réseau est géré par un moteur pas à pas qui permet de sélectionner la longueur d'onde en sortie du monochromateur.

A la sortie du monochromateur le faisceau est constitué principalement d'une seule longueur d'onde et d'une infime proportion des longueurs d'ondes voisines. Les fentes d'entrée et de sortie ont une hauteur fixe de 20 mm et leur largeur est réglable de 10 µm à 8 mm. La largeur des fentes influe directement sur la sélection en longueur d'onde, appelée bande passante. Plus la largeur des fentes diminue, plus la bande passante sera petite et plus le flux en sortie du monochromateur sera faible. Le rapport signal sur bruit devient alors prépondérant. Le moteur pas à pas permet de changer l'orientation du réseau de diffraction, pour sélectionner la longueur d'onde en sortie. Pour ce réseau un pas moteur correspond à 0,075 nm. La vitesse maximale de déplacement du moteur est de 20 $nm \cdot s^{-1}$.

## 2.3 Le système optique d'illumination

Afin de pouvoir générer un spot lumineux de 20 mm de diamètre focalisé dans le plan de l'échantillon, nous avons opté pour un système télécentrique. La source lumineuse est placée au foyer objet d'une lentille convergente $L_1$ de focale $f_1$=500 mm et de 25,4 mm de diamètre. Son image se retrouve de cette façon envoyée à l'infini en entrée du monochromateur, focalisée sur le réseau et renvoyée à l'infini en sortie du monochromateur. La fente de sortie du monochromateur est un rectangle vertical, nous y ajoutons un diaphragme délimiteur carré permettant d'obtenir un carré en objet projeté. L'image projetée sur le plateau est au final celle de la fente de sortie du monochromateur $D_2$ au travers d'une lentille $L_2$ de focale $f_2$= 350 mm et de 25,4 mm de diamètre. Un système de miroir basculant automatisé permet de renvoyer la lumière en sortie du monochromateur vers un piège à lumière. Ce dispositif est utilisé pour mesurer la lumière parasite. Ce piège à lumière a été réalisé en interne. Il est constitué d'un tube dont l'intérieur est un pas de vis profond. L'intérieur est peint en noir mat. Le fond du piège est une lamelle en plastique noire brillante inclinée à 45°. Quand la lumière entre dans le piège elle est tout d'abord réfléchie par le fond du piège puis absorbée par les parois. Aucune réflexion directe vers la sortie n'est possible avec ce dispositif.

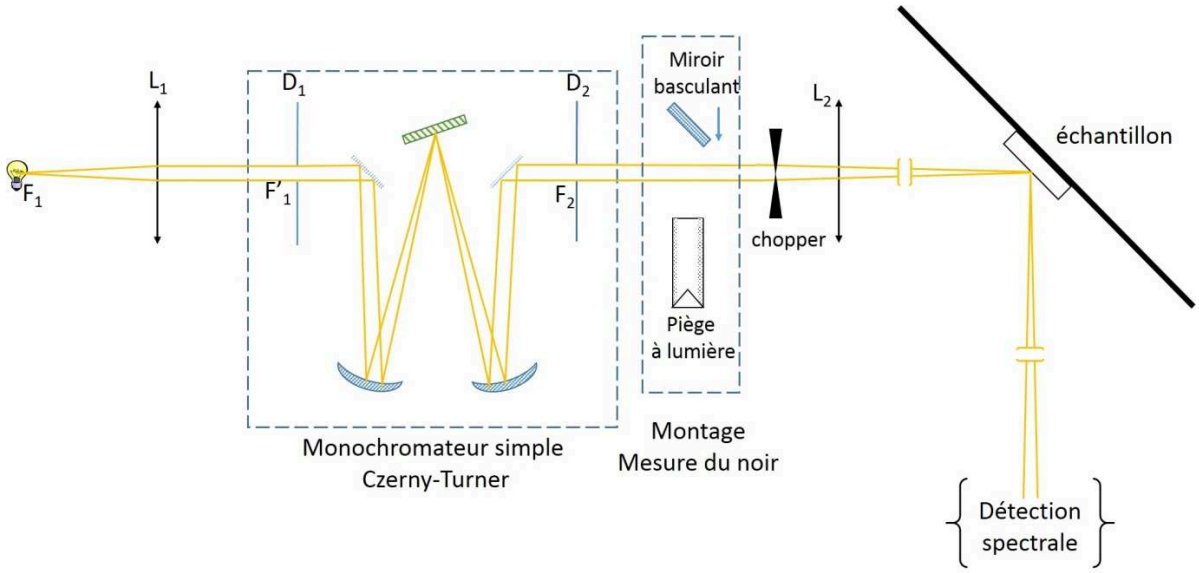



Figure 31 : Schéma de principe de l'illumination spectrale de notre gonioréflectomètre.

Afin de mesurer la quantité utile de lumière, il fallait être vigilant sur la divergence du faisceau incident sur l'échantillon. En effet, nous voulons voir entrer dans la détection spectrale tous les rayons issus de la fente de sortie du monochromateur. La divergence après l'échantillon (notée β) doit donc rester en dessous de la valeur de 1° (Figure 32).

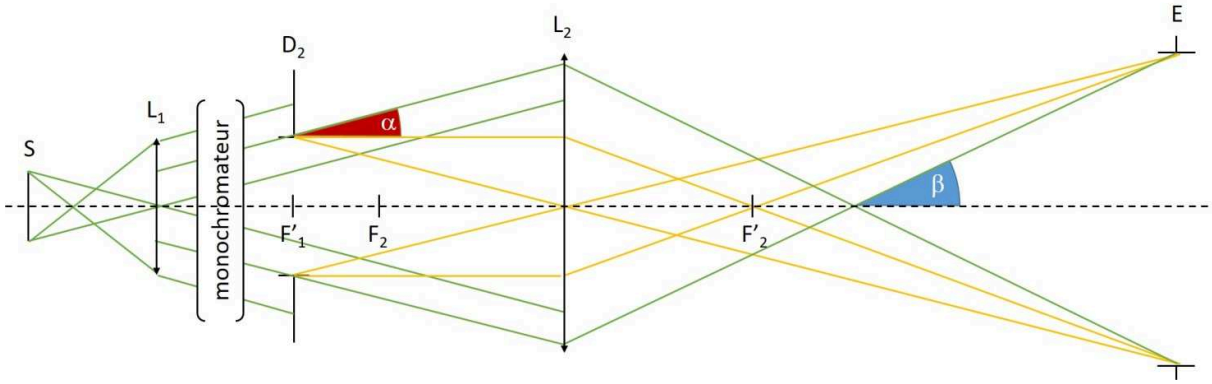



Figure 32 : Schéma descriptif de la voie d'illumination spectrale
Nous imageons la fente de sortie du monochromateur $D_2$ sur l'échantillon E. Afin que toute la lumière issue de $D_2$ passe dans notre détection, il est nécessaire que la divergence (β) par rapport à l'axe optique des rayons extrêmaux issus de $D_2$ passant par $L_2$ soit contrôlée. Le système limite cette divergence à moins d'un degré.

Au final, avec le système retenu, la surface projetée est un carré de 20 mm de coté.

# 3. La détection

La détection doit pouvoir mesurer tous les rayons réfléchis dans un angle solide Ω de $9{,}57 \cdot 10^{-4}$ sr, dont le sommet est situé au centre de la surface étudiée, la surface est définie par un diaphragme, la hauteur est fixée par la distance L entre l'échantillon et le diaphragme d'entrée du système optique de détection.

Pour la conception de la détection, nous sommes initialement partis d'un système très simple puis en fonction des contraintes rencontrées nous l'avons amélioré pour arriver à un résultat qui combine à la fois un prix abordable et une perte minimale de flux à cause des optiques utilisées.

Nous développons ci-dessous cette progression qui nous a mobilisés de nombreux mois.

## 3.1 La taille du champ d'observation

Si on éclaire avec un angle zénithal de 88° qui représente l'angle maximal prévu sur notre instrument, et que l'on regarde dans la direction normale à la surface éclairée, alors la surface éclairée aura la forme d'une ellipse. L'axe $x$ de cette ellipse est donné par :

$$x = \frac{D}{\cos(\theta_R)} \tag{36}$$

D étant le diamètre de la surface éclairée et $\theta_{\mathbf{R}}$ l'angle zénithal d'illumination. Pour $\theta_{\mathbf{R}}$=88°, $x$ =580 mm. Pour éviter les problèmes de vignetage le champ d'observation doit être de 600 mm.

Ainsi, nous devons détecter tous les rayons réfléchis par l'intégralité de la surface du plateau de diamètre D=600 mm, dans un angle de $\pm 1°$ traversant un diaphragme placé à 1500 mm de l'échantillon.

## 3.2 Diamètre du diaphragme d'ouverture

Afin de calculer le diamètre du diaphragme d'ouverture, nous devons tenir compte des paramètres décrivant l'angle solide de détection dont le sommet est situé sur un point M de la surface étudiée (échantillon). La base correspond à l'ouverture du diaphragme et la hauteur est déterminée par la distance entre l'échantillon et le diaphragme d'entrée du système optique de détection comme le montre Figure 33.

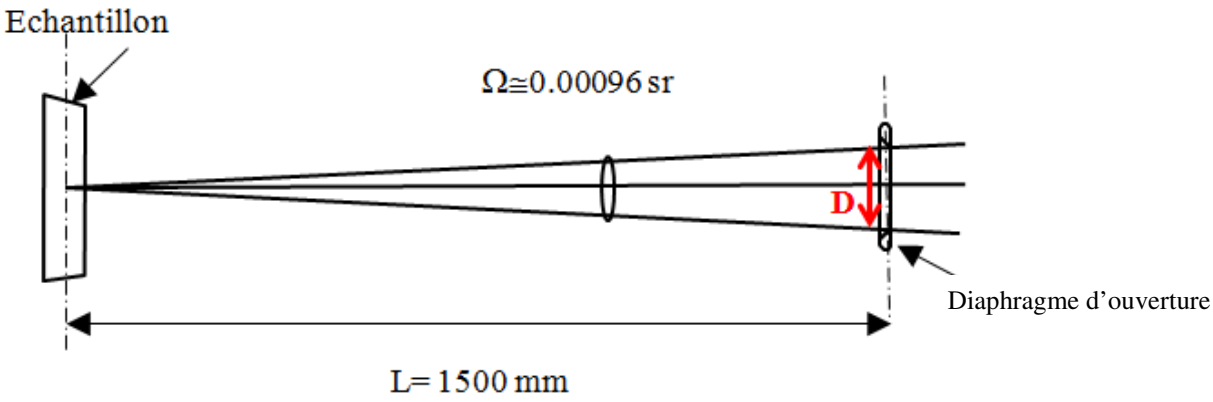



Figure 33: Représentation schématique de la géométrie servant au calcul du diamètre du diaphragme d'ouverture.
La distance entre l'échantillon et le diaphragme d'ouverture L est de 1500 mm. L'angle solide de détection Ω est de $9{,}57 \cdot 10^{-4}$ sr.

Avec un angle solide de détection de $9{,}57 \cdot 10^{-4}$ sr et une distance échantillon-diaphragme d'ouverture L=1500 mm, nous calculons l'ouverture du diaphragme, telle que :

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \Omega \cdot L^2}{\pi}} \qquad \text{unité: mm} \tag{37}$$

$$\mathrm{D_{diaphragme}} = 52{,}36 \text{ mm}$$

Pour déterminer l'incertitude sur ce diaphragme, nous utilisons la loi de composition des variances. L'incertitude sur D peut s'écrire :

$$(u_D) = \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial \Omega} \cdot u_\Omega\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial L} \cdot u_L\right)^2} \qquad \text{unité: mm} \tag{38}$$

Après simplification nous trouvons :

$$(u_D) = \sqrt{\frac{2L^2}{\pi\Omega} \cdot {u_\Omega}^2 + \frac{4\Omega}{\pi} \cdot {u_L}^2} \qquad \text{unité: mm} \tag{39}$$

Avec :

L= 1500 mm, $u_L$=0,5 mm.

$\Omega = 9{,}57 \cdot 10^{-4}$ sr.

L'incertitude relative sur l'angle solide $(\frac{u_\Omega}{\Omega})$ ne doit pas limiter notre mesure.

Nous souhaitons qu'elle soit inférieure à $10^{-3}$. Alors $u_\Omega = 9{,}57 \cdot 10^{-7}$ sr.

On retrouve une incertitude de $u_D = 0{,}04$ mm. C'est cette incertitude que nous avons imposé au fabricant.

## 3.3 Conceptions non retenues

Le gonioréflectomètre tel qu'il était imaginé au début devait permettre des mesures à la fois de BRDF spectrale et spatiale. L'idée était d'avoir une seule partie illumination qui serait commune aux deux voies de mesures. Celle-ci devrait être mobile, montée sur la couronne et devrait tourner autour de l'échantillon. La lumière réfléchie devait passer dans un diaphragme qui définissait l'angle de détection de 2°. Derrière le diaphragme, un miroir de repliement devait permettre de diriger la lumière réfléchie vers le monochromateur pour une détection spectrale ou vers le conoscope et la caméra pour une détection spatiale comme le montre la Figure 34.

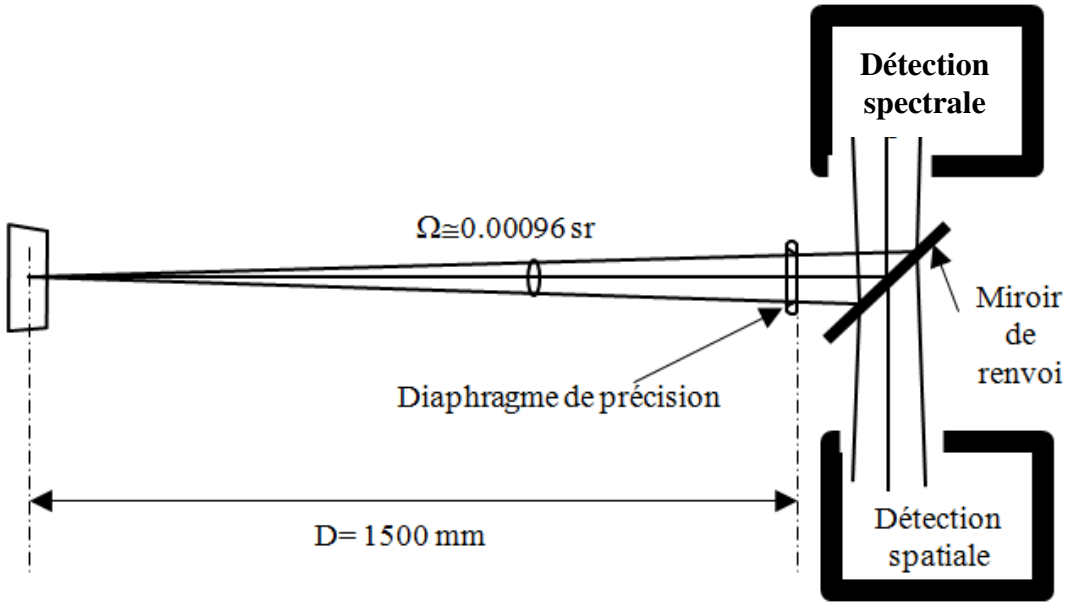



Figure 34 : Première configuration du gonioréflectomètre du LNE-CNAM.
La lumière réfléchie par l'échantillon est soit redirigée par le miroir vers la détection spectrale pour la mesure de la couleur, soit vers la détection spatiale pour la mesure du brillant.

Dans cette configuration nous devions concevoir un système optique qui collecte la lumière réfléchie et permette de la faire rentrer dans la fente d'entrée du monochromateur de 3 mm de coté. Elle sortirait après la décomposition en longueur d'onde par la fente de sortie pour être détectée (Figure 35).

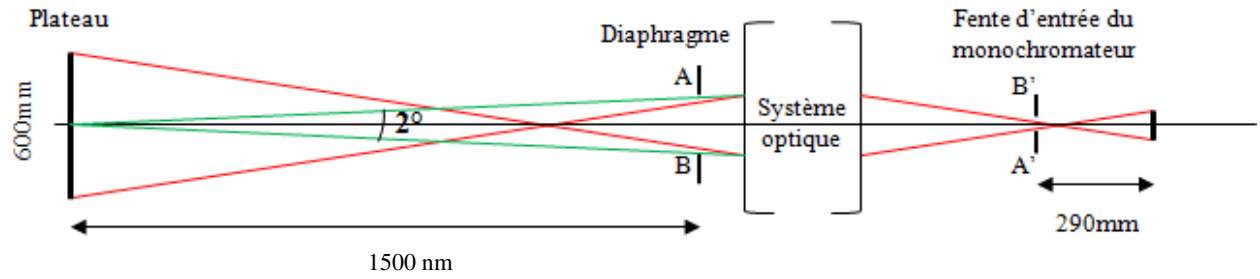



Figure 35 : Principe de la chaine de détection.
Le plateau est à une distance de 1700 mm du diaphragme d'entrée du système optique. La taille du diaphragme d'entrée AB= 52 mm. La taille de la fente d'entrée du monochromateur A'B'= 3 mm.
Le système optique doit pouvoir récolter tous les rayons provenant du plateau de 600 mm de diamètre dans un angle de 2° et les envoyer à travers la fente d'entrée du monochromateur de 3 mm de largeur. Les rayons doivent arriver sur le premier miroir à l'intérieur du monochromateur placé à 290 mm de la fente d'entrée. Pour cela la taille du faisceau doit être réduite d'un rapport 600/3.

Ce système est complexe. D'un côté le grossissement (600 : 3) est fort, de l'autre côté, avec une distance plateau-diaphragme de 1500 mm, les rayons divergent fortement. Ces deux contraintes imposent l'utilisation d'optiques de grande taille et de petite focale qui doivent être réalisées sur mesure, avec un coût élevé.

Pour ces raisons nous avons revu la conception du gonioréflectomètre. Nous avons pris la décision de découpler la ligne spectrale de la ligne spatiale. Chacune a sa propre illumination et sa propre détection, le miroir de sélection disparait, ce qui nous permet de réduire la distance entre le diaphragme et le premier dioptre.

Mais surtout, pour la ligne spectrale, cette nouvelle configuration relâche considérablement la contrainte sur le grossissement. Le monochromateur passe côté illumination. Il ne reste que la photodiode côté détection. Le grandissement n'est plus donné par le rapport entre le champ de 600 mm et la fente du monochromateur mais par le rapport entre le champ et la taille de la photodiode.

La détection sera composée d'une optique de focalisation et d'une photodiode Silicium associée à un convertisseur courant tension.

Nous avons testé plusieurs conceptions pour la détection. La première était d'utiliser un condenseur de 150 mm de diamètre et de 38 mm de focale placé à 200 mm du diaphragme (Figure 36). Ce dernier assure le réacheminement de tous les rayons vers une photodiode de 13 mm de coté. Ce système n'a pas été retenu à cause du coût élevé dû à la fabrication du condenseur

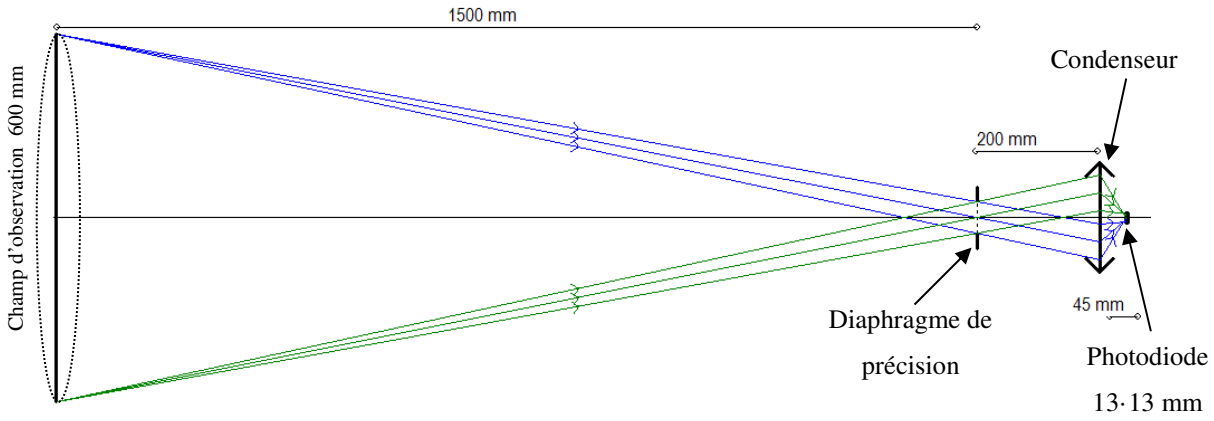



Figure 36 : Premier système optique imaginé pour la détection.
A gauche le plateau de diamètre D=600mm, les rayons passent le diaphragme et arrivent sur un condenseur qui les focalise sur la photodiode.

La seconde proposition était plus raisonnable. Elle combinait l'effet de deux condenseurs (Figure 37). Le premier condenseur ($C_1$) de diamètre $d$= 75 mm et de focale $f$= 50 mm qu'un deuxième condenseur ($C_2$) de diamètre $d$= 52 mm et de focale $f$= 33 mm. Le diaphragme est au plan focal objet du premier condenseur ($C_1$). Le condenseur ($C_1$) est au plan focal objet du deuxième condenseur ($C_2$). En sortie, les rayons sont collectés par une photodiode de 13 mm de coté.

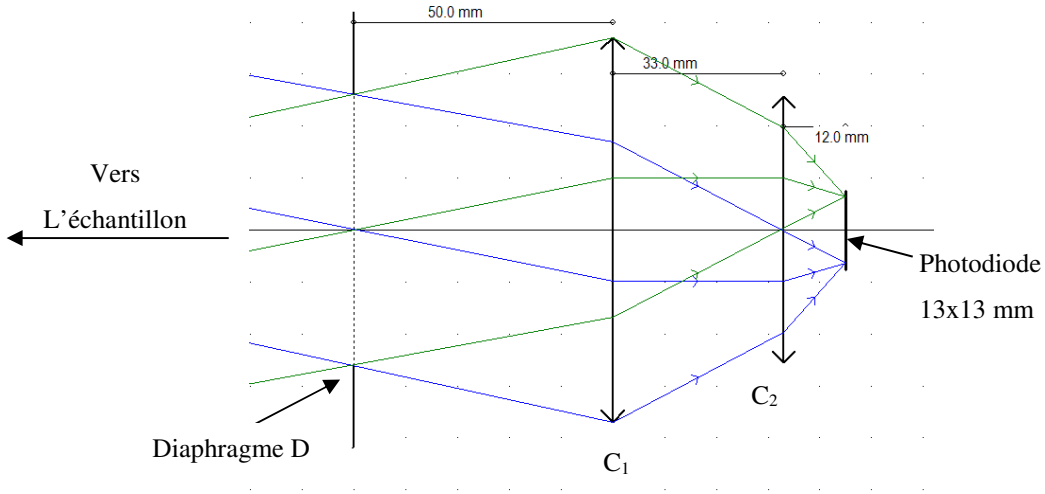



Figure 37 : Deuxième système optique imaginé pour la détection.
Les rayons provenant de l'échantillon entrent dans le diaphragme D et arrivent sur un premier condenseur ($C_1$) qui les focalise sur le condenseur ($C_2$) et qui à son tour les focalise pour qu'ils puissent tous être captés par la photodiode.

Ce système coûte moins cher car les optiques sont directement achetées sur catalogue et non commandées sur mesure chez un fabriquant, mais l'utilisation de deux condenseurs augmente les pertes en flux (les condenseurs ($C_1$) choisis sur le catalogue de Melles Griot non traités présente un coefficient de réflexion de 90%). De plus, la succession de lentilles risque de créer des réflexions multiples dans la boîte qui vont apporter de la lumière parasite. Pour cette

raison nous avons choisi de remplacer le premier condenseur par un miroir sphérique. Ce qui nous amène au système suivant.

## 3.4 Conception retenue

- Principe général

Le système optique que nous avons finalement retenu est constitué d'un miroir sphérique de 120 mm de diamètre et 230 mm de rayon. Le miroir est placé à 100 mm du diaphragme d'ouverture. Il collecte les rayons réfléchis par l'échantillon et les fait converger vers un condenseur de 50 mm de focale et 75 mm de diamètre. Le condenseur fait converger le faisceau sur la surface active d'une photodiode en silicium. La photodiode mesure 28 mm de côté et couvre le domaine spectral compris entre 340 nm et 1100 nm. Le miroir sphérique a été fait sur mesure par le fabricant Fichou. Les autres éléments sont commandés sur catalogue :

- Condenseur de Melles Griot (Référence : LAG-75.0-50.0-C)
- Photodiode Hamamatsu (Référence : S3584-08).

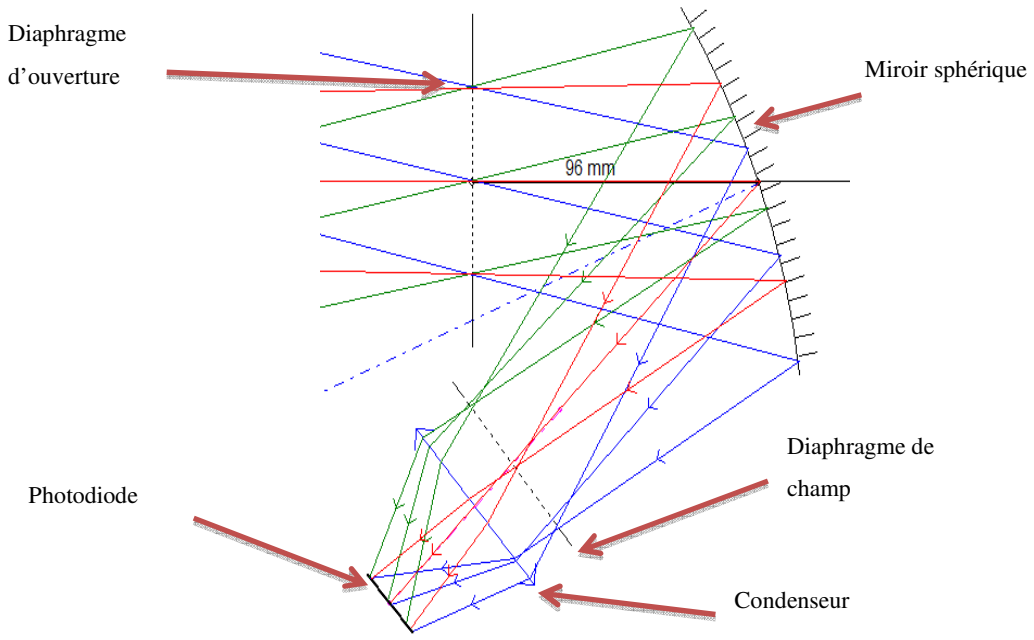



Figure 38 : Détection retenue.
La solution retenue combine l'utilisation d'un miroir sphérique de 120 mm de diamètre et 230 mm de rayon (Fichou), d'un condenseur de 75 mm de diamètre et 75 mm de focale (Melles Griot), d'une photodiode de 28 mm de côté (Hamamatsu) et d'un diaphragme de champ (Newport).

Ce système remplit le cahier des charges. Néanmoins dans la configuration la plus défavorable (illumination avec un angle zénithal de 88°, détection avec un zénith de 0°), le système optique doit détecter tous les rayons réfléchis par la surface éclairée, qui est alors une ellipse de diamètre 574 mm. Ceci donne un angle de champ de 21,6°.

Cette configuration n'est pas idéale, mais elle est un compromis nécessaire entre la volonté d'avoir une surface éclairée de grande dimension et la possibilité d'avoir des angles très rasants. La diminution de cet angle pourrait se faire en augmentant la distance échantillon / détection. Mais l'augmentation de cette distance entrainerait une augmentation immédiate de la taille de la couronne et de la taille des optiques, et donc du coût de l'équipement. La solution retenue est un compromis entre ces diverses contraintes.

Dans des configurations moins défavorables, c'est-à-dire, pour une illumination avec un angle zénithal inférieur à 88°, le grand axe de la surface éclairée diminue. Nous avons la possibilité d'insérer un diaphragme de champ qui permet de réduire la taille de la zone observée et de diminuer la lumière parasite (La Figure 38).

## 3.5 Réalisation mécanique

### 3.5.1 Réalisation mécanique du diaphragme d'ouverture

Pour éviter la réflexion de la lumière sur les bords intérieurs vers le détecteur, nous avons décidé de concevoir un diaphragme en acier à bords inclinés à 45° (Figure 39 et Figure 40). Le diaphragme a été fabriqué en interne dans les ateliers du LNE. L'épaisseur de 10 mm ainsi que le diamètre extérieur de 72 mm ont été calculé afin que la dilatation thermique de l'acier reste inferieur à la tolérance sur le diamètre intérieur du diaphragme et ce pour maintenir l'angle d'observation à 2°.

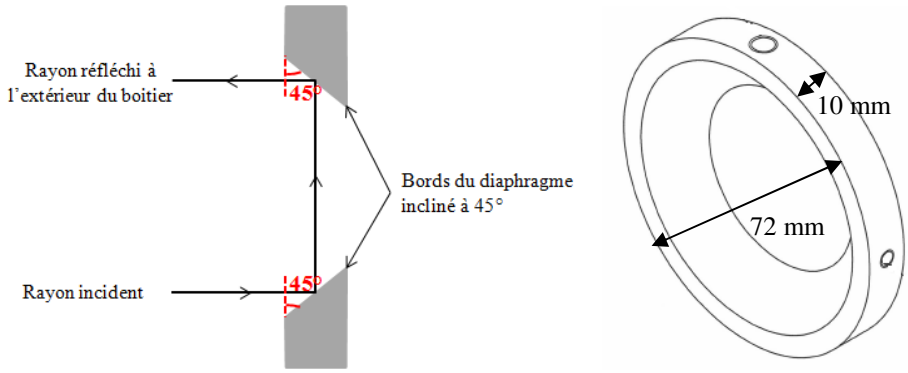



Figure 39 : Schéma représentatif du design du diaphragme d'ouverture.

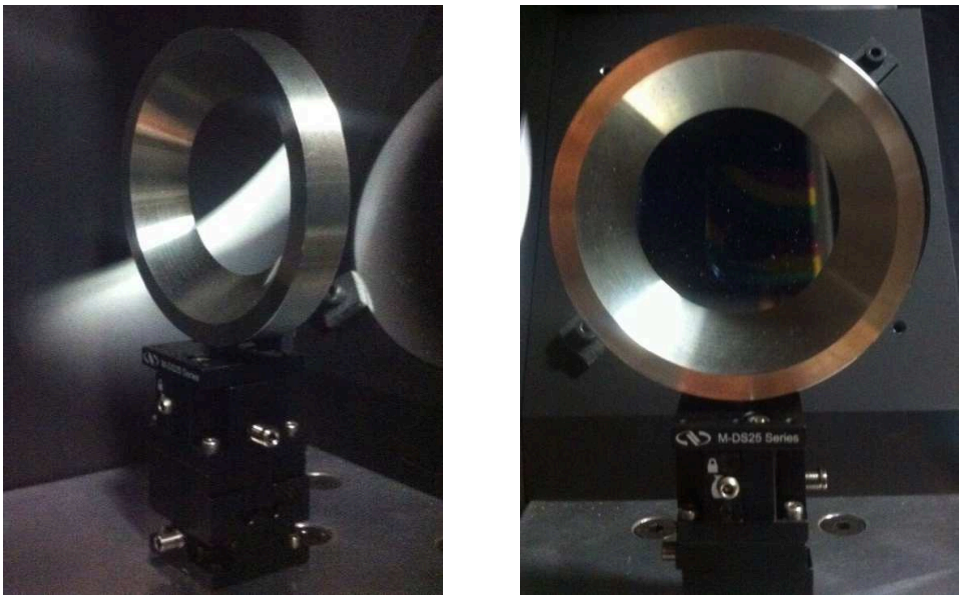



Figure 40 : Photo du diaphragme d'ouverture monté.

### 3.5.2 Réalisation mécanique du boitier contenant les optiques

Les éléments optiques et leurs réglages ont été inclus dans un boîtier qui devait répondre à un double impératif : le premier d'encombrement, le second de souplesse de réglages des alignements des optiques. La Figure 41 montre le montage retenu qui prend en compte ces deux contraintes.

1. L'encombrement :

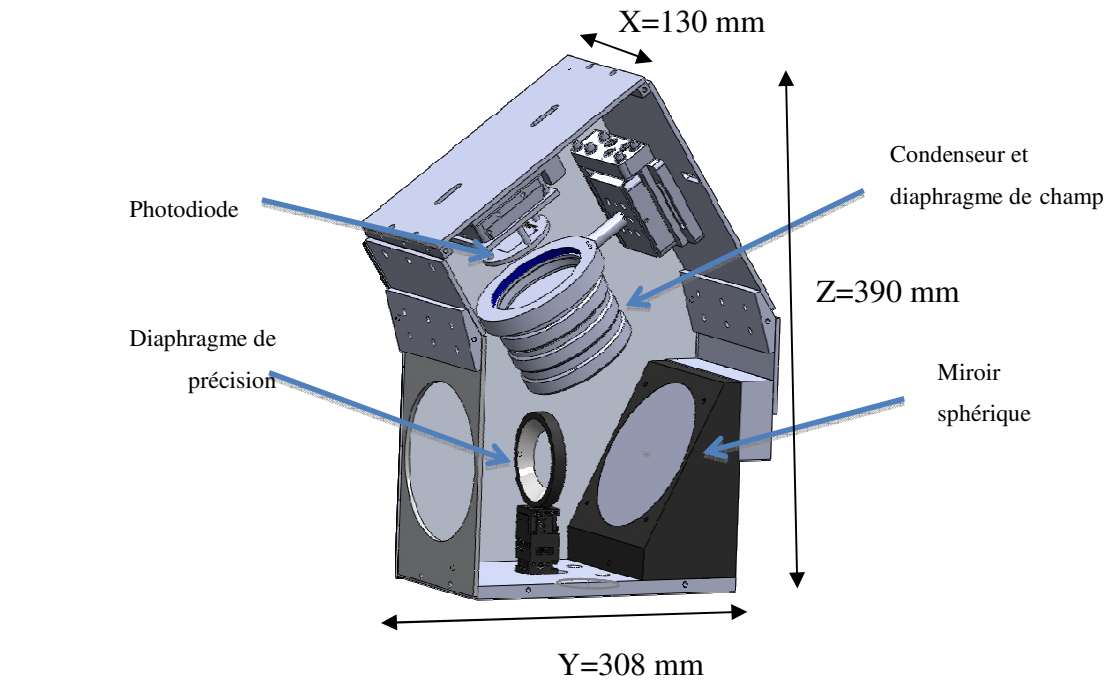
Du fait de son installation sur la couronne mobile, la détection est amenée à passer dans le faisceau de l'illumination spectrale pour des directions d'observation proches des directions d'illuminations, amputant de cette façon le domaine de mesure. Pour cette raison, l'équipement doit être construit en hauteur et en profondeur tout en minimisant sa largeur.

2. L'alignement :

Dans le boîtier, seul le miroir est fixe, la photodiode est montée sur un plateau de translation X, Y. Le diaphragme de champ est fixé au condenseur. Cet ensemble est réglable par translation. Le diaphragme d'ouverture repose sur un ensemble de translation X, Y, Z. Le côté de cette enceinte se démonte totalement pour faciliter les alignements.

Au final, la largeur du boitier est de 130 mm, ce qui correspond à une zone de 4,95°. La hauteur du boîtier est de Z=390 mm, et sa longueur, Y=308 mm.

La réalisation de cet ensemble a été confiée à la société Eberlé d'après des plans dessinés en interne par un ingénieur d'étude de l'équipe. Le boîtier (Figure 41) est en aluminium pour limiter sa masse et est anodisé noir mat pour limiter les réflexions parasites.



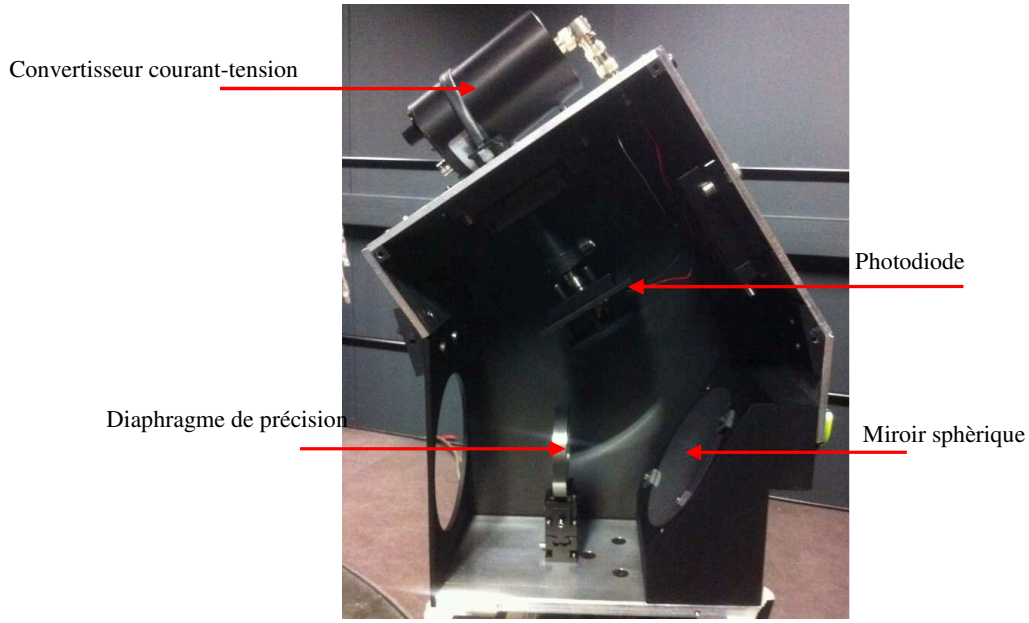




Figure 41 : Réalisation mécanique du boîtier contenant la détection spectrale.

# 4. Caractérisation de la voie spectrale

La caractérisation complète de la voie spectrale consiste à évaluer :

- La maitrise de la longueur d'onde et son incertitude associée.
- La mesure de l'angle solide et son incertitude associée.
- La maitrise de la mesure des flux et l'incertitude associée.

Dans le cadre de ce travail de thèse, seule la partie longueur d'onde a été traitée. L'étude de l'angle solide et des mesures de flux n'ont pas été réalisées pour des raisons externes, essentiellement liées au planning de mesure de l'équipement qui devait être utilisé en premier lieu sur sa voie spatiale (voir chapitre IV) dans le cadre d'un projet européen qui a débuté en septembre 2013.

## 4.1 Restauration du monochromateur

- Principe de fonctionnement :

Le monochromateur que nous utilisons est un équipement ancien qui nous a été donné par le Muséum National d'Histoire Naturelle. La partie mécanique du monochromateur était en bon fonctionnement. La partie détection avait en revanche des problèmes.
Normalement, le signal au niveau de la fente de sortie du monochromateur est détecté par un tube photomultiplicateur (PMT) référence R928 de Hamamatsu, alimenté par une haute tension constante de 900 V. Le photocourant est amplifié puis converti en tension par le convertisseur courant-tension (CAV) selon le calibre de gain (G) choisi. Cette tension est envoyée au convertisseur analogique numérique (Bentham-228), qui permet de recueillir une valeur de tension numérique proportionnelle au flux de photons incident. Le résultat est affiché sur l'afficheur numérique (Bentham-217). L'acquisition des données peut se faire à l'aide du logiciel fourni avec le monochromateur grâce à l'interface GPIB/USB.
Après une série de tests et d'essais infructueux, nous avons diagnostiqué que l'amplificateur, le CAV et l'afficheur digital étaient hors service et qu'il fallait les remplacer, ce qui s'avérait coûteux en temps et en argent. Nous avons décidé de ne garder que le système optique (réseau

de diffraction et miroirs) et le photomultiplicateur. Le reste de la chaine d'acquisition sera constitué d'un convertisseur courant tension (FEMTO DLPCA-200), en série avec le voltmètre. La mesure est récupérée via le port GPIB sur un ordinateur de commande.

L'afficheur numérique de longueur d'onde étant hors service, nous calons visuellement le monochromateur sur la raie verte de la lampe à vapeur de mercure basse pression ORIEL correspondant à la longueur d'onde connue de 546,075 nm.

La Figure 42, montre un schéma décrivant la chaine d'acquisition utilisée pour étalonner le monochromateur.

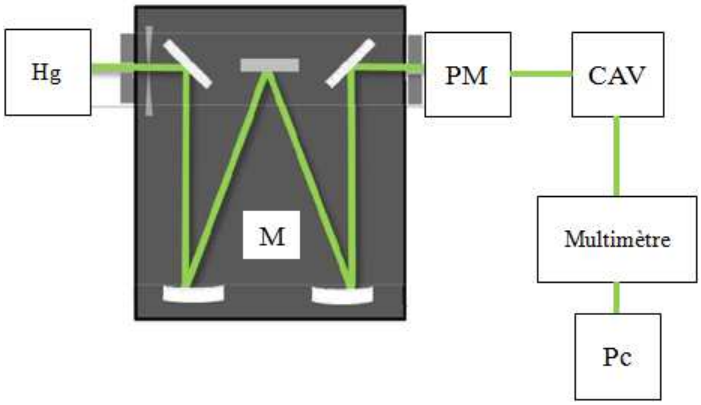



Figure 42 : Schéma du montage d'étalonnage.
A gauche, le faisceau provenant de la lampe est diffracté par le monochromateur en plusieurs raies monochromatiques. Le faisceau monochromatique sort par la fente de sortie et est collecté par le photomultiplicateur (PM) qui délivre un photocourant. Le photocourant est converti en tension par le convertisseur courant-tension (CAV). Cette tension est mesurée par le voltmètre qui transmet le résultat à un ordinateur de commande (PC).

Aucune archive n'était disponible pour commander le monochromateur. Des recherches et de nombreuses prises de contact avec Bentham ont permis de retrouver les ordres GPIB. Nous avons alors pu écrire le programme qui permet de contrôler le monochromateur à partir de Labview.

## 4.2 Programme de pilotage du monochromateur pour l'étalonnage

Nous avons écrit un programme spécifique pour l'étalonnage qui permet de piloter le monochromateur et récupérer les données de mesures (Figure 43). Ce programme consiste à :

- Valider le calage. Celui-ci est fait sur la raie verte de la lampe mercure et correspond à 546,075 nm.
- Saisir la zone de balayage souhaitée ($\lambda_{min}, \lambda_{max}$) et la vitesse de balayage (prise de mesure tous les $n$ pas).

- Calculer le nombre de pas à effectuer pour arriver à $\lambda_{max}$, et déduire le sens de déplacement.
- Durant le déplacement du réseau, la longueur d'onde de mesure est affichée.
- Pour chaque pas de déplacement, le programme relève la valeur de la tension sur le multimètre et la trace en temps réel sur un graphique en fonction de la longueur d'onde.
- L'ensemble des mesures est archivé dans un tableau.

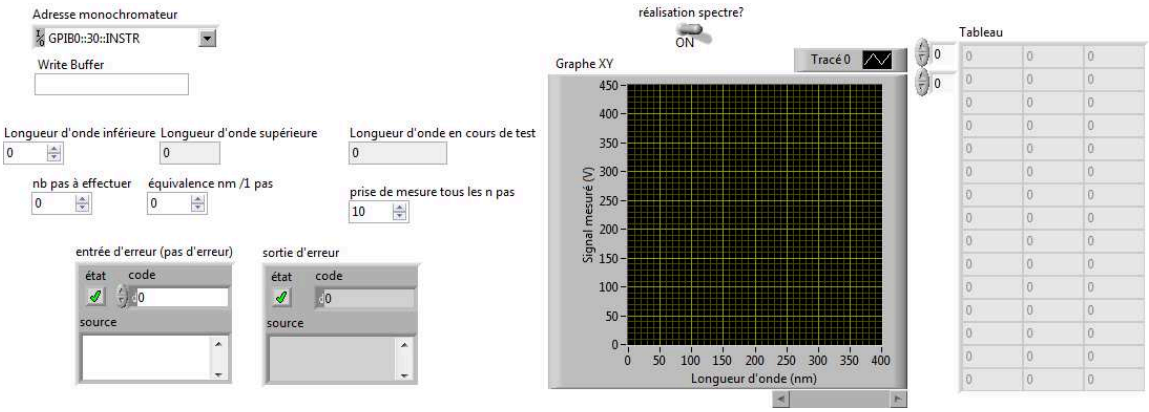



Figure 43 : Face avant du programme Labview destiné au contrôle du monochromateur.

## 4.3 Restauration des fentes

L'étalonnage en longueur d'onde a été réalisé à l'aide d'une lampe à vapeur de mercure basse pression ORIEL, pour les raies d'émission à 365,02 nm, 435,83 nm, 546,07 nm et 576,96 nm. Quelle que soit la raie à balayer, le réglage du monochromateur se fait sur la raie verte de mercure qui est la plus lumineuse pour un observateur humain.

➢ Réglage des fentes

En théorie, la lumière provenant de la lampe entre dans le monochromateur par la fente d'entrée, elle est ensuite diffractée par le réseau, et la longueur d'onde est sélectionnée par la fente de sortie. Le signal recueilli par le photomultiplicateur est le résultat de la convolution de l'image de la fente d'entrée sur la fente de sortie. Les deux fentes ayant la même largeur, le résultat de la convolution devrait être un triangle.

Nous avons réglé, à l'aide des verniers, les fentes d'entrée et de sortie $f_e$ et $f_s$ à une largeur identique de 4 mm. Nous avons procédé au balayage du pic de longueur d'onde 546,075 nm. La tension fournie par le multimètre en fonction de la longueur d'onde est présentée Figure 44.

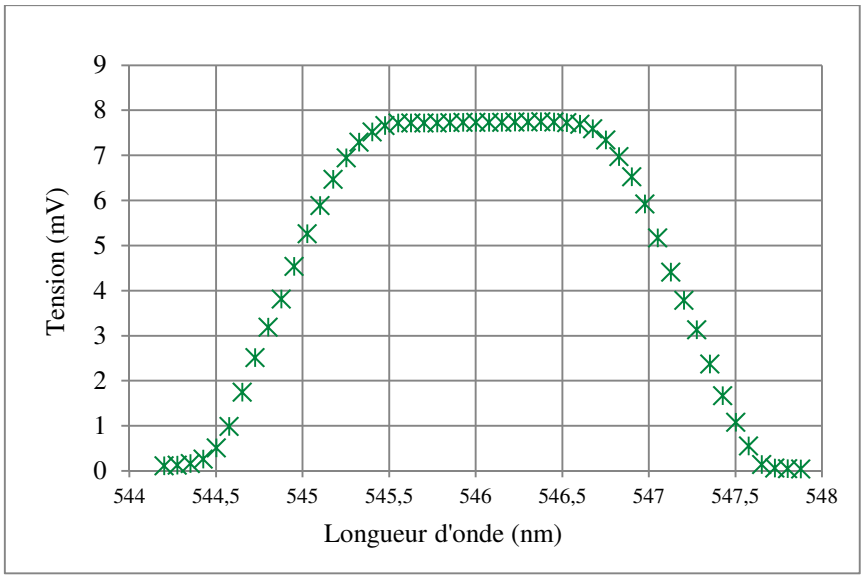



Figure 44 : Tension (V) en fonction de la longueur d'onde.
Pour un réglage des fentes d'entrée et de sortie de 4 mm, la forme en trapèze témoigne d'un mauvais réglage des fentes. Les mesures sont prélevées avec un pas de 0,075 nm.

Le résultat de la convolution présente un trapèze au lieu d'un triangle malgré le fait que les deux verniers affichent la même valeur d'ouverture. L'ouverture réelle des fentes n'est donc pas celle affichée par les verniers.

La taille de la fente de sortie est gardée fixe, la fente d'entrée est modifiée. Nous ajustons sa largeur pour obtenir un triangle. Le résultat est reporté Figure 45.

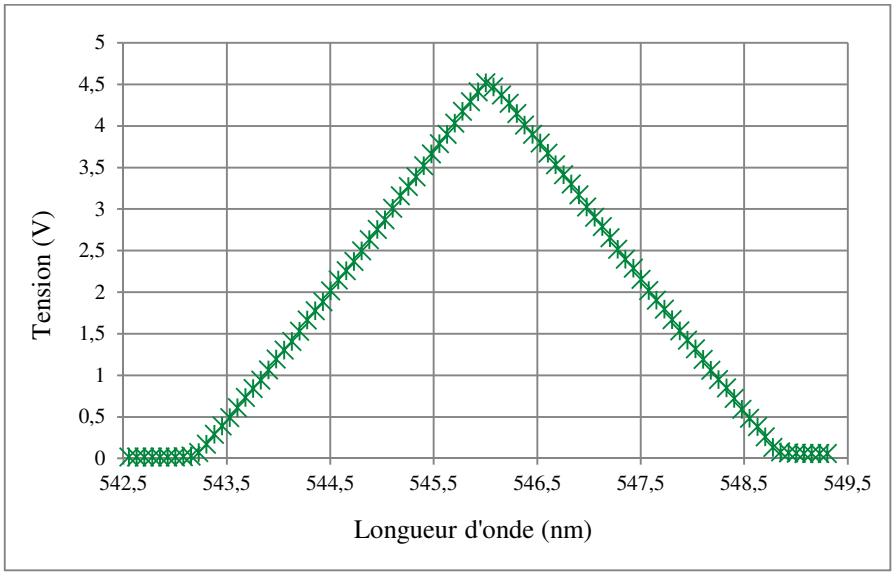



Figure 45 : Tension de sortie en fonction de la longueur d'onde après ajustement des fentes. Les verniers sont décalés de 0,5mm.

Un décalage de 0,5 mm existe entre les deux verniers. Ce décalage est à prendre en compte lors du changement des tailles des fentes d'entrée et de sortie.

## 4.4 Etalonnage en longueur d'onde

### 4.4.1 Principe général

Pour se positionner à une longueur d'onde de travail donnée, $\lambda_T$, nous procédons en deux étapes.

D'abord, nous plaçons une lampe à mercure en guise de source, nous tournons le réseau du monochromateur manuellement de sorte que la raie verte (λ=546,074 nm) sorte du monochromateur. Dans cette position, le monochromateur est calé sur la raie verte.

Pour aller à la longueur d'onde de travail $\lambda_T$, nous adressons au réseau d'effectuer $n$ pas moteur avec :

$$n = \frac{\lambda_T - \lambda_{verte}}{\Delta\lambda} \tag{39}$$

Avec :

$\Delta\lambda$: le déplacement en longueur d'onde correspondant à 1 pas moteur

Dans la pratique, la maîtrise de la longueur d'onde de travail $\lambda_T$ dépend donc de la qualité :

- Du calage sur la raie verte du mercure.
- Du déplacement du monochromateur.

Le calage sur la raie verte du mercure dépend essentiellement de l'opérateur.

La qualité du déplacement quand à elle, doit faire l'objet d'une étude particulière, c'est l'étalonnage en longueur d'onde.

L'étalonnage en longueur d'onde consiste à mesurer le nombre de pas du monochromateur nécessaire pour réaliser un trajet entre deux longueurs d'ondes connues, et ce, pour plusieurs trajets. Pour cela on utilise une lampe à vapeur de mercure et, partant de la raie verte, de longueur d'onde 546,74 nm, on évalue la justesse de pas du monochromateur pour rejoindre d'autres raies (par exemple : 365,02 nm et 435,83 nm).

A l'issue de ce travail, on reporte la droite d'étalonnage du monochromateur. Nous présenterons la méthode pour tracer cette droite.

Selon le constructeur, pour ce réseau à 1200 tr/mm, un pas moteur correspond à 0,075 nm. L'étalonnage en longueur d'onde du monochromateur va permettre de s'assurer que le pas moteur fourni est toujours le même quel que soit le domaine de longueur d'onde. Dans la pratique, nous savons que cela est rarement le cas pour de multiples raisons pas toujours évidentes à formaliser (variation sur la vis, non linéarité de la barre sinus,…etc.).

➢ Principe

On place la lampe à mercure en face de la fente d'entrée. Nous calons le monochromateur sur la longueur d'onde λ= 546,07 nm. Le programme de gestion du monochromateur enregistre la position de la raie verte et s'en réfère pour atteindre les autres longueurs d'onde au voisinage des trois raies d'émission à 365,02 nm, 435,83 nm, 546,07 nm. La fonction de transfert du monochromateur est tracée pour chacune des raies de la lampe. A partir du triangle, nous calculons la position de la raie dans le repère de mesure du monochromateur ($\lambda_{mes}$) et l'incertitude sur cette longueur d'onde mesurée ($u_{\lambda mes}$).

Un programme développé sous Excel permet d'automatiser le calcul de $\lambda_{mes}$ et $u_{\lambda mes}$.

### 4.4.2 Calcul de la longueur d'onde mesurée $\lambda_{mes}$ pour une raie donnée $\lambda_{théo}$

Pour chacune des trois raies d'émission à 365,02 nm, 435,83 nm et 546,07 nm nous avons effectué trois balayages. Nous traçons les courbes de la tension prélevée en fonction de la longueur d'onde U(λ) (Figure 46).

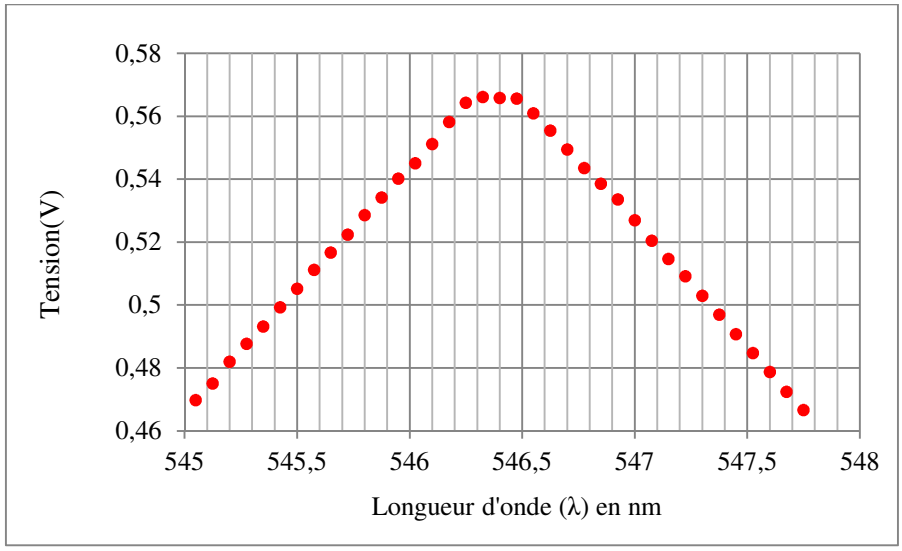



Figure 46 : Tension en fonction de la longueur d'onde ($\lambda_{théorique}$=546,074 nm).

Dans ce qui suit, nous calculons la longueur d'onde mesurée et l'écart entre la longueur d'onde mesurée et la longueur d'onde théorique pour pouvoir appliquer une correction au monochromateur.

Nous prenons l'exemple numérique pour la longueur d'onde théorique 546,074 nm. Les autres longueurs d'ondes suivent le même raisonnement.

#### 4.4.2.1 Méthode

La longueur d'onde mesurée est théoriquement localisée au sommet du triangle. Malheureusement, ce sommet n'est pas évident à définir (Figure 46).

Pour déterminer la longueur d'onde $\lambda_{mes}$, nous calculons l'intersection entre la droite des moindres carrés établie sur le flan montant et la droite des moindres carrés appliquée au flan descendant.

Soit la droite $V = \theta_1 \cdot \lambda + \theta_0$ représente la droite sur le flan montant avec :

$$\theta_1(\mathrm{V/nm}) = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\lambda_i V_i - \sum_{i=1}^{n}\lambda_i \sum_{i=1}^{n} V_i}{n\sum_{i=1}^{n}\lambda_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\right)^2} \quad (40)$$

$$\theta_0(V) = \frac{\sum_{i=1}^{n}\lambda_i^2 \sum_{i=1}^{n} V_i - \sum_{i=1}^{n}\lambda_i \sum_{i=1}^{n}\lambda_i V_i}{n\sum_{i=1}^{n}\lambda_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\right)^2} \quad (41)$$

Avec :

n, le nombre de points sur le flan montant (dans la pratique, nous ne prenons que les 10 derniers points qui presentent une évolution plus linéaire qu'en bas du pic).

$\lambda_i$, la longueur d'onde au point i.

$V_i$, la tension de mesure au point i.

Le même calcul s'applique pour $V' = \theta_1' \cdot \lambda + \theta_0'$, la droite sur le flan descendant avec une pente $\theta_1'$ négative.

Pour la raie verte, la pente et l'ordonnée à l'origine pour chacune des droites sont reportées dans le Tableau 2.

| $\theta_1$ | $\theta_0$ | $\theta_1'$ | $\theta_0'$ |
|---|---|---|---|
| $7{,}78 \cdot 10^{-2}\ V/nm$ | $-42\ V$ | $-7{,}8 \cdot 10^{-2}\ V/nm$ | $43\ V$ |

Tableau 2 : Valeurs des pentes et des ordonnées à l'origine pour la raie verte du mercure.

- Calcul de la longueur d'onde $\lambda_{mes}$ à l'intersection des deux droites.

Les deux droites sont données par :

$$\begin{cases} \mathrm{V} = \theta_1.\lambda_{raie} + \theta_0 \\ \mathrm{V}' = \theta_1'.\lambda_{raie} + \theta_0' \end{cases}$$

D'après ces équations, La longueur d'onde $\lambda_{mes}$ est donnée par :

$$\lambda_{mes} = \frac{(\theta_0 - \theta_0')}{(\theta_1 - \theta_1')} \quad (42)$$

On trouve $\lambda_{mes} = 546{,}39$ nm.

### 4.4.3 Calcul de l'incertitude $u_{\lambda mes}$

Le calcul de l'incertitude se fait en plusieurs étapes :

Etape 1 : calcul de l'incertitude sur les points de mesures du triangle.

Etape 2 : calcul d'incertitude sur les valeurs des paramètres des droites des moindres carrés.

Etape 3 : calcul d'incertitude sur la longueur d'onde $\lambda_{mes}$, longueur d'onde extrapolée.

- Etape 1 : calcul de l'incertitude sur les points de mesure du triangle.

Pour déterminer l'incertitude sur les points de mesure, nous devons prendre en compte d'une part les composantes d'incertitudes évaluées par la méthode de calcul d'incertitude de type A, et les composantes d'incertitudes évaluées par la méthode de calcul d'incertitude de type B telles que les incertitudes de justesse et d'exactitude du multimètre, et les incertitudes dues à la méthode employée pour déterminer la longueur d'onde.

- Composante de type A:

L'incertitude de type A sur les points de mesure est calculée en prenant le maximum de l'estimateur de l'écart type sur la moyenne de la tension pour chaque point *i* ayant participé au calcul des droites des moindres carrés.

$$u_{Ai} = max\left[\frac{S_{U_i}}{\sqrt{n}}\right] \quad en\ Volt \tag{43}$$

Avec :

$\frac{S_{U_i}}{\sqrt{n}}$, Ecart type sur la moyenne de la tension $U_i$.

$n$, le nombre de points relevés par point *i* ($n = 40$).

On trouve :

$$u_{Ai} = 2 \cdot 10^{-4}\ V$$

- Composantes de type B :

a) Exactitude du multimètre :

L'exactitude est définie par le Vocabulaire International de Métrologie (VIM) comme étant "l'étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie d'un mesurande". Elle est reliée à la justesse et à la fidélité de l'instrument [62]. La valeur du signal d'entrée qui produit une indication donnée $\pm E$ peut se situer avec une égale probabilité à n'importe quel endroit de l'intervalle entre $\pm E$. Le signal d'entrée est décrit par une loi de probabilité rectangulaire de largeur $E$.

Pour le multimètre Keithley 199, sur le calibre de 3 V, un étalonnage datant de plus d'un an, nous retrouvons l'exactitude à partir de la fiche technique fournie.

E= $\pm 5{,}96 \cdot 10^{-5} V$. Pour une densité de probabilité rectangulaire, la composante d'incertitude associée s'écrit :

$$u_{exa} = \left(\frac{E}{\sqrt{3}}\right) \tag{44}$$

On trouve : $u_{exa} = 3{,}4 \cdot 10^{-5}\mathrm{V}$

b) Résolution du multimètre :

Si la résolution du dispositif indicateur est $R$ , la valeur du signal d'entrée qui produit une indication donnée $R$ peut se situer avec une égale probabilité à n'importe quel endroit de l'intervalle entre $\pm\frac{R}{2}$. Le signal d'entrée est alors décrit par une loi de probabilité rectangulaire de largeur $R$ [63]. La composante d'incertitude pour la résolution est :

$$u_{res} = \frac{R}{2\sqrt{3}} \tag{45}$$

Pour le multimètre Keithley 199, $R = 10\ \mu V$.

On trouve : $u_{res} = 2{,}9 \cdot 10^{-5} V$.

c) Incertitude liée au monochromateur

Le réseau se déplace pas à pas, le pas moteur étant de P=0,075 nm, le positionnement de la longueur d'onde suit une loi de probabilité rectangulaire de largeur $\frac{P}{2}$ qui se traduit, au niveau du point i, par une composante d'incertitude :

$$u_{\lambda p} = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{3}} = 2{,}2 \cdot 10^{-2}\ \text{nm} \tag{46}$$

L'incertitude sur la longueur d'onde $u_{\lambda p}$ engendre une composante d'incertitude supplémentaire $u_{\lambda_i}$ sur la valeur de la tension mesurée. Cette composante se propage par les pentes des droites sur les flans montant et descendant.

On a :

$$u_{\lambda_i} = \left|\frac{\partial V}{\partial \lambda}\right|_{\lambda_i} \cdot u_{\lambda p} \quad \Big| \text{unité: Volt} \tag{47}$$

Nous calculons cette composante d'incertitude sur les valeurs de la tension en nous mettant dans le cas le plus défavorable c'est-à-dire en prenant le maximum en valeur absolue des deux pentes.

$$u_{\lambda_i} = \max(\theta_1,\ \theta_1') \cdot u_{\lambda p} = 1{,}7 \cdot 10^{-3}\text{V} \tag{48}$$

L'incertitude globale sur la valeur de la tension mesurée nommée $u_{V_i}$ , est une combinaison des incertitudes de type A et les incertitudes de type B que nous venons de décrire. Soit :

$$u_{V_i} = \sqrt{{u_{Ai}}^2 + {u_{exa}}^2 + {u_{res}}^2 + {u_{\lambda_i}}^2} = 1{,}7 \cdot 10^{-3}\text{V} \tag{49}$$

Cette incertitude est reportée sur la Figure 47 pour k=1.

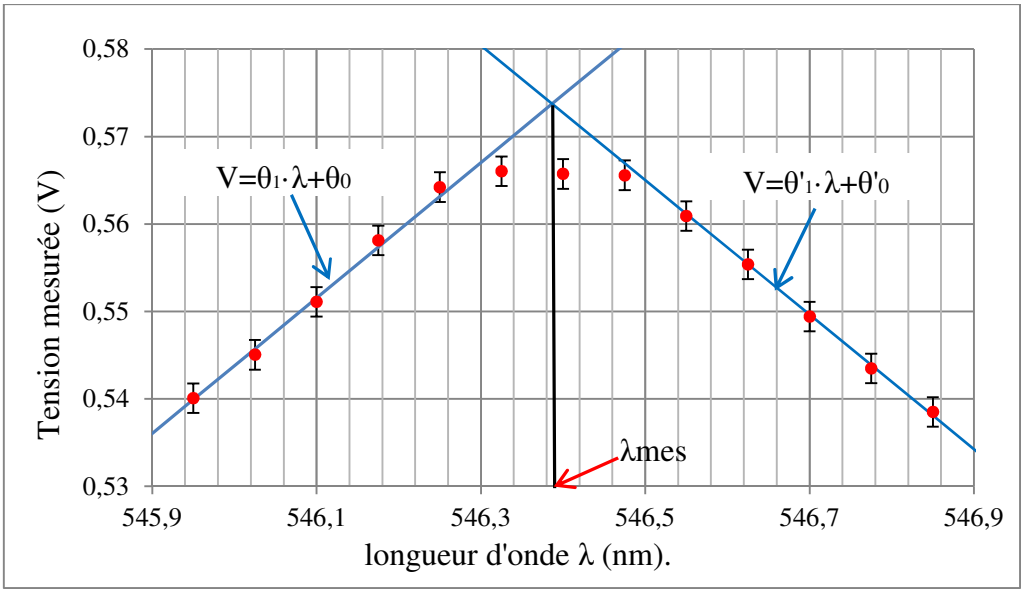



Figure 47 : Mesure de la raie à $\lambda_{théo} = 546{,}074\text{nm}$.
En rouge les points de mesure, en bleu les deux droites appliquées au flan montant et descendant, et en noir l'incertitude sur les points mesurés. $\lambda_{mes}$ est extrapolée à l'intersection des deux droites.

- Etape 2 : Incertitude sur la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite des moindres carrés :

L'incertitude sur les mesures de tension étant maintenant connue, nous pouvons calculer l'incertitude sur les pentes et sur les ordonnées à l'origine des flans du triangle.

L'incertitude sur la pente est donnée par :

$$u_{\theta_1}(\text{V/nm}) = \left[\frac{n \;\; {u_{V_i}}^2}{n\sum_{i=1}^{n}\lambda_i^2 - (\sum_{i=1}^{n}\lambda_i)^2}\right]^{1/2} \tag{50}$$

L'incertitude sur l'ordonnées à l'origine est donnée par :

$$u_{\theta_0}(\text{V}) = \left[\frac{{u_{V_i}}^2 \sum_{i=1}^{n}\lambda_i^2}{n\sum_{i=1}^{n}\lambda_i^2 - (\sum_{i=1}^{n}\lambda_i)^2}\right]^{1/2} \tag{51}$$

La covariance entre la pente et l'ordonnée à l'origine.

$$cov(\theta_0 \;, \theta_1) = \left[\frac{-\;{u_{V_i}}^2 \sum_{i=1}^{n}\lambda_i}{n\sum_{i=1}^{n}\lambda_i^2 - (\sum_{i=1}^{n}\lambda_i)^2}\right] \tag{52}$$

Avec :

n, le nombre de points de mesure pour le calcul de la droite.

$u_V$ , L'incertitude sur la valeur de la tension calculée à l'étape 1.

$\lambda_i$ est la longueur d'onde au point *i*.

Le Tableau 3 regroupe les résultats de l'analyse numérique pour le pic à 546,074 nm.

| $u_{\theta_1}$ (V · nm$^{-1}$) | $u_{\theta_0}$ (V) | $cov(\theta_0 \;, \theta_1)$ (V$^2$ · nm$^{-1}$) | $u'_{\theta_1}$ (V · nm$^{-1}$) | $u'_{\theta_0}$ (V) | $cov(\theta'_0 \;, \theta'_1)$ (V$^2$ · |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $nm^{-1}$) |
| $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ | $6{,}7 \cdot 10^{-1}$ | $-8{,}3 \cdot 10^{-3}$ | $1{,}1 \cdot 10^{-3}$ | $6{,}2 \cdot 10^{-1}$ | $-6{,}9 \cdot 10^{-4}$ |

Tableau 3 : Valeurs de l'incertitude sur la pente l'ordonnées à l'origine ainsi que la covariance pour les deux droites.

- Etape 3 : Calcul de l'incertitude sur $\lambda_{mes}$:

A partir des paramètres précédents, il est possible de calculer l'incertitude sur un point de mesure extrapolé sur la droite des moindres carrées.

Soit le point $M_1$, à la longueur d'onde $\lambda_{M_1}$. La tension de mesure extrapolée par ce point à partir de la droite de pente $\theta_1$ et d'ordonnée à l'origine $\theta_0$ est donnée par:

$$V_{M_1} = \theta_1 \cdot \lambda_{M_1} + \theta_0$$

Soit le point $M_2$, à la longueur d'onde $\lambda_{M_2}$. La tension de mesure extrapolée par ce point à partir de la droite de pente $\theta_1'$ et d'ordonnée à l'origine $\theta_0'$ est donnée par:

$$V_{M_2} = \theta_1' \cdot \lambda_{M_2} + \theta_0'$$

L'incertitude sur la tension est donnée par :

$$u_{\mathrm{M}} = \left[{u_{\theta_0}}^2 + {\lambda_M}^2 \cdot {u_{\theta_1}}^2 + 2 \cdot \lambda_M \cdot cov(\theta_0, \theta_1)\right]^{1/2} \qquad (53)$$

Sur la Figure 48, nous traçons pour la raie verte du mercure, les droites des moindres carrés, et l'évolution des incertitudes sur les points extrapolés. On définit la zone d'intersection, définie par le losange donné par les quatre courbes : $V_{M_1} \pm u_{\mathrm{M1}}^2$ et $V_{M_2} \pm u_{\mathrm{M2}}^2$.

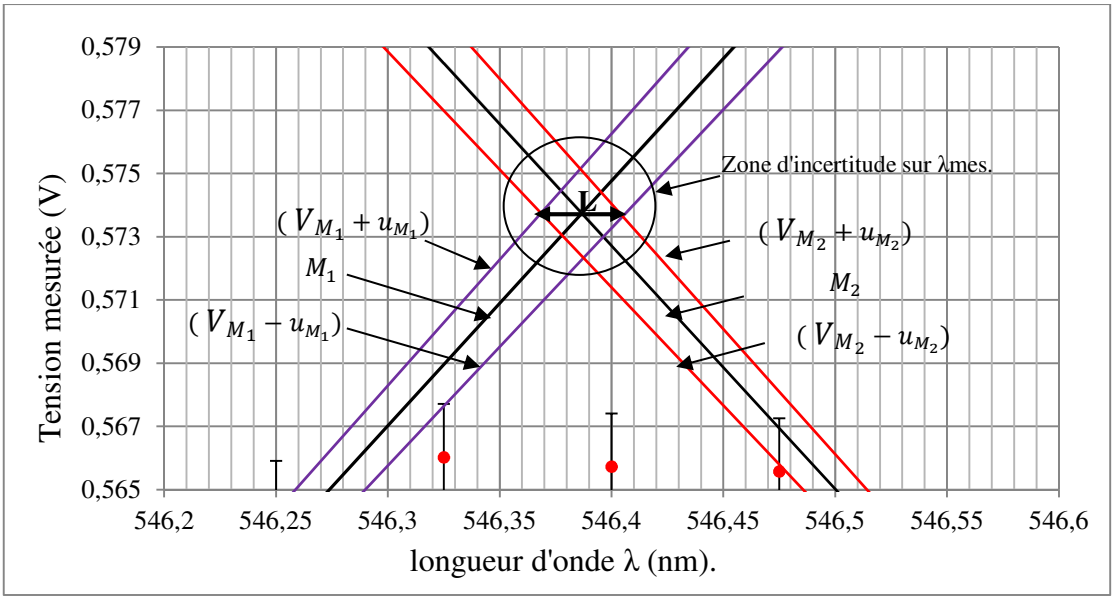



Figure 48 : Illustration de la zone d'incertitude à l'intersection des deux droites calculées au sens des moindres carrées (k=1), pour la raie verte de notre lampe à vapeur de mercure.

Le calcul de l'incertitude sur $\lambda_{mes}$ revient à évaluer *L*, la diagonale du losange (Figure 48). Le calcul de L peut se faire de manière analytique. Dans notre cas nous avons utilisé une méthode numérique en s'appuyant sur un algorithme de minimisation du "solver" d'Excel.
Nous trouvons :

$$u_{\lambda_{mes}} = \frac{L}{2} = 1{,}2 \cdot 10^{-2} \text{ nm} \tag{54}$$

### 4.4.4 Calcul de l'incertitude sur la longueur d'onde de travail

Nous pouvons maintenant calculer les écarts entre les longueurs d'onde théoriques de raie d'émission d'une lampe à vapeur de mercure et les longueurs d'ondes mesurées. Chaque longueur d'onde mesurée est la moyenne de trois répétitions.
Exemple: pour la longueur d'onde théorique $\lambda_{théo}(nm) = 546{,}074$ nm , la longueur d'onde mesurée $\lambda_{mes1}(nm) = 546{,}386$ nm, $\lambda_{mes1}(nm) = 546{,}299$ nm, $\lambda_{mes1}(nm) = 546{,}225$ nm, ainsi

$$\lambda_{mes}(nm) = 546{,}303 \text{ nm}$$

| $\lambda_{théo}(nm)$ | $\lambda_{mes}(nm)$ | $\lambda_{mes}$- $\lambda_{théo}(nm)$ | incertitude $u_{\lambda_{mes}}$ $(nm)$ |
|---|---|---|---|
| 365,016 | 364,952 | $-6{,}4 \cdot 10^{-02}$ | $5{,}0 \cdot 10^{-02}$ |
| 435,834 | 436,159 | $3{,}2 \cdot 10^{-01}$ | $3{,}2 \cdot 10^{-02}$ |
| 546,074 | 546,303 | $2{,}3 \cdot 10^{-01}$ | $2{,}0 \cdot 10^{-02}$ |

Tableau 4 : Ecarts entre les longueurs d'onde théoriques de raie d'émission d'une lampe à vapeur de mercure et les longueurs d'ondes mesurées.

### 4.4.5 Incertitude sur la longueur d'onde de travail $\lambda_T$

L'incertitude sur $\lambda_T$ provient de la combinaison de plusieurs composantes

- D'après les mesures effectuées, le plus grand écart entre la longueur d'onde théorique d'une raie de la lampe à vapeur de mercure, et celle mesurée, est de 0,32 nm (Tableau 4).

La plus grande incertitude sur les longueurs d'onde mesurées est 0,05 nm. L'erreur maximale sur la longueur d'onde est donc égale à 0,37 nm.
Une loi de distribution rectangulaire a été choisie en faisant l'hypothèse que l'erreur a la même probabilité d'être comprise dans l'intervalle [-*a* ; +*a*] où *a* est le demi- étendue qui est égale à 0,37 nm. L'incertitude associée, $u_{\Delta\lambda+\lambda\text{mes}}$, est donc égale à 0,22 nm (0,37/√3).

- Incertitude due au calage du monochromateur sur la raie verte de mercure

Le calage du monochromateur manuellement sur la raie verte de mercure engendre une incertitude liée à la répétabilité de l'opérateur. Elle est évaluée à partir de trois répétitions effectuées. Pour chaque répétition nous calculons la longueur d'onde $\lambda_{mes}$.

L'incertitude associée à cette composante est donnée par :

$$u_{\lambda_{cal}} = \left[\frac{S_{\lambda_i}}{\sqrt{n}}\right] = 4{,}6 \cdot 10^{-2}\text{nm} \tag{55}$$

Avec :

$S_{\lambda_i}$, l'écart type sur les longueurs d'onde mesurées.

n : le nombre de mesure = 3.

- Incertitude liée aux paramètres mécaniques du monochromateur (moteur pas à pas),on retrouve :

➢ L'incertitude $u_{res\cdot mon}$ due à la résolution du monochromateur calculée plus haut pour un pas P=0,075nm est donnée par :

$$u_{res\cdot mon} = \frac{\text{P}}{2\sqrt{3}} = 2{,}2 \cdot 10^{-2}\text{nm} \tag{56}$$

➢ L'incertitude due à la relaxation du monochromateur estimée à deux pas moteur pour de petits monochromateurs :

$$u_{relax} = \frac{(2P)}{2\sqrt{3}} = 4{,}33 \cdot 10^{-2}\text{nm} \tag{57}$$

- Défaut dans le rattrapage de jeu du monochromateur estimé à un pas moteur :

$$u_{ratt} = \frac{P}{2\sqrt{3}} = 2{,}2 \cdot 10^{-2}\text{nm} \tag{58}$$

L'incertitude globale sur la longueur d'onde est donnée par la somme carrée de toutes les composantes d'incertitudes évaluées précédemment ainsi on peut écrire :

$$u_{\lambda T}(\lambda) = \sqrt{{u_{\Delta\lambda+\lambda\text{mes}}}^2 + {u_{\lambda_{cal}}}^2 + {u_{res\cdot mon}}^2 + {u_{relax}}^2 + {u_{ratt}}^2} \tag{59}$$

$u_{\lambda T}(\lambda)$ =0,22 nm.

L'étude de cet exemple permet de conclure que pour travailler dans le visible, il faut améliorer le calage du monochromateur sur la raie verte du mercure. Néanmoins pour travailler dans l'IR, il faudrait refaire l'étalonnage avec plus de pics en utilisant des lampes dont les pics connus sont dans l'infrarouge.

# 5. Protocole de mesure

La partie illumination et détection étant montées, nous pouvons maintenant réaliser une mesure de BRDF.

Le photocourant généré par la photodiode (Hamamatsu Référence : S3584-08) de la détection spectrale mesuré est amplifié et converti en tension via un convertisseur courant-tension (Gamma scientific modèle 19885). Le changement de calibre du CAV est pilotable par le programme LabVIEW du banc de mesure de la BRDF.

Un fichier de géométrie de mesure génère les points *n* où le gonioréflectomètre devra se positionner.

Un cycle comporte 3 types de mesures, à savoir :

1. Une mesure en direct du flux lumineux émis par la source, qui correspond au niveau 100% ($V_{sa}$: tension correspondant au flux direct émis par la source à l'aller).
2. Une mesure de noir dans cette configuration permettant de corriger les erreurs dues à la lumière parasite ($V_{sa}$: tension correspondant à la mesure du noir à l'aller).
3. Une mesure du flux réfléchi par l'échantillon dans la configuration angulaire définie par l'opérateur à une position *n*.
4. Une mesure de noir dans la nouvelle configuration.
5. Répétition des mesures 3 et 4 pour les configurations angulaires définies par l'opérateur entre *n* et *n*+1.
6. Répétition des mesures 1 et 2.

Afin de compenser les dérives lentes, ces mesures sont effectuées deux fois, selon une séquence « aller » et une séquence « retour » symétriques. Le cycle de mesure est présenté sur la Figure 49.

Nous calculons la BRDF comme la moyenne des BRDF aller et retour d'une même position.

Les mesures de tensions associées aux calibres employés par le CAV permettent de remonter aux photocourants $i_{ech}$ et $i_{source}$ caractéristiques respectivement de l'échantillon et de la source :

$$i_{\text{ech aller}} = \frac{V_{ea}(n) - V_{0\%ea}(n)}{R_{ech}} \qquad i_{\text{ech retour}} = \frac{V_{er}(n) - V_{\%er}(n)}{R_{ech}} \tag{60}$$

$$i_{\text{source aller}} = \frac{V_{sa} - V_{0\%sa}}{R_{source}} \qquad i_{\text{source retour}} = \frac{V_{sr} - V_{\%sr}}{R_{source}} \tag{61}$$

Où $R$ correspond à la valeur du gain de l'amplificateur.

La BRDF est déterminée pour une position n à partir de l'équation suivante :

$$BRDF(n) = \frac{i_{ech}(n)}{i_{source}} \cdot \frac{1}{\Omega cos\theta_R} \tag{62}$$

Où $\Omega$ est l'angle solide de détection et $\theta_R$ le zénith de détection.

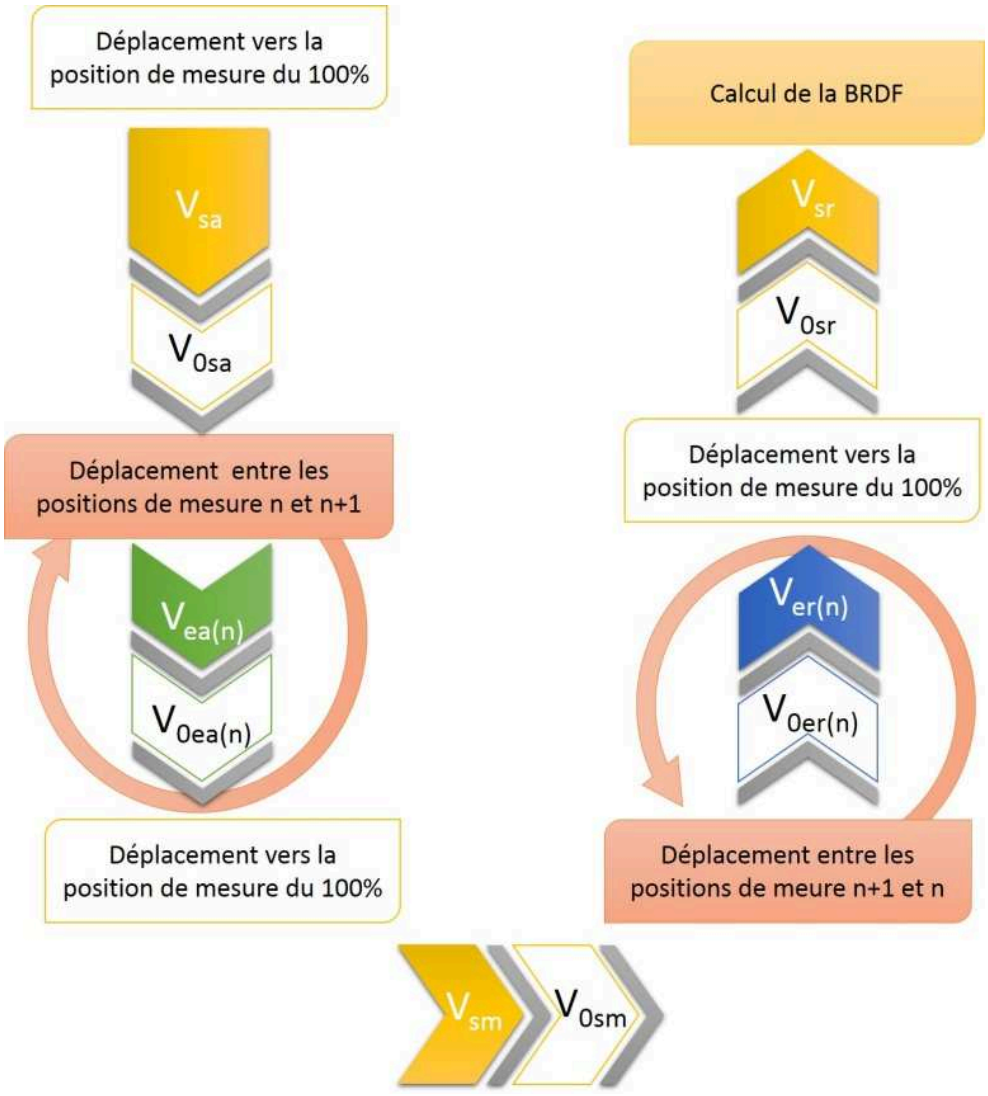



Figure 49 : Cycle de mesure de la BRDF.
Chaque chevron coloré est une mesure du signal de la source en direct ou de l'échantillon, les chevrons blancs correspondent à des mesures de zéro. Les petits chevrons gris correspondent aux bascules de l'obturateur.

# 6. Résultat

Après avoir aligné les optiques de l'illumination et de la détection ainsi que le robot au centre du gonioréflectomètre, nous avons réalisé des mesures de la BRDF dans le plan d'incidence d'un échantillon de spectralon® Labsphère avec une illumination normale à sa surface.

Le spectralon®, est un fluoropolymère qui présente, théoriquement, la particularité de réfléchir la lumière d'une manière lambertienne. Il est souvent utilisé comme échantillon dans la mesure de la BRDF. Dans la pratique, les études menées par la PTB, ont montré que le spectralon® n'est pas complètement lambertien et qu'il présente une décroissance aux angles d'observation rasants, mais aussi pour les courtes longueurs d'onde (300 nm) [64][65][66]. La Figure 50, issue de nos premières mesures met bien en évidence ce comportement. D'un autre côté, nous visons une incertitude type de répétabilité sur la BRDF de 0,5%, or nous retrouvons une incertitude proche de 2% en relatif, à k=1. (L'incertitude calculée pour une mesure de BRDF est inferieure à 1% ( k=1)[67]). Ce résultat mitigé en regard de notre objectif d'incertitude ne doit pas être bloquant. Depuis cette mesure des améliorations ont été apportées telle que :

- La lumière parasite peut encore être diminuée (utilisation de détection synchrone)
- L'alignement des optiques d'illumination et de détection mériterait encore quelques réglages (réglages mécaniques plus fins installés sur les optiques).

D'autres améliorations sont peut être à prévoir, par exemple l'isolation électromagnétique de la boîte de la détection est à terminer (cloisonnement métallique, mise à la masse de la boite).

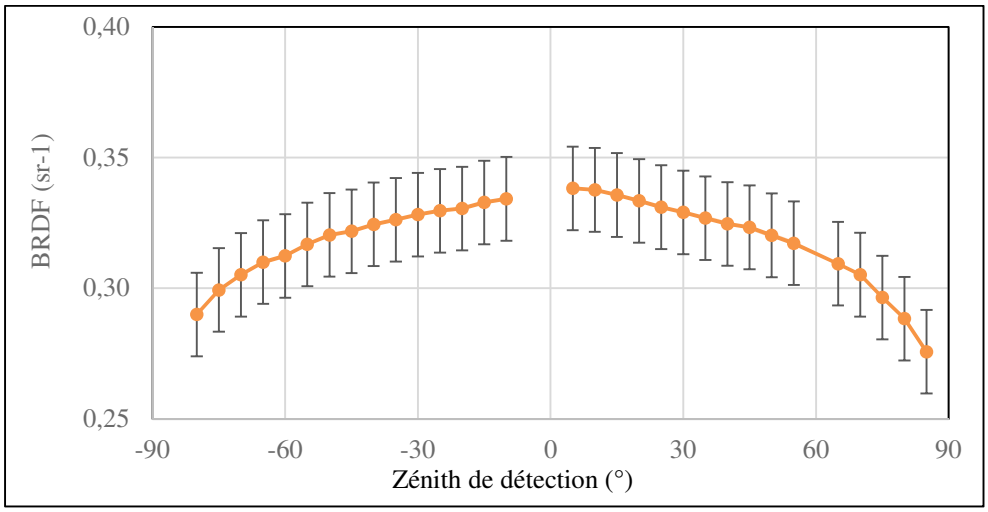



Figure 50 : BRDF dans le plan d'incidence d'un échantillon de spectralon®Labsphère. $\lambda$= 560 mn, $\varphi_I = 0°$, $-85° < \theta_R < 85°$ par pas de 5°.

# CHAPITRE IV

# La voie spatiale



# Le brillant



# 1. Rappel du cahier de charges

Pour cette voie spatiale, nous allons développer un instrument de mesure de BRDF à haute résolution angulaire. La résolution visée est celle de l'œil humain soit 0,03°. Nous pourrons ainsi fournir des mesures de pic spéculaire pour des surfaces brillantes et fournir des pistes pour l'étude du brillant visuel. Mais 0,03° représente un angle solide de 0,2 µsr, ou encore une surface de 0,5 mm de diamètre vue à 1 m de distance. Ceci est très petit outre les problèmes de flux et de rigueurs dans le positionnement mécanique qui sont évidents.

Outre la résolution, nous avons d'autres contraintes. En effet, d'un point de vue temporel, mesurer un pic spéculaire revient à mesurer la luminance dans des directions comprises dans et autour de la direction spéculaire. La méthode qui serait d'utiliser un diaphragme de diamètre 0,5 mm et d'effectuer la mesure dans une direction donnée puis le déplacer pour mesurer la direction adjacente semble hasardeuse. Cette méthode demanderait environ 5000 mesures soit environ 5000 min, soit presque trois jours et demi de mesures continues. Nous avons donc décidé d'opter pour un conoscope inspiré de l'EZ contrast d'Eldim (page 59) qui permet de mesurer en un seul cliché la luminance provenant des différentes directions.

D'un point de vue spectral, la réflexion concernée est la réflexion dite de « surface ». Cette réflexion n'est pas colorée. Pour cette raison, la détection n'a pas besoin d'être spectrale. Nous travaillerons en grandeurs photométriques sur cette voie avec la perspective d'observer des corrélations entre les résultats de mesures physiques (BRDF) et les résultats de caractérisation psychophysique obtenue sur des sujets humains.

D'un point de vue géométrique, même si la voie brillant a pour objectif de réaliser des mesures confinées dans et autour de la direction spéculaire, les autres directions d'observation devront être accessibles.

Pour des raisons mécaniques, la détection se trouve à 1700 mm du centre de l'échantillon. Elle est posée sur la table optique fixe. Cette contrainte est essentiellement due au fait que la partie source tourne à une distance fixe de 1 m de la surface mesurée. Dans ces conditions, il est hors de question de recueillir la lumière dans un angle solide trop large sous peine d'augmenter considérablement la taille de la première lentille de la détection et d'avoir à gérer

des aberrations importantes. Nous avons décidé de recueillir la lumière dans un cône de ±1°. C'est la valeur recommandée par la CIE pour la mesure de la couleur.

La taille du champ observé ne peut pas être aussi élevée que pour la voie spectrale (la détection observe tout le plateau de 600 mm de diamètre) pour des raisons de divergence optique. Nous visons un champ maximum de 40 mm au niveau de l'échantillon. Dans ce cas, pour une taille de faisceau de 20 mm nous serons capables d'éclairer avec un angle zénithal d'incidence de 60°. Cet angle peut être plus élevé pour des faisceaux plus étroits. Dans ces conditions, le diaphragme d'ouverture du système est de 72,4 mm de diamètre, pour une distance échantillon – détection de 1700 mm.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la conception optique de l'illumination. Puis nous développons la détection et sa faisabilité, notamment en termes de flux. Nous verrons ensuite sa caractérisation métrologique. Nous terminons par la mise en œuvre de mesures réelles, en multi-exposition temporelle et angulaire.

# 2. L'illumination

- Choix de la lampe

Parmi les deux lampes sélectionnées pour l'illumination de la ligne spatiale (lampe QTH et lampe à arc xénon), il a été retenu l'utilisation d'une lampe QTH de 75 W dont la température de couleur est de $T_c = 2800\,K$. Elle est stabilisée en courant par une alimentation Drush stabilisée. Le choix de cette lampe par rapport à une lampe à xénon s'impose pour les trois raisons suivantes :

- Le corps noir possède la particularité de transformer la totalité du flux absorbé en chaleur émise sous forme de rayonnement électromagnétique. Pour notre application, l'utilisation d'une source dont les propriétés se rapprochent le plus possible du corps noir serait l'idéal. A cet effet, la CIE définit l'illuminant A qui représente le rayonnement d'un corps noir à une température de 2856 K, celui-ci peut être approché par une lampe à incandescence à filament de tungstène. C'est l'illuminant recommandé par la CIE pour les applications de colorimétrie [68]. Ainsi en photométrie nous utilisons un filtre V(λ) optimisé pour l'illuminant A qu'on associe à une lampe QTH réglée à $T_c = 2800$ K, ce qui permet d'obtenir un spectre très proche de l'illuminant A.
- La stabilité spatiale des lampes QTH est directement liée à leur stabilité mécanique, une lampe immobile signifie que l'éclairement provient globalement de la même surface du filament. Tandis que pour l'arc, du fait de son instabilité spatiale entre l'anode et la cathode il est difficile d'éclairer de la même manière (même intensité).
- La stabilité en flux de la lampe QTH (à long terme) est meilleure que celle des lampes à arc xénon. En effet, à court terme (<1s), les lampes à arc Xénon et QTH, ont une incertitude relative du même ordre ($\cong 10^{-3}$). Tandis qu'à long terme (100 s) la QTH présente une incertitude relative $\cong 3 \cdot 10^{-4}$, tandis que la lampe à décharge au xénon présente une incertitude relative $\cong 2 \cdot 10^{-3}$.

L'utilisation d'un détecteur codé sur 16 bits (65535 nombre de charges) donnera une incertitude relative de 20 nombre de charges ($3 \cdot 10^{-4}$ x 65535) avec la lampe QTH et 131 nombre de charges ($2 \cdot 10^{-3}$ x 65535) avec la lampe xénon. Le bruit de Schottky, donné par $\sqrt{n}$ est égal à 255 pour un signal de 65535 nombre de charges. En comparant les trois valeurs

il est clair que l'incertitude qu'on a en utilisant la lampe QTH est presque négligeable devant le bruit de Schottky, ce qui n'est pas le cas avec la lampe à arc xénon.

Néanmoins, l'inconvénient de la lampe QTH par rapport à une lampe à décharge au xénon est sa luminance faible (de 4 à 8 fois plus petite) [69]. Or nous savons que sur cette ligne le flux diminuera, compte tenu des contraintes de collimation (ouverture du sténopé) et des angles solides de détection faibles (±1°). Les calculs préliminaires (détaillés page 119) montrent que cette diminution est de l'ordre de $10^{-7}$, une détection sensible sera nécessaire pour pouvoir travailler avec une telle lampe.

Pour avoir, côté détection, une résolution angulaire de 0,03°, il est nécessaire d'éclairer l'échantillon avec un faisceau dont la divergence est inférieure à 0,03°. Si on considère une source de taille $x$ placée au plan focal objet d'une lentille L de focale $f$, alors la divergence de 0.03° est égale à $0{,}03° = atan\left(\frac{x}{f}\right)$.

L'utilisation du filament comme source nous imposerait d'utiliser une focale trop longue. L'utilisation d'un sténopé placé devant la source permet l'adaptation de l'ouverture de la source, son emplacement par rapport à la lentille ainsi que son diamètre déterminent la divergence du faisceau d'illumination (Figure 51).

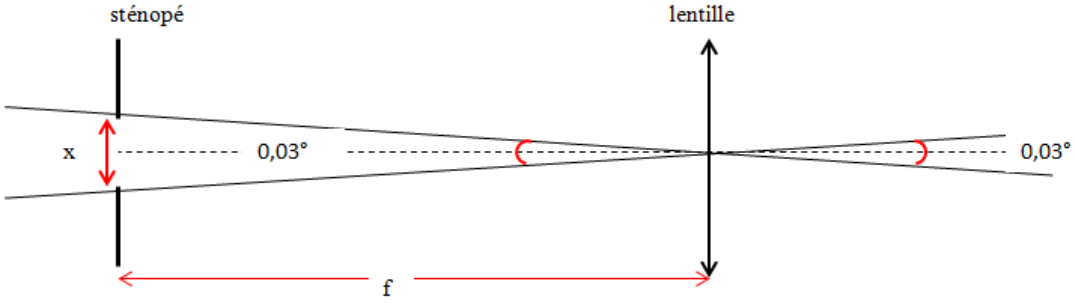



Figure 51: Représentation schématique des paramètres de calcul de la divergence.

Le Tableau 5 représente quelques combinaisons possibles de tailles de sténopé et focales à utiliser pour avoir une résolution de 0,03°.

| Diamètre du sténopé (µm) \ Focale (mm) | 2000 | 1000 | **400** | 200 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1000 | 0,03° | 0,06° | 0,14° | 0,29° | 0,57° |
| 500 | 0,01° | 0,03° | 0,07° | 0,14° | 0,29° |
| 200 | 0,01° | 0,01° | 0,03° | 0,06° | 0,11° |
| 100 | 0,003° | 0,01° | 0,01° | 0,03° | 0,06° |
| 50 | 0,001° | 0,003° | 0,01° | 0,01° | 0,03° |

Tableau 5 : Résolution du faisceau d'illumination en fonction de l'ouverture du sténopé et de la focale du collimateur.

Les contraintes d'encombrement (partage de la table optique de 60x60 cm entre l'illumination spatiale et la détection spectrale) ainsi que la quantité de flux issue du sténopé ont conduit à l'analyse suivante :

La résolution de 0,03° peut être retrouvée avec des focales 2000 mm et 1000 mm pour des diamètres de 1 mm et 0,5 mm respectivement. Ces deux configurations présentent un problème d'encombrement dû à des focales longues. Mais ces tailles de sténopés permettent de laisser passer plus de flux (jusqu'à 25 fois plus de flux en utilisant le sténopé de 1 mm au lieu du sténopé de 200 µm).

Les focales de 200 mm et 100 mm utilisées avec des sténopés de 100 µm et de 50 µm respectivement, permettent de retrouver la résolution de 0,03° mais ces diamètres sont très petits, ce qui impliquerait une perte en flux considérable (seize fois moins de flux si on utilise le sténopé de diamètre 50 µm au lieu de celui de 200 µm et quatre fois moins de flux si on utilise celui à 100 µm).

Compte tenue de cette analyse, nous avons choisi d'utiliser un doublet achromatique de focale $f = 400$ mm pour un sténopé en acier inoxydable de diamètre Ø=200 µm (Edmund Optics 39-728). L'ensemble donne une divergence théorique de 0,03°.

- Schéma adopté

Afin d'éviter la surchauffe du sténopé et par conséquent des déformations importantes, un premier système optique de grossissement γ=1 constitué d'une lentille convergente de focale $f_1$=100 mm image le filament de la lampe sur le sténopé qui se trouve au plan focal objet du doublet achromatique de collimation dont la focale $f_2$ est égale à 400 mm.

Derrière le doublet de collimation nous plaçons une série de 4 diaphragmes afin de limiter le diamètre du faisceau à 20 mm.

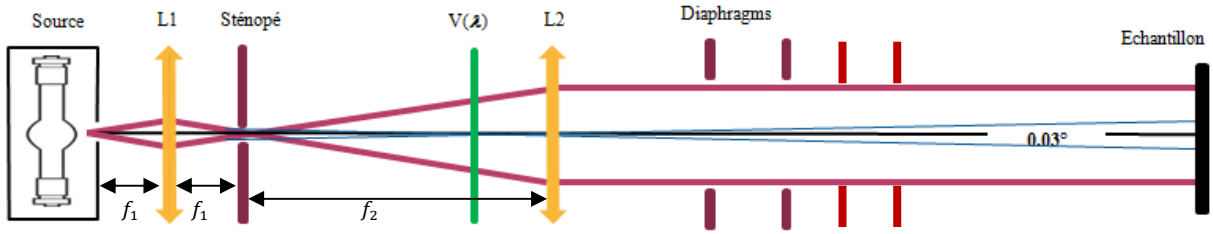



Figure 52 : Schéma descriptif de l'optique d'illumination
Ce système comprend un sténopé, deux lentilles et quatre diaphragmes. La première lentille, de focale $f_1$=100 mm, sert à palier les problèmes de chauffe du sténopé, elle image la source sur le sténopé. Le diamètre du sténopé est de 200 µm. il est placé au point focale objet du doublet de collimation $f_2$=400 mm ce qui donne une divergence théorique de 0,03°.

- Implémentation

Nous devons partager l'espace sur la table optique montée sur la couronne avec la détection de la ligne spectrale. Le système doit tenir sur un espace de 30 x 60 cm, ce qui impose une contrainte géométrique supplémentaire d'autant plus que les distances entre les optiques formant l'illumination sont relativement longues. Notons en plus que cette table est placée très en dessous du centre du gonioréflectomètre. Ceci est dû au fait que la détection spectrale a été dessinée tout en hauteur. Nous utilisons deux miroirs de repliement successif pour replier le faisceau et libérer de l'espace. La lampe est installée dos à l'échantillon afin de limiter au maximum la lumière parasite. Un périscope permet de remonter le faisceau à la hauteur du centre du gonioréflectomètre.

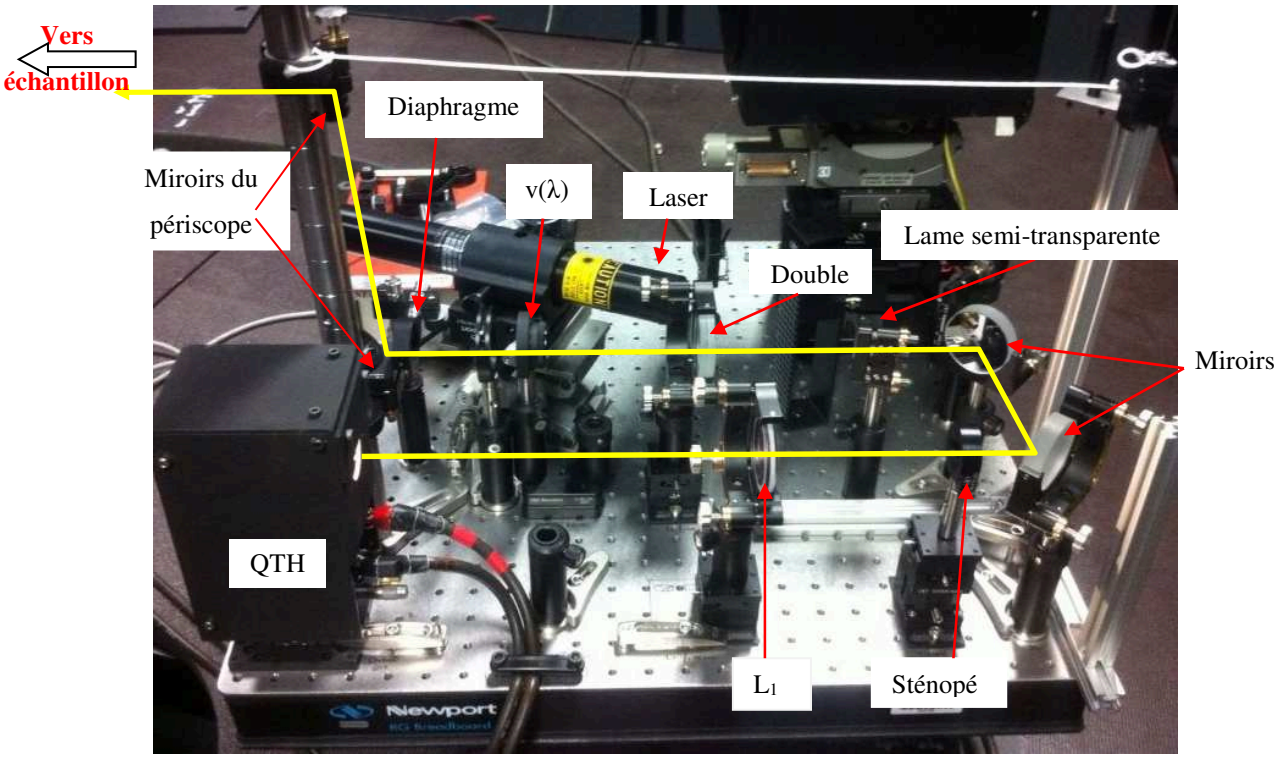



Figure 53 : Image de l'illumination de la ligne spatiale. En jaune le trajet du faisceau.

- Alignement

Les lentilles et les miroirs sont montés sur des systèmes de translation et de rotations. Le sténopé est sur un module micrométrique X, Y, Z. Le faisceau provenant d'un laser d'alignement utilisé avec une lame semi-transparente amovible permet d'aligner les optiques sur l'ensemble du montage simultanément vers la lampe et vers l'échantillon.

# 3. La détection

La détection est assurée par la combinaison d'un conoscope qui réalise l'optique de Fourier et d'une caméra CCD. La détection a été développée en collaboration avec Eldim, leader mondial de ce type de détection.

## 3.1 La caméra

La caméra est cruciale dans ce dispositif. Nous attendons d'elle qu'elle soit sensible, dynamique et linéaire. Sensible car nous ne nous attendons pas à trouver beaucoup de lumière dans un angle solide de 0,2 µsr (0,03°) surtout en dehors du pic spéculaire. Dynamique car nous savons qu'un pic spéculaire peut s'élever sur plusieurs décades en terme de luminance [70]. Linéaire en temps et en flux, car notre objectif est de construire un équipement de référence.

Après un bref rappel sur le fonctionnement d'une caméra CCD, nous présentons l'étude théorique en flux, qui a permis de sélectionner la caméra utilisée dans notre détection, puis l'étude théorique des bruits, qui a servi à valider la faisabilité du projet. La caractérisation métrologique de la linéarité, est développée par la suite.

### 3.1.1 La caméra CCD, principe général

Une caméra numérique est constituée de quatre différentes parties :

- L'objectif et l'obturateur

L'objectif est un ensemble d'optiques, qui sert à focaliser la lumière sur le capteur. Il est caractérisé par sa focale qui peut être fixe ou variable. Une focale variable permet de gérer l'angle de champ, une focale courte correspond à une ouverture de champs plus grande, et inversement. Un diaphragme est souvent placé en entrée de l'objectif afin de changer l'angle d'ouverture, qui va régler la quantité de lumière susceptible d'atteindre le capteur. L'angle d'ouverture s'écrit par convention sous la forme $f/x$, $f$ étant la focale et $x$ le diamètre du diaphragme.

L'objectif est un élément optique qui coûte cher et représente souvent un pourcentage non négligeable dans le prix de la caméra. Dans notre cas, l'objectif est développé à part. Nous recherchons donc une caméra nue ce qui devrait réduire le coût.

Derrière l'objectif se trouve l'obturateur, qui peut être mécanique ou électronique. C'est cet élément qui limite le temps d'exposition du capteur. L'obturateur mécanique peut être à iris ou à rideau. Dans les deux cas, il s'ouvre progressivement, privilégiant l'exposition de certaines zones du détecteur par rapport à d'autres. Dans le cas d'un obturateur à iris les pixels du détecteur situés au centre de l'obturateur seront plus exposés que ceux des bords. Pour les obturateurs à rideau, cela dépend de son sens d'ouverture (haut/bas, droite/gauche, etc.) mais le résultat est aussi une inhomogénéité d'exposition. Cet écart est souvent négligeable pour les temps d'exposition longs mais il peut être pénalisant pour les temps courts. Ainsi pour ce type d'obturateur, il est indispensable de déterminer un seuil limite de temps d'exposition.
En ce qui concerne les obturateurs électroniques, le principe est différent. Dans ce cas le capteur est constamment exposé à la lumière. La durée du temps actif du détecteur se fait de manière électronique grâce à des horloges. Ainsi seules les charges emmagasinées pendant l'activation des horloges sont transférées, celles emmagasinées en dehors de ce temps seront supprimées en vidant les pixels. Les capteurs électroniques sont donc dépourvus de lamelles. En cela, ils peuvent présenter un atout pour des temps d'obturation courts. En revanche, l'exposition permanente du capteur a tendance à élever sa température et à augmenter le bruit.
Dans notre cas nous allons préférer l'utilisation d'un obturateur mécanique puisque nous travaillerons essentiellement à des temps d'exposition longs.

- Le capteur photosensible

Ce capteur est généralement un CCD (Charge Coupled Device) ou un CMOS (Complementary Metal Oxide Semi-conducteur).
La Figure 54, présente une vue du principe de la chaine de détection d'une caméra. La partie détection se trouve derrière l'obturateur et est composée d'un dispositif à transfert de charge (*CCD*) noté *R* qui convertit la puissance optique en quantités de charges, d'un convertisseur charge-tension noté (*CCT*), d'un amplificateur *A* et d'un convertisseur analogique numérique (*CAN*). En sortie nous récupérons alors un signal numérique codé sur n bits.

Le CCD est une matrice de pixels. Il est caractérisé par le nombre de pixels, mais aussi par leur taille. Le nombre de pixel des caméras CCD varie d'une caméra à une autre, il varie aussi selon l'application de la caméra. Pour la photographie, il est classique aujourd'hui de

trouver des CCD contenant plus de 20 MPixels. Pour les caméras scientifiques refroidies ce nombre est généralement plus petit. Dans notre cas, le nombre de pixels n'est pas essentiel pour notre application. En effet, la détection avec une résolution de 0,03° dans un angle de ±1°, ne requiert que $\left({}^{2^\circ}/_{0{,}03^\circ}\right) \cdot {}^{\pi}/_{4} \cong 3500$ pixels. En revanche, la taille du pixel est importante. En effet, plus le pixel est grand plus sa capacité de charge est grande.

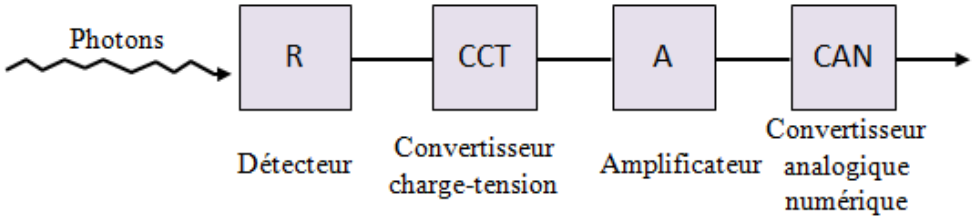



Figure 54 : La chaine de détection d'une caméra.
Le détecteur R stocke les charges dans des puits de potentiel, puis les transferts au convertisseur charge tension, la tension est amplifiée et convertie en un signal numérique exploitable.

A ces différentes parties s'ajoutent :

- La partie traitement numérique et compression des données.
- La partie sauvegarde avec la carte mémoire pour le stockage des données.

Le principe de fonctionnement du CCD, du convertisseur charge tension et du convertisseur analogique numérique est détaillé en annexe i page 155.

### 3.1.2 Etude théorique du flux disponible

Pour choisir la caméra, il est indispensable d'évaluer pour notre application l'ordre de grandeur du flux énergétique détecté au niveau d'un pixel.

Dans un premier temps nous allons calculer théoriquement, pour un échantillon lambertien et pour une caméra 512 x 512 pixels, ce flux énergétique, puis nous calculerons la puissance équivalente au bruit pour différents temps d'exposition et pour différentes caméras afin de les comparer et de choisir celle qui répond le mieux au cahier des charges.

La source que nous utilisons pour l'illumination de la ligne spatiale est une lampe QTH de 75 W. D'un point de vue spectral, nous considérons, pour simplifier les choses, que la source est blanche et qu'elle est placée derrière un filtre V(λ) que nous considérons "parfait" et qui limite le rayonnement au domaine photométrique.

➢ Etape 1 : Calcul de la luminance de la lampe (QTH, 75W) à T=2800K:

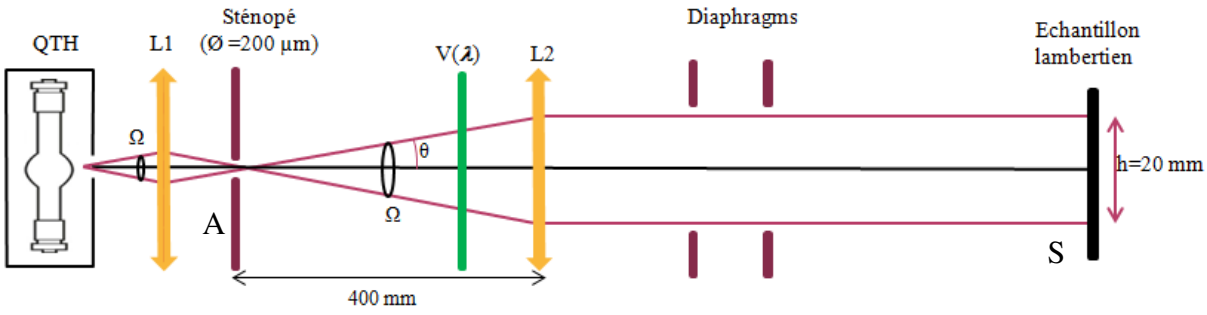



Figure 55 : Représentation de la partie illumination pour le calcul de la luminance sur l'échantillon.

➢ La densité spectrale de luminance du corps noir est donnée par la loi de Planck, tel que :

$$L_\lambda(T) = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left[\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right] - 1} \quad \text{unité } W \cdot m^{-3} \cdot sr^{-1} \qquad (63)$$

$C_1$ et $C_2$ sont des constantes donnée par :

$C_1 = 2 \cdot h \cdot c_\lambda^2 = 1{,}191\ 10^{-16}$ W· m$^2$.

avec :

$n_\lambda$ est l'indice de réfraction du milieu pour la longueur d'onde λ

$c$ = 299 792 458 m·s$^{-1}$ (vitesse de la lumière dans le vide).

$h$ = 6,626 17×10$^{-34}$ J.s (constante de Planck).

$C_2 = h \cdot c_\lambda / k = 1{,}4388\ 10^{-2}$ m·K.

avec :

$c_\lambda = c / n_\lambda$ ;

$k$ = 1,380 66×10$^{-23}$ J·K$^{-1}$ (constante de Boltzmann).

$T$ est la température de la surface du corps noir en kelvin.

Dans le cas des corps réels, nous définissons l'émissivité spectrale $\varepsilon_\lambda$ comme étant le rapport de la luminance du corps réel à la luminance du corps noir pour une même température.
La luminance d'un corps réel se déduit alors en multipliant la luminance du corps noir ayant la même température par l'émissivité.

➢ Dans notre cas, nous considérons que le filament de la lampe est isotrope, son intensité est constante quelque soit la direction d'observation. Ainsi, on fait l'hypothèse que l'émissivité est indépendante de la longueur d'onde et de la direction d'émission. L'émissivité du tungstène ε est égale à 0,5.

La lumière provenant de lampe QTH est ensuite filtrée par un filtre V(λ). La luminance de la lampe après filtrage est donnée par la densité spectrale de luminance du corps noir multiplié par l'émissivité du tungstène et intégrée sur le filtre V(λ) tel que :

$$L_{lampe} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[ \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left[\frac{C_2}{\lambda \cdot T} - 1\right]} \right] \cdot \varepsilon \cdot V(\lambda) d\lambda \qquad (64)$$

Avec : $\lambda$ comprise entre 360 nm et 830 nm.

On trouve la luminance de la lampe QTH :

$$L_{\text{lampe}} = 1{,}21 \cdot 10^4 \ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}$$

La Figure 56 montre les résultats de la densité spectrale de luminance du corps noir, la densité spectrale de luminance du filament de Tungstène ainsi que la luminance après passage par le filtre V(λ).

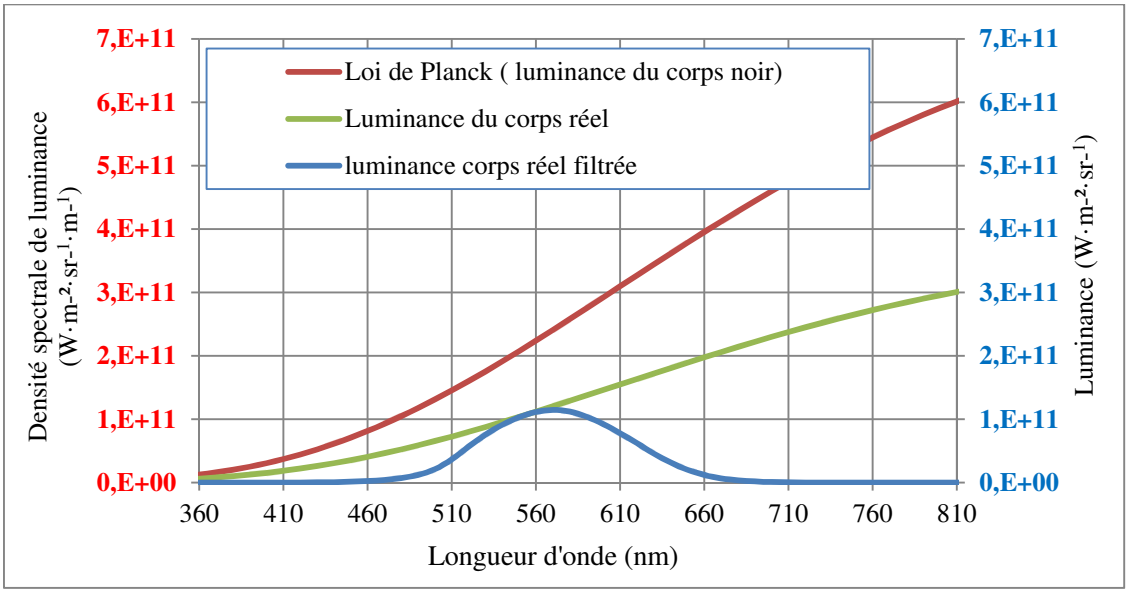



Figure 56: Densité spectrale de luminance du corps noir et de la lampe QTH ainsi que la luminance de lampe filtrée en fonction de la longueur d'onde λ.

Nous savons que la luminance du côté de la lampe est elle-même la luminance au niveau du sténopé, on peut écrire que :

$$L_{\text{lampe}} = L_{\text{sténopé}}$$

La luminance entre le doublet achromatique et l'échantillon est aussi la même, la surface formée par le spot lumineux sur le doublet $S_{\text{lentille}}$ est considérée la même que sur l'échantillon $S_{\text{éch}}$ son diamètre *d* est de 20 mm.

Ainsi le flux incident au niveau de l'échantillon est donné par la luminance dans l'étendue géométrique formée entre la surface du sténopé et la surface de l'échantillon:

$$\phi_{\text{inc}} = L_{\text{sténopé}} \cdot \mathrm{S}_{\text{sténopé}} \cdot \frac{\mathrm{S}_{\text{doublet}}}{D^2} \quad (65)$$

Avec :

$\mathrm{S}_{\text{sténopé}}$, la surface du sténopé de 200 µm de diamètre.

D, la distance entre le sténopé et la lentille 400 mm.

$\mathrm{S}_{\text{doublet}}=\frac{\pi \cdot d^2}{4}$.

- Etape 2 : Calcul de la luminance renvoyée par l'échantillon :

Nous considérons que l'échantillon est blanc et lambertien (cas d'une mesure sur un spectralon® par exemple) et que l'incidence est perpendiculaire à la surface.
Alors d'après la loi de Lambert, on peut mettre en relation l'émittance et la luminance de l'échantillon tel que :

$$M_{ech} = \pi \cdot L_{\text{ech}} \quad (66)$$

D'un autre côté l'équation (8) donne l'émittance en fonction du flux, telle que

$$M_{ech} = \frac{\phi_{\text{inc}}}{S_{ech}} \quad (67)$$

Sachant que $S_{ech} = \mathrm{S}_{\text{doublet}}$ et en remplaçant le flux incident $\phi_{\text{inc}}$ par son expression (65), et l'équation (67) peut s'écrire :

$$M_{ech} = \frac{L_{\text{sténopé}} \cdot \mathrm{S}_{\text{sténopé}}}{\mathrm{D}^2} \quad (68)$$

Des deux équations (66) et (68) on retrouve, la luminance au niveau de l'échantillon $L_{\text{ech}}$ tel que:

$$L_{\text{ech}} = L_{\text{sténopé}} \cdot \mathrm{S}_{\text{sténopé}} \cdot \frac{1}{\pi \cdot \mathrm{D}^2} \quad (69)$$

On trouve :

$$L_{\text{ech}} = 7{,}6 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{W \cdot m^{-2} sr^{-1}}$$

- Etape 3 : calcul du flux énergétique au niveau du pixel

Le principe de la détection repose sur le fait que tous les rayons parallèles sont focalisés au même point sur le plan de Fourier. Nous considérons que le système de projection du plan de Fourier sur le CCD est totalement transparent. Alors toute la lumière réfléchie dans la direction $\theta_R$ se retrouve sur un pixel du CCD.

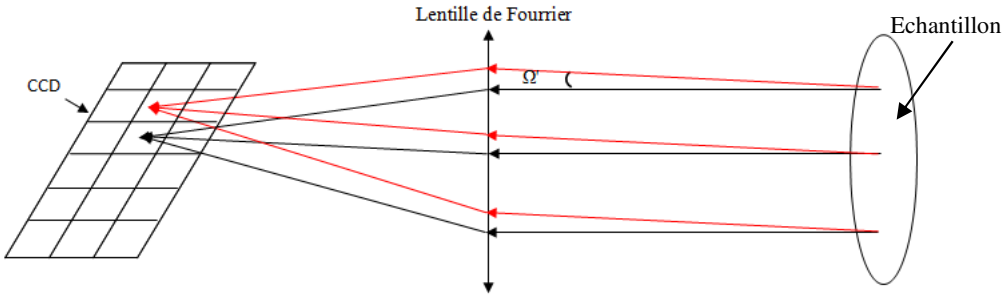



Figure 57 : Représentation schématique de la partie détection pour le calcul des flux sur un pixel. Les rayons parallèles provenant de l'échantillon sont focalisés à l'aide de l'optique de Fourier sur l'un des pixels du CCD. Ω' est l'angle solide dans lequel le flux émis par l'échantillon est collecté par un seul pixel.

Le flux arrivant sur le pixel $\phi_{e\,\mathrm{pix}}$est proportionnel à la luminance renvoyée par toute la surface de l'échantillon dans un angle solide $\Omega'$défini sur la Figure 57, on trouve :

$$L_{\mathrm{ech}} = \frac{\phi_{\mathrm{pix}}}{S_{ech} \cdot \Omega'} \tag{70}$$

Ce qui donne :

$$\phi_{pix} = S_{ech} \cdot \Omega' \cdot L_{\mathrm{ech}} \tag{71}$$

$\Omega'$ dépend de la taille des pixels du CCD et de la distance focale de la lentille de Fourier.

- Nous pouvons calculer $\Omega'$ sans connaitre les caractéristiques exactes du CCD et du conoscope mais en sachant que:

Le champ angulaire d'observation total du CCD est de 2° pour un CCD de 512x512 pixels, l'ouverture angulaire observée par un pixel est $\theta_{pixel} = {}^{2^\circ}/_{512} = 0{,}004°$. Elle détermine un angle solide :

$$\Omega' = {}^{\pi}/_{4} \tan^2({\theta_{pixel}}^2) \tag{72}$$

$\Omega' = 3{,}9 \cdot 10^{-9}\mathrm{sr}$.

Le flux au niveau du pixel :

$$\phi_{pix} = 9{,}27\ 10^{-16}\ \mathrm{W}$$

### 3.1.3 Cahier des charges pour la caméra

Ainsi nous aurons à détecter, dans le cas d'une mesure sur un échantillon lambertien, un flux de $9{,}27\ 10^{-16}$ W par pixel, dans le cas d'une matrice CCD de 512 x 512 pixels.

Le flux reçu par pixel diminue pour des matrices plus grandes et augmente pour les surfaces d'échantillon brillant, mesurées dans la direction spéculaire comparés à des surfaces mates.

A partir de là, nous avons établi le cahier des charges de la caméra comme suit :

❖ La caméra doit être capable de détecter un flux au moins 100 fois plus petit que $9{,}27\ 10^{-16}$ W pour avoir un rapport signal à bruit (SNR) de 100.

❖ Nombre de pixels: Généralement pour augmenter la résolution spatiale (mesurée en pixels par pouce (ppp)), les fabricants de CCD utilisent des pixels plus petits au détriment du rapport signal à bruit. En effet plus les pixels sont petits plus leur capacité de charges diminue causant la diminution du signal et l'augmentation du rapport signal à bruit. D'un autre coté un CCD de 512 x 512 Pixels, utilisée pour un champ d'observation de 2°, donne une résolution angulaire de 0,004° ce qui est suffisant pour notre application.

❖ Taille des pixels : La capacité de charges des pixels est proportionnelle à leur taille (surface). Les pixels petits (5x5 µm) possèdent des puits de charges petits, par conséquent leur capacité de charges est inférieure à la capacité de charge des pixels plus grands allant jusqu'à 24 µm. Nous optons pour une résolution d'au moins 16 µm (H) x 16 µm (V).

❖ Forme des pixels : carrés pour éviter les déformations et les distorsions des images lors de l'affichage sur l'écran d'un PC dont la forme des pixels est carrée.

❖ Temps d'exposition possible en réglage manuel pour pouvoir l'adapter au différents types de surfaces allant de la plus brillante (temps d'exposition courts < 1 s) aux plus mates (temps d'exposition plus long > 1s).

❖ Grande capacité de charge (approchant les $10^5$ électrons).

❖ Une dynamique de 16 bits permettrait d'exploiter plus de niveaux de gris.

❖ Caméra à refroidissement : les paires électrons-trous produites par agitation thermique constituent un bruit thermique qui peut être diminué en refroidissant la caméra. Le refroidissement le plus utilisé pour la caméra scientifique est le refroidissement thermoélectrique en utilisant un ou plusieurs étages Peltier adapté à la détectivité recherchée.

❖ Compatibilité avec le logiciel LabVIEW.

❖ Caméra noir et blanc, car la mesure du brillant n'est pas spectrale.

❖ Un obturateur mécanique pour éviter l'exposition continue des pixels comme dans le cas d'un obturateur électronique. Néanmoins la vitesse d'obturation est un élément critique qu'il faudra étudier pour déterminer le temps d'exposition minimal pour lequel le temps d'ouverture et de fermeture de l'obturateur mécanique devient négligeable.

Suite à l'établissement du cahier de charges, une étude du marché a été réalisée. Nous avons contacté trois fabricants qui proposaient des produits adaptés :

- Hamamatsu : modèle ORCA-II-BT-512 G
- Andor : modèle : iKon M 934 BR-DD.

- Kappa : modèle DX 4C-285 FW.

Un appel d'offre a été émis en accord avec les règles du marché. Au final, nous avons sélectionné la caméra OCRA II-BT-512G/ C4742-98-26LWG2 Dual Scan Cooled CCD Camera dont les spécifications sont les suivantes :

| | |
|---|---|
| Taille du CCD | 512x512 pixels |
| Taille des pixels | 24 µm x 24 µm |
| Forme des pixels | carrés |
| Temps d'exposition | 20 ms à 7200 s |
| Capacité de charge | 80000 électrons |
| Dynamique | 16 bits |
| Domaine spectral | 320-1100 nm |
| Compatibilité | Labview |
| refroidissement | -75°C (quatre étages Peltier) |

Tableau 6 : Cahier des charges de la caméra

Pour chacune des caméras, nous avons réalisé le calcul de la puissance équivalente au bruit. Un exemple de ce calcul, pour la caméra ORCA-II-BT-512 G est présenté en annexe ii page 163, et la Figure 58 présente l'évolution de la puissance équivalente au bruit en fonction de la longueur d'onde λ.

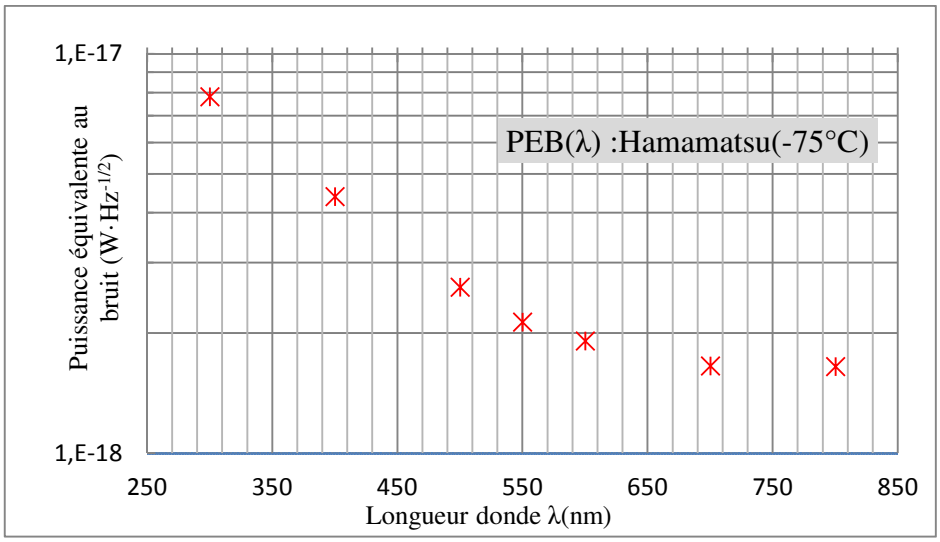



Figure 58 : Puissance équivalente au bruit en fonction de la longueur d'onde.

- Suite au calcul du flux au niveau du pixel nous avons calculé un flux de $9{,}27\ 10^{-16}$ W .

- Dans la plage de longueurs d'onde comprise entre 300 nm et 800 nm la plus grande puissance équivalente au bruit que nous avons est à $7{,}8 \cdot 10^{-18}\,W \cdot Hz^{-1/2}$.
- Pour λ=550 nm, la puissance équivalente au bruit de $2{,}1 \cdot 10^{-18}\ W \cdot Hz^{-1/2}$.
- Nous calculons d'abord la puissance de bruit en Watt pour des temps d'exposition de 1 s, 10 s et 100 s, en multipliant la puissance équivalente au bruit par la racine carré de la largeur de bande ($Hz^{1/2}$ équivalente à $s^{-1/2}$).

$[W \cdot Hz^{-1/2}]$ x $[\ Hz^{1/2}] \equiv [W \cdot Hz^{-1/2}]$ x $[\ s^{-1/2}\ ] \equiv [W]$.

- Nous calculons ensuite le rapport signal à bruit pour ces mêmes temps d'exposition en divisant le flux incident sur un pixel (W) par la puissance de bruit (W) pour les temps d'exposition de 1 s, 10 s et 100 s.

Le Tableau 7 représente les résultats obtenus :

| Temps d'exposition (s) | 1 | 10 | 100 |
|---|---|---|---|
| Signal (flux) reçu au niveau d'un pixel (W) | 9,3E-16 | 9,3E-16 | 9,3E-16 |
| Le bruit B (W) pour une longueur d'onde λ= 550 nm | $2{,}13 \cdot 10^{-18}$ | $2{,}13 \cdot 10^{-18{,}5}$ | $2{,}1 \cdot 10^{-19}$ |
| Le bruit B (W) pour une longueur d'onde λ= 300 nm (Cas le plus défavorable à 300 nm) | 7,8E-18 | 2,5E-18 | 7,8E-19 |
| Le rapport signal à bruit pour λ= 550 nm | 435 | 1376 | 4352 |
| Le rapport signal à bruit pour λ= 300 nm (Cas le plus défavorable à 300 nm) | 119 | 376 | 1188 |

Tableau 7 : Puissance équivalente au bruit en fonction du temps d'exposition.

Nous remarquons que dans le cas le plus défavorable nous avons un rapport signal à bruit supérieur à 100 pour un temps d'exposition de 1 s.

A la longueur d'onde λ=550 nm, le rapport signal à bruit est supérieur à 400 pour un temps d'exposition de 1 s. ce qui signifie que même dans le cas le plus défavorable la caméra fournit des valeurs exploitables. Nous remarquons aussi que pour un temps d'exposition de 100 s le bruit diminue d'un facteur 10 permettant au SNR d'augmenter d'un facteur 10.

Nous concluons que la caméra remplit aisément les attentes du cahier de charges en puissance équivalente au bruit. De plus, selon le fournisseur, la densité de courant d'obscurité décroit d'un facteur 2 pour chaque diminution de la température de la matrice de 7° à 8°.

## 3.2 Le conoscope

- L'optique de Fourier

Durant l'exercice 2008, un premier jet du système optique a été réalisé par Yves Candela, étudiant en deuxième année de SupOptique (Figure 59).

Ce projet, qui s'appuyait exclusivement sur l'utilisation de miroirs sphériques n'a pas été retenu car ce système est très sensible aux alignements et la partie " roue à diaphragmes " est difficile à réaliser mécaniquement.

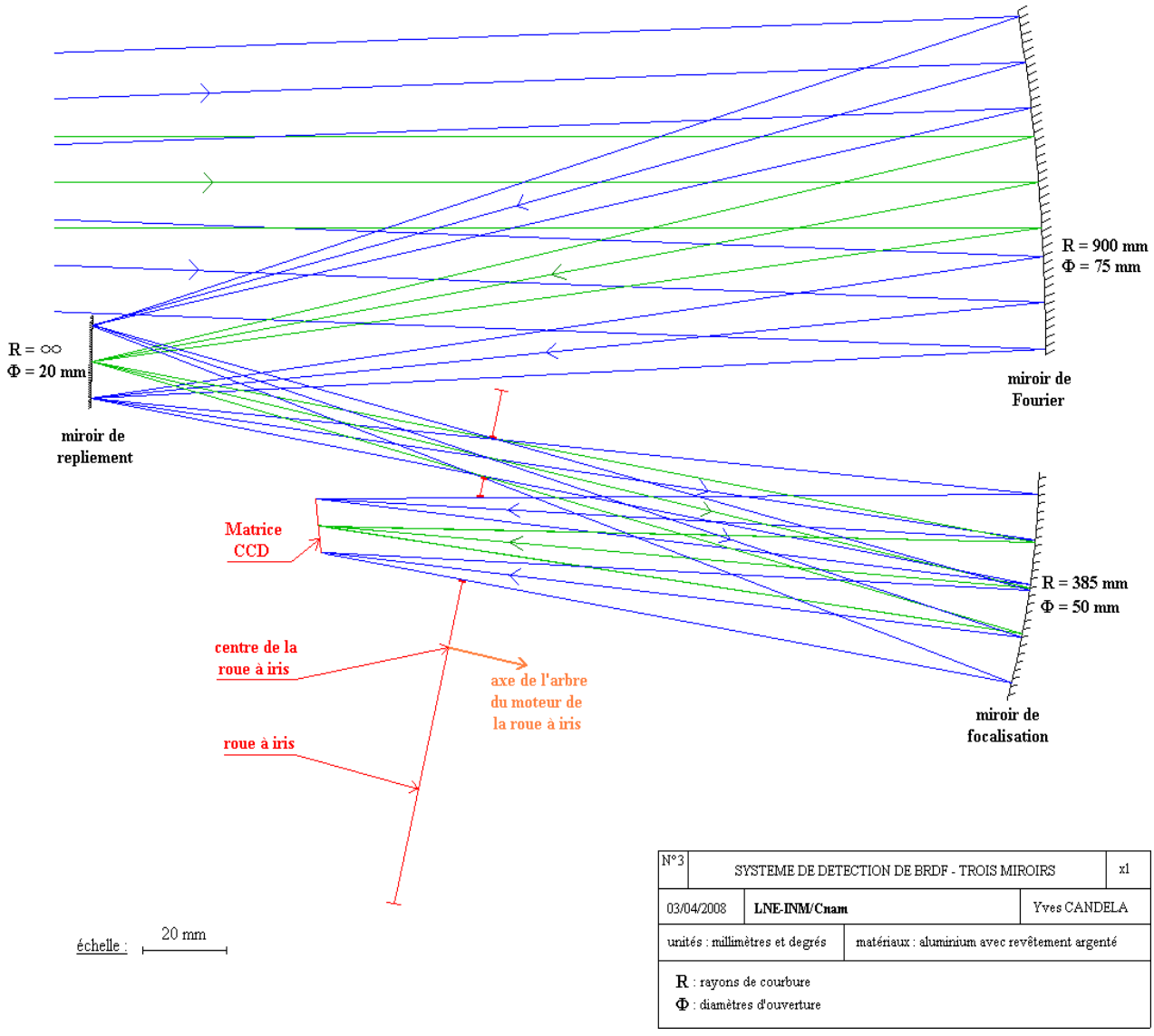



Figure 59 : Conception de la détection basée exclusivement sur l'utilisation de miroirs sphériques par Y. Candela [71].

Lors des premiers mois de ma thèse, je me suis attachée à la conception de cette optique. Malheureusement ce travail s'est révélé être un véritable travail de concepteur en

optique. Il aurait été là aussi risqué, et coûteux en temps de poursuivre dans cette voie, compte tenu de ma formation plutôt axée sur l'optronique.

La stratégie a été repensée durant l'exercice 2011. Nous avons sollicité la société Eldim pour réaliser cette détection, via une action d'incitation du LNE. La société Eldim dispose en effet de la meilleure expertise mondiale pour réaliser ce type de système.

Rappelons le schéma de principe de l'EZ-Contrast de la Figure 19.

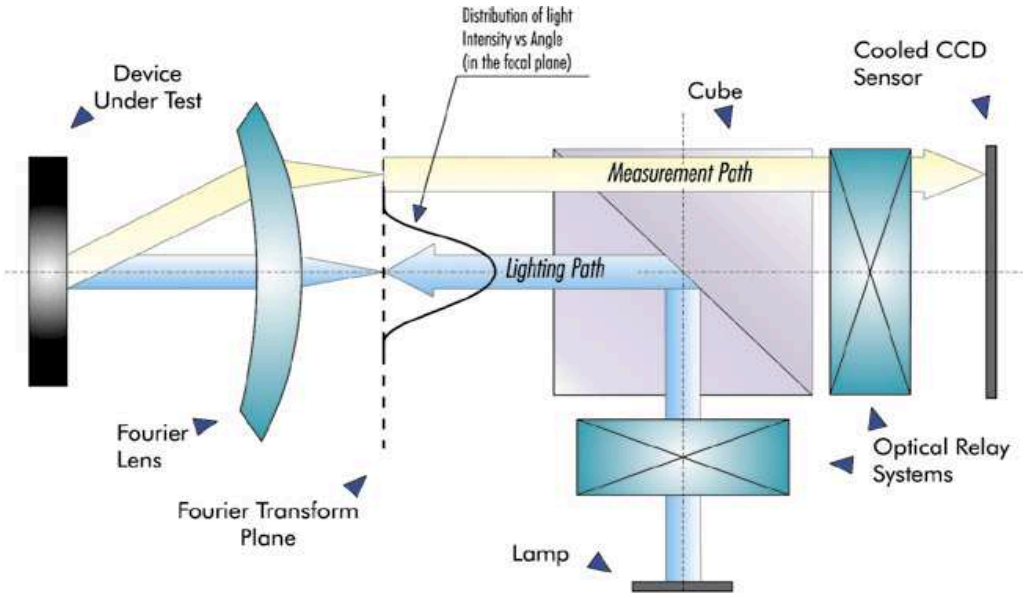



Figure 19 : Schéma de principe de l'EZ contrast [44].

Nous ne reviendrons pas ici sur le principe du système que nous avons développé dans notre étude bibliographique page 59. Rappelons seulement qu'un tel système permet en théorie de mesurer la répartition de la luminance incidente dans autant de directions qu'il y a de pixels sur le capteur CCD, en un seul cliché.

Rappelons aussi que dans le cahier des charges, l'angle de collection est de 2°, la taille du CCD est de 512 x 512 pixels, le champ observé est de 40 mm au niveau de l'échantillon, la distance détection – échantillon est de 1700 mm et que la résolution angulaire doit être d'au moins de 0,03°.

Mon implication dans le développement de ce système optique s'est alors déplacée vers la discussion des contraintes imposées par le cahier des charges, la réponse aux problématiques subvenues lors de l'intégration de nouvelles contraintes ou modification des contraintes existantes, suivi de l'avancement et de la gestion de la collaboration avec Eldim. Après de nombreux échanges électroniques complétés par des visites chez eux (Herouville-St Clair, Calvados) sur une période d'un an d'échanges, le système optique de détection à base d'un

conoscope. Le principe du conoscope consiste à combiner une optique de Fourier et un capteur CCD pour acquérir la luminance dans plusieurs directions de réflexion simultanément Toutes ces contraintes ont été respectées. Thierry Leroux, directeur d'Eldim estime que la résolution peut descendre à 0,004°, taille d'un pixel du CCD.

Pour donner un ordre d'idée du dispositif, le plan et une photo sont présentés Figure 60 et Figure 61.

La caméra est vissée à l'arrière du conoscope pour former un seul bloc. L'ensemble est monté sur un support doté d'un système tirant –poussant pour faciliter l'alignement et surélever la détection au niveau du plan horizontal du gonioréflectomètre.

Le diamètre de la première lentille est de 120 mm. Toutes les lentilles ont été réalisées sur mesure, chez Eldim.

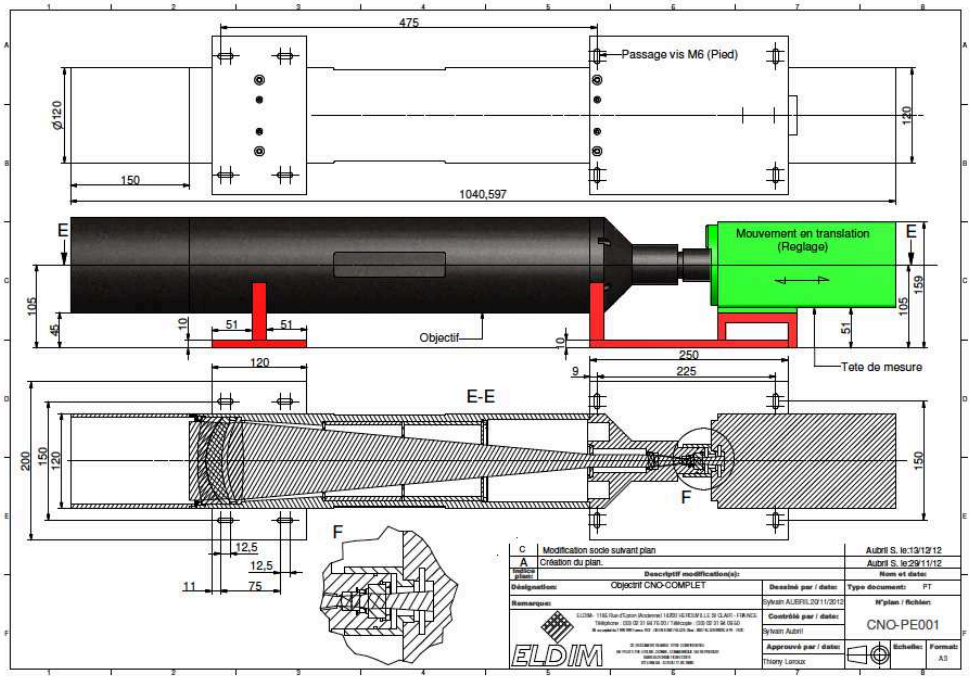



Figure 60 : Plan de la détection extrait du rapport de conception présentant la vue générale. Le système optique est en noir, la caméra en vert.




Figure 61 : Image de la détection montée sur la table optique.

# 4. Mise en œuvre de la détection

## 4.1 Alignement de la caméra dans le plan focal de l'optique de Fourier:

Le conoscope est conçu pour focaliser les rayons parallèles provenant d'une direction **R** en un point sur le plan de Fourier. Ce point est ensuite reporté sur le CCD.

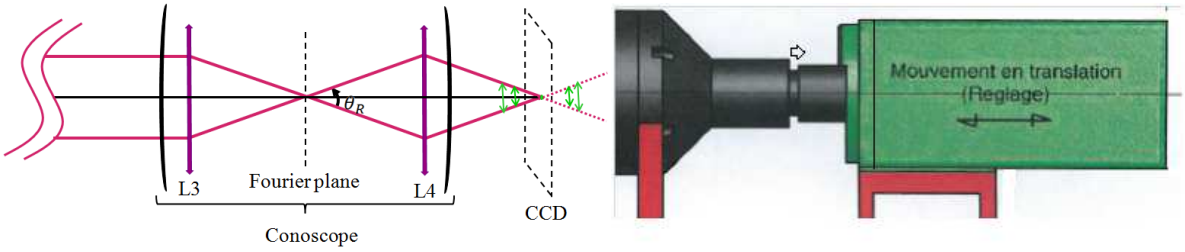



Figure 62 : Schéma principe de fonctionnement du conoscope. Le système optique $L_3$ réalise la transformation dans le plan de Fourier. Le système optique $L_4$ reporte ce plan sur le CCD.

Dans la pratique, l'emplacement du plan de Fourier reporté n'est pas aisé à localiser. Il dépend directement de la distance entre l'échantillon et le conoscope qui est à 1700 ±1 mm. Pourtant, le positionnement du CCD de la caméra dans ce plan est crucial, car il est directement lié à la netteté de l'image que nous captons et donc, à notre résolution angulaire.

- ❖ Méthode d'alignement :

D'un point de vue mécanique, la caméra est montée sur un rail qui lui permet de glisser en profondeur par rapport au conoscope. Ceci se fait via un tube coulissant du côté du conoscope et fileté du côté de la caméra pour pouvoir être vissée à celle-ci.

Pour positionner la caméra sur le plan de Fourier nous procédons comme suit :

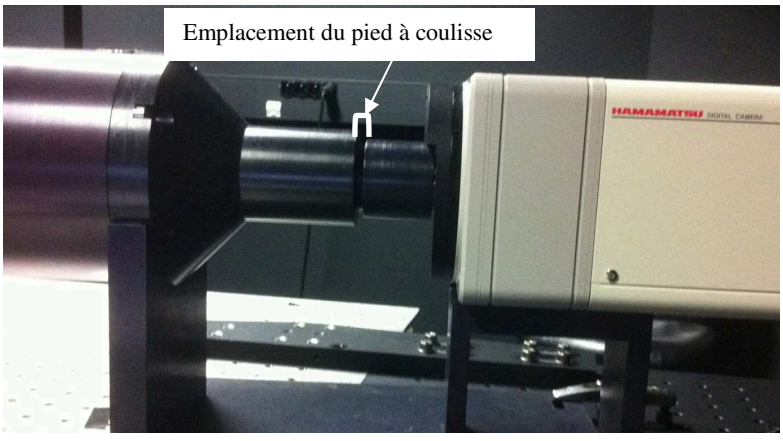



Figure 63 : La connexion entre l'arrière du conoscope (noire) et la caméra (gris et beige).

La détection est placée face à la source. Dans cette situation, nous devrions mesurer un pic dont la largeur à mi-hauteur est égale à la divergence du faisceau incident, soit 0,03° (Le CCD de 512 x 512 pixels correspond à un champ d'observation de 2°. Ainsi, un pic qui s'étend sur 8 pixels correspondent à un angle de 0,03°). Si ce n'est pas le cas, c'est que le CCD est devant ou derrière le plan de Fourier et qu'il faut le déplacer.

Nous avons pris plusieurs clichés de la projection du faisceau incident dans le plan de Fourier et nous avons mesuré la largeur à mi-hauteur. Les clichés ont été pris pour des distances différentes entre l'arrière du conoscope et le devant de la caméra (Figure 63). Ces distances mesurées au pied à coulisse sont comprises entre 3,5 mm et 9,5 mm.

Pour évaluer la largeur à mi-hauteur d'un pic, un programme a été développé sous Matlab. Il modélise le contour tracé à mi-hauteur du pic par un cercle ou une ellipse [72]. L'indicateur de la largeur à mi-hauteur est la moyenne du grand axe et du petit axe de l'ellipse (Figure 64).

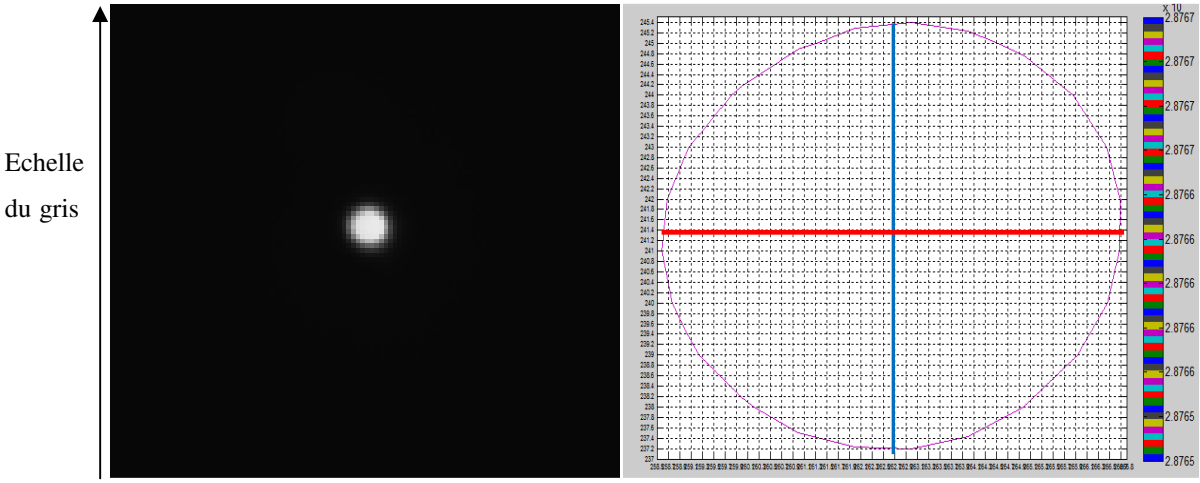



Figure 64 : Evaluation de la largeur à mi-hauteur du pic spéculaire.
A gauche, exemple du cliché en incidence normale. Chaque pixel représente un angle de 0,004°. A droite, le traitement de ce pic pour en extraire la largeur à mi-hauteur, via une modélisation elliptique du contour.

❖ Résultats :

Nous extrapolons la position optimale à partir d'une double interpolation linéaire comme le montre la Figure 65.

Nous trouvons l'emplacement situé à $x = 6{,}10$ mm à partir de l'extrémité arrière du conoscope. La caméra est fixée à cette position. Dans cette zone centrale, la largeur à mi—hauteur atteint environ 8 pixels.

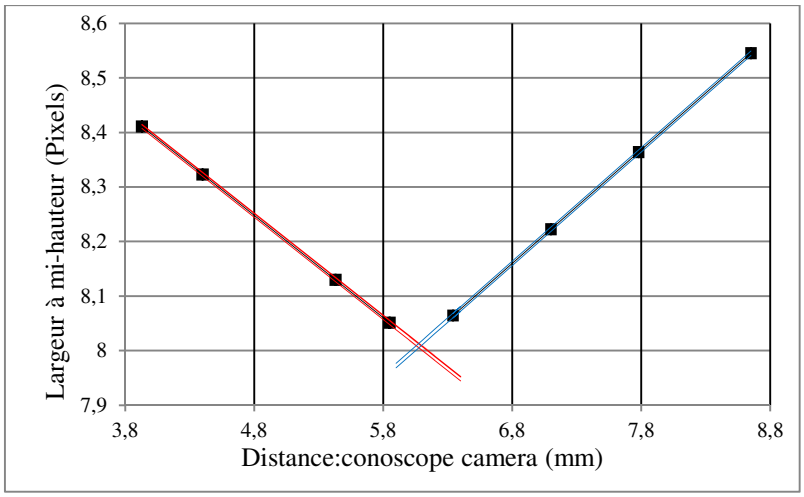



Figure 65 : Largeur à mi-hauteur (Pixels) en fonction de la distance (conoscope-caméra).
Par extrapolation linéaire, la distance optimale est fixée à 6,10 ± 0,02 mm.

## 4.2 Résolution

Comme nous l'avons expliqué dans la partie illumination de la voie spatiale, ce système est conçu pour mesurer la BRDF avec une résolution de 0,03°. Dans cette partie, nous souhaitons évaluer la résolution de l'équipement.

❖ Méthode :

L'illumination est placée face à la détection. Rappelons que nous utilisons un doublet achromatique de focale $f$= 400 mm et un sténopé de diamètre Ø = 200 µm. La divergence théorique du faisceau est de 0,03°. Projeté dans le plan de Fourier de la détection, ce faisceau devrait donc donner une tache, qui s'étale sur environ 7,7 pixels.

❖ Résultat :

Grâce au positionnement méticuleux du CCD dans le plan de Fourier et du sténopé au point focal de la lentille, nous atteignons la résolution espérée de 0,03° (Figure 66).

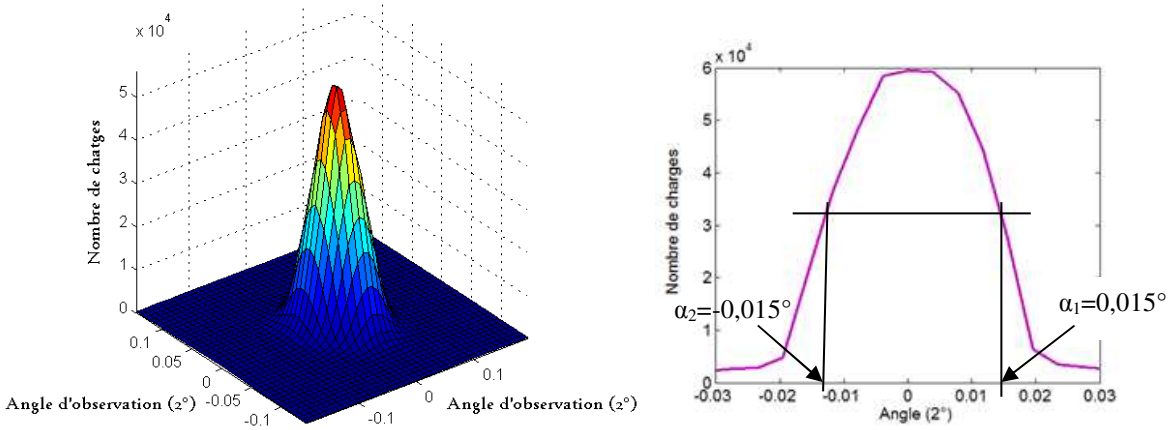



Figure 66 : Fonction de transfert de la détection spatial pour un sténopé de 200µm.
A gauche, le pic spéculaire en 3D. A droite, une coupe dans le plan d'incidence qui permet de valider une résolution de 0,03°.

La résolution est directement liée à la divergence du faisceau incident.

- Avec un sténopé de 75 µm :

Afin de tester notre détection, nous avons réalisé des essais en utilisant un sténopé de diamètre Ø = 75 µm, ce qui permet théoriquement d'atteindre une résolution de 0,011°. Dans la pratique la largeur à mi-hauteur est de 0,012° (Figure 67).

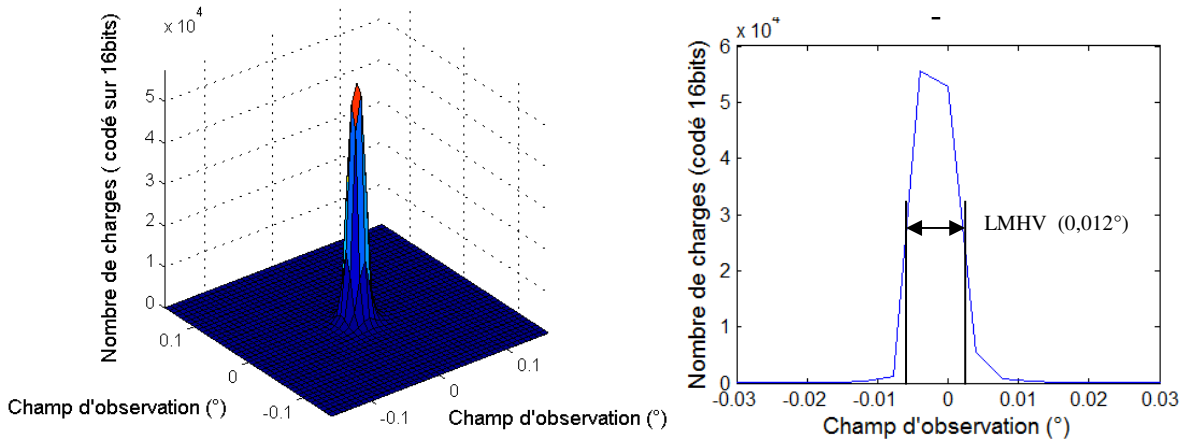



Figure 67 : Pic spéculaire de 0,012° de résolution obtenu en utilisant un sténopé de 75 µm.

Ce dernier test permet de valider le fait que l'objectif de Fourier offre des possibilités supérieures en termes de résolution. Les simulations effectuées par ELDIM laissaient envisager une résolution de 0,004°. Elle est peut être atteignable.

Néanmoins, nous ne sommes pas allés plus loin dans ces tests. Ce genre de performances se fait au détriment d'une perte de flux importante car une telle résolution imposerait l'utilisation d'un sténopé de 26,7 µm de diamètre ce qui fera chuter le flux d'un facteur 7. Il ne nous semble pas nécessaire, aujourd'hui, de descendre sous l'acuité visuelle car l'un de nos objectifs est de pouvoir, un jour, observer des corrélations entre les résultats de l'évaluation humaine et physique du brillant. Gardons juste l'idée, avant de clore ce sujet, que notre système n'a pas encore livré toutes ses possibilités.

# 5. Caractérisation de la voie spatiale

Le travail de caractérisation consiste en différentes opérations qui nous permettrons de mettre en relation le taux de charge des pixels et le flux reçu en fonction du temps d'exposition. L'étude de l'incertitude sur ces paramètres n'a pas été réalisée.

Dans cette section nous présenterons :

- Détermination de la zone d'exploitation du CCD.
- Caractérisation de la Multi-exposition temporelle.
- Caractérisation de la Multi-exposition spatiale.

❖ Montage utilisé et traitement préliminaire :

Pour ces caractérisations nous avons décidé d'utiliser comme échantillon un spectralon® de deux pouces (50,80 mm) de diamètre, souvent utilisé comme échantillon lors des étalonnages d'instrument [73] ou encore comme revêtement des sphères intégrantes [66]. Le spectralon® est éclairé en incidence normale.

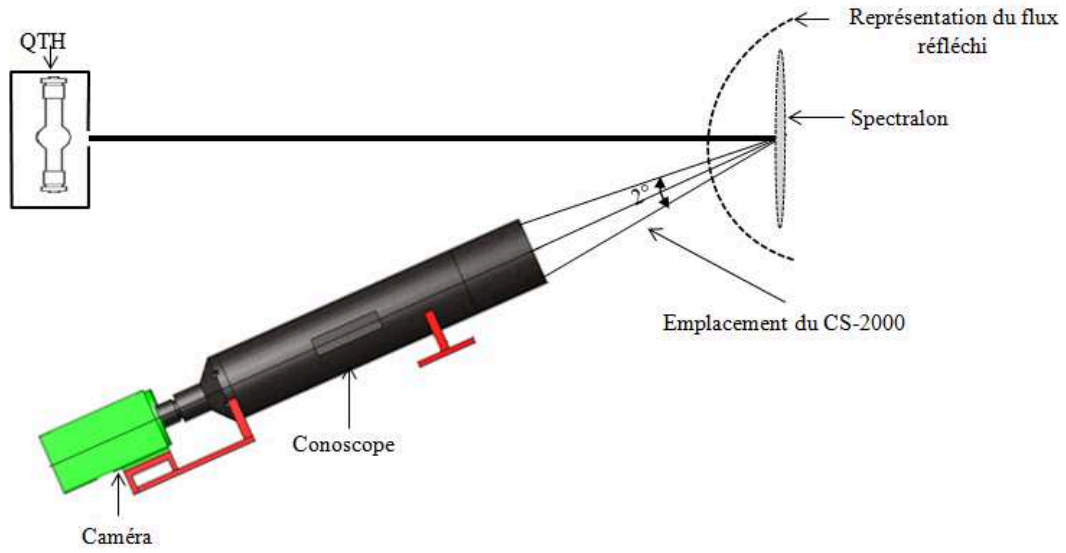



Figure 68: Schéma du montage de caractérisation du CCD.
Eclairement du Le spectralon® à incidence normale. Le conoscope détecte le flux réfléchi par le spectralon® dans un champ d'observation de 2°. La mesure de la luminance réfléchie est réalisée avec le spectroradiomètre CS-2000 placé entre le conoscope et le spectralon®.

Dans ces conditions (illumination normale à la surface du spectralon®) le spectralon® est supposé être quasi lambertien à la fois d'un point de vue spectral et d'un point de vue angulaire. Bien sûr, ce point est discutable et fait aujourd'hui encore débat [64][74][66]. De plus, les études menées par Moeller et al.[64] ont montré que le Spectralon® subit un

vieillissement dû principalement à quatre paramètres: la longueur d'onde d'illumination, le niveau d'illumination, le temps d'exposition, et la durée de stockage des échantillons.
Les sphères intégrantes sont proches des diffuseurs idéaux. La lumière collectée par une sphère intégrante est uniformément reflétée et diffusée à l'intérieur de la sphère afin qu'à la sortie nous récoltions un faisceau uniforme et lambertien. Les diffuseurs à disque, comme le spectralon®, ne possèdent pas cette particularité et requièrent une illumination relativement uniforme [75]. Pour cette raison, le laboratoire a acquis vers la fin de ma thèse une sphère intégrante (revêtement intérieur en spectralon®) de 12 pouces (304,8 mm) de diamètre qui devrait permettre de confirmer, avec une meilleure incertitude, les mesures que nous allons présenter compte tenu du fait que les sphères intégrantes n'affichent pas de décroissance dans la bande de longueurs d'onde qui concerne nos études (280 nm-780 nm) [76]. Le travail sur les incertitudes sera réalisé avec la sphère en 2015.
Nous considérons que la luminance de l'échantillon ne varie pas en fonction de la direction d'observation (échantillon lambertien). Cette propriété devrait se traduire au niveau de notre détection par un éclairement uniforme du CCD de la caméra.

Théoriquement, dans ces conditions de mesures, et à cause de la lambertianité du spectralon®, le conoscope devrait fournir l'image d'un disque centré sur le pixel central du CCD (256,256) et devrait avoir un rayon de 256 pixels. Pour nous en assurer, nous décidons de créer un programme qui traite les données récupérées par la caméra pour fournir le centre du disque.

- ❖ Programme de prétraitement

Un programme de prétraitement a été développé sous Matlab. Ce programme, à partir d'une mesure en obscurité et d'une mesure en éclairement, réalise les opérations suivantes :

- Soustraction : la mesure en obscurité est soustraite de la mesure en éclairement.

Nous réalisons la moyenne de 10 clichés sur un échantillon de spectralon®, le résultat obtenu est une matrice dont la forme 3D représente un cylindre (Figure 69).

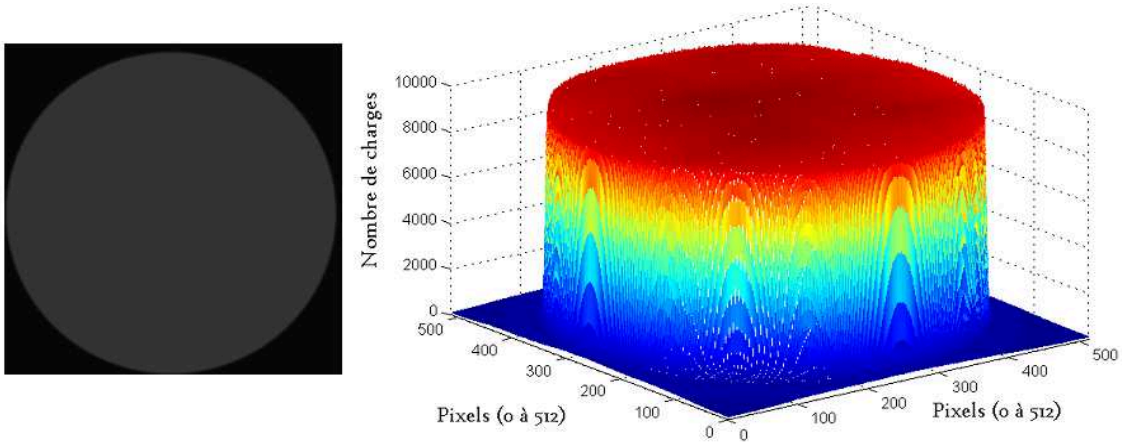



Figure 69 : Mesure de la réflexion d'un spectralon®.
Nombre de charges en fonction de la position du pixel pour un éclairement à incidence normale et détection à 15°.

A l'issue de ce prétraitement, nous pouvons commencer la caractérisation. On procède comme suit :

- ❖ Dérivation de la matrice.

Pour faire apparaitre les bords du cylindre nous dérivons la matrice (Figure 70).

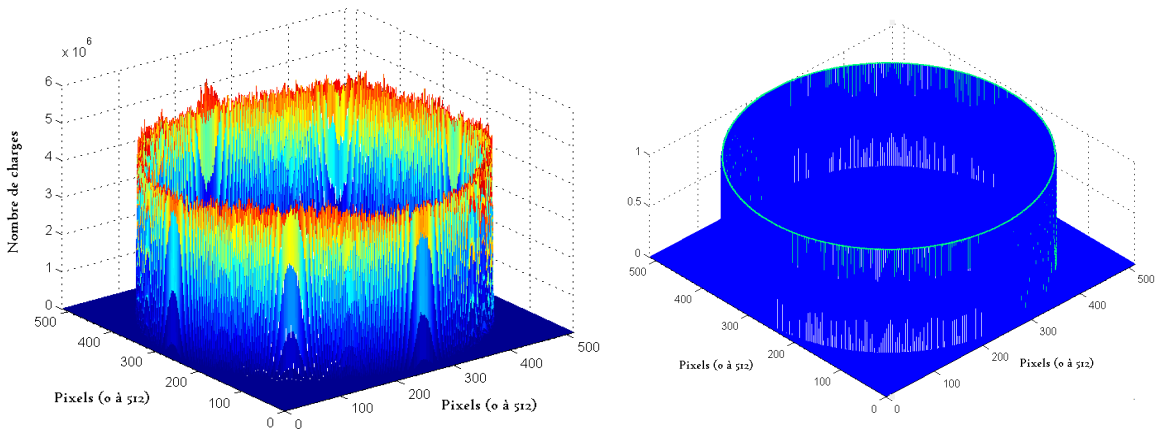



Figure 70 : Schéma représentant le post traitement des résultats.
A gauche, la matrice dérivée et à droite le traitement de la matrice dérivée.

- Identification du centre et du rayon.

A l'issu de ce travail nous obtenons une matrice contenant les positions (x,y) des pixels formant le cercle définit par l'équation du cercle :

$$y_{mesuré} = y_0 \pm \sqrt{r^2 - (x - x_0)^2} \tag{74}$$

Où $x_0, y_0$ représentent la position du pixel central du cercle mesuré et *r* son rayon.

Nous décidons de modéliser ce cercle $y_{model}$ par un modèle décrit par la fonction :

$$y_{model} = y_{0mod} \pm \sqrt{{r_{model}}^2 - (x - x_{0mod})^2} \tag{75}$$

Où $x_{0model}, y_{0model}$ représentent la position du pixel central du cercle modélisé et $r_{model}$ son rayon.

Étant donné que la matrice CCD fait une taille de 512x512 pixels, on suppose que dans le cas idéal le cercle est décrit par les conditions initiales : $\begin{cases} x_{0model} = 256. \\ y_{0model} = 256. \\ r_{model} = 256. \end{cases}$

Un code développé sous Matlab permet d'ajuster les paramètres $(x_{0model}, y_{0model}, r_{model})$ au sens des moindres carrés en minimisant la somme carré des résidus entre $y_{model}$ et $y_{mesuré}$.

En sortie le code fournit les paramètres ajustés $(x_{0aj}, y_{0aj}, r_{aj})$ qui décrivent au mieux le cercle mesuré.

Si les valeurs ajustées $(x_{0aj}, y_{0aj}, r_{aj})$ correspondent à (256, 256, 256) alors le conscope est bien aligné sur l'axe optique autrement il faudra le réaligner.

Nous soupçonnons que cette contradiction avec la réalité qui n'excède jamais un écart d'un pixel, soit 0,004°, peut être due aux défauts de non lambertianité du spectralon®, ou à la transmission des optiques utilisées. A ce stade, nous avons estimé qu'il n'était pas nécessaire d'essayer de comprendre la raison de cet écart et qu'il fallait se contenter de le corriger en appliquant une rotation angulaire au conoscope et de vérifier ensuite la position du pixel central du disque à l'aide du programme.

## 5.1 Détermination de la zone d'exploitation du CCD

L'étude de la linéarité de la caméra pour différents niveaux de luminance a été réalisée. Le but de cette étude est d'établir une zone d'exploitation confortable du CCD, n'incluant pas le signal saturé et le signal noyé dans le bruit.

L'échantillon utilisé est un spectralon® éclairé en lumière diffuse. Pour un temps d'exposition constant, nous faisons varier la luminance d'un spectralon® en ajoutant des densités neutres sur le faisceau incident. A la sortie du système optique d'illumination nous plaçons un filtre V(λ) pour nous mettre dans des conditions photométriques. La luminance énergétique spectrique est mesurée à l'aide d'un spectroradiomètre CS-2000 (Minolta).

La luminance lumineuse est calculée théoriquement en intégrant la luminance énergétique spectrique sur le spectre du visible et en la multipliant par $K_M$. Le filtre V(λ) étant déjà inclus dans le chemin optique nous ne pouvons pas utiliser la valeur de luminance lumineuse prélevée par le Minolta car celui-ci intègre à son tour sur V(λ). Nous appliquons donc la formule (23) sans intégrer le filtre V(λ), ce qui donne :

$$L_v = \mathrm{k}_M \int_{380}^{780} \mathrm{L}_e(\lambda) d\lambda \quad [\mathrm{cd \cdot m^{-2}}]$$

Avec : $K_M(555) = 683\ \mathrm{lm \cdot W^{-1}}$ .

Pour chaque densité spectrale, le taux de remplissage de la zone éclairée du CCD est relevé en fonction de la luminance de l'échantillon pour un temps d'exposition fixe. Les résultats montrent que le CCD est linéaire en luminance, jusqu'à ce qu'il atteigne les 65535 nombre de charges ou il sature (Figure 71).

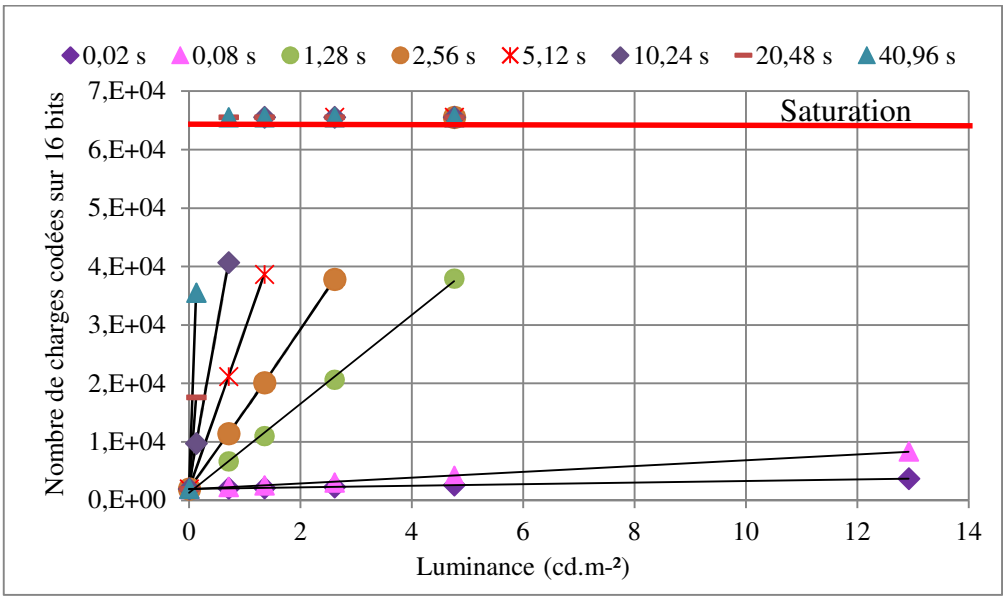



Figure 71 : Nombre de charges en fonction de la luminance pour différents temps d'exposition.

Nous décidons de limiter le nombre de charges recueilli lors des mesures à un max de 90 % du signal de saturation arrondi par la suite à 60000 nombre de charge.

Les expériences menées sur le bruit, en recueillant le nombre de charge lorsque le conoscope n'est exposé à aucune lumière affiche un seuil autour de 1900 nombre de charge.

La zone d'utilisation du CCD en nombre de charge sera alors comprise entre 2000 et 60000 nombre de charge.

## 5.2 Caractérisation de la multi-exposition temporelle :

❖ Motivation :

Notre caméra travaille sur 16 bits, ce qui nous donne une dynamique de 65536 niveaux entre le noir et le blanc, ou entre la luminance maximale et la luminance minimale.

Ce type de dynamique est déjà très bon et entièrement compatible avec la plupart des pics spéculaires que l'on peut mesurer (quatre décades [70]). Néanmoins, pour des surfaces très brillantes, il est possible que cette dynamique devienne limitante. Par ailleurs, n'oublions pas que dans la vie courante, le système visuel perçoit classiquement 4 à 5 décades de luminances

entre les zones les plus sombres et les zones les plus lumineuses de la scène. Il peut donc être intéressant de se garder la possibilité d'améliorer la dynamique de la caméra en jouant sur le temps d'exposition des clichés.

❖ Méthode :

Nous avons développé un programme qui prend systématiquement 3 clichés du pic spéculaire.

- Le cliché n°1 au temps d'exposition $t_1$, temps le plus long permettant de ne pas saturer le pixel le plus exposé.

Le cliché n°2 réalisé avec un temps d'exposition $t_2 = 2t_1$. Si nous augmentons d'un facteur 2 le temps d'exposition, nous augmentons la dynamique sur les pixels les plus sombres. Les pixels les plus éclairés saturent, mais cela n'est pas un problème car leur niveau de luminance est accessible sur la première image.

- Le cliché n°3 est réalisé avec un temps d'exposition $t_3 = 4t_1$. Comme pour le cliché n°2, nous augmentons la dynamique sur les pixels les plus sombres et les pixels les plus éclairés saturent.
- Nous obtenons ainsi trois matrices correspondant aux clichés 1, 2 et 3.

Le principe est alors de remonter à un seul cliché à partir de ces trois mesures. Les pixels "sous exposés" du cliché 1 sont remplacés par ceux du cliché 2 et les pixels "sous exposés" du cliché 2 sont remplacés par ceux du cliché 3. Il est possible de prolonger cette approche en augmentant le nombre de clichés. Le résultat étant qu'à chaque fois que l'on augmente d'un facteur 2 le temps d'exposition, l'on double les détails de la forme du pic spéculaire à des niveaux différents. Ainsi à la fin, nous avons toujours la même dynamique globale c'est-à-dire un pic codé sur $2^{16}$ bits mais avec plus de détails.

❖ Implémentation et résultats :

Le travail de reconstruction est réalisé sous Matlab. Le programme prend en entrée six images (trois mesures en éclairement aux temps d'exposition $t_1, t_2, t_3$ et trois clichés en obscurité aux même temps d'exposition). Il génère trois matrices corrigées de la lumière parasite et de la non linéarité temporelle $M_1, M_2, M_3$. Il effectue ensuite, la reconstruction comme suit :

Pour les trois matrices on supprime les valeurs supérieures à 60000.

Dans un premier temps on normalise les valeurs des matrices $M_2$ et $M_3$ par rapport au temps d'exposition $t_1$ de la matrice $M_1$. La division, sous réserve de la linéarité du capteur, remet les trois matrices à égalité en nombre de charge par seconde, ainsi :

— Les valeurs de la matrice $M_3$ étant exposé quatre fois plus de temps que la matrice $M_1$, on la divise par quatre. Les valeurs de cette matrice seront comprises entre 0 et 15000 nombre de charge.

— La matrice $M_2$, a été exposé deux fois plus longtemps que la matrice $M_1$, elle est alors divisé par 2. Les valeurs sont comprises entre 0 et 30000 nombre de charge.

— La matrice $M_1$ est comprise entre 0 et 60000.

La reconstitution du pic spéculaire à partir de ces trois matrices se fait comme suit :

— Soit $M'_3$, la matrice $M_3$ dans laquelle tous les pixels ayant une valeur supérieure à 15000 sont supprimés (Figure 72).

— Soit $M'_2$, la matrice $M_2$ dans laquelle tous les pixels ayant une valeur supérieure à 30000 et inferieure à 12000 (80% du maximum de nombre de charge du cliché 3 (15000)) sont supprimés (Figure 72).

— Soit $M'_1$, matrice $M_1$ dans laquelle tous les pixels ayant une valeur inferieure à 24000 sont supprimés. La valeur 24000 correspond à 80% du maximum de nombre de charge du cliché 2 (80% de 30000) comme le montre la Figure 72.

Le critère de 60000 nombre de charge supprime les pixels saturés, celui de 24000 et 12000 nombre de charge permet d'avoir une zone de recouvrement entre deux clichés.

Alors, la matrice reconstituée est donnée par :

$$M_{finale} = M'_1 + M'_2 + M'_3 \tag{76}$$

Sur la Figure 72, nous représentons trois matrices traitées réalisées sur un échantillon noir brillant aux temps d'exposition $t_1$, $t_2$, $t_3$.

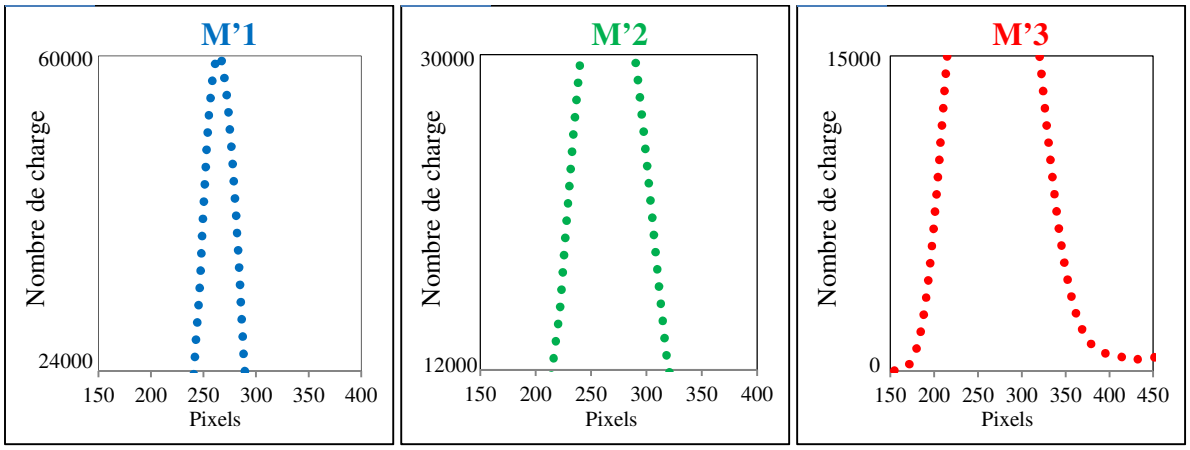



Figure 72 : Principe de la reconstruction d'un pic à partir de trois temps d'exposition.

La Figure 73, représente la matrice reconstituée $M_{finale}$. L'axe des abscisses représenté en pixels est converti en degrés sur la Figure 73. Rappelons que 512 pixels correspondent à un angle de 2° ainsi chaque pixel correspond à 0,004°.

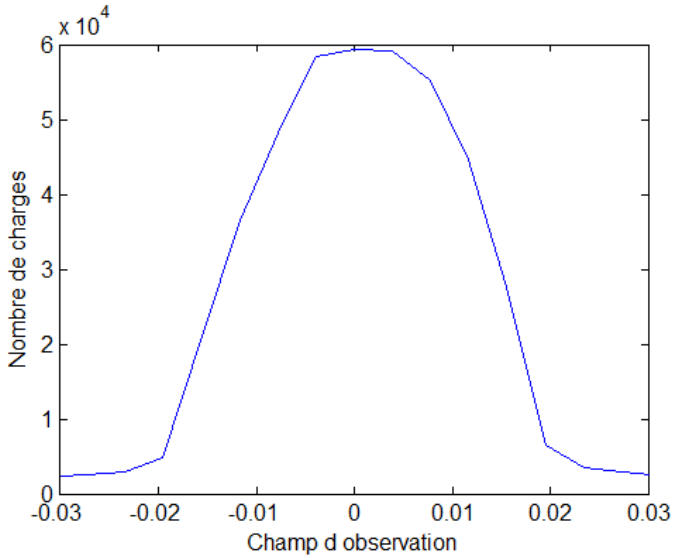



Figure 73 : Reconstruction du pic spéculaire à partir de trois clichés. Mesure réalisée sur un échantillon noir brillant.

## 5.3 Caractérisation de la multi-exposition spatiale

La détection permet de mesurer la luminance réfléchie avec une résolution de 0,03°, sur une dynamique d'au moins 16 bits, dans un cône de ± 1° autour de la direction d'observation. Cependant, dans le cas de l'observation de pics spéculaires plus larges que 2°, il est obligatoire de réaliser plusieurs clichés adjacents pour couvrir toute l'étendue du pic. Il faut ensuite les recombiner entre eux pour tracer le pic complet.

Prenons l'exemple d'un échantillon de papier brillant (Gloss speculaire 91 gu à 60°) de couleur noir. Ce type d'échantillon présente, lorsqu'il est illuminé selon un zénith de 45°, un pic spéculaire qui a une largeur à mi-hauteur de l'ordre de 1,5° [77].

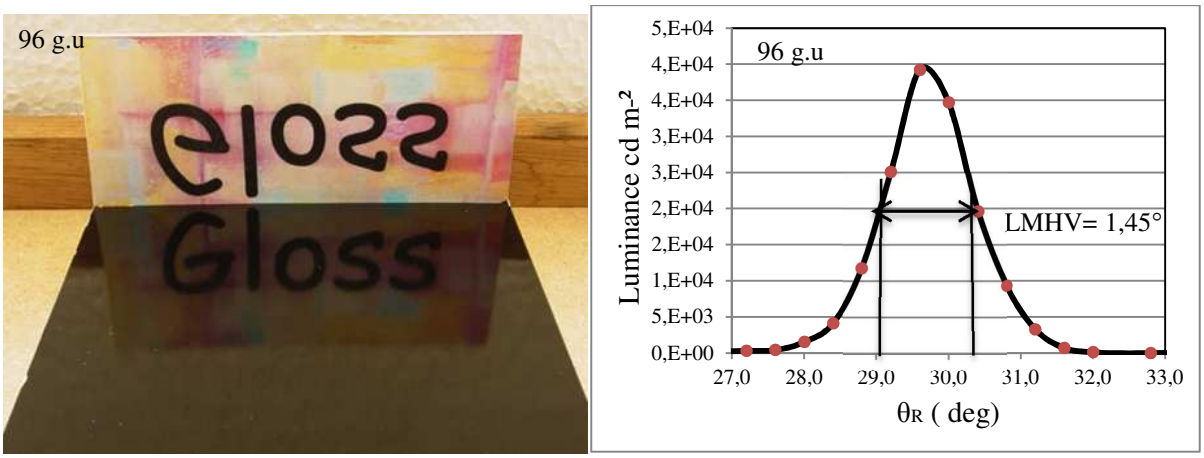



Figure 74 : Pic spéculaire d'un échantillon brillant.
A gauche, Echantillon noir de l'échelle du brillant 3C, de brillant spéculaire à 60° 96g.u. A droite, une mesure du pic spéculaire sur cet échantillon, dans le plan d'incidence par un zénith d'illumination de 30°. La largeur à mi-hauteur est supérieure à 1°. Un seul cliché ne suffit pas pour analyser tout le pic.

Si nous voulons tracer l'ensemble de ce pic, il sera nécessaire de réaliser plusieurs clichés, en déplaçant la direction d'observation. Dans le cas de cet échantillon, nous avons envisagé de couvrir une zone de 5° à la fois en zénith et en azimut centrée autour de la direction spéculaire **S** ($\theta_S = 45°$, $\varphi_S = 0°$).

Nous devons pour cela réaliser un certain nombre de clichés centrés sur différentes directions que nous devons calculer dans le repère du laboratoire et qui couvre une zone de ± 2,5° autour du spéculaire.

Si nous appelons **S**($\theta_S$, $\varphi_S$), la direction centrale de la détection spatiale. Pour une illumination selon la direction d'illumination I($\theta_I$, $\varphi_I$), nous pouvons couvrir une zone de 5° en réalisant les 9 clichés ci-dessous dont les directions sont présentées Tableau 8.

Chaque cliché représente une largeur de 2°, nous pouvons alors couvrir le pic de 5° avec neufs clichés (3x3) et avec une redondance de 0,5° entre deux clichés successifs.

| Image # | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\theta_S$ | 43,53° | 45,03° | 46,52° | 43,53° | 45,03° | 46,52° | 43,53° | 45,03° | 46,52° |
| $\varphi_S$ | 1,98° | 1,91° | 1,85° | 0° | 0° | 0° | -1,98° | -1,91° | -1,85° |

Tableau 8 : Position angulaire des neuf mesures pour couvrir la zone (45°,0°) à ± 2,5°.

La Figure 75, représente la zone contenant les 9 différents clichés dans le plan de Fourier décrit précédemment.

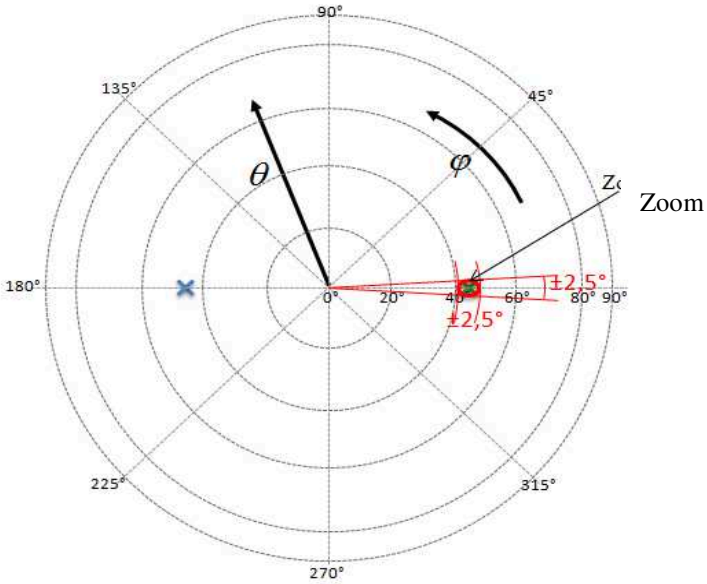



Figure 75 : Position angulaire de la zone observée dans le plan de Fourier pour couvrir la zone (45°,0°) à ± 2,5°.

Après un zoom sur la partie couverte par les clichés on obtient la Figure 76, qui illustre la position angulaire des différents clichés pris dans la zone observée (entourée en rouge).

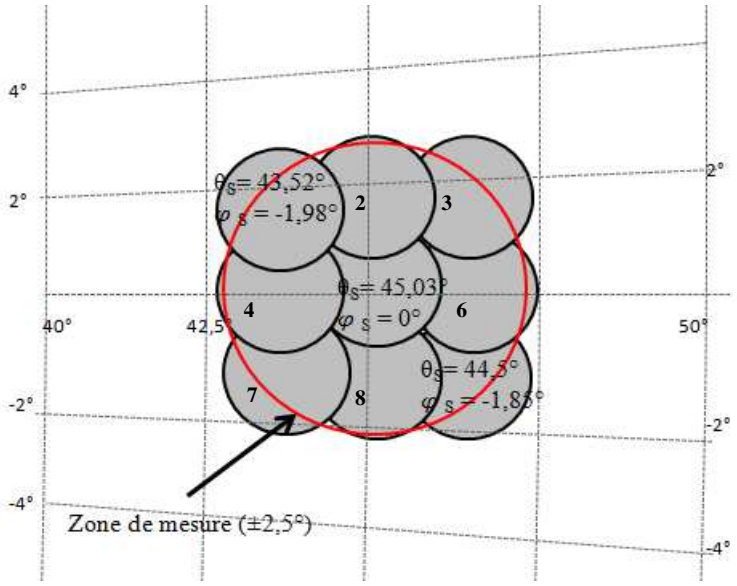



Figure 76 : Principe de la multi-exposition spatiale.
Pour mesurer une zone de rayon 2,5° dans le plan du laboratoire (en rouge) il faut réaliser 9 clichés avec le conoscope (cercle violet). Les changements de direction d'observation se font avec le robot et la couronne.

Nous obtenons 9 mesures, chacune étant le résultat de la combinaison de 3 temps d'exposition, mais qui ne sont pas forcément les mêmes. En effet, la mesure 5, prise dans la direction spéculaire, aura les temps d'exposition les plus courts, notés $t_1$, $t_2$ et $t_3$. Les 8 autres mesures, qui sont centrées sur les flancs du pic, auront des temps plus long car ces zones sont moins exposées que le centre du pic. Dans le cas présenté sur la Figure 77, il s'agit de $t_2$, $t_3$ et

$t_4$. Nous avons $t_4 = 2t_3 = 4t_2 = 8t_1$ avec $t_1$=0,07s. Les 9 clichés obtenus sont reportés sur la Figure 77.

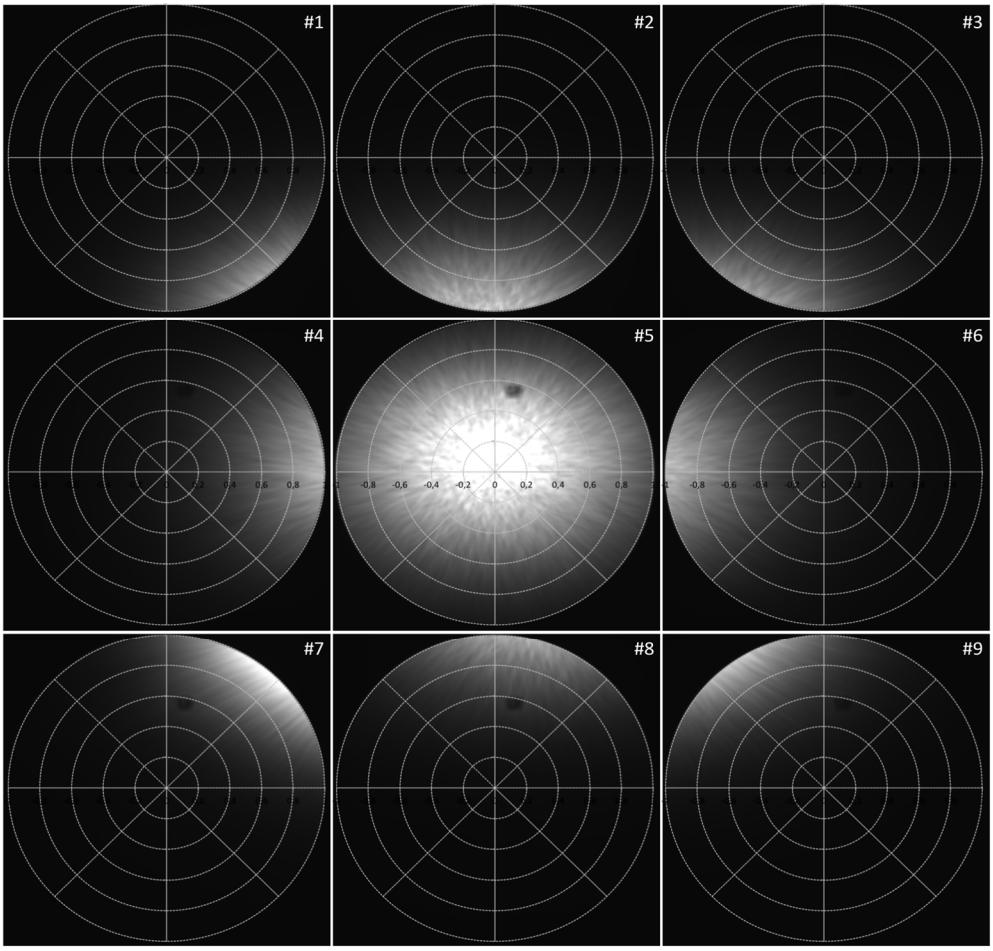



Figure 77 : Les 9 clichés utilisés pour reconstruire le pic spéculaire d'un échantillon de papier noir brillant. Pour une incidence avec un angle zénithal de 45°. Chaque cliché est centré sur une direction d'observation donnée décalée de plus ou moins 1,5° en zénith, et en azimut.

- Reconstruction d'une image à partir de plusieurs clichés :

A partir de ces 9 clichés, nous devons maintenant reconstruire le pic spéculaire complet. D'un point de vue théorique, cette opération n'est pas aussi simple. En effet, les luminances mesurées dans le plan de Fourier sont relatives à la direction d'observation $\mathbf{S}(\theta_S, \varphi_S)$ qui correspond au pixel central du CCD (x=0, y=0). Mais la direction de réflexion $\mathbf{R}(\theta_R, \varphi_R)$, qui correspond au pixel $(x, y)$ d'une image sur le CCD n'est pas définie dans le repère de l'échantillon. Elle est seulement définie par les angles $\Delta\theta$ et $\Delta\varphi$, où $\Delta\theta$ et $\Delta\varphi$ sont les zéniths et azimuts relatifs par rapport à la direction $\mathbf{S}(\theta_S, \varphi_S)$.

Nous cherchons les coordonnées de la direction $\mathbf{R}(\theta_R, \varphi_R)$ d'un point R sur le CCD défini par ses coordonnées relatives par rapport au centre du CCD, appelé $\Delta\theta_R$ et $\Delta\varphi_R$

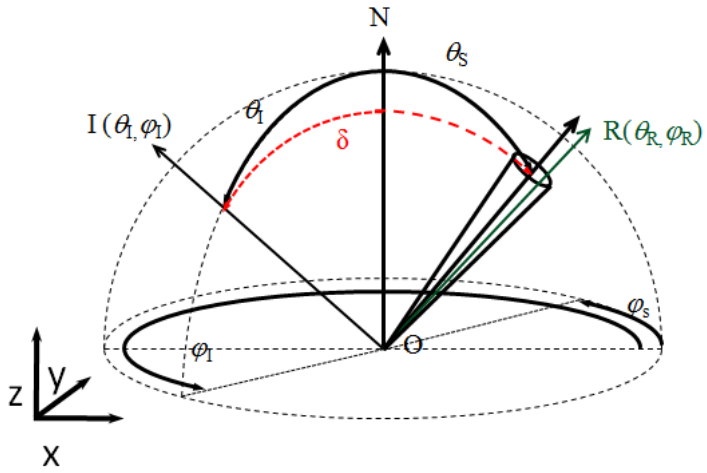



Figure 78 : Représentation des différents vecteurs unitaires utilisés $\overrightarrow{OI}, \overrightarrow{OS}$ et $\overrightarrow{OR}$.

Avec :

$\overrightarrow{OI}$, $\overrightarrow{OS}$ et $\overrightarrow{OR}$, des vecteurs unitaires, partant du centre de repère de l'échantillon, et pointant respectivement la direction d'illumination I ($\theta_I$ ; $\varphi_I$), la direction d'observation du centre de la détection S($\theta_S$ ; $\varphi_S$) et la direction d'observation correspondant au pixel ($x$,$y$), R($\theta_R$ ; $\varphi_R$).

δ est l'angle formé entre la direction d'illumination et d'observation ( $\overrightarrow{OI}$ et $\overrightarrow{OS}$).

O (0, 0, 0) le centre du repère du laboratoire et de l'échantillon.

Soit (p) le plan qui contient les directions I et S, et qui coupe la base de l'angle solide en passant par les point B et B' comme le montre la Figure 79.

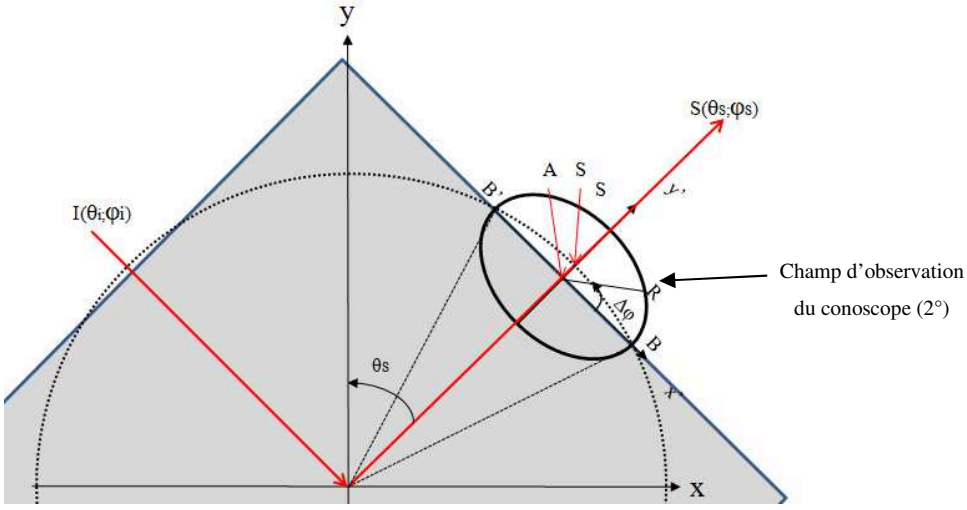



Figure 79 : les points A, B, B' et S dans le repère du laboratoire.

Avec : Δ $\theta_R$ l' angle zénithal et $\varphi_R$ l'angle azimutal de **R**.

**On définit les points A, B et E:**

Les points B et B' se trouvent sur le cercle (base de l'angle solide 2°) qui coupe la sphère unitaire, ainsi on note R =1 et B et B' sont données par les coordonnées dans le plan du laboratoire $(\theta_B, \varphi_B, 1)$ et $(\theta_{B'}, \varphi_{B'}, 1)$.

Ces points sont définis dans le plan de l'échantillon comme le montre la Figure 80.

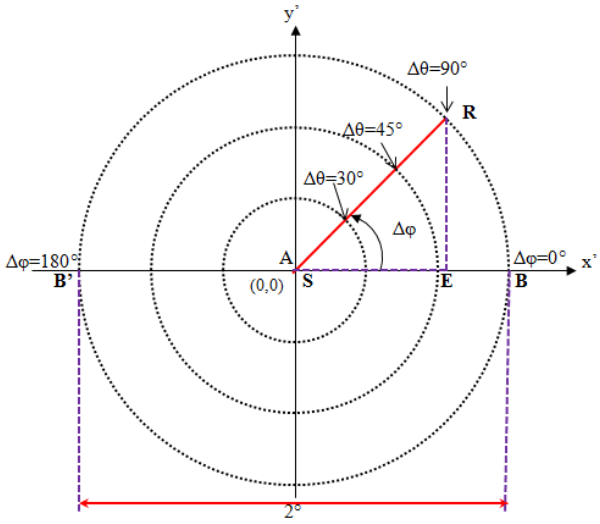



Figure 80: Représentation des points utiles au calcul.
A droite, B, S et R vus dans le plan de Fourier du conoscope. A gauche, O, A, S, I, R et B vus dans le repère de l'échantillon.

Le point B est défini sur le repère de l'échantillon ( x', y') tel que : $\Delta\theta_B$=$\Delta\theta_R$ et $\Delta\varphi_B = 0$.

Soit *A* le point d'intersection entre la droite $\overrightarrow{OS}$ passant par A et le plan orthogonal à $\overrightarrow{OS}$ contenant B (Figure 81) le pont *A* n'appartient donc pas à la sphère unitaire. Sachant que $\overrightarrow{OB}$=1, alors $\left\|\overrightarrow{OA}\right\| = \cos\Delta\theta$. Les coordonnées de A dans le repère du laboratoire sont données par $(\theta_S, \varphi_S, \cos\Delta\theta)$.

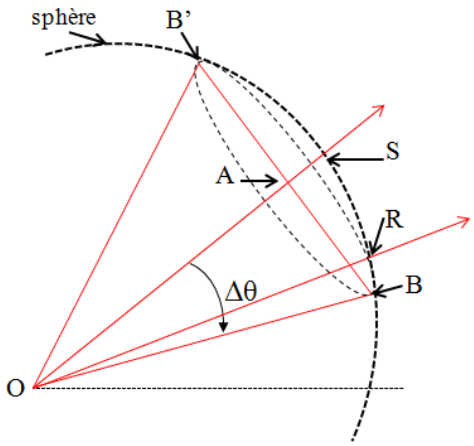



Figure 81: Représentation permettant de visualiser le point A défini par entre la droite $\overrightarrow{OS}$ passant par A et le plan orthogonal à $\overrightarrow{OS}$ contenant B et B'et R.

On définit E dans le repère de l'échantillon tel que E est le point de projection orthogonale de R sur $\overrightarrow{AB}$ (Figure 80).

A partir de ces différents points, nous pouvons exprimer $\overrightarrow{OR}$ (Figure 80).

$$\overrightarrow{OR} = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AE} + \overrightarrow{ER}. \tag{77}$$

1. **Expression de $\overrightarrow{OA}$ dans le plan de l'échantillon :**

Le point A appartient à $\overrightarrow{OS}$ soit $\overrightarrow{OA} = k_1 \cdot \overrightarrow{OS}$

Avec : $k_1 = \left\|\overrightarrow{OA}\right\| / \left\|\overrightarrow{OS}\right\|$

$\left\|\overrightarrow{OA}\right\| = \left\|\overrightarrow{OB}\right\| \cdot \cos \Delta\theta_R$ et $\left\|\overrightarrow{OB}\right\| = \left\|\overrightarrow{OS}\right\| = 1$ (*B* et *S* appartiennent à la sphère unitaire).

$k_1 = \cos \Delta\theta_R$

Soit :

$$\boldsymbol{\overrightarrow{OA} = \cos \Delta\theta_R \cdot \overrightarrow{OS}} \tag{78}$$

2. **Expression de $\overrightarrow{AB}$ dans le repère de l'échantillon :**

Le conoscope est fixe dans le laboratoire. Compte tenu de la position de B dans le conoscope on comprend que B dépend de $\Delta\theta_R$, mais se situe toujours dans le plan horizontal (P) du laboratoire, passant par O. Ce plan horizontal contient les points B et B' et également $\overrightarrow{OI}$ *et* $\overrightarrow{OS}$ (Figure 82).

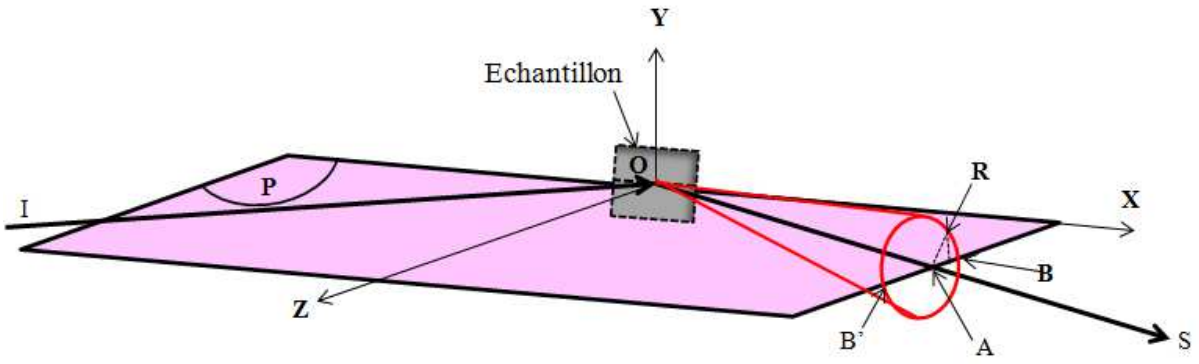



Figure 82 : Illustration du plan (P) contenant $\overrightarrow{OI}$ , $\overrightarrow{OS}$ ainsi que les point A, B et B'.

Le plan (P) est décrit par son vecteur normal à ce plan ($\overrightarrow{OI} \wedge \overrightarrow{OS}$), qui pointe verticalement dans le laboratoire. D'autre part, $\overrightarrow{AB}$ est orthogonal à $\overrightarrow{OS}$, toujours à cause de sa position à $\Delta\varphi_B = 0$ dans le conoscope . Alors, nous en déduisons que $\overrightarrow{AB}$ est colinéaire au vecteur $(\overrightarrow{OI} \wedge \overrightarrow{OS}) \wedge \overrightarrow{OS}$ (Figure 83).

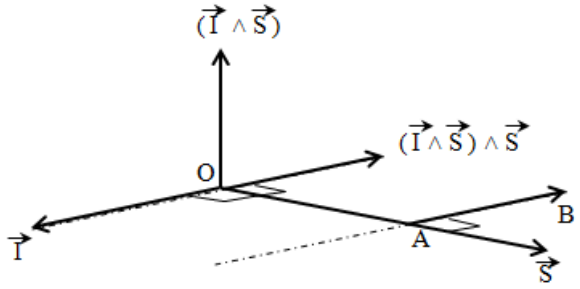



Figure 83 : Illustration des vecteurs $(\vec{I} \wedge \vec{S}) \wedge \vec{S}$ et $\overrightarrow{AB}$.

Soit :

$$\overrightarrow{AB} = k_2 \cdot (\overrightarrow{OI} \wedge \overrightarrow{OS}) \wedge \overrightarrow{OS} = k_2 \cdot [(\overrightarrow{OI} \cdot \overrightarrow{OS}) \cdot \overrightarrow{OS} - (\overrightarrow{OS} \cdot \overrightarrow{OS}) \cdot \overrightarrow{OI}] \quad (79)$$

On pose :

$$\overrightarrow{OI} \cdot \overrightarrow{OS} = \|\overrightarrow{OI}\| \cdot \|\overrightarrow{OS}\| \cdot \cos\delta$$

Avec δ, l'angle entre $\overrightarrow{OI}$ et $\overrightarrow{OS}$

Alors :

$$\overrightarrow{AB} = k_2 \cdot [\cos\delta . \overrightarrow{OS} - \overrightarrow{OI}]$$

Avec :

$$k_2 = \frac{\|\overrightarrow{AB}\|}{\|\cos\delta . \overrightarrow{OS} - \overrightarrow{OI}\|}$$

On a :

$$\|\overrightarrow{AB}\| = \|\overrightarrow{AR}\| = \|\overrightarrow{OR}\| \cdot \sin\Delta\theta_R$$

$$\|\cos\delta . \overrightarrow{OS} - \overrightarrow{OI}\| = \sqrt{\|\cos\delta \cdot \overrightarrow{OS}\|^2 + \|\overrightarrow{OI}\|^2 - 2 \cdot \cos\delta \cdot \overrightarrow{OS} \cdot \overrightarrow{OI}}$$

$$= \sqrt{\cos\delta^2 + 1 - 2 \cdot \cos\delta \cdot \cos\delta}$$

$$= \sqrt{1 - \cos\delta^2} = \sin\delta$$

On trouve :

$$\overrightarrow{\boldsymbol{AB}} = \frac{\sin\boldsymbol{\Delta\theta_R}}{\sin\boldsymbol{\delta}} [\cos\boldsymbol{\delta} . \overrightarrow{\boldsymbol{OS}} - \overrightarrow{\boldsymbol{OI}}] \quad (80)$$

3. **Expression de $\overrightarrow{AE}$ dans le repère de l'échantillon :**

$\overrightarrow{AE}$ est colinéaire au vecteur $\overrightarrow{AB}$, on peut écrire que :

$$\|\overrightarrow{AE}\| = k_3 \cdot \|\overrightarrow{AB}\|$$

D'un autre côté :

$$\|\overrightarrow{AE}\| = \|\overrightarrow{AR}\| \cdot \cos\Delta\varphi_R$$

Or : $\|\overrightarrow{AR}\| = \|\overrightarrow{AB}\|$ car les deux points B e R appartiennent à la sphère unitaire.

Alors

$$\|\overrightarrow{AE}\| = \cos \Delta\varphi_R \cdot \|\overrightarrow{AB}\|$$

$$\overrightarrow{AE} = \cos \Delta\varphi_R \cdot \overrightarrow{AB}$$

En remplaçant $\|\overrightarrow{AB}\|$ par son expression, on trouve :

$$\overrightarrow{\boldsymbol{AE}} = \boldsymbol{\cos \Delta\varphi_R} \cdot \frac{\boldsymbol{\sin \Delta\theta_R}}{\boldsymbol{\sin \delta}} [\boldsymbol{\cos \delta}. \overrightarrow{\boldsymbol{OS}} - \overrightarrow{\boldsymbol{OI}}] \quad (81)$$

### 4. Expression de $\overrightarrow{ER}$ dans le repère de l'échantillon

Le vecteur $\overrightarrow{ER}$ représente un déplacement vertical dans le repère du laboratoire, il est donc colinéaire à $(\overrightarrow{OI} \wedge \overrightarrow{OS})$ (Figure 84).

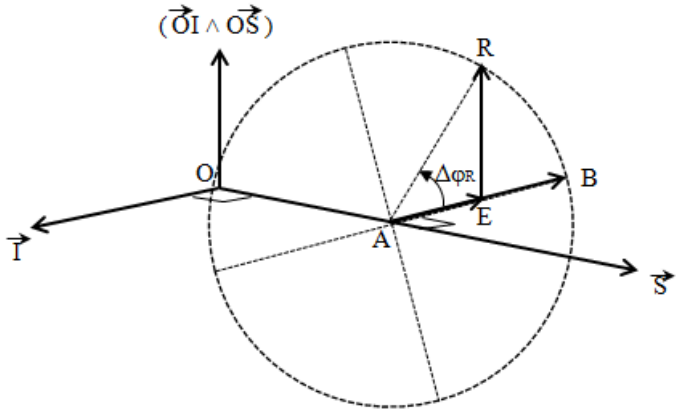



Figure 84 : Représentation schématique du vecteur $\overrightarrow{ER}$.

Soit :

$$\overrightarrow{ER} = k_4 \cdot (\overrightarrow{OI} \wedge \overrightarrow{OS})$$

Nous savons que : $\sin \Delta\theta_R = \frac{\|\overrightarrow{AR}\|}{\|\overrightarrow{OR}\|}$ et $\|\overrightarrow{OR}\| = 1$ sphère unitaire, alors : $\|\overrightarrow{AR}\| = \sin \Delta\theta_R$.

De la Figure 84, on peut donc écrire que:

$$\|\overrightarrow{ER}\| = \|\overrightarrow{AR}\| \cdot \sin \Delta\varphi_R \rightarrow \|\overrightarrow{ER}\| = \sin \Delta\theta_R \cdot \sin \Delta\varphi_R \quad (82)$$

$$\|\overrightarrow{OI} \wedge \overrightarrow{OS}\| = \|\overrightarrow{OI}\| \cdot \|\overrightarrow{OS}\| \sin \delta \rightarrow \|\overrightarrow{ER}\| = k_4 \cdot \sin \delta \quad (83)$$

$\|\overrightarrow{OI}\| = \|\overrightarrow{OS}\| = 1$ Vecteurs unitaires appartenant à la sphère.

$$k_4 = \frac{\|\overrightarrow{ER}\|}{\|\overrightarrow{OI} \wedge \overrightarrow{OS}\|} = \frac{\sin \Delta\theta_R \cdot \sin \Delta\varphi_R}{\sin \delta}$$

On trouve :

$$\overrightarrow{\boldsymbol{ER}} = \frac{\sin \Delta\boldsymbol{\theta_R} \cdot \sin \Delta\boldsymbol{\varphi_R}}{\sin \boldsymbol{\delta}} \cdot (\overrightarrow{\boldsymbol{OI}} \wedge \overrightarrow{\boldsymbol{OS}}) \tag{84}$$

5. Expression de $\overrightarrow{OR}$ dans le repère de l'échantillon :

Au final, à l'aide de différents vecteurs que nous venons de calculer, nous trouvons $\overrightarrow{OR}$, tel que :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{OR} = \cos \Delta\varphi_{\mathrm{R}} \cdot \overrightarrow{OS} + \frac{\cos \Delta\varphi_{\mathrm{R}} \cdot \sin \Delta\theta_{\mathrm{R}}}{\sin \delta}\left[\cos \delta . \overrightarrow{OS} - \overrightarrow{OI}\right] \\ + \frac{\sin \Delta\theta_{\mathrm{R}} \cdot \sin \Delta\varphi_{\mathrm{R}}}{\sin \delta} \cdot (\overrightarrow{OI} \wedge \overrightarrow{OS})\end{aligned} \tag{85}$$

Soit :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{OR} = -\frac{\cos \Delta\varphi_R \cdot \sin \Delta\theta_R}{\sin \delta} \cdot \overrightarrow{OI} + \left(\cos \Delta\theta_R + \frac{\cos \Delta\varphi_R \cdot \sin \Delta\theta_R}{\tan \delta}\right) \cdot \overrightarrow{OS} + \\ \frac{\sin \Delta\theta_R \cdot \sin \Delta\varphi_R}{\sin \delta} \cdot (\overrightarrow{OI} \wedge \overrightarrow{OS})\end{aligned} \tag{86}$$

Rappelons que :

— $\overrightarrow{OI}$, $\overrightarrow{OS}$ et $\overrightarrow{OR}$ , des vecteurs unitaires, partant du centre de repère de l'échantillon, et pointant respectivement la direction d'illumination I ($\theta_{\mathrm{I}}$ ; $\varphi_{\mathrm{I}}$), la direction d'observation du centre de la détection S($\theta_{\mathrm{S}}$ ; $\varphi_{\mathrm{S}}$) et la direction d'observation correspondant au pixel ($x$, $y$), R($\theta_{\mathrm{R}}$ ; $\varphi_{\mathrm{R}}$)

— $\Delta\,\theta_{\mathbf{R}}$ et $\varphi_{\mathbf{R}}$ sont les angles zénithal et azimutal de **R**.

— $\delta$ est l'angle entre $\overrightarrow{OI}$ et $\overrightarrow{OS}$.

$$\delta = \cos^{-1}(\sin \theta_I \cdot \sin \theta_R \cos(\varphi_R - \varphi_I) + \cos \theta_I \cdot \cos \theta_R) \tag{87}$$

Une fois ce calcul réalisé, il est possible d'attribuer, pour chacun des pixels des 9 clichés, les coordonnées polaires ($\theta_{\mathbf{R}}$ ; $\varphi_{\mathbf{R}}$) correspondant au vecteur **R.** Nous obtenons avec une matrice combinée, qui contient l'information sur la luminance réfléchie par l'échantillon pour des angles zénithaux 42,5° < $\theta_{\mathbf{R}}$ < 47,5° et azimutaux -2,2° < $\varphi_R$ < 2,2°, avec un pas $\delta\theta = \delta\varphi = 2/512 = 0{,}004°$. Le nombre total de directions d'observation reporté est donc d'environ 1,4 Million.

Nous avons développé un certain nombre de programmes pour automatiser cette opération de reconstruction. Ils permettent de basculer du repère du conoscope au repère de l'échantillon, de rechercher les points redondants entre deux clichés et de les moyenner, ou encore de tracer les points recombinés dans une représentation 3D exploitable.

En effet le résultat de mesures recombinées atteint vite des tailles supérieures à 20 M pixels, et pose des questions de gestion d'affichage et de compression numérique. Un programme de compression a été créé.

La Figure 85, présente un pic recombiné, dans le plan de Fourier de l'échantillon, pour une direction d'illumination de zénith 45°.

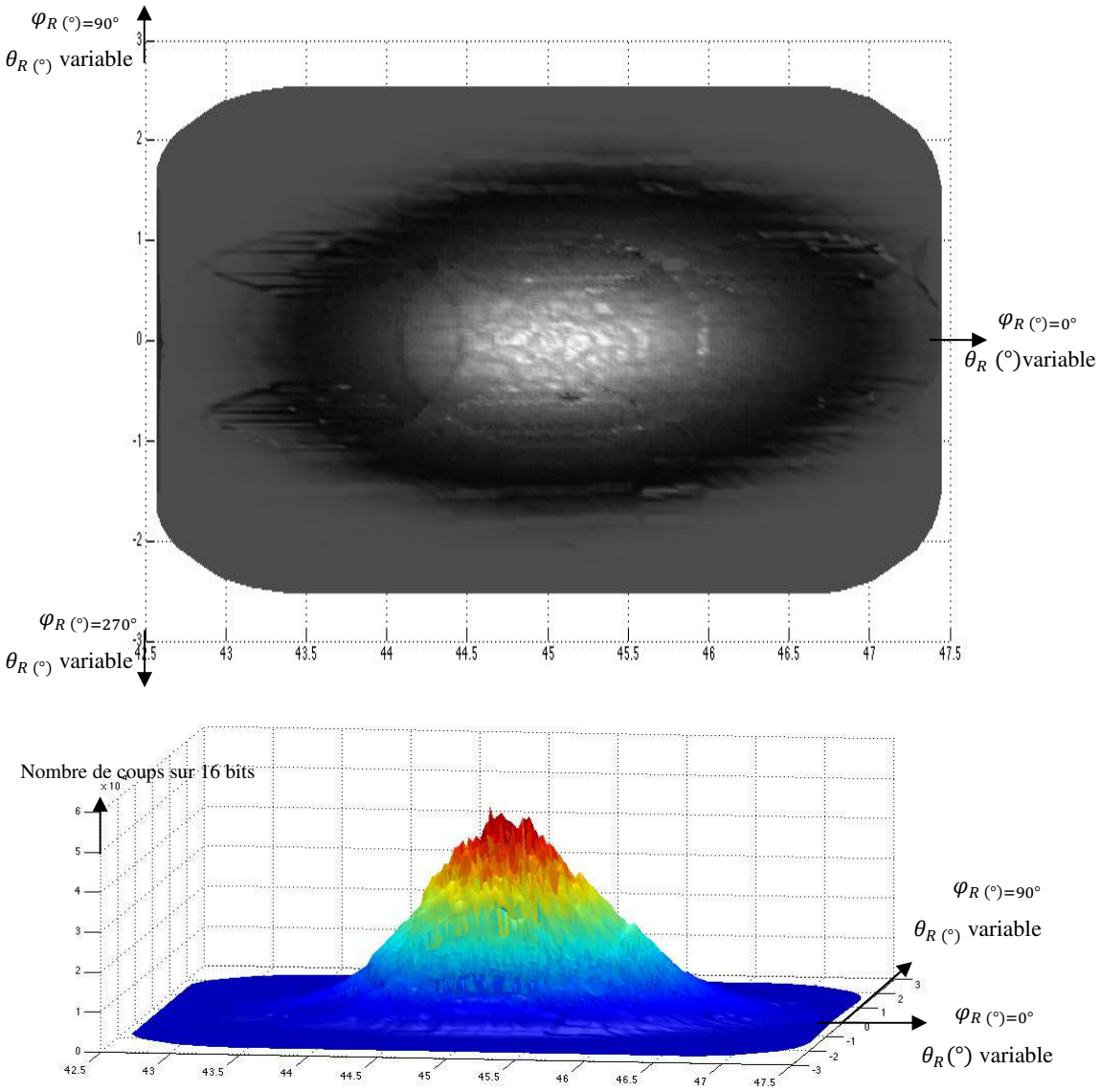



Figure 85 : Pic spéculaire recombiné à partir de 9 clichés.
Pour un échantillon de papier noir brillant, pour une incidence avec un angle zenithal de 45°. L'ensemble de l'image représente environ 1,4 million de direction d'observation. Le pas angulaire est de 0,004.

La réalisation de la mesure d'un pic spéculaire avec ce niveau de détail n'a jamais été atteinte auparavant. L'observateur attentif remarquera qu'il reste néanmoins des améliorations à apporter à notre système. C'est le cas notamment à la frontière entre les clichés. Nous observons en effet de petits décrochements d'une image à l'autre qui peuvent provenir de l'étalonnage en linéarité temporelle de la caméra ou d'une mauvaise maitrise des équipements

angulaires du robot. Cependant, notre système visuel est particulièrement performant pour détecter des contours. Dans la réalité physique, le décrochement est de l'ordre de 4%, ce qui est, certes, améliorable, mais à placer en regard de l'incertitude d'étalonnage des luminancemètres haut de gamme, qui généralement, tourne autour de 2%.

Dans tous les cas, la mission qui m'était confiée, à savoir la mise en place d'un système de mesure de BRDF avec une résolution au moins égale à celle de l'œil humain est réalisée. L'amélioration de ces détails est au programme de notre activité 2014, voire de celle des années suivantes si besoin. Elle se fera au contact de l'exploitation de l'équipement sur des échantillons réels.

# Conclusion

Le brillant est un attribut visuel de surfaces qui joue un rôle important dans la perception visuelle. D'un point de vue industriel, le brillant est associé à la qualité et a un rôle important dans l'aspect esthétique d'un matériau. Il est donc essentiel de le contrôler. C'est pour cela que durant ces 20 dernières années, des efforts importants ont été réalisés par les fabricants pour proposer des matériaux avec des effets visuels sophistiqués comme les peintures métalliques, les matériaux goniochromatiques et les surfaces présentant des effets scintillants.

D'un point de vue métrologique, le brillant n'est pas complètement maitrisé et suscite plus d'intérêt de la part des métrologues. Pour cela un métrologue a besoin de nouvelles méthodes de mesure, de nouvelles configurations (illumination et observation en dehors du plan d'incidence) et par conséquent d'équipements plus complets et plus sophistiqués (résolution angulaire, temps de mesure…) que ceux qui existent déjà.

Ces études auront pour but de fournir des données quantitatives, qui serviront à assurer la reproductibilité et le contrôle qualité des objets ainsi qu'à assurer la corrélation entre visuelle et instrumentale en améliorant la compréhension du lien entre le brillant et le type de surface.

Le but de ma thèse était de munir la métrologie française d'un instrument de référence consacré à la mesure et à l'étude du brillant. Cet instrument a été développé au LNE-CNAM, et en collaboration avec la société Eldim pour la partie détection de la ligne spatiale. La partie budget d'incertitude n'a pas encore été réalisée. Une fois le budget d'incertitude sur la mesure de la BRDF établi l'instrument devra faire l'objet d'une comparaison de ses résultats de mesure de brillant et de couleur avec d'autres instruments de référence de laboratoires nationaux de métrologie tels que le NIST et la PTB afin qu'il puisse être validé.

L'originalité de cet instrument vient du fait que la détection soit basé sur le principe de l'optique de Fourier associé à une caméra ce qui permet de mesurer en quelques secondes la luminance réfléchie dans un cône de ±1° situé dans et autour de la direction spéculaire, où l'information sur le brillant est située. Cet instrument possède une discrimination angulaire théorique de 0,004°. Dans la pratique, nous avons validé une résolution de 0,03° avec un sténopé de 200 µm, et 0,01° avec un sténopé de 75 µm. Nous avons également validé la méthode qui permet de compiler différents temps d'exposition (multi-exposition temporelle) et différentes photos adjacentes (multi-exposition spatiale) [78], ce qui rend la mesure de pics

spéculaires de différentes largeurs à mi-hauteur possible, sans limite de taille, sauf peut-être la quantité de données ainsi que le temps de mesure et de traitement des données. Les recherches actuelles mené à l'aide du gonioréflectomètre du LNE-CNAM ont pour but de fournir de nouvelles informations sur la compréhension du pic spéculaire afin d'aider à mieux établir le lien entre la rugosité de la surface et la mesure BRDF d'un côté et entre la mesure de la BRDF et la perception visuelle de la brillance de l'autre.

# Annexes

# i. Annexe I : Principe de fonctionnement du CCD, du convertisseur charge-tension et du convertisseur analogique-numérique.

## Le détecteur CCD :

Les premiers à introduire les CCD sont W.S. Boyle et G.E.Smith, en 1970. Un détecteur CCD est un élément photoélectrique basé sur la technologie MOS (Metal Oxide Semi-conductor) [79] [19]. Le MOS est capable de stocker des charges électriques dans des puits de potentiel lorsqu'il est éclairé, ces charges sont ensuite converties en tension. Les transistors MOS sont constitués d'une première électrode à base d'un matériau conducteur Métallique, appelée "gate" ou grille, d'une couche d'Oxyde de silicium jouant le rôle d'isolant, et d'un substrat en silicium, comme le montre la Figure 86.

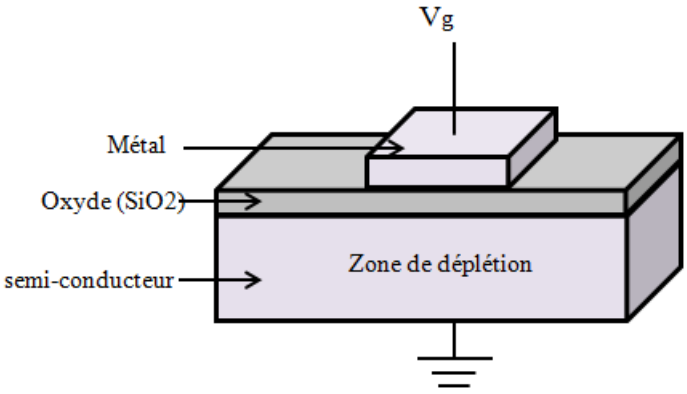



Figure 86 : Schéma représentatif d'un MOS.
Un MOS est composé d'un semi-conducteur en Si, une couche d'oxyde et finalement une électrode métallique appelé porte qui permet de gérer la tension Vg.

D'abord les MOS stockent les charges dans des puits de potentiel. Les charges se déplacent d'un pixel à un autre en appliquant des tensions différentes à leur grille. Elles sont recueillies par le registre horizontal qui les transmet au convertisseur charge tension, puis à un convertisseur analogique numérique. Ces étapes sont décrites dans ce qui suit :

**1ère étape :** chargement des pixels :

Le stockage des charges est possible en manipulant la tension appliquée à la grille du MOS noté Vg, nous prenons l'exemple d'un semi-conducteur dopé p, pour lequel les charges positives (trous) sont majoritaires et les porteurs négatifs (électrons) sont minoritaires.

- Pour une tension négative appliquée à la grille (régime d'accumulation):

Appliquer une tension négative à la grille signifie que celle-ci présente une charge négative $Q_g^-$, qui attire les porteurs majoritaires (trous) à l'interface oxyde-semi-conducteur. Il apparait alors sous l'oxyde une zone d'accumulation de charge positives $Q_A^+$, dont la profondeur dépend de la tension appliquée, tel que :

$$Q_g^- = Q_A^+ \quad \text{unité: C} \cdot \text{cm}^{-2} \tag{88}$$

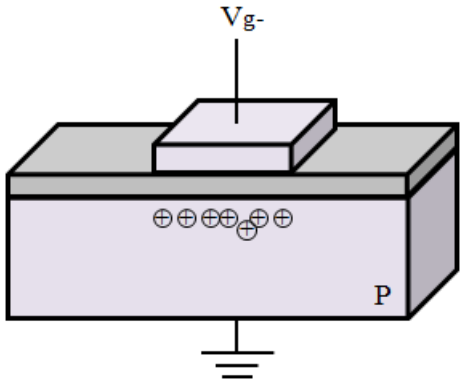



Figure 87 : représentation du régime d'accumulation dans le transistor MOS.

- Pour une tension positive appliquée à la grille (régime de désertion) :

Dans ce cas la grille présente une charge par unité de surface positive $Q_g^+$ qui va repousser les porteur majoritaires (trous) dans le volume du semi-conducteur créant ainsi sous la grille une zone désertée chargée négativement et noté $Q_d^-$ [80](Figure 88) telle que :

$$Q_g^+ = Q_d^- \tag{89}$$

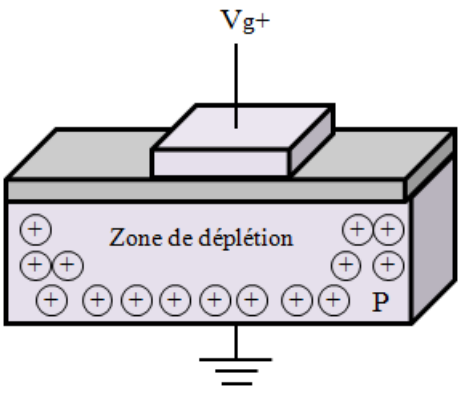



Figure 88: Schéma d'un MOS dopé P auquel on applique une tension à la grille Vg positive.

- Génération de paires électrons-trous :

Lors de l'éclairement du CCD il y a création de paires électrons-trous crées lors de l'absorption de photons. Les électrons se retrouvent piégés dans la zone de déplétion tandis que les trous sont repoussés vers le substrat. Dans la zone de déplétion se crée une couche dite d'inversion qui contient des électrons (Figure 89).

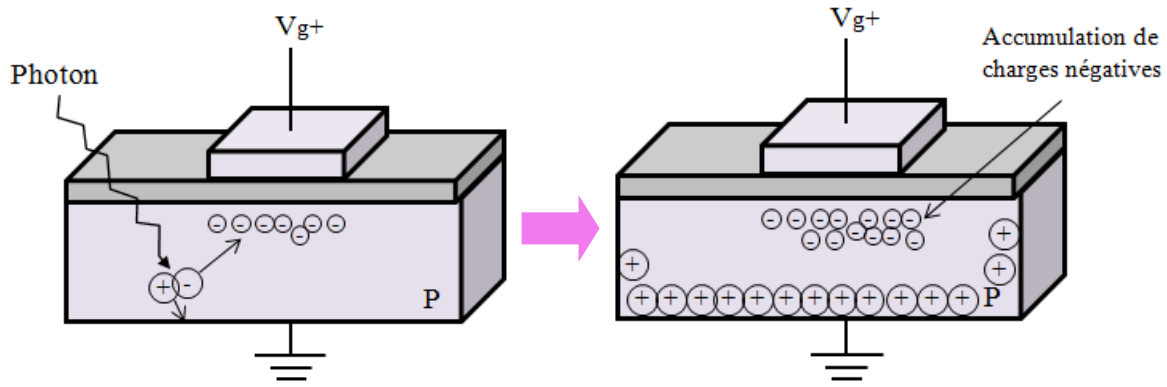



Figure 89: Schéma représentatif de la création de la couche d'inversion contenant les électrons dans un MOS.

**2ème étape : transfert de charges :**

Un CCD est composé de plusieurs lignes et colonnes, en bas des colonnes se trouve le registre horizontal, comme le montre Figure 90.

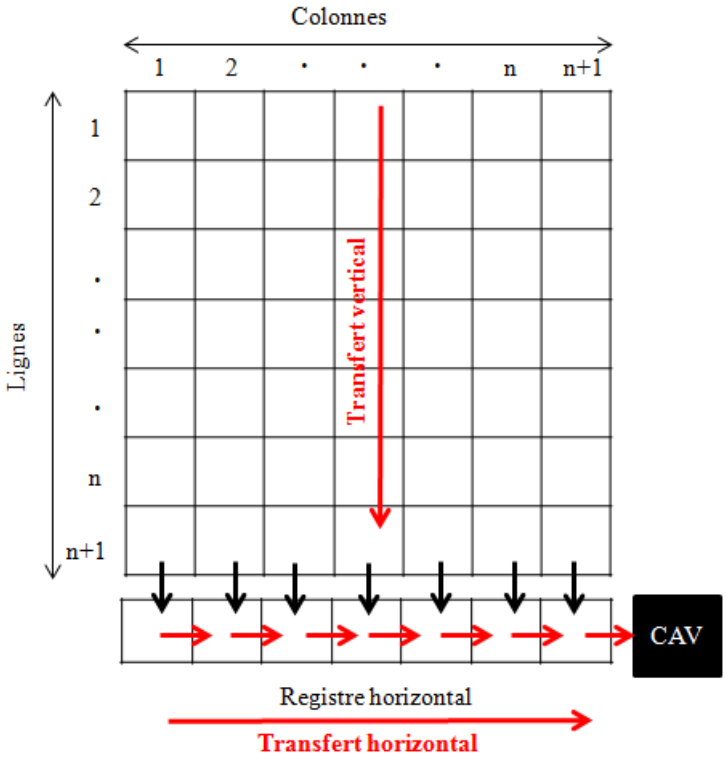



Figure 90 : Représentation schématique des lignes et des colonnes constituant un CCD.

Lors du transfert de charges, la charge contenue dans les pixels de la ligne (n+1) se vide dans le registre horizontal, ceux de la ligne n se vide dans la ligne (n+1) et ainsi de suite. C'est le transfert vertical des charges vers le registre horizontal.

Une fois le registre chargé, il se vide via un processus de décalage horizontal vers un convertisseur charge-tension. C'est le transfert horizontal.

A chaque fois que le registre se vide, le processus se répète jusqu'à la lecture complète du CCD. La Figure 91 schématise le processus de décalage vertical et horizontal.

Au début, Figure 91 (a), les pixels se remplissent pendant le temps d'exposition $t_s$(s), ensuite Figure 91 (b) le CCD procède au transfert de charge vertical inter lignes, qui se termine par le passage de la charge de la ligne au registre à décalage. E en fin, Figure 91 (c), le registre le registre se vide en procédant à un transfert horizontal des charges vers un convertisseur courant tension.

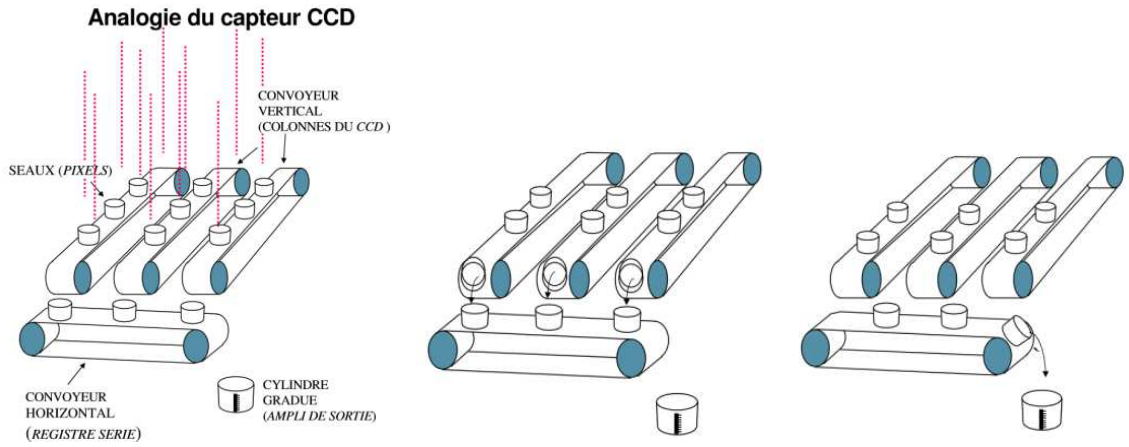



Figure 91: Schéma représentatif du principe du transfert de charge [81].

Le transfert de charges est régulé par des horloges verticales et horizontales. Ces charges se déplacent d'un pixel à un autre en modifiant la tension de chaque grille. Le schéma représentatif (Figure 92) décrit le principe de transfert de charge :

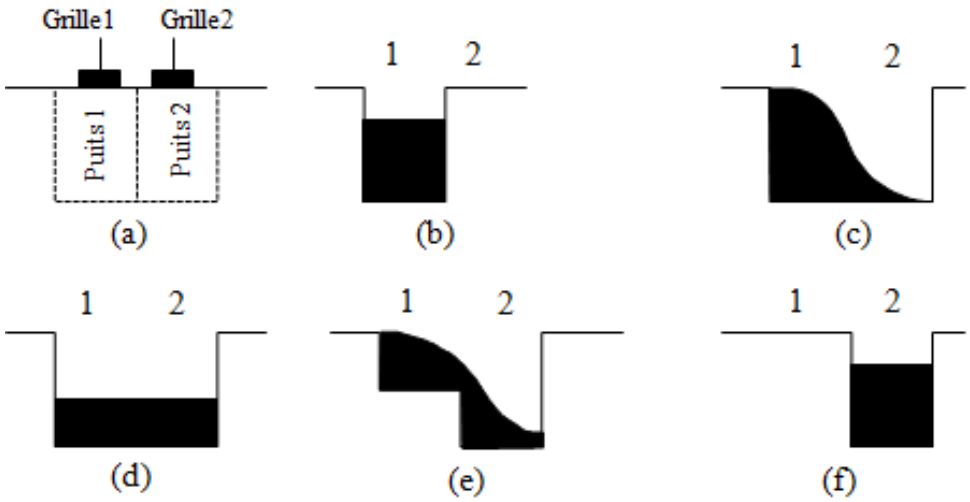



Figure 92 : Schéma représentatif du transfert de charge entre deux portes adjacentes [19].
Les charges de gauches à droite suivent le sens de la tension positive la plus élevé ce qui leur permet de passer d'un pixel à un autre.

Au départ, une tension $V_{g1}$ est appliquée à la porte 1, pour piéger les électrons dans le puits 1 (décrite dans l'étape 1), une tension $V_{g2} = V_{g1}$ est appliquée à la porte 2, forçant les électrons à se déplacer vers le puits 2 (Figure 92 c) jusqu'à atteindre l'équilibre en quantité d'électron dans chacun des puits (Figure 92 d).

En réduisant la tension $V_{g1}$ de la porte 1, les électrons se situant dans le puits 1 basculent progressivement vers le puits 2 (Figure 92 e). Pour une tension $V_{g1}$ nulle, tous les électrons du puits 1 passent dans le puits 2. En appliquant une polarisation plus importante à la porte 3 ($V_{g3} = V_{g2}$) on fait passer la charge dans le puits 3 et ainsi de suite jusqu'au transfert de toutes les charges vers le registre horizontal.

## Le convertisseur charge-tension (CAV)

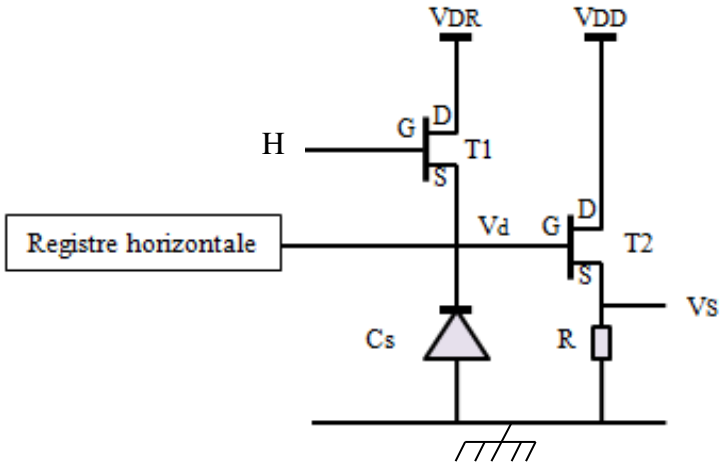



Figure 93: Convertisseur charge-tension.

Un convertisseur charge-tension, comme le montre la Figure 75 est constitué d'un premier transistor $T_1$ utilisé comme interrupteur, un second transistor $T_2$ utilisé comme amplificateur et une diode flottante.

L'horloge H, sert à commander l'état dans lequel se trouve le transistor $T_1$, celui-ci est soit bloqué pour un état faible de l'horloge ou bien saturé pour un état haut comme suit :

- Etat haut de l'horloge : on applique une tension de référence $V_{DR}$ élevée au drain, le transistor se retrouve alors dans un état saturé et se comporte comme un interrupteur fermé. La tension appliquée sert à la création d'une zone de déplétion dans la diode provoquant son déséquilibre.
- Horloge en état bas : le transistor est bloqué et se comporte comme un interrupteur ouvert, la diode est donc isolée de la tension. Pour revenir à l'équilibre, celle-ci reçoit les charges provenant du registre horizontal, qui vont se cumuler dans la zone de déplétion créant une variation de potentiel $V_d$ aux bornes de la diode, tel que :

$$V_d = \frac{-Q}{C_d} \tag{90}$$

Avec : $C_d$ : la capacité de diffusion en farads.

Q : la somme des charges électriques.

Le transistor T2 de gain $G_0$ reçoit la tension $V_d$provenant de la diode par sa grille et délivre une tension amplifiée $V_S$ recueillie sur sa source.

A la fin de la lecture l'horloge repasse au niveau haut, le transistor redevient saturé (fermé) et les charges se dissipent dans la masse, la diode est prête à accueillir la charge suivante.

## Le convertisseur analogique-numérique

Situé derrière l'amplificateur (cf. Figure 54), le convertisseur analogique-numérique a pour fonction de convertir le signal analogique continu en un signal numérique. Chaque pixel sera doté d'une valeur discrète codée sur n bits. Le nombre de bits utilisés dépend de la dynamique du capteur tel que pour n bits de codage on a $2^n$ niveaux de gris pour une caméra noir et blanc par exemple.

# ii. Annexe II: Puissance équivalente au bruit pour une caméra CCD.

La puissance équivalente au bruit NEP s'exprime en $\mathrm{W} \cdot \mathrm{Hz}^{-1/2}$. Elle représente la valeur de la puissance optique incidente qui génère un photocourant équivalent au bruit d'obscurité de la caméra. Le rapport signal à bruit est égal à un 1, pour une bande passante ΔF=1Hz.
La puissance équivalente au bruit est donnée par :

$$\mathrm{NEP} = \frac{\mathrm{B_I}(\nu)}{\mathrm{S}} \quad \text{unité} : W \cdot Hz^{-1/2} \tag{91}$$

Avec :

$\mathrm{B_I}(\nu)$ : La densité spectrale de bruit de courant s'exprime en $A \cdot Hz^{-1/2}$.

S : La sensibilité du détecteur. Elle s'exprime en $\mathrm{A} \cdot \mathrm{W}^{-1}$.

1. Calcul de la densité spectrale de bruit de courant $\mathrm{B_I}(\nu)$ :

Dans le cas d'un bruit de Schottky, la densité spectrale de bruit de courant est donnée par :

$$\mathrm{B_I}(\nu) = \sqrt{2 \cdot \mathrm{q} \cdot \mathrm{I}} \quad \text{unité: } (A \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}) \tag{92}$$

Ainsi pour les bruits d'obscurité et de lecture (Read Out) qui représentent des bruits blancs de Schottky, on peut écrire que :

$$\begin{aligned} \mathrm{B_{I_{obs}}}(\nu) &= \sqrt{2q \cdot I_{obs}} \quad (A \cdot Hz^{-1/2}) \\ \mathrm{B_{I_{R.o}}}(\nu) &= \sqrt{2q \cdot I_{R.O}} \quad (A \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}) \end{aligned} \tag{93}$$

La densité spectrale de bruit total est donnée par la somme carrée des deux densités de bruits de lecture et d'obscurité, tel que :

$$\mathrm{B_{I_{Total}}}(\nu) = \sqrt{\left|\mathrm{B_{I_{obs}}}(\nu)\right|^2 + \left|\mathrm{B_{I_{R.O}}}(\nu)\right|^2} \quad \textit{unité}: (\mathrm{A} \cdot \mathrm{Hz}^{-\frac{1}{2}}) \tag{94}$$

En intégrant l'équation (98) dans l'équation (99) on retrouve :

$$\mathrm{B_{I_{Total}}}(\nu) = \sqrt{2qI_{obs} + 2q\, I_{R.O}} \quad en\ (\mathrm{A} \cdot \mathrm{Hz}^{-\frac{1}{2}}) \tag{95}$$

$I_{obs}$ et $I_{R.O}$ se calculent à partir de l'équation suivante :

$$\begin{cases} I_{R.O}(A) = n_{R.O} \cdot q \\ I_{obs}(A) = n_{obs} \cdot q \end{cases} \quad (96)$$

Avec :

$q = 1{,}6\ 10^{-19}$ C et n : le taux d'électrons par seconde

Selon le fiche technique de la caméra Hamamatsu ORCA II, le nombre d'électrons lors de la lecture du CCD ainsi que le nombre d'électrons dû au courant d'obscurité par pixel est équivalent à :

$$\begin{cases} n_{R.O} = 7\ e^- /s \\ n_{obs} = 0{,}032\ e^- /s \end{cases} \rightarrow \begin{cases} I_{R.O} = 2{,}24 \cdot 10^{-18}\ \text{A} \\ I_{obs} = 1{,}02 \cdot 10^{-20}\text{A} \end{cases}$$

On trouve : $\text{B}_{I_{Total}}(\nu) = 8{,}49\ 10^{-19}\text{A} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$.

2. La sensibilité S du détecteur :

Un photodétecteur converti un signal lumineux en un signal électrique, c'est-à-dire qu'à partir de $n$ photons incidents, le photodétecteur génère $n'$ nombre d'électrons. On définit l'efficacité quantique η tel que :

$$\eta = \frac{\text{Nombre d'électrons générés}}{\text{nombre de photons incidents}} = \frac{n'}{n} \quad (97)$$

L'efficacité quantique est donnée par le constructeur

La relation entre l'efficacité quantique η du détecteur et sa sensibilité S est donnée par :

$$\text{S} = \frac{I_S}{P_S} = \frac{\text{q}.\eta}{\text{h}.\nu} = \frac{\text{q}.\eta}{\text{h}.\text{c}} \cdot \lambda \qquad \text{unité : } \text{A} \cdot \text{W}^{-1} \quad (98)$$

Avec :

$q$, la charge élémentaire $q = 1{,}6\ 10^{-19}$ C

$c$ , la vitesse de la lumière $\text{c} = 3\ 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

η, l'efficacité quantique.

$h$, la constante de Plank $h = 6{,}626\ 10^{-34}\ \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

$\lambda$, la longueur d'onde (m).

La sensibilité dépend donc de la longueur d'onde. Nous traçons alors la puissance équivalente au bruit pour la caméra ORCA en fonction de la longueur d'onde (Figure 58 page 125).

# Références


[1] "Chubb, C., Olzak, L., Derrington, A., 'Second-order processes in vision: Introduction', JOSA A, 18, 9, 2175-2178, 2001."

[2] "CIE Publication 175. A Framework for the Measurement of Visual Appearance. Vienna: Central Bureau of the CIE, 2006."

[3] "Zorll, U., « New aspects of gloss of paint film and its measurement », Progress in Organic Coatings, 1, 113-155, 1972."

[4] "Nadal, M. E., Early, E. A., Weber, W. and Bousquet, R., « NIST 0:45 reflectometer ». Color Res. Appl., 33: 94–99, 2008."

[5] "LELOUP, F., OBEIN, G., POINTER, M., HANSELAER, P., « Toward the soft metrology of surface gloss: A review ». Color Res. Appl.. doi: 10.1002/col.21846."

[6] "CIE Colorimetry Technical Report 15:2004 (3rd edition), Vienna: Central Bureau of the CIE, 2004."

[7] American Society for Testing and Materials, "Standard test method for specular gloss,ASTM D523."

[8] "International Standard ISO 2813, 'Paint a nd Varnishes-Measurements of Specular Gloss of Nonmetallic Paint Films at 20 ° , 60 ° , and 85 ° ' (International Organization for Standardization 1978)."

[9] T. Atamas, K. Hauer, and A. Höpe, "Appearance Measurements of Goniochromatic Colours Predicting Perceptions," in *Predicting Perceptions: Proceedings of the 3rd International Conference on Appearance*, 2012, vol. 1831135700, pp. 149–154.

[10] CIE, "ÉCLAIRAGE CHAPITRE 845 :MESURES RADIOMÉTRIQUES, PHOTOMÉTRIQUES ET COLORIMÉTRIQUES. RÉCEPTEURS PHYSIQUES.," vol. 50, no. 845, 1987.

[11] CIE, "ÉCLAIRAGE CHAPITRE 845 :MESURES RADIOMÉTRIQUES, PHOTOMÉTRIQUES ET COLORIMÉTRIQUES. RÉCEPTEURS PHYSIQUES.," vol. 50, no. 845, p. 144, 1987.

[12] CIE, "ÉCLAIRAGE CHAPITRE 845 :MESURES RADIOMÉTRIQUES, PHOTOMÉTRIQUES ET COLORIMÉTRIQUES. RÉCEPTEURS PHYSIQUES.," vol. 50, p. 145, 1987.

[13] CIE, "ÉCLAIRAGE CHAPITRE 845 :MESURES RADIOMÉTRIQUES, PHOTOMÉTRIQUES ET COLORIMÉTRIQUES. RÉCEPTEURS PHYSIQUES.," vol. 50, p. 145, 1987.

[14] CIE, “ÉCLAIRAGE CHAPITRE 845 :MESURES RADIOMÉTRIQUES, PHOTOMÉTRIQUES ET COLORIMÉTRIQUES. RÉCEPTEURS PHYSIQUES.,” vol. 50, p. 143, 1987.

[15] CIE, “ÉCLAIRAGE CHAPITRE 845 :MESURES RADIOMÉTRIQUES, PHOTOMÉTRIQUES ET COLORIMÉTRIQUES. RÉCEPTEURS PHYSIQUES.,” vol. 50, no. 845, p. 17, 1987.

[16] F.E.Nicodemus, J.C.Richmond, and J.JHsia, “Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance,” no. October, 1977.

[17] B.Balland, *Optique géométrique: imagerie et instruments*, 1ère éditi. Collection des sciences appliquées de l’INSA de Lyon, 2007, p. 403.

[18] CIE, “ÉCLAIRAGE CHAPITRE 845 :MESURES RADIOMÉTRIQUES, PHOTOMÉTRIQUES ET COLORIMÉTRIQUES. RÉCEPTEURS PHYSIQUES.,” vol. 50, no. 845, p. 12, 1987.

[19] Gerald C. Holst, *CCD ARRAYS, CAMERAS, AND DISPLAYS.*, 2nd ed. 1998.

[20] CIE, “ÉCLAIRAGE CHAPITRE 845 :MESURES RADIOMÉTRIQUES, PHOTOMÉTRIQUES ET COLORIMÉTRIQUES. RÉCEPTEURS PHYSIQUES.,” vol. 50, no. 845, p. 36, 1987.

[21] A. Razet, N. Pousset, G. Obein, J. Bastie, and F. Viénot, “Métrologie de l’apparence,” *13 ème Congrès Int. métrologie*, 2007.

[22] Commission Internationale de l’Eclairage, “Commission Internationale de l’Eclairage,” in *A framework for the measurement of visual appearance. CIE 175 :2006*.

[23] F. Leloup and S. Forment, “Characterization of printed textile fabrics,” in *Oxford V Conference on Spectrometry.*, 2006.

[24] S. G. Kong, Y.-R. Chen, I. Kim, and M. S. Kim, “Analysis of hyperspectral fluorescence images for poultry skin tumor inspection.,” in *Applied optics*, 2004, vol. 43, no. 4, pp. 824–33.

[25] K. Arai, “Method for estimation of grow index of tealeaves based on Bi-directional Reflectance Distribution Function: BRDF measurements with ground based network,” *International Journal of Applied*, no. 2, pp. 52–62, 2011.

[26] F. B. Leloup, M. R. Pointer, and P. Dutré, “Integration of Multiple Cues for Visual Gloss Evaluation,” *Proc. 3rd Int. Conf. Appear.*, no. April, 2012.

[27] G. Obein, “Métrologie de l’apparence et mesure de BRDF,” in *Présentation orale. Journée des métrologues*, 2012.

[28] G. Obein, “CARACTÉRISATION OPTIQUE ET VISUELLE DU BRILLANT,” *Thèse pour le Dr. Systèmes Phys. Métrologie*, p. 26,27., 2003.

[29] “CIE Publication S 017=E. International Lighting Vocabulary. Vienna: Central Bureau of the CIE; 2011.”

[30] “Erb, W., ‘Requirements for Reflection Standards and the Measurement of Their Reflection Values,’ Appl. Opt. 14, 493-499 (1975).”

[31] “CIE Colorimetry Technical Report 15:2004 (3rd edition), Vienna: Central Bureau of the CIE, 2004.”

[32] H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy, and P. Hanrahan, “A practical model for subsurface light transport,” *Siggraph*, pp. 511–518, 2001.

[33] J. Wang, S. Zhao, X. Tong, S. Lin, Z. Lin, Y. Dong, B. Guo, and H.-Y. Shum, “Modeling and rendering of heterogeneous translucent materials using the diffusion equation,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 27, no. 1, pp. 1–18, Mar. 2008.

[34] “Coppel, L., « Lateral light propagation and angular variation of the reflectance of paper », Proc. SPIE 9018, Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance, 90180L, February 24, 2014.”

[35] O. G. Cula and K. J. Dana, “3D Texture Recognition Using Bidirectional Feature Histograms,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 59, no. 1, pp. 33–60, Aug. 2004.

[36] “Shah, P., Chantler, M. and Green, P. , « Analysis of Human Perception of Surface Directionality », Predicting Perceptions: Proceedings of the 3rd International Conference on Appearance. Lulu Press, pp. 29-31, 2012.”

[37] K. J. Dana, O. G. Cula, and J. Wang, “Surface detail in computer models,” *Image Vis. Comput.*, vol. 25, no. 7, pp. 1037–1049, Jul. 2007.

[38] CIE, “ÉCLAIRAGE CHAPITRE 845 :MESURES RADIOMÉTRIQUES, PHOTOMÉTRIQUES ET COLORIMÉTRIQUES. RÉCEPTEURS PHYSIQUES.,” vol. 50, no. 845, p. 125, 1987.

[39] “VIÉNOT, F. , OBEIN, G., ‘Is gloss recognized as a surface property?’, Proceedings of MS 2004, 1st International Workshop on Materials and Sensations, Pau, France, 27-29 October 2004, pages 77-82, 2004.”

[40] G. Obein, “CARACTÉRISATION OPTIQUE ET VISUELLE DU BRILLANT,” *Thèse pour le Dr. Systèmes Phys. Métrologie*, p. 16, 2003.

[41] F. Leloup, P. Hanselaer, and S. Forment, “BRDF and gloss measurements,” *CIE Expert Symp. …*, pp. 1–6, 2007.

[42] G. Obein, “CARACTÉRISATION OPTIQUE ET VISUELLE DU BRILLANT,” *Thèse pour le Dr. Systèmes Phys. Métrologie*, p. 46/47, 2003.

[43] G. Obein, “CARACTÉRISATION OPTIQUE ET VISUELLE DU BRILLANT,” *Thèse pour le Dr. Systèmes Phys. Métrologie*, pp. 48–50, 2003.

[44] “http://www.eldim.fr.”

[45] M. Pointer and N. Barnes, “A new goniospectrophotometer for measuring gonio-apparent materials,” in *Coloration technology*, 2005.

[46] M. Rabal, A. Ferrero, J. Campos, J. L. Fontecha, A. Pons, M. Rubiño, and A. Corróns, “Automatic gonio-spectrophotometer for the absolute measurement of the spectral BRDF at in- out-of-plane and retroreflection geometries,” *Metrologia*, vol. 49, no. 3, pp. 213–223, Jun. 2012.

[47] “SURREL JOELLE, « Optique Instrumentale Optique de Fourier ». Paris ; Ellipses, 1996.”

[48] “NADAL M., BOUSQUET R., OBEIN G., 2005, NIST Reference Colorimeter, AIC Colour 05 Proceedings, 10th Congress of the International Colour Association, Grenada, 701-704.”

[49] A. Höpe, D. Hünerhoff, and K.-O. Hauer, “Robot-based gonioreflectometer,” in *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications*, 2007, no. December.

[50] S. Holopainen, F. Manoocheri, E. Ikonen, K.-O. Hauer, and A. Höpe, “Comparison measurements of 0:45 radiance factor and goniometrically determined diffuse reflectance.,” *Appl. Opt.*, vol. 48, no. 15, pp. 2946–56, May 2009.

[51] D. Hünerhoff, U. Grusemann, and a Höpe, “New robot-based gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflection,” *Metrologia*, vol. 43, no. 2, pp. S11–S16, Apr. 2006.

[52] A. Höpe, T. Atamas, D. Hünerhoff, S. Teichert, and K. Hauer, “ARGon 3 : ‘ 3D appearance robot-based gonioreflectometer ’ at PTB,” vol. 045102, no. February, pp. 1–8, 2012.

[53] J. E. Proctor and P. Y. Barnes, “NIST high accuracy reference reflectometer-spectrophotometer,” in *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1996, vol. 101, no. 5, p. 619.

[54] Robert R. Bousquet; Maria E. Nadal; Gael Obein., “NIST Reference Colorimeter,” in *10th Congress of the Intl. Colour Association*, pp. pp. 701 – 704.

[55] “OBEIN G., BOUSQUET R, NADAL M., 2005, New NIST Reference Goniospectrometer, Optical Diagnostics, Proceedings of SPIE Vol. 5880, 31 July – 4 August, San Diego, USA, pages T1-T10.”

[56] L. BOUSQUET, “Mesure et modélisation des propriétés optiques spectrales et directionnelles des feuilles,” *Thèse pour le Dr. Spécialité Méthodes Phys. en Télédétection*, p. 34/42, 2007.

[57] Y. Boucher and H. Cosnefroy, “Comparison of measured and modeled BRDF of natural targets,” in *AeroSense’99. International Society for Optics and Photonics*, 1999, pp. 16–26.

[58] B. O. ; S. B. ; B. N. ; D. S. ; R. P. ; G. W. ; F. Michel, “Spectrogonio radiometer for the study of the bidirectional reflectance and polarization functions of planetary surfaces. 1. Design and tests,” vol. 43, n° 9, , 2004.

[59] ELDIM, “Viewing Cone measurement.”

[60] “A. Höpe, K.-O. Hauer, ‘Three-dimensional appearance characterisation of diffuse standard reflection materials’, Metrologia 47, 295, 2010.”

[61] Bentham, “Single Monochromator.” [Online]. Available: http://www.bentham.co.uk/pdf/M300.pdf.

[62] “JCGM 200 : 2012 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms ( VIM ) 3rd edition Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés ( VIM ) 3 e édition,” no. Vim, p. 21, 2012.

[63] “Évaluation des données de mesure — Guide pour l ’ expression de l ’ incertitude de mesure,” vol. 2008, p. 66, 2008.

[64] H. Search, C. Journals, A. Contact, M. Iopscience, and I. P. Address, “Degradation of the diffuse reflectance of Spectralon under low-level irradiation,” *Metrologia*, vol. 40, no. 1, pp. S212–S215, 2003.

[65] A. Höpe and K.-O. Hauer, “Three-dimensional appearance characterization of diffuse standard reflection materials,” *Metrologia*, vol. 47, no. 3, pp. 295–304, Jun. 2010.

[66] V. R. Weidner and J. J. Hsia, “Reflection properties of pressed polytetrafluoroethylene powder,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 71, no. 7, p. 856, Jul. 1981.

[67] G. T. Georgiev, C. K. Gatebe, J. J. Butler, and M. D. King, “Comparison between laboratory and airborne BRDF measurements for remote sensing,” in *SPIE Optics + Photonics. International Society for Optics and Photonics*, 2006, vol. 6296, pp. 629603–629603.

[68] CIE, “CIE standard illuminants for colorimetry, ISO/CIE 10526:1999 (CIE S 005/E:1998).”

[69] ORIEL, “ORIEL PRODUCT TRAINING Spectral Irradiance.”

[70] G. Ged, Z. Silvestri, G. Obein, J. Le Rohellec, and F. Viénot, “Recognizing real materials from their glossy appearance,” *J. Vis.*, vol. 10, pp. 1–17, 2010.

[71] Y. Candela, “Système de détection pour la mesure de BRDF/BTDF,” Mémoire de fin d’étude. LCM: LNE-CNAM, 2008.

[72] L. Simonot and G. Obein, “Geometrical considerations in analyzing isotropic or anisotropic surface reflections,” *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 14, pp. 2615–2623, 2007.

[73] G. T. Georgiev and J. J. Butler, “Long-term calibration monitoring of Spectralon diffusers BRDF in the air-ultraviolet,” *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 32, pp. 7892–7899, 2007.

[74] M. M. Rabal, A. Ferrero, J. Campos, A. Pons and L.Hernanz, “Bidirectional reflectance distribution function of diffuse reflectance standards around the retro-reflection direction,” *Metrologia*, vol. 51, 2014.

[75] Newport, “Sphères Intégrantes Oriel.” [Online]. Available: http://www.newport.com/Sph%C3%A8res-int%C3%A9grantes-Oriel/378467/1036/info.aspx.

[76] Labsphere, “Technical Guide: Integrating Sphere Radiometry and Photometry.”

[77] G. Obein and F. Viénot, “MODELLING THE BRDF OF A SERIES OF MATT GLOSSY BLACK SAMPLES,” in *the CIE Expert Symposium on Visual Appearance, CIE publication*, 2006, pp. 67–74.

[78] G. Obein, S. Ouarets, and G. Ged, “Evaluation of the shape of the specular peak for high glossy surfaces,” *SPIE*, p. 901805, Feb. 2014.

[79] W.S. Boyle et G.E.Smith, *Charge Coupled Semiconductor Device.*, vol. 49. 1970, pp. 587–593.

[80] G. Boucharlat, I. De, I. National, and P. De Grenoble, “Dispositifs à transfert de charges ( CCD ),” vol. 33, no. Ccd, 2013.

[81] P.Slangen, “Traitement d’image :capteur.” [Online]. Available: http://lyceeduruy.fr/si/files/2010/09/capteurs.pdf.

Shiraz OUARETS

# CONCEPTION DE LA DETECTION D'UN GONIOREFLECTOMETRE METROLOGIQUE POUR MESURER LA BRDF DES SURFACES

## Résumé en français

Le but de ce travail de thèse est de doter la métrologie française d'un instrument de référence dédié à la caractérisation métrologique des propriétés réflectives des objets qui, du point de vue de l'apparence, sont à l'origine des sensations de couleur, de brillant, de texture, de translucidité…etc. Ce mémoire décrit la conception, réalisation et mise au point d'un dispositif de mesure de la fonction de distribution bidirectionnelle du facteur de luminance d'une surface plane (BRDF). La BRDF est la grandeur physique qui caractérise intégralement la réflexion lumineuse à la surface d'un matériau. En cela, sa mesure s'inscrit comme un outil indispensable pour la mesure de l'apparence car elle permet de connaître en détail le signal qui entre dans l'œil. Certaines surfaces présentent une apparence pigmentée, métallisée, nacrée ou encore interférentielle, ces surfaces, dites "goniochromatiques", ont la capacité de changer d'apparence en fonction de l'angle d'observation. Pour les caractériser, il est impératif d'effectuer une mesure de BRDF sous plusieurs conditions d'observation et d'illumination. L'outil de mesure de la BRDF est un gonioréflectomètre, dédié à des mesures dans le domaine UV - Visible (250 nm – 900 nm).

Le montage expérimental consiste en deux lignes distinctes. La première, appelée voie spectrale, est dédiée à l'étude de la couleur. Elle est constituée d'une illumination fixe assurée par une lampe à décharge de xénon filtrée par un monochromateur puis focalisée sur la surface étudiée. La détection, mobile, est assurée par un système optique constitué de lentilles et de miroirs qui servent à renvoyer la lumière réfléchie par la surface sur la photodiode.

La deuxième ligne, appelée voie spatiale, est la dédiée à l'étude du brillant. Elle requière une résolution angulaire qui égale l'acuité visuelle de l'œil humain (0,03°) c'est cette partie qui introduit l'originalité de notre instrument. Sur cette voie, la détection est fixe et est basée sur la combinaison d'une optique de Fourier et d'une caméra CCD (512x512 pixels). L'illumination est mobile et est assurée par une lampe incandescente à filament de tungstène collimatée sur l'échantillon.

Les deux lignes partagent un robot porte-échantillon qui offre six dégrées de liberté qui sert à reproduire toutes les directions d'illumination et d'observation au-dessus de l'échantillon.

Mots clés : Couleur, Brillant, BRDF, Goniochromatisme, Pic spéculaire.

# Résumé en anglais

The aim of this thesis is to provide the French Metrology with a reference instrument that can be used for measuring the appearance of objects. Several physical properties of object appearance are used not only to identify the object itself but also determine its quality. These include color, gloss, texture and translucency. This work describes the design, characterization and the implementation of an instrument that has been built particularly to measure the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of planar surfaces. BRDF is a physical quantity that enables measuring the surface color and gloss. Accordingly it is important to ensure accurate and traceable measurements of such a quantity in order for a comprehensive understanding of surface properties to be fulfilled.

Some surfaces show pigmented, metallic, sparkling or pearlescent appearance. These surfaces, called goniochromatic surfaces, have the ability to change their appearance depending on the viewing angle. To characterize them, it is necessary to deliver surface reflectance measurements at several directions and under different illumination conditions. The instrument that enables these measurements is called gonioreflectometer.

The experimental setup we have designed consists of two separate detection lines. The first line, called "color line", is used to study the color. It consists of a stationary illumination source that uses a xenon lamp spectrally resolved by a monochromator. The light coming out from the source is focused on the surface under investigation. The reflected light by the surface is collected by using a lens and directed onto a photodiode by a mirror. This detection system can be moved over a wide angular range so as to measure the BRDF.

The second line, called "gloss line", is used to measure the gloss of the surface. In order to be very close to the average human observer, high angular resolution is required. In this line the detection part is stationary. It consists of a Charged Coupled Device (CCD) camera of 512 x 512 pixels. The source used to illuminate the surface is an incandescent tungsten lamp. Angular measurements in this line are provided by the movement of the illumination source itself. Both color and gloss lines share a robot sample-holder that provides six degrees of freedom. This of course facilitates measurements over varies detection and illumination directions of the sample.

Key words: Color, Gloss, BRDF, Goniochromatisme, Specular pic.