

ÉCOLE DOCTORALE 432, "SCIENCES DES METIERS DE L'INGENIEUR"
Spécialité : Lasers, nanosciences et métrologie

Manuscrit présenté par
Gaël Obein

En vue de l'obtention de l'

Habilitation à Diriger les Recherches

METROLOGIE DE L'APPARENCE

Soutenue le 26 / 11 / 2018 à La Plaine St Denis,

devant le jury composé de

- Prof. Andraud Christine, Muséum National d'Histoire Naturelle, FR, rapporteur
- Prof. Fernandez Maloigne Christine., Université de Poitiers, FR, rapporteur
- Prof. Hanselaer Peter, Université de KU KLeuven, BE, rapporteur
- Dr Blattner Peter, Federal Institute of Metrology METAS, CH, examinateur
- Prof. Zissis Georges, Université de Toulouse, FR, examinateur
- Prof. Himbert Marc, Conservatoire National des Arts et Métiers, FR, garant

Mars 2018

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	5
1.1. Qu'est-ce que l'apparence ?	5
1.2. La métrologie de l'apparence.....	6
1.3. Les attributs de l'apparence	7
1.4. Plan du manuscrit	9
2. APPRENTISSAGE (1998-2007)	11
2.1. Une formation technique	11
2.2. Le mésopique, initiation à la psychophysique.....	11
2.3. Caractérisation optique et visuelle du brillant.....	13
2.3.1 Introduction	13
2.3.2 Caractérisation visuelle du brillant	14
2.3.3 Constance de brillant	15
2.3.4 Mesure et modélisation de la BRDF	16
2.3.5 Bilan	18
2.4. Caractérisation d'un goniospectrophotomètre primaire	19
2.4.1 Contexte.....	19
2.4.2 Travail réalisé.....	19
2.4.3 Bilan	21
2.5. La photométrie primaire et le maintien des références	21
2.5.1 Validation de la nouvelle réalisation de la candéla et du lumen.....	21
2.5.2 Maintien à niveau des références de photométrie et raccordement de laboratoires étrangers.....	22
2.5.3 Dépouillement des résultats et rédaction du rapport de la comparaison clef CCPR-K6.....	23
2.5.4 Bilan	24
2.6. Apprentissage : Épilogue	24
3. MISE EN ŒUVRE (2008-2017)	25
3.1. Enseignement	25
3.2. Encadrement.....	26
3.2.1 Tutorat académique	26
3.2.2 Encadrement de stagiaires	26
3.2.3 Encadrement de mémoires ingénieurs Cnam.....	27
3.2.4 Encadrement de doctorants.....	27
3.2.5 Encadrement de chercheurs et ingénieurs contractuels.....	27
3.3. Activité de maintien à niveau des références nationales pour la photométrie et la spectrophotométrie	27
3.3.1 Service d'étalonnage.....	27
3.3.2 Comparaisons internationales.....	28
3.4. Établissement d'un équipement de référence pour la mesure de la BRDF : le goniospectrophotomètre primaire	30
3.4.1 Equation de mesure	31
3.4.2 Cahier des charges.....	32
3.4.3 Conception mécanique	32
3.4.4 Conception optique	32
3.4.5 Pilotage	33
3.4.6 Validation	33
3.5. Conception de « CONDOR », équipement dédié à l'étude du pic spéculaire	34
3.5.1 Conception générale	34
3.5.2 Développement de la détection.....	35
3.5.3 Développement de l'illumination	36
3.5.4 Caractérisation du dispositif.....	36
3.5.5 Fonction d'appareil et résolution angulaire atteinte.....	36
3.5.6 Validation métrologie.....	37

3.5.7	<i>Multi-exposition angulaire</i>	38
3.5.8	<i>Bilan</i>	38
3.6.	Étude psychophysique du brillant	38
3.6.1	<i>Effets de la convergence de l'illumination sur la sensation de brillant</i>	40
3.6.2	<i>Effet de l'environnement sur la sensation de brillant</i>	40
3.6.3	<i>Bilan de l'étude psychophysique du brillant</i>	41
3.7.	Coordination de la métrologie de l'apparence au niveau Européen	41
3.7.1	<i>xDReflect, première expérience de coordination Européenne</i>	42
3.7.2	<i>BiRD, second projet européen</i>	45
3.8.	Mise en œuvre - Epilogue	45
4.	PROJETS	46
4.1.	Étudier les liens entre microtopographie de surface, BRDF et perception visuelle du matériau	46
4.2.	Comprendre la BRDF	47
4.2.1	<i>BRDF et speckle</i>	47
4.2.2	<i>BRDF des surfaces courbes</i>	48
4.2.3	<i>Propagation de la BRDF de surfaces sub-micrométriques vers des surfaces centimétriques ?</i>	49
4.2.4	<i>Influence de l'instrument dans la mesure de la BRDF pour des surfaces présentant des effets visuels spécifiques de type brillant ou scintillement</i>	49
4.3.	Développer une nouvelle référence de mesures spectrophotométriques dédiées à la caractérisation de la translucidité :	50
4.4.	Être utile pour l'industrie et les laboratoires en proposant un service de mesure..	51
4.5.	Progresser dans la compréhension du brillant.....	52
5.	CONCLUSION	54
6.	REFERENCES	55
	ANNEXE A – CV	59
	ANNEXE B – LISTE DES PUBLICATIONS	60
	Revue internationale à comité de lecture	60
	Revue nationale à comité de lecture.....	60
	Actes de colloque internationaux.....	60
	Actes de colloque nationaux.....	62
	RESUME	64

REMERCIEMENTS

Je remercie :

Marc Himbert pour avoir cru en moi dès le début et pour avoir veillé sur ma progression avec discrétion, bienveillance et constance,

Françoise Viénot pour les connaissances et la rigueur scientifique qu'elle m'a transmis avec une patience et une disponibilité infaillible,

Jean Bastie pour avoir mis en place et maintenu les références nationales de photométrie et spectrophotométrie et pour me les avoir transmises en me racontant leur histoire,

Maria Nadal pour m'avoir fait traverser l'atlantique et m'avoir permis de découvrir la métrologie primaire,

Arnaud Richard, Guillaume Ged et Ana Rabal pour les joies, les colères, les doutes, les satisfactions, les interrogations qu'ils me donnent au quotidien et qui me font mûrir et progresser,

Bernard Rougié, Jeanne-Marie Coutin, Mohamed Sadli et Jean-Pierre Wallerand pour leur professionnalisme et leurs qualités de métrologue, qui inspirent et montrent le chemin

Annick Razet et Patrick Juncar pour leur confiance, patience et soutien dans mon travail d'enseignant,

Cécile Guianvarc'h, Stéphan Briaudeau, Mark Plimmer, Patrick Boutin pour naviguer sur le même navire pédagogique avec solidarité, même quand c'est dur,

Zaccari Silvestri, Frédéric Bourson, Laurent Pitre, Lara Risegari, Hugo Frédéric, Fernando Sparasci, Daniel Truong, Catherine Martin, Mai Valin, Fatima Tayeb, Thierry Deuzé pour les débats d'idées et les échanges scientifiques et culturels indispensables à la recherche,

Stéphane Aubert, Arnaud Richard et Joseph Bérénice pour leur soutien inconditionnel à mes failles organisationnelles,

Christine Andraud, Christine Fernandez-Maloigne et Peter Hanselaere pour avoir accepté de donner de leur temps pour rapporter sur ma candidature et pour la qualité de leurs rapports,

Peter Blattner et George Zissis pour leur participation à mon jury et leur enthousiasme communicatif,

La course à pied et la montagne pour leurs rôles de régulateurs de pression et de pourvoyeurs d'inspiration et de recul,

Les travaux relatés dans ce mémoire sur le maintien à niveau des références nationales de photométrie n'existeraient pas sans les mesures radiométriques réalisées par Jeanne-Marie Coutin sur le radiomètre cryogénique et par Fatima Tayeb-Chandoul sur la sensibilité spectrale relative.

Les travaux relatés dans ce mémoire sur l'établissement et le maintien à niveau des références nationales de spectrophotométrie en transmission et en réflexion n'existeraient pas sans la participation d'Arnaud Richard pour le facteur de transmission et de Guillaume Ged et Ana Rabal pour la BRDF.

1. Introduction

1.1. Qu'est-ce que l'apparence ?

L'apparence d'un objet peut être définie par l'aspect de l'expérience visuelle qui fait que cet objet est reconnu [1]. Lorsqu'un observateur regarde un objet, il reçoit des photons qui proviennent de toute la scène qu'il a devant les yeux. Ces photons sont captés par la rétine et convertis en impulsions électriques, qui sont à leur tour filtrées et transmises par le système visuel jusqu'au cerveau. Grâce à son expérience visuelle et cognitive, un observateur est capable de transformer et d'organiser cette quantité faramineuse d'informations en une perception complexe, dans laquelle les sources lumineuses, les ombres et les objets sont discriminés et reconnus. La scène que l'observateur a devant les yeux vient d'apparaître.

Imaginons maintenant que notre observateur décide de s'intéresser aux objets de la scène. Au-delà de leur forme, il identifie des indices qui lui permettent d'identifier ces objets. Ces indices sont appelés les attributs d'apparence visuelle. Ils sont dénommés par la Commission Internationale de l'éclairage (CIE), dans sa définition de l'apparence d'un objet [2]. Il s'agit de *la couleur, la texture, le brillant, la transparence*.

Les attributs d'apparence visuelle ont un rôle important pour l'observateur. Ils lui permettent d'aller plus loin dans son analyse visuelle. De quelle essence est fait ce meuble ? Ce fruit est-il mûr ? Cette valise est-elle en cuir ? Ce verre est-il propre ? Avant même de toucher ou de sentir, alors qu'il est encore à distance, l'observateur étudie la couleur, la texture, le brillant et la translucidité et à l'issue de cette analyse, il se forge une idée sur l'objet, qu'il utilise ensuite pour définir ses actions et ses opinions. Ce meuble est en chêne et doit être solide. Ce fruit est mûr, je peux le manger. Cette valise est en cuir et semble de bonne qualité. Ce verre est propre, je peux l'utiliser sans risque pour ma santé.

Ainsi, les attributs de l'apparence sont impliqués dans l'identification de l'objet et surtout, ils participent à l'élaboration de nos critères de choix, qu'ils soient alimentaires, hygiéniques, fonctionnels ou esthétiques.

D'un point de vue académique, l'étude de la manière dont le système visuel, particulièrement dans le cas de l'humain, extrait du signal optique renvoyé par l'objet des informations sur sa couleur, son brillant, sa texture et sa transparence est une activité de recherche très dynamique aujourd'hui. Ces études permettent avant tout de progresser sur la connaissance du corps humain et de son cerveau avec toutes les applications thérapeutiques que l'on peut imaginer. Elles peuvent également trouver une application très rapide, notamment dans le domaine de la vision informatique, de l'imagerie numérique ou de la réalité virtuelle.

D'un point de vue industriel, les attributs de l'apparence visuelle sont très importants. D'une part, ils renseignent le fabricant sur la qualité et la stabilité de sa production. Il n'est pas prétentieux de dire que le capteur visuel est le premier capteur de l'histoire de l'industrie, voir de l'humanité. Il renseigne le forgeron sur la température de son acier, l'agriculteur sur le mûrissement de ses céréales, le fondeur sur la régularité de son tissu, le boulanger sur la cuisson de son pain. Mais d'autre part, et comme nous l'avons précisé plus tôt, l'apparence visuelle a un lien direct avec la notion d'esthétique et de qualité. Elle participe aux critères de choix du client et est directement liée à la vente et à la prospérité de l'entreprise.

Pour toutes ces raisons, il est essentiel pour l'industriel de contrôler l'apparence visuelle des objets manufacturés. Pour contrôler, il faut savoir mesurer.

On peut mesurer en utilisant un œil humain. On parle alors d'expertise visuelle. Le capteur visuel a été le seul capteur existant jusqu'à la fin du XXe siècle. Sa sensibilité est excellente, tout comme sa dynamique. Mais c'est un piètre capteur absolu et sa stabilité dans le temps laisse à désirer. Il présente également l'inconvénient de tomber parfois malade, ou de changer d'entreprise du jour au lendemain. Son expédition est très coûteuse.

Pour ces raisons, que je ne fais que survoler ici, à l'orée du XXe siècle, poussé par la révolution industrielle, il est devenu nécessaire de développer des capteurs et des techniques qui permettent de mesurer l'apparence des objets. *La métrologie de l'apparence*, la science qui étudie les moyens et méthodes pour la mesure de l'apparence est née

1.2. La métrologie de l'apparence

Le besoin de quantifier l'apparence étant établi, il faut maintenant faire la mesure.

On comprend immédiatement que la tâche n'est pas aisée car l'apparence est une propriété subjective, qui naît dans la tête de l'observateur. La métrologie de l'apparence se heurte donc immédiatement à deux problèmes :

1. Le mesurande n'est pas clairement défini
2. Le mesurande n'est pas accessible directement à la mesure.

Ces problèmes ne sont pourtant pas insurmontables. Tout d'abord, l'apparence n'est pas si subjective qu'elle en a l'air. Par exemple, si l'on présente une série de 16 pions de couleur différente à un observateur et qu'on lui demande de les classer dans un ordre logique de couleur, il y parvient sans difficulté. En moins de 60 secondes, il classe les pions (Figure 1). La même tâche demandée à un autre observateur renverra le même classement (hormis dans le cas des daltoniens). Ainsi, la perception de la couleur n'est pas subjective. Elle suit une logique, une échelle.



Figure 1. Illustration de l'aspect quantitatif de l'apparence au travers de l'exemple de la couleur. En haut, les 16 pions sont présentés dans un ordre aléatoire. L'observateur les reclasse facilement dans un ordre logique qui correspond à une échelle.

La même expérience réalisée avec des échantillons présentant différents niveaux de brillant, ou de texture, ou de transparence donnera également un classement répétable par les observateurs. L'apparence est donc quantifiable et le rôle du métrologue de l'apparence, dans ce contexte, est de mettre en place des indices qui s'appuient sur les propriétés optiques des objets et qui permettent de retrouver le classement des observateurs

Le deuxième problème est que l'apparence n'est pas directement accessible à la mesure car elle née dans la tête de l'observateur. Cette situation est aujourd'hui en train de changer avec les progrès de l'IRM fonctionnelle qui ouvrira probablement, dans un futur proche, de nouveaux moyens de mesure pour les métrologues de l'apparence. Cependant, oublions cela pour l'instant pour nous concentrer sur les méthodes éprouvées.

Le mesurande est inaccessible directement à la mesure. Seul le stimulus, i.e. l'objet dont on cherche à mesurer l'apparence, peut être exposé aux mesures physiques. La quantification de l'apparence doit se faire en trois étapes. Il convient d'abord d'acquérir la sensation de l'observateur (étape 1). C'est le rôle de la psychophysique. Il faut soumettre l'objet à des mesures radiométriques pertinentes, qui sont en rapport avec l'apparence de celui-ci (étape 2). C'est le rôle de la spectrophotométrie. Enfin, il faut établir des corrélations entre la sensation de l'observateur et les mesures radiométriques, afin de développer des modèles métrologiques de perception et des indicateurs (étape 3). C'est le rôle de la métrologie. L'ensemble de cette démarche est résumé sur la Figure 2.

Donc tout n'est pas perdu. La méthode existe. Cependant, elle est difficile à mettre en place comme un tout. Si l'observateur a trouvé facilement un classement logique pour les pions de la Figure 1, c'est parce que ces pions présentaient des différences d'apparence restreintes à leur couleur. Mais prenons 4 objets distincts, comme par exemple, une pomme, une clef à molette, un torchon et un violon. Si je demande à l'observateur de les classer en fonction de leur différence d'apparence il ne pourra vraisemblablement pas répondre. En revanche, si je lui demande de les classer en fonction de leur niveau de brillant, il le fera sans difficulté.

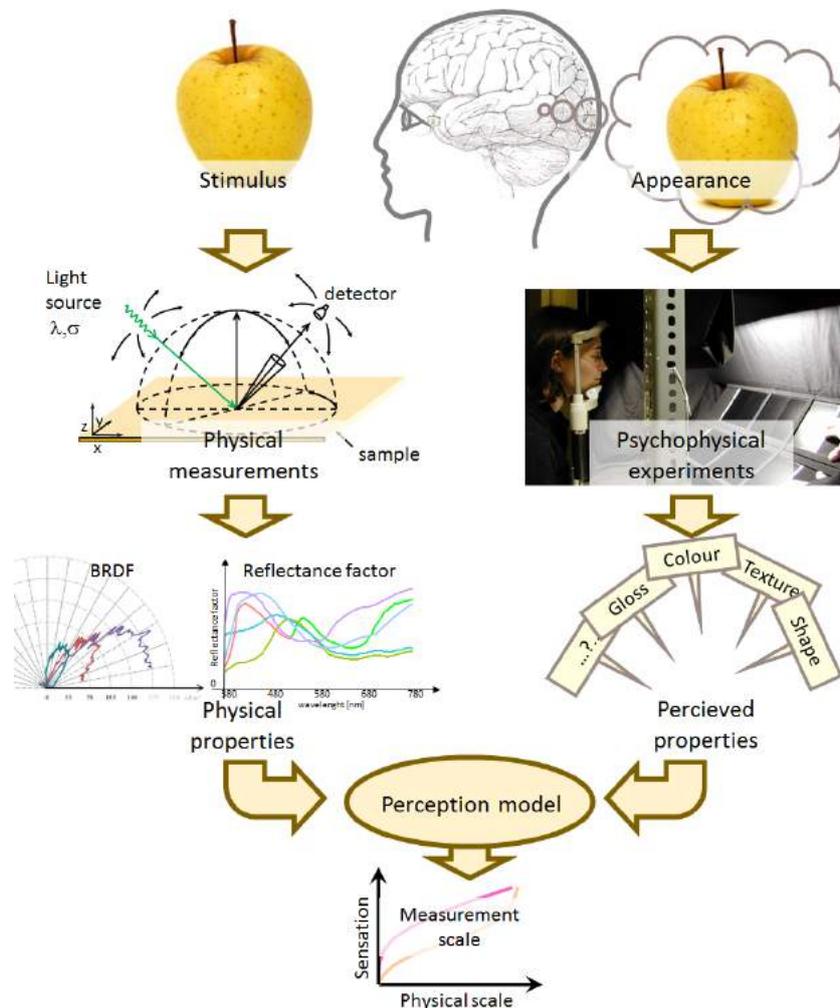


Figure 2. Construction d'un modèle de perception permettant de mettre en relation une sensation et une mesure physique.

Ainsi, il ne semble pas possible de mesurer l'apparence comme un tout car le mesurande est trop complexe pour être acquis par les méthodes psychophysiques. En revanche, il est possible de décomposer le problème en sous-parties, qui vont être chacune reliées à un attribut de l'apparence. Face à un objet, je peux mesurer sa couleur, son brillant, sa translucidité et sa texture et créer un groupe de données, qui, mises ensemble, caractérisent l'apparence totale de l'objet. C'est la démarche adoptée par le métrologue de l'apparence.

1.3. Les attributs de l'apparence

Le premier attribut à avoir été étudié est la couleur. Dès le début du XXe siècle, des protocoles de mesure sont mis en place et la correspondance entre le spectre de réflectance et les coordonnées colorimétriques est normalisée par la CIE. Nous sommes en 1931. La colorimétrie est née et grâce à elle, des spectrophotomètres, des colorimètres, des modèles perceptifs, des espaces de représentation, des seuils de discrimination, des équations de formulation et tout un tas d'outils et d'indicateurs vont voir le jour. La colorimétrie est aujourd'hui une science bien établie. Elle permet de mesurer la couleur et aide les industriels à décrire, reproduire ou surveiller leurs produits. Les normes sont en place et elles sont efficaces. C'est l'arrivée sur le marché de peintures iridescentes ou goniochromatiques qui a un peu chamboulé les choses ces 15 dernières années. Face à ces effets, naturels dans le cas des papillons morphos, ou synthétiques dans le cas des peintures à effets, la colorimétrie classique montre ses limites. Il est nécessaire de mettre en place une colorimétrie bidirectionnelle. La quantité radiométrique pertinente n'est plus le facteur de réflexion mais la BRDF, acronyme anglais de fonction de distribution bidirectionnelle du coefficient de luminance. La BRDF se mesure avec un goniospectrophotomètre. D'énormes efforts et progrès ont été faits dans ce domaine et la caractérisation des surfaces goniochromatiques est entre de bonnes mains [3][4]. Une partie de mon

activité de recherche, notamment au travers de la conception et construction d'un goniospectrophotomètre primaire pour la métrologie française, s'est inscrite dans cette thématique entre 2007 et 2012. J'y reviendrai dans ce manuscrit.

La colorimétrie est un très beau succès pour le métrologue de l'apparence. Malheureusement, elle est le seul vrai succès. Les autres attributs n'ont pas bénéficié de la même attention scientifique et leur métrologie a été reléguée loin derrière la colorimétrie, voire même n'a pas réellement débuté.

C'est le cas de la translucidité. La translucidité est la capacité qu'a un objet à laisser passer la lumière, sans permettre toutefois de distinguer nettement le contour de l'objet placé derrière. D'un point de vue graduel, on pourrait dire que la translucidité va de l'opacité à la transparence [2]. C'est un attribut visuel important dans l'alimentaire, dans les cosmétiques, dans la minéralogie. Pourtant, il n'existe aujourd'hui aucun instrument de mesure de la translucidité, hormis quelques bricolages basés sur des spectrophotomètres montés en configuration de mesure du facteur de transmission. Donc aujourd'hui, tout se fait encore à l'œil pour l'évaluation de la translucidité. Comme pour la couleur en 1900 ! Ce retard s'explique. Monopolisation des ressources sur la colorimétrie d'une part, manque de besoin industriel identifié d'autre part, et enfin manque de savoir-faire technologique.

Aujourd'hui les choses changent. La colorimétrie est un succès (presque) achevé, et de nombreuses équipes de recherches se déploient sur les autres attributs visuels délaissés jusque-là, dont la translucidité fait partie. Le besoin industriel émerge, notamment avec l'arrivée des LED, ces toutes petites sources qui peuvent de loger n'importe où, comme derrière des verres dépolis pour donner de beaux effets lumineux de corps. Enfin, le savoir-faire technologique est là. La quantité radiométrique pertinente pour mesurer la translucidité est la BSSRDF, quantité introduite en 1977 par Nicodemus [5] et que l'on pourrait traduire par Fonction de la distribution bidirectionnelle de la diffusion de la subsurface. La BSSRDF est une fonction de 8 paramètres (4 angles, 1 longueur d'onde, 1 polarisation, 2 translations). Elle est très difficile d'accès d'un point de vue instrumental. Cependant, les progrès récents enregistrés dans le domaine de la goniospectrophotométrie permettent aujourd'hui d'envisager de faire des mesures de BSSRDF avec le niveau métrologique requis pour l'établissement de références. Les étoiles semblent en train de s'aligner pour la mesure de la translucidité. Je souhaite participer à ce chantier. Je reviendrai sur ce sujet lorsque j'aborderai mon programme de recherche.

La texture est sûrement l'attribut le plus difficile à mesurer. En effet, si le concept de texture est intuitivement évident pour un observateur, il est très difficile à définir. L'ASTM en donne la définition suivante, qui me semble assez floue : « La texture est la structure visible de la surface qui dépend de la taille et de l'organisation de petites parties la constituant, typiquement, la surface d'un textile laineux ». La mesure de la texture avance de façon non régulière. Les progrès réalisés par l'imagerie numérique, notamment dans le domaine des caméras à très hautes dynamiques permettent aujourd'hui de réaliser des poussées, mais souvent uniquement pour une application particulière. Ainsi, l'étude des rayures sur surfaces métalliques a fait de très beaux progrès ces dernières années, supportée activement par le secteur de la manufacture des objets métalliques, de type aluminium brossé, ou miroirs polis. Même histoire pour ce qui concerne la mesure du « Sparkle », cet effet scintillant que l'on retrouve aujourd'hui sur plus de 80% des peintures automobiles produites dans le monde [7]. Mais malheureusement, il n'existe pas de coordination dans ces efforts. La texture est un sujet très vaste qui me semble encore immature. Je ne pense pas travailler dessus dans les années à venir.

Le brillant, tout comme la texture et la translucidité, a été très peu étudié avant les années 2000. En témoigne le fait que les études psychophysiques sont quasiment absentes lors du XXe siècle hormis Judd et Hunter en 1939 [8], Harrison et Poulter en 1951 [9] et Billmeyer et O'Donnell en 1987 [10]. En revanche, le brillant jouit d'un grand intérêt scientifique et métrologique depuis 20 ans. Ce regain d'attention provient du feu croisé de deux besoins. Le besoin industriel d'une part, car le brillant, et plus particulièrement le contrôle du niveau de brillant d'un objet, est évalué par le client et lui fournit des informations sur la beauté, la qualité et la finition de l'objet qui peuvent être décisives en termes d'acceptabilité ou de prise de décision d'achat [11]. Le besoin académique d'autre part, car le brillant n'est pas uniquement un attribut décoratif des objets qui nous entourent. Le brillant est confiné dans une région très locale de l'espace, que l'on appelle la région spéculaire. Cette région est directement liée à la planéité de la surface et à la position des sources lumineuses. Ainsi, de manière quasi directe, l'observation du brillant renseigne le passant sur la position et l'étendue des sources qui l'entourent [12], sur la courbure des objets [13]. Par extension, certains chercheurs (dont je fais partie) pensent que le brillant est fortement impliqué dans la compréhension et la cohérence des scènes qui nous entourent. Le monde de la réalité virtuelle a pleine conscience de ce point, et s'est en grande partie amélioré en travaillant sur la qualité de rendu du brillant des objets simulés [14].

J'ai débuté ma thèse en 1999 sur la caractérisation optique et visuelle du brillant. J'ai donc eu la chance de participer à cet élan collectif sur sa mesure, qui a démarré à peu près à la même époque. La métrologie du brillant m'a occupé, m'occupe et m'occupera. Une longue partie de ce manuscrit est consacrée à relater les travaux que j'ai réalisés ou encadrés sur cette thématique. Je reviendrai également sur mes projets dans le domaine de la mesure du brillant dans la partie consacrée à mon programme de recherche.

J'ai dit qu'il n'est pas possible de mesurer l'apparence comme un tout, et qu'il est nécessaire de décomposer cette étude en mesures indépendantes des quatre attributs de l'apparence. Ceci est la bonne démarche. En revanche, ce n'est pas parce que l'on a acquis la mesure des quatre attributs que l'on a acquis l'apparence totale de l'objet. Le brillant influence sur la couleur. A teinte égale, une surface vernie apparaît plus saturée qu'une surface mate. La clarté influence sur le brillant. A spéculaire égale, une surface blanche apparaît moins brillante qu'une surface noire. La texture influence sur la couleur. Ainsi, l'étape ultime de la métrologie de l'apparence sera, une fois les attributs maîtrisés, d'établir les corrélations entre ces attributs, pour s'approcher de la mesure de l'apparence totale. La route est longue sur ce chemin. Cependant, l'étude des interactions couleur brillant est aujourd'hui à portée de main, et je pense que mon équipe a sa place pour traiter ce sujet dans les années à venir.

1.4. Plan du manuscrit

Voilà donc décrite en quelques pages ma thématique de recherche. Je suis métrologue de l'apparence. Mon travail consiste à :

- mettre en œuvre des techniques de mesure de quantités radiométriques ou spectrophotométriques en rapport avec les attributs visuels de l'apparence que sont la couleur, le brillant, la translucidité et la texture.
- acquérir, via les techniques de la psychophysique la sensation visuelle d'observateurs humains face à des échantillons et à créer des échelles de perception.
- rechercher des corrélations entre la sensation visuelle et les mesures radiométriques pour créer des modèles de perception ou des indicateurs qui peuvent aider les industriels à caractériser ou contrôler l'apparence des objets qu'ils fabriquent.

Mon parcours est simple et linéaire. J'ai été formé à la mesure de l'apparence au travers de l'étude du brillant, au Muséum National d'Histoire Naturel, par Françoise Viénot, entre 1999 et 2003. Pour progresser dans le développement des outils de mesure adaptés à la mesure du brillant, j'ai développé entre 2004 et 2011 une expertise dans la mesure de la BRDF. Cette expertise a été initiée au NIST (US) sous la direction de Maria Nadal et complétée au CNAM au contact des experts nationaux en radiométrie et spectrophotométrie que sont Jean Bastie, Jeanne-Marie Coutin et Bernard Rougié. J'ai acquis la culture de la métrologie primaire au CNAM, en prenant la responsabilité de l'unité opérationnelle de photométrie et spectrophotométrie en 2007. L'implication dans la métrologie française m'a permis de lancer ma thématique de recherche et de constituer un « groupe » sur la métrologie de l'apparence la même année. J'ai pu ainsi construire le goniospectrophotomètre primaire et « ConDOR », un équipement de très haut niveau dédié à l'étude du brillant. Cet équipement et mon appartenance au laboratoire de métrologie national m'ont permis de rejoindre la communauté européenne des métrologues experts en spectrophotométrie au sein d'EURAMET et d'y proposer en 2011 un projet européen sur la métrologie de l'apparence dans le programme Européen EMRP. Ce projet de 36 mois, nommé xDReflect (Multidirectional Reflectometry for Industry), a regroupé 12 partenaires européens dont 8 instituts nationaux de métrologie. xDReflect m'a permis de coordonner l'effort européen autour de la métrologie de l'apparence et de placer mon équipe dans une position référente pour la question de la mesure du brillant. Aujourd'hui identifié au sein d'EURAMET comme le porteur de cette thématique, j'ai pu proposer et obtenir le financement d'un nouveau projet dans le programme EMPIR, nommé BiRD (Bidirectionnal Reflectance Definitions). BiRD courra de 2017 à 2020.

Les projets EMRP et EMPIR requièrent un lien étroit avec l'industrie. En tant que coordinateur d'xDReflect et BiRD, je suis en contact permanent depuis 2011 avec les principaux acteurs du domaine, qu'ils soient fabricants d'échantillons (Labsphere, BASF, MERCK, St Gobain), fabricants de spectrophotomètres (Konica Minolta, X-Rite, Byk-Gardner) ou concernés au premier plan par la problématique de l'apparence (Audi, Toyota, Apple, Munsckjo, Arjo-Wiggins, LVMH, Océ printers, Villemorin). Le dialogue avec les industriels d'un côté, avec les chercheurs européens de l'autre, me permet d'être force de proposition et me donne une vision claire (au moins à mon sens), des efforts à fournir en termes de recherche et développement pour la métrologie de l'apparence. Il s'agit d'une part de créer des outils et indicateurs rapidement utilisables par les industriels et de développer les concepts de mesure de demain.

Je me sens aujourd'hui responsable de mon équipe de recherche au sein du laboratoire, et en charge de la thématique au niveau de la communauté Européenne des métrologues travaillant sur ce sujet. J'estime aujourd'hui que ces prises de responsabilité me permettent de présenter mon habilitation à diriger les recherches devant mon école doctorale.

Je propose de développer dans ce manuscrit le travail que j'ai réalisé et que je compte réaliser sur la période 1999 – 2025. Ce manuscrit est découpé en 3 parties.

La première partie s'intitule « apprentissage ». Elle relate mes travaux de 1998 à 2007. Monsieur Bastie, qui fut le chercheur en charge de la mise en pratique et du maintien de la Candela de 1978 à 2005 disait qu'il faut 10 ans pour former un métrologue. Je n'ai pas brulé les étapes. Dans cette partie, je reviens sur mon travail de thèse, mon travail de chercheur invité au NIST, mon expérience d'ingénieur de recherche contractuel à l'institut national de métrologie et ma première année de maître de conférences au CNAM.

La seconde partie s'intitule « mise en œuvre ». Elle relate mes travaux de recherche de 2008 à 2017, mon activité au sein du laboratoire et au sein de la communauté internationale, qu'elle soit européenne (EURAMET) ou mondiale (CIE, CCPR). J'ai été formé par mes pères et ce que j'ai produit jusqu'à présent s'inscrit dans la continuité de mon apprentissage.

La troisième partie s'intitule « projets ». J'y développe les perspectives et ambitions que j'ai pour mon équipe pour les 7 ans à venir. Pourquoi 7 ans ? Car c'est la période qui m'apparaît claire dans l'objectif. Au-delà, ma vision est rendue floue par le haze [15].

2. Apprentissage (1998-2007)

Le chercheur est un apprenti permanent. C'est la science et les travaux expérimentaux qui l'éduquent tout au long de sa vie. Par apprentissage, je parle du temps où j'ai évolué sur l'aile de mes pères, de mes maîtres. Ils sont trois à s'être occupés de moi dans cette période. Françoise Viénot, qui fut ma directrice de thèse. Maria Nadal, qui m'a appris les mesures de spectrophotométrie au plus haut niveau. Jean Bastie, qui m'a initié à la métrologie primaire au sens large et m'a fait entrer dans le cercle relativement restreint des experts de la Division 2 de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) et au sein du Comité Consultatif pour la Radiométrie et la Photométrie (CCPR). Sous la bienveillance des 3 personnes, j'ai pu progresser pas à pas en sécurité, jusqu'à ce que je sois assez mûr pour prendre en main ma propre équipe et thématique.

Ce chapitre est donc divisé en 3 parties. La première relate la période où j'ai travaillé au Muséum National d'Histoire Naturelle au sein successivement de laboratoire de Photobiologie dirigé par le Professeur Santus et du Centre pour la Conservation et la Restauration des Documents Graphiques dirigé par le Professeur Lavédrine. La seconde relate la période où j'ai travaillé au National Institut of Standard and Technology à Gaithersburg (USA) au sein de la Division Optical Technology dirigée par le Dr Al Parr. La troisième concerne mon travail au sein de l'Institut National de Métrologie du Conservatoire National des Arts et Métiers dirigé par le Prof Himbert. Ces parties s'enchaînent après une courte introduction sur ma formation académique qui me semble utile pour qui veut comprendre mon parcours.

2.1. Une formation technique

Mon parcours universitaire débute à l'IUT de Mesures Physique de St Nazaire. Loin de moi à cette époque l'idée de penser que la mesure allait devenir ma vie. J'atterris là par le hasard des candidatures, mais je vais m'épanouir durant les 2 années de cette formation technique. L'IUT de St Nazaire est à l'époque un établissement récent très bien doté. Je reçois un enseignement de très bonne qualité et plus que cela, je pense que l'IUT m'a inculqué la culture de la mesure. Je ne suis pas prédisposé. Je subis durant le dernier semestre de la formation un programme qui contient 30h de travaux pratiques hebdomadaire. Un genre de bouquet final qui succède à 3 semestres déjà très chargés en TP. A ce régime tout fini par rentrer. J'ai été initié à toutes les techniques de mesure qu'elles soient mécaniques, optiques, spectrométriques, électroniques... Je reçois mon DUT en Juin 1994. Je suis, sans le savoir, armé d'un savoir-faire technique qui va m'être précieux toute ma carrière. Encore aujourd'hui, il m'arrive souvent de louer ces automatismes qui m'ont été inculqués à l'IUT par des enseignants compétents et motivés. Je pense également souvent à eux quand j'enseigne.

Ma mention me permet d'intégrer la licence de Physique Appliquée de l'université de Nantes. La passerelle existe mais je l'ai trouvée raide. Mes lacunes théoriques en mathématiques sont énormes. Je mets 2 ans pour acquérir la licence, au prix d'un effort scolaire que je n'ai jamais produit jusque-là. C'était le prix à payer pour être à flot au niveau théorique et pratique. La suite sera facile. J'évolue à l'université comme un poisson dans l'eau. C'est à cette époque que je décide d'y rester toute ma vie et prend la décision de devenir maître de conférences. Je me classe second de la Maîtrise de physique appliquée en 1997 et suis admis à intégrer le DEA de Laser, Métrologie et Télécommunications, codirigé par l'université de Paris 13 et le CNAM. Je piétine un an en 1998 à cause du service militaire et en 1999, je majore le DEA, ce qui m'ouvre la porte de la très prisée allocation MENRT du ministère de recherche. En Septembre 1999, je débute ma thèse au Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN), sous la direction du Dr Françoise Viénot, qui deviendra Professeur quelques années plus tard.

2.2. Le mésopique, initiation à la psychophysique

En Décembre 1998, je suis retenu par Françoise Viénot pour faire mon stage de DEA dans son équipe. Françoise Viénot est experte mondialement reconnue en vision des couleurs. A cette époque, elle réalise, en outre, un projet en collaboration avec EDF sur la dégradation de la vision dans le mésopique.

La première partie de l'étude, réalisée en 1997, avait consisté à créer un algorithme de traitement d'image qui permettait, partant d'une photo prise en ambiance photopique, de simuler son apparence colorée telle qu'elle serait perçue par un observateur pour un niveau mésopique. Le niveau était choisi par l'opérateur. En cas de succès, il aurait s'agit là d'un outil fort utile pour aider à la prise de décision du seuil de déclenchement de l'éclairage urbain. Le logiciel, développé par Sandra Domont s'appuyait

sur le modèle de Hunt. Ce modèle prend en compte 2 paramètres indépendants : la perte d'apparence colorée et la perte d'acuité.

Le réalisme des images ayant subi uniquement la dégradation d'apparence colorée (voir Figure 3), avait conduit l'équipe à penser que la simulation de la perte d'acuité était peut-être facultative. Mon travail a consisté à vérifier la validité de cette hypothèse, en confrontant les images simulées et la situation réelle.



Figure 3. Illustration de la dégradation d'une image dans le mésopique utilisant l'algorithme développé par S. Domont [16]. A gauche la photo d'origine qui présente une luminance moyenne de $20 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. A droite, la photo simulant la perte d'apparence colorée pour un niveau de $0.02 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$.

L'expérience a consisté à réaliser une égalisation supraliminaire de contraste entre 2 mires sinusoïdales de fréquence spatiale différente. En nous appuyant sur les travaux de Ginsburg [17] et de Hess [18], nous savions que le seuil d'égalisation de contraste apparent entre 2 mires est lié à l'écart fréquentiel et au niveau lumineux sous lequel sont réalisées les égalisations. Nous avons donc comparé, pour un niveau lumineux donné et pour le même écart fréquentiel, le seuil d'égalisation de contraste, dans des conditions mésopiques réelles et dans des conditions simulées.

Les conditions réelles étaient obtenues en plaçant des densités neutres devant les yeux de l'observateur. Afin que le dispositif soit étanche à la lumière parasite, j'avais utilisé un masque de plongée dont la vitre avait été modifiée pour accueillir les filtres. Les conditions simulées étaient obtenues en laissant l'observateur en environnement de bureau et en faisant tourner l'algorithme de Sandra Domont.

Les résultats ont montré que, pour un éclairage donné, l'observateur perçoit mieux les contrastes dans le contexte simulé que dans la réalité. Il apparaissait donc que notre hypothèse de départ était fautive et qu'il était essentiel d'ajouter, à la dégradation d'apparence colorée existante, un filtrage spatial passe-bas des images, qui simulerait la perte d'acuité liée à la baisse du niveau lumineux. J'ai pu présenter ces conclusions lors d'un congrès international organisé au NPL [19].

Ce stage m'a initié à la mesure psychophysique. L'affichage des mires contrastées était réalisé sur écran CRT. Il m'avait fallu étalonner l'écran et caractériser au photomètre le contraste réel des mires, qui était différent du contraste adressé du fait de la position entrelacée des luminophores rouges, verts et bleus. Il m'a fallu trouver des solutions pratiques pour simuler le mésopique. Il m'a fallu mettre en place l'expérience psychophysique et faire passer des observateurs. Je ne vais pas rentrer dans le détail, mais ce travail m'a ouvert les yeux. Initialement dubitatif sur cette étude « psycho quelque chose », qui ne m'augurait rien de bien sérieux, j'ai pris conscience, grâce à Françoise Viénot, qu'il est possible de mesurer la sensation. Cette mesure est indirecte et difficile d'accès. Elle requiert une grande rigueur instrumentale et statistique. Elle demande de l'inventivité, de la patience. Elle est au carrefour de l'optique, de la physiologie, de la psychologie, de la mesure instrumentale et du bricolage. Elle requiert également quelques qualités sociales lorsqu'il s'agit de maintenir l'observateur concentré pendant 30 mn. Et à la fin, elle produit des résultats de mesure, auxquels il est possible d'associer une incertitude, comme à n'importe quel instrument. Ces résultats permettent de prendre des décisions.

J'ai décidé de poursuivre dans cette voie et, mon allocation MENRT en poche, je suis revenu chez Françoise Viénot pour y faire ma thèse de doctorat.

2.3. Caractérisation optique et visuelle du brillant

Lorsque Françoise Viénot me propose de travailler sur la mesure du brillant, l'expertise sur cet attribut est nulle au laboratoire. Il va donc me falloir tout construire. La bibliographie est vite vue puisque très peu d'études psychophysiques du brillant ont été réalisées auparavant. Mon objectif n'est pas d'étudier le brillant comme attribut visuel et de comprendre les mécanismes de la perception du brillant. Je souhaite mettre en place une mesure du brillant, qui s'appuie sur une mesure des propriétés optiques de la surface, et qui corrèle avec la sensation visuelle. Pour cela, il m'aura fallu réunir un certain nombre d'ingrédients indispensables :

- Une échelle d'échantillons brillants.
- Une cabine d'observation
- Des observateurs naïfs
- Un appareil de mesure des propriétés optiques des surfaces
- Des logiciels de calculs et de modélisation.

S'il est facile de se procurer ou de fabriquer des échantillons colorés, il est nettement moins facile de se procurer des échantillons présentant différents niveaux de brillant. La seule échelle de brillant commerciale qui existe en 1999 est l'échelle NCS, qui comporte 6 niveaux allant du très mat au très brillant. Elle est déclinée en noir, gris et blanc. Nous nous apercevons rapidement avec Françoise Viénot que cette échelle est insuffisante pour mener à bien mon étude. Alain Chrisment, directeur de la société 3CConseil, s'intéresse à mon travail lance la production d'une nouvelle échelle de brillant à 10 niveaux qu'il met à ma disposition gratuitement. Sans Alain Chrisment, mon travail n'aurait pas pu se faire.

Nous n'avions pas de cabine d'observation pour le brillant. Je l'ai donc construite intégralement. C'est une cabine de 1 m³, dans laquelle une source lumineuse peut être déplacée en hauteur et en profondeur. Elle est équipée d'une mentonnière pour placer la tête de l'observateur au bon endroit. Cette cabine, construite en 2000, est encore utilisée aujourd'hui dans mon laboratoire au LNE, à Trappes, pour faire des expériences psychophysiques sur le brillant.

Pour cette étude, les observateurs naïfs ont été pris parmi les personnes travaillant au laboratoire ou y effectuant leur stage de master. Au total, mon étude portait sur 6 observateurs, dont 2 non-naïfs. C'est peu. C'est une faiblesse de ce travail. Néanmoins, j'ai encadré beaucoup plus tard (en 2016), la répétition de ce travail sur 29 observateurs.

La grandeur radiométrique pertinente pour étudier le brillant est la BRDF, qui se mesure avec un goniospectrophotomètre. En 1999, le laboratoire n'a pas les moyens de s'offrir ce type d'équipement, ni de le construire. Thierry Leroux, directeur de la société Eldim, s'intéresse à mon travail et va mettre à ma disposition des EZ-Contrast neufs en phase de qualification finale avant livraison. Ils permettent d'accéder à la BRDF de mes échantillons. Sans Thierry Leroux, mon travail n'aurait pas pu se faire. L'année suivant ma thèse, le laboratoire a pu s'acheter un EZ-Contrast grâce à un financement du Bureau National de Métrologie.

La BRDF est une grandeur à 6 dimensions, qui génère beaucoup de données. Le traitement des BRDF requiert de la puissance de calcul et des logiciels. Le laboratoire m'a mis à disposition ce matériel sans limitation.

Malgré tout cela, je ne vais pas aboutir à l'établissement d'une nouvelle mesure. Mais mon travail de doctorat va permettre de poser de solides jalons sur le chemin de la mise en place d'une mesure moderne du brillant. Aujourd'hui encore, il est régulièrement cité quand on parle de la mesure visuelle du brillant. Les pages suivantes relatent les principaux résultats obtenus.

2.3.1 Introduction

Le brillant naît d'une interaction entre un rayonnement lumineux, la surface d'un matériau et l'observateur. Il est localisé dans la direction spéculaire. En 1939, suite à ses travaux sur la mesure de l'apparence [15] et avec le soutien du National Institut of Standard (NBS), Hunter publie la norme ASTM D523 [20]. Cette norme définit la méthode de mesure de ce que nous appelons aujourd'hui le brillant spéculaire. Il s'agit d'exprimer, en pourcentage, le rapport du flux lumineux réfléchi dans la direction spéculaire par l'échantillon sur le flux lumineux réfléchi dans les mêmes conditions par un étalon. Cet étalon est un verre noir parfaitement poli, d'indice de réfraction à 589 nm égal à 1,567. La mesure n'est pas exprimée en % mais en « *gu* » (gloss units). La norme a connu quelques révisions qui n'ont pas changé son esprit originel. S'appuyant sur la D523, les fabricants de spectrophotomètres ont développé les glossmètres, ou brillancemètres, qui réalisent la mesure automatiquement. Aujourd'hui, ces appareils sont miniaturisés, portables et coûtent environ 5k€. Ils sont très employés dans l'industrie.

Cependant, de nombreux industriels travaillant dans le domaine des cosmétiques ou de l'automobile, se plaignent que la mesure des glossmètres ne corrèle qu'approximativement avec la sensation visuelle.

En 1984, dans la 4^{ième} édition du vocabulaire international de l'éclairage [21], la CIE retravaille la définition du brillant et en adopte une nouvelle, qui n'a plus été modifiée depuis :

brillant ; luisance (d'une surface)

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 sensation est placée au cœur de cette nouvelle définition. Dès lors, il est nécessaire de faire en sorte que toute mesure du brillant tienne compte de la sensation visuelle. Cela implique de mesurer la sensation visuelle de brillant, de rechercher les paramètres optiques saisis par l'observateur lorsqu'il évalue le brillant et de chercher des corrélations entre la sensation visuelle de brillant et la mesure optique.



Figure 4. Illustration de la définition de la CIE. L'objet est pris en photo dans les mêmes conditions sur 2 surfaces noires qui présentent un niveau de brillant différent. La surface de gauche apparaît plus brillante car les reflets de l'image superposés à la surface sont plus visibles.

2.3.2 Caractérisation visuelle du brillant

Six observateurs ont participé aux expériences psychophysiques visant à quantifier l'évolution de la sensation visuelle de brillant générée par l'échelle 3CConseil à 10 niveaux. Les observations ont été réalisées sous deux directions d'illumination (20° et 60°), en vision binoculaire et en vision monoculaire. Le protocole utilisé était une comparaison de paires associée à la technique de maximisation de la vraisemblance [22]. Ce protocole n'avait encore jamais été utilisé sur des surfaces brillantes. Il s'est montré très efficace pour établir les échelles de perceptions. Les principales conclusions de ce travail sont :

➤ Sur l'influence de la vision binoculaire

L'apport de la vision binoculaire dans la perception du brillant a été évoqué plusieurs fois dans la littérature. Bien qu'un point de vue ancien posait l'hypothèse que la disparité entre les 2 yeux serait à l'origine du brillant [23], force est de constater que nous sommes parfaitement capables d'apprécier le brillant d'une surface en fermant un œil. Les résultats de nos expériences montrent que le système visuel est plus performant pour juger les échantillons très brillants en vision binoculaire. Nous pensons que la disparité binoculaire n'entre en jeu dans la perception du brillant qu'à partir du moment où le sujet réussit à fusionner l'image de la source reflétée par la surface. Cette opération n'est possible qu'à partir d'un niveau de brillant élevé [24].

➤ Evolution de la sensation en fonction de la mesure de brillant spéculaire

Nos résultats montrent que la sensibilité au brillant n'évolue pas de manière linéaire avec la mesure de brillant spéculaire (Figure 5). Nous avons proposé de séparer ces échelles en 3 zones. La zone des échantillons mats, la zone des échantillons intermédiaires et la zone des échantillons brillants. Pour les échantillons mats, la sensibilité du système visuel est maximale. Elle est au plus faible dans la zone intermédiaire et augmente à nouveau lorsque les échantillons deviennent très brillants.

L'évolution de la sensibilité s'explique aisément si l'on considère les critères de jugement qu'utilisent les observateurs. Lorsque la surface est mate (pour une valeur de gloss inférieure à 20 gu), la réflexion spéculaire est quasiment absente. La surface apparaît uniformément grise et le sujet effectue un jugement de niveau de gris. Ce critère est simple et robuste. La sensibilité est élevée. Lorsque la surface est très brillante (pour une valeur de gloss supérieure à 60 gu), la réflexion spéculaire est forte. L'observateur n'accommode pas sur la surface, mais sur l'image de la source reflétée par la surface. Il évalue la déformation de cette image. On parle alors de DOI, pour Distinctness Of Image. Ce critère est

robuste. La sensibilité est élevée. Dans la zone intermédiaire, le reflet de la source est présent, mais n'est pas facile à accrocher. L'accommodation de l'observateur fluctue entre le reflet de la source et la surface. Lorsqu'un sujet est interrogé pour juger le brillant dans cette zone, son temps de réponse augmente, traduisant une hésitation. Les 2 critères précédents entrent en conflit. La sensibilité diminue.

Il s'agissait là des premières courbes présentant l'évolution de la sensation visuelle de brillant en fonction de la mesure de brillant spéculaire, réalisées sur échantillons réels depuis Billmeyer et O'Donnell en 1987 ! Le fait qu'elles aient été obtenues avec une comparaison de paires est important, car cette méthode permet non seulement de construire une véritable échelle perceptuelle, mais également d'évaluer l'incertitude de mesure sur les points de l'échelle. Avec ces courbes, la métrologie entre dans le domaine de la sensation visuelle de brillant pour la première fois. Depuis, plusieurs équipes ont réalisé des expériences similaires [25][26]. Elles ont obtenu des échelles de même forme.

Outre le fait que ces résultats permettent de progresser dans la compréhension des mécanismes d'évaluation du brillant, elles offrent aux industriels une possibilité de relier la mesure du brillancemètre à la sensation de brillant. Elles peuvent également permettre de piloter la fabrication d'une échelle de brillant uniforme, ce qui a été fait [27]. Cette dernière pourrait servir de nuancier de brillant très utile pour quantifier le niveau brillant d'un échantillon en accord avec la sensation visuelle.

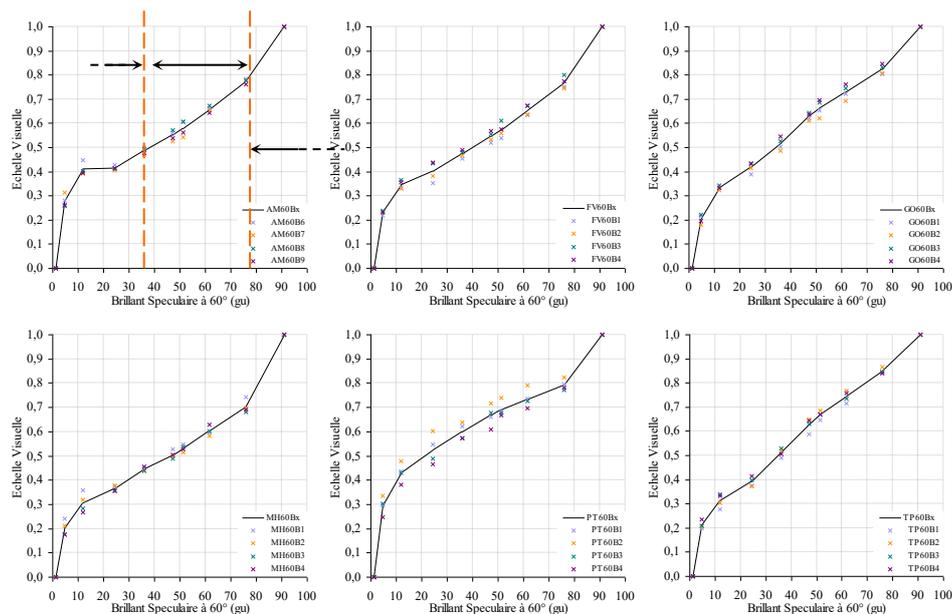


Figure 5. Evolution de la sensation de brillant pour 6 observateurs en fonction du brillant spéculaire (60°) : Valeurs obtenues en vision binoculaire, échantillons illuminés sous zénith de 60°. Les croix représentent les 4 répétitions, la courbe représente l'échelle calculée sur 840 comparaisons de paires.

2.3.3 Constance de brillant

D'après la relation de Fresnel, plus l'angle d'incidence de la lumière sur la surface est rasant, plus le flux réfléchi par la surface est important. Nous serions donc tentés de penser, à la vue de la corrélation entre la sensation de brillant et le glossmètre, que plus l'angle d'incidence de la lumière augmente, plus le brillant augmente. Ce raisonnement est correct si la scène est prise de manière isolée, hors contexte.

Mais l'étude de l'évolution de la sensation de brillant en fonction de l'angle d'illumination a montré que l'observateur n'est pas sensible à l'augmentation de flux liée à la direction d'illumination à partir du moment où l'échantillon est placé dans un contexte. Ce flux peut pourtant varier d'un facteur 5 en fonction de la configuration (Figure 6). Quelle que soit la configuration angulaire, l'observateur assigne toujours la même valeur de brillant à l'échantillon.

Il est notoire que le système visuel est capable de compenser les variations spectrales des sources lumineuses qui éclairent un objet tout au long d'une journée et de nous livrer une représentation stable des couleurs de notre environnement. Cette propriété s'appelle la constance de couleur. Le phénomène de constance de couleur est connu de longue date. Hermann von Helmholtz faisait déjà remarquer au XIX^{ème} siècle, que notre perception de la couleur se fait en défalquant l'éclairement [28]. De la même manière, nous avons démontré par nos travaux que l'observateur est capable de compenser les

variations de flux réfléchi par les surfaces en fonction de l'angle d'incidence et de retrouver le brillant intrinsèque de l'échantillon. Nous avons appelé cette propriété la constance de brillant [29]. La constance de brillant est désormais acceptée par la communauté scientifique. On la retrouve banalement mentionnée dans le titre d'articles [30]. Un grand nombre de travaux postérieurs à notre étude ont également démontré, souvent à juste titre, les limites de la constance de brillant. Je ne vais pas tous les citer ici car cela ferait gonfler inutilement la bibliographie. Le lecteur intéressé peut lire le paragraphe consacré à la constance de brillant dans la revue sur le brillant faite par Chadwick & Kentridge en 2015, qui est un bon point de départ bibliographique [31].

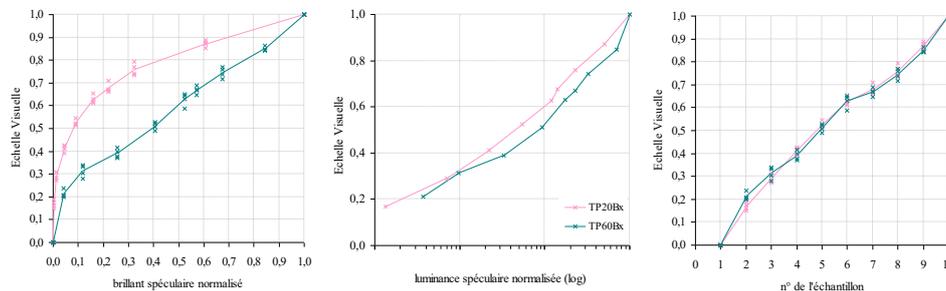


Figure 6. Echelles visuelles obtenues pour 1 observateur, lorsque les échantillons sont observés sous une illumination de 60° (vert) et 20° (rose). Abscisse de gauche : brillant spéculaire mesuré à 20° et 60° et normalisé. Abscisse du centre, luminance dans la direction spéculaire mesurée à 20° et 60° et normalisée. Abscisse de droite, numéro des échantillons.

2.3.4 Mesure et modélisation de la BRDF

Parallèlement aux études psychophysiques, nous avons recherché quels indices le système visuel exploite dans le signal lumineux qui lui parvient pour construire la sensation de brillant. Le point de départ de cette étude a été de regarder la démarche des observateurs lorsque nous leurs tendions deux échantillons noirs de même aire et de même forme, et que nous leur posions la question : « lequel de ces deux échantillons est-il le plus brillant ? »

Les gestes sont très répétables. Le sujet prend les échantillons et immédiatement se tourne vers la fenêtre ou vers la source d'éclairage. Il déplace les échantillons afin de positionner son regard dans la direction miroir, appelée direction spéculaire. Mais, lorsqu'il est dans cette direction, il n'immobilise pas les objets. Il continue de les déplacer, souvent par un mouvement circulaire autour de la direction spéculaire. Si l'échantillon est très volumineux, l'observateur se déplace lui-même autour de la surface pour réaliser la même opération.



Figure 7. : La démarche visuelle pour évaluer le brillant d'une surface est très répétable d'un sujet à l'autre. L'observateur va chercher la direction spéculaire, puis déplace son regard autour de celle-ci en basculant l'échantillon.

Pour se prononcer sur le brillant d'une surface, l'observateur a donc besoin d'évaluer la quantité de lumière réfléchi par la surface dans et autour la direction spéculaire. Si nous voulons trouver des indices objectifs en relation avec la sensation de brillant, il faut que nous fassions la même chose instrumentalement.

Dans ce cas, la quantité adaptée est la BRDF, quantité qui trace l'évolution du rapport entre la luminance et l'éclairement, pour une direction d'illumination, une direction d'observation, une longueur d'onde et une polarisation donnée. Il suffit de mesurer ce rapport luminance sur éclairement pour toutes les directions d'illumination et d'observation possibles et l'affaire est dans le sac, nous avons alors à notre disposition tous les éléments nécessaires à la compréhension du brillant.

De la théorie à la pratique, le passage n'est pas trivial. La BRDF se mesure avec un goniospectrophotomètre. C'est une mesure longue à acquérir et relativement complexe à mettre en œuvre. Lors de ma thèse, j'ai utilisé un équipement commercial particulièrement rapide grâce à son

design optique judicieux qui s'appuie sur l'association d'une optique de Fourier et l'utilisation d'une caméra CCD étalonnée [32]. Cet équipement s'appelle [EZ-Contrast](#). En 2000, l'EZ-Contrast a une résolution angulaire de 0,4°.

J'ai collecté la BRDF d'un grand nombre d'échantillons. Il y avait les échelles de brillant commerciales NCS, Munsell, 3CConseil. Il y avait également des morceaux de verre, du chocolat, du cuir, différents types de papiers recouverts de différents types d'encre. Toutes ces mesures ont été archivées et classées rigoureusement selon une nomenclature qui s'est avérée pertinente avec le temps et que j'utilise encore aujourd'hui.

A partir de ces mesures, je me suis attelé à caractériser la forme du pic spéculaire, qui est bien entendu la partie intéressante pour qui veut mesurer le brillant. Les données collectées étant bien trop nombreuses pour être utilisées directement (on parle ici d'environ deux millions de points de mesures par échantillon), la première étape de ce travail a consisté à modéliser les données. Pour y parvenir, j'ai utilisé le modèle de Cook-Torrance [33], modèle basé sur l'optique géométrique et sur l'hypothèse que la surface est constituée de microfacettes de surface identique, mais dont l'inclinaison varie. L'inclinaison des facettes est décrite par l'angle α , angle qui définit l'écart entre la normale à la surface, et la normale à la facette, dans le cas restreint d'une surface isotrope. Le modèle considère que α peut être considéré comme une variable aléatoire, dont la densité de probabilité est décrite par la fonction $P(\alpha)$. A partir de là, la luminance de la surface dans une direction donnée, et pour une direction d'illumination donnée, peut être modélisée par l'équation suivante :

$$L(\psi, \theta, \varphi) = q_{\text{diff}} \cdot \rho_d \cdot \frac{E_0}{\pi} \cdot \cos \psi + q_{\text{spec}} \frac{E_0}{\omega} \frac{\cos \alpha \cdot \cos \psi'}{\cos \theta} F(n, \psi') \cdot G(\psi, \theta, \alpha, \psi') \cdot P(\alpha)$$

Avec

ψ ,	zenith de la direction d'illumination
θ ,	zenith de la direction d'observation
φ ,	azimut de la direction d'observation
α ,	angle entre la facette et la normale à la surface (α est déduit de ψ , θ et φ)
ψ' ,	angle entre la direction d'illumination et la normale à la facette (ψ' est déduit de ψ , θ et φ)
n ,	indice de réfraction de la surface
q_{diff} ,	proportion de surface se comportant comme un réflecteur diffus
q_{spec} ,	proportion de surface se comportant comme un réflecteur spéculaire
ρ_d ,	proportion de lumière réfléchi par les pigments dans le demi-espace
E_0 ,	éclairage dans la direction normale à la surface
ω ,	angle solide de la détection
$F(n, \psi')$,	facteur de Fresnel
$G(\psi, \theta, \alpha, \psi')$,	facteur de masquage ombrage
$P(\alpha)$,	densité de probabilité d'apparition d'une facette d'inclinaison α

Dans cette grande équation, ψ , θ , φ , α , ψ' , E_0 , ω , $F(n, \psi')$ et $G(\psi, \theta, \alpha, \psi')$ sont connus.

L'étude étant restreinte aux échantillons noirs, q_{diff} et ρ_d sont nuls.

Il reste donc à déterminer n , q_{spec} et $P(\alpha)$.

Il existe dans la littérature un grand nombre de propositions pour déterminer ou assigner une valeur à ces inconnues afin de modéliser ou synthétiser des BRDF. Ma proposition tiendra son originalité du fait que je vais proposer de déduire ces variables à partir des mesures.

En effet, grâce à l'EZ-Contrast, je dispose de la valeur de la luminance pour un très grand nombre de directions d'observation et d'illumination. Je dispose également de l'éclaircissement. Je peux donc inverser le modèle pour des millions de directions et déduire statistiquement des valeurs pour n , q_{spec} et $P(\alpha)$

Cette approche a produit des résultats qui étaient en accord avec les mesures (Figure 8). Ceci n'est pas surprenant puisque les paramètres avaient été déduits des mêmes mesures. Le gros intérêt résidait dans le fait que l'information sur la BRDF de l'échantillon était réduite à 2 constantes, n , q_{spec} et à une fonction $P(\alpha)$.

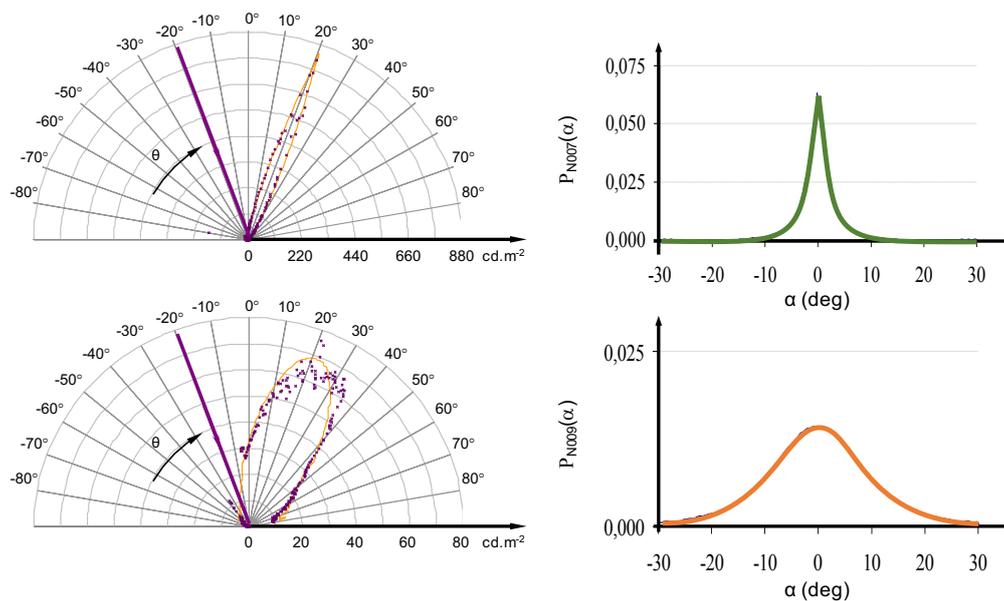


Figure 8. Exemple de reconstruction de la BRDF dans le plan d'incidence. En haut, échantillon présentant un niveau de brillant moyen (24 gu), en bas, échantillon mat (4,9 gu). A gauche, la BRDF a été reconstruite dans le plan d'incidence, pour une direction d'illumination de 20°. (trait = modèle, croix = mesures). A droite, la distribution de probabilité des normales des microfacettes pour chaque échantillon. α représente l'angle entre la normale à la surface et la normale à la microfacette.

Nous avons noté que la forme de la fonction $P(\alpha)$ variait de manière importante d'un échantillon à l'autre. Elle approche une forme Gaussienne pour les échantillons mats, et Lorentzienne pour les surfaces non mates. A l'issue de cette opération de modélisation, nous disposons donc de deux constantes et d'une fonction par échantillon. Ces paramètres peuvent être considérés comme la « signature » de la surface puisque à eux seuls, ils permettent de reconstruire l'intégralité de la BRDF de cette surface. Ce travail a fait l'objet de communications orales dans plusieurs congrès internationaux [34][35][36].

2.3.5 Bilan

Ce travail a apporté des éléments importants, nécessaires et préalables à la mise en œuvre d'une nouvelle mesure du brillant, qui corrèlera de manière plus précise que le brillant spéculaire à la sensation visuelle de brillant.

- La vision binoculaire accentue la discrimination du brillant sur les surfaces les plus brillantes mais n'a pas d'effet sur le jugement des surfaces mates,
- Le système visuel construit une sensation de brillant qui est indépendante de la direction d'illumination,
- La sensation de brillant s'appuie sur des paramètres intrinsèques à la surface que le système visuel extrait du pic spéculaire. Il s'agit vraisemblablement plus de la forme du pic que de sa taille.
- Il est possible de modéliser la BRDF de surfaces brillantes en utilisant un modèle de microfacettes dont la répartition de normales suit une loi Gaussienne pour les surfaces mates ou Lorentzienne pour les surfaces brillantes

A l'issue de ce travail, je suis convaincu que l'observateur extrait la sensation de brillant non pas du flux réfléchi dans la direction spéculaire, mais de la forme du pic spéculaire. J'irai même plus loin en disant qu'il extrait de cette forme d'autres informations qui lui permettent de diagnostiquer le type de matériau qu'il a sous les yeux. Nous ferons d'ailleurs une ultime expérience avec Françoise Viénot avant mon départ du laboratoire, qui achèvera de me convaincre [37].

Mais pour acquérir la forme du pic spéculaire, il faudrait disposer d'un goniospectrophotomètre ayant une résolution angulaire petite devant la largeur du pic. Or un pic spéculaire, pour des surfaces brillantes, présente une largeur à mi-hauteur de l'ordre de un ou deux degrés. En 2004, il n'existe pas de goniospectrophotomètre ayant une résolution angulaire inférieure à 0,4° qui permettrait d'étudier la forme des pics. La construction d'un équipement permettant d'accéder à cette information est une composante du projet de recherche que j'ai présenté aux concours de recrutement de maître de conférences en 2004 et 2005.

Au-delà des thématiques de recherche que m'a ouvert ce travail, j'ai appris durant cette période à maîtriser la spectrophotométrie et les méthodes de mesure psychophysiques. J'ai appris la rigueur scientifique, le doute, la persévérance, sous l'œil bienveillant de ma directrice. Je pense que je suis sorti du laboratoire formé à la recherche.

2.4. Caractérisation d'un goniospectrophotomètre primaire

2.4.1 Contexte

En décembre 2004, je rejoins la division « Optical Thermometry and Spectral Methods », au National Institut of Standards and Technology (NIST), à Gaithersburg (USA, Maryland). Le NIST est l'institut national de métrologie pour les USA. J'intègre l'équipe « Color and appearance » dirigée par Maria Nadal, en tant que Guest researcher.

Maria Nadal est en charge du maintien et la dissémination des références nationales pour la mesure des facteurs de réflexion (réguliers et diffus), ainsi que pour les mesures de brillant spéculaire. Elle est à cette époque une personne de référence dans le domaine de la métrologie du brillant grâce à ses travaux sur le glossmètre primaire du NIST [38]. En 2001, le NIST a initié un projet pour développer un nouveau goniospectrophotomètre. L'objectif est de répondre au besoin de l'industrie automobile, qui se lance à cette époque dans le développement de peintures à effets goniochromatiques. Ce nouvel équipement doit réaliser des mesures de facteur de réflexion régulier, pour n'importe quelle direction d'illumination et d'observation. Il viendra compléter l'équipement existant nommé STARR [39], qui est limité aux mesures dans le plan d'incidence. Il devra avoir une incertitude au moins égale à STARR. Le chef de projet est Ted Early. Il quitte le NIST en septembre 2004. C'est sur son poste que je suis recruté.

2.4.2 Travail réalisé

Lorsque j'arrive, l'équipement est assemblé. Tous les composants sont présents. Il ne reste plus qu'à le mettre en route et à évaluer ses performances.

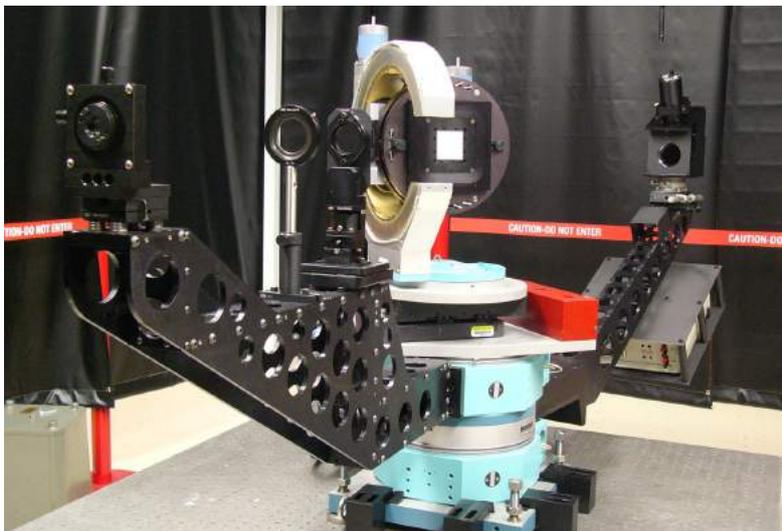


Figure 9. Photo du goniospectrophotomètre 5 axes lors de mon arrivée au NIST. L'équipement est assemblé. Il faut le mettre en œuvre, caractériser ses performances et compiler le budget d'incertitude.

Je travaille en binôme avec Robert Bousquet, informaticien qui n'a aucune formation en optique et en métrologie. Dans la salle, je suis le métrologue et l'opticien, il est la personne qui implémente les programmes de pilotage et d'acquisition. Je dispose de beaucoup de matériel opto-mécanique, de beaucoup d'autonomie et d'une grande confiance de la part de Maria Nadal.

Lorsque je quitte le NIST, 12 mois plus tard, nous avons réalisé le contrat. L'équipement est opérationnel, son budget d'incertitude est complet et nous avons comparé ses performances avec STARR.

Il a fallu mettre en place toute la procédure d'alignement. Aligner un goniospectrophotomètre de ce niveau, c'est garantir que les composantes tournent autour d'un point contenu dans une sphère dont le diamètre est inférieur au $1/10^{\circ}$ de millimètre. C'est s'assurer que tous les faisceaux sont contenus dans

un plan horizontal, avec une incertitude sur l'angle d'horizontalité inférieure à 0,01°. Je n'étais pas formé à la technique d'alignement. Au prix de jours et de nuit passées sur cette machine, j'ai réussi à maîtriser les alignements, mon faisceau est devenu de plus en plus beau, les résultats de plus en plus cohérents avec STARR.

Il a fallu étalonner le monochromateur. Il s'agissait d'un monochromateur double optimisé pour travailler entre 360 nm et 780 nm, ayant une largeur de bande de 0.5 nm. Je n'avais jamais étalonné de monochromateur.

Il a fallu ajuster les paramètres de la détection synchrone et caractériser sa linéarité.

Il m'a fallu établir les équations de passage entre les angles des quatre platines de rotation de la machine (nommées α , β , γ et δ) et les zéniths et azimuts d'illumination (θ , φ) et d'observation (θ_R , φ_R). Cela peut paraître simple, mais ça ne l'est pas. On trouve

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\cos\theta_R - \cos\theta_I \cos\delta}{\cos\theta_I \sin\delta}\right) \quad (3)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{-\sin\theta_I \sin\theta_R \sin(\varphi_R - \varphi_I)}{\sin\delta}\right) \quad (4)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\sin\theta_I \cos\theta_R \sin\varphi_I - \sin\theta_R \cos\theta_I \sin\varphi_R}{\sin\theta_R \cos\theta_I \cos\varphi_R - \sin\theta_I \cos\theta_R \cos\varphi_I}\right) \quad (5)$$

$$\delta = \arccos(\sin\theta_I \sin\theta_R \cos(\varphi_R - \varphi_I) + \cos\theta_I \cos\theta_R) \quad (6)$$

Il a fallu enfin établir toutes les corrections liées à l'utilisation de faisceaux étendus, là où la BRDF est définie pour des faisceaux infinitésimaux. L'utilisation d'un faisceau d'illumination de section rectangulaire et d'une détection d'ouverture circulaire rendait le calcul de l'étendue géométrique particulièrement complexe, tout comme le calcul de l'incertitude sur l'étendue géométrique. Tous les résultats sont relatés dans un article qui a été beaucoup lu, et ils sont utilisés par la communauté [40].

A l'issue de ces efforts, le nouveau goniospectrophotomètre 5 axes du NIST est validé, avec une incertitude type relative de 0,2% pour des angles inférieurs à 60°, ce qui le place à cette époque parmi les 3 meilleurs équipements au monde, avec STARR et le gonio développé à la PTB par Andreas Höpe [41].

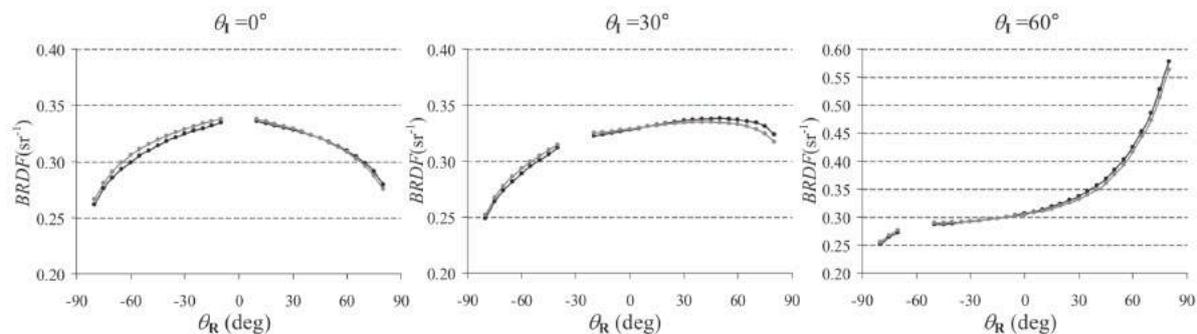


Figure 10. Comparaison de mesures de BRDF réalisées sur un spectralon® entre STARR (en noir) et le goniospectrophotomètre 5 axes (en gris), pour $\lambda = 550$ nm, dans le plan d'incidences, pour 3 directions d'illumination (0° à gauche, 30° milieu, 60° à droite). Extrait de [40]

Nous avons également réalisé la première mesure complète de la BRDF du spectralon pour 2 directions d'illumination, 0° et 60°. Les résultats montraient clairement la non-lambertianité du spectralon pour des incidences non nulles. Ce comportement était connu, mais pour la première fois, nous pouvions présenter des mesures réalisées sur l'intégralité du demi-espace, avec un équipement de tout premier plan.

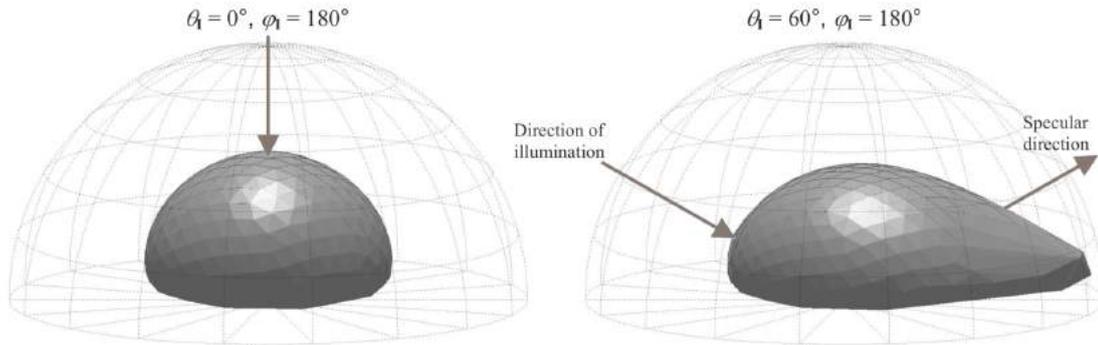


Figure 11. Mesure de la BRDF du spectralon® hors du plan d'incidence. A gauche, illumination selon la direction normale. A droite, illumination avec un zénith de 60°. Lumière non polarisée. $\lambda = 550 \text{ nm}$. La sphère représente $0,56 \text{ sr}^{-1}$ dans les deux cas. Extrait de [40]

2.4.3 Bilan

Je quitte l'équipe «Color and appearance » après 12 mois de contrat. Le bilan de ce séjour au NIST est 100% positif. Il s'agit de mon premier contact avec la métrologie au plus haut niveau. J'ai disposé de moyens et de liberté d'action. Au contact de cet environnement et des métrologues, j'ai appris à traquer le signal, à l'améliorer, à répéter les alignements. J'ai acquis le doigté et j'ai pris confiance en moi. Au-delà de l'aspect technique, j'ai aussi tissé des liens avec mes collègues américains, j'ai progressé en anglais, et j'ai découvert les USA.

Cette année, passée à travailler beaucoup, a été décisive pour ma carrière.

2.5. La photométrie primaire et le maintien des références

En Décembre 2005, je rejoins l'équipe « rayonnements optiques » à l'institut national de métrologie (INM), au Cnam. Je suis recruté sur un contrat de 12 mois, en tant qu'ingénieur de recherche.

Jean Bastie dirige cette équipe. Il me confie plusieurs missions :

- Valider la nouvelle réalisation de la candéla et du lumen
- Assurer le maintien à niveau des références de photométrie et assurer le raccordement de laboratoires étrangers
- Dépouiller les résultats et rédiger le rapport de la comparaison clef CCPR-K6

2.5.1 Validation de la nouvelle réalisation de la candéla et du lumen

La candela, unité d'intensité lumineuse, est l'une des sept unités de base du SI. Depuis la 16^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures en 1979 sa définition est reliée à l'unité de puissance, le watt par la définition suivante [42]:

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de $1/683$ watt par stéradian .

Il est donc possible de matérialiser la candela au moyen de photomètres raccordés directement ou indirectement à une référence radiométrique. En France, depuis 1983, l'INM utilise des photomètres traçables au radiomètre à substitution électrique cryogénique [43].

En 2005, une "nouvelle" candela a été réalisée afin d'améliorer la référence primaire et d'accroître la qualité du transfert pour les mesures d'intensité et de flux lumineux. Cette réalisation est basée sur des photomètres étalons constitués de trois éléments : un détecteur de type « piège », un filtre et un diaphragme. 5 photomètres différents ont été fabriqués. Le travail de conception, de caractérisation et d'assemblage a été fait par Laura Gonzales dans le cadre de son travail de doctorat [44].

Les résultats sont prometteurs, mais malheureusement, la sensibilité absolue des photomètres présente une différence significative par rapport aux incertitudes, lorsqu'elle est calculée à partir des caractéristiques des 3 éléments séparés, et lorsqu'elle est calculée en prenant le photomètre comme un tout. Ceci traduit que le budget d'incertitude n'est pas complètement maîtrisé. Dans ces conditions, les photomètres ne sont pas validés.

Durant l'année 2006, je vais coordonner la répétition de toutes les mesures de Laura Gonzales pour recalculer la sensibilité des photomètres. J'ai été formé aux mesures d'intensité lumineuse sur le banc photométrique, aux mesures du facteur de transmission sur le spectrophotomètre primaire, aux mesures de la linéarité des détecteurs et aux mesures de la surface des diaphragmes sur les installations dédiées. A la suite de ces formations, j'ai répété toutes les mesures. Dans le même temps, les détecteurs pièges ont été remesurés face au radiomètre cryogénique et leur sensibilité a été actualisée. J'ai ensuite repris l'intégralité des budgets d'incertitude. Fin 2006, les sensibilités calculées par les deux méthodes sont en accord pour les cinq photomètres. La nouvelle réalisation de la candéla française est annoncée à la communauté nationale [45] et internationale [46].

2.5.2 *Maintien à niveau des références de photométrie et raccordement de laboratoires étrangers*

La métrologie primaire est un monde à part. Quand on réalise une mesure avec un instrument, la confiance que l'on a dans le résultat de mesure dépend de la confiance que l'on a dans l'instrument. S'il est bien entretenu, bien utilisé et s'il est étalonné, c'est-à-dire, si l'on peut établir sa traçabilité aux références nationales, alors, on a confiance dans le résultat de mesure. C'est le rôle de la métrologie de garantir cette confiance. Mais lorsque l'instrument de mesure est la référence nationale, alors, il n'est pas possible de l'étalonner. Comment garantir la confiance ? Comment garantir la stabilité ? Il existe 2 méthodes :

La première est de réaliser la référence périodiquement, afin, dans le cas de la candéla, d'actualiser la valeur de la sensibilité des 4 photomètres primaires. Cette approche est la meilleure d'un point de vue scientifique. Mais si l'on s'accordait à définir une périodicité de 6 mois dans l'actualisation de la sensibilité des photomètres, il faudrait monopoliser à 100% une équipe de 4 experts toute l'année. L'opération serait trop coûteuse pour le laboratoire. Qui plus est, une telle approche imposerait de démonter et remonter des photomètres 2 fois par an, ce qui aurait tendance à les fragiliser et à les déstabiliser.

La seconde méthode consiste à fixer la valeur de la candéla sur un support stable juste après sa réalisation. Ainsi, on peut, à une périodicité de 6 mois, confronter la sensibilité des photomètres à cette valeur figée au moment de la réalisation. Si les résultats ne changent pas, c'est que la sensibilité des photomètres est stable et que l'on peut avoir confiance dans le résultat de mesure. En photométrie, on fixe la valeur de la candéla sur un lot de lampes étalons. Ce lot devient une réalisation secondaire. Il conserve la valeur qu'avait la référence à un instant t . Au laboratoire, nous avons ainsi différents lots de lampes qui conservent les différentes valeurs qu'a pu prendre la candéla française depuis 1931 !!

Bien sûr, les lampes peuvent casser. C'est assez rare. En revanche, il est connu que leur intensité lumineuse varie lorsqu'elles sont utilisées. Si l'on veut garantir la stabilité de la référence, il est donc préférable de ne pas utiliser les lampes. Mais dans ce cas, elles ne servent à rien. La parade consiste à dupliquer le nombre de lots de lampes sur lesquels on fixe la valeur de la candéla. On nomme alors des « lots de références » et des « lots de travail ». Le lot de travail sert à vérifier périodiquement la stabilité des photomètres (tous les 6 mois). Le lot de références sert à vérifier périodiquement la stabilité du lot de travail (tous les 4 ans). Enfin, notons que nous allons utiliser plusieurs lots de travail, correspondant aux différentes technologies de lampes présentes sur le marché et donc plusieurs lots de référence.

Tout ce système est rigoureusement contrôlé. Chaque utilisation est documentée et archivée dans le cadre d'un système qualité qui satisfait les recommandations de la norme ISO 17025. C'est un travail non visible, qui demande une grande expertise et une grande rigueur. C'est un travail chronophage. Mais c'est à ce prix que l'on peut garder la confiance dans la valeur de la sensibilité des photomètres qui définissent la valeur de la candéla, sans avoir à repasser par un étalonnage complet de chacun des éléments des photomètres.

Ce travail, c'est ce que l'on désigne dans le jargon de la métrologie par l'expression fourre-tout « maintien à niveau des références ». C'est lui qui garantit à l'industrie française la stabilité des mesures et la confiance dans les références. En 2006, au prix de nombreuses heures passées à manipuler à 4 mains avec Jean Bastie comme encadrant, ou seul sur des lampes de chauffe, j'ai appris les gestes qui permettent de manipuler les lampes étalons et les règles qui permettent d'en garantir la stabilité. J'ai pris en main le banc photométrique, le goniophotomètre et le spectrophotomètre. Fin 2006, Jean Bastie me remet les clefs du laboratoire. Je deviens responsable de l'unité opérationnelle de photométrie.

Cette fonction me permet d'accéder au cercle restreint des experts au Comité Consultatif pour la Radiométrie et la Photométrie (CCPR). Depuis 1971 le CCPR, sous l'égide du BIPM, est le comité en charge de la coordination des activités qui attirent aux étalons pour les quantités de radiométrie et photométrie et pour le développement de la radiométrie absolue. Il conseille le CIPM sur les questions

liées à la photométrie et la radiométrie. Dans sa composition actuelle, il rassemble 41 experts provenant de 25 pays.



Figure 12. Photographie officielle de la 23^e réunion du CCPR au BIPM (Sèvres, France, 2016)

2.5.3 Dépouillement des résultats et rédaction du rapport de la comparaison clef CCPR-K6

En 1999, le CIPM signait le MRA, l'Arrangement de Reconnaissance Mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie. Cette reconnaissance ne vient pas comme un don. Elle s'acquiert, en se prouvant mutuellement ses propres compétences par le biais de l'établissement de CMC, les capacités d'étalonnage et de mesure. Les CMC s'établissent par des comparaisons clefs, qui permettent de confronter les différentes réalisations de grandeurs de référence des différents laboratoires nationaux de métrologie souhaitant accéder au MRA.

Ces comparaisons clefs sont réalisées sous le contrôle du BIPM, via le CCPR. Comme il serait impensable de faire participer tous les adhérents du MRA à la même comparaison, le CCPR établit une comparaison restreinte, limitée à l'époque à 15 laboratoires (12 aujourd'hui), équitablement répartis de par le monde. Il est classique de retrouver 4 laboratoires européens dans cette première comparaison. Pour assurer le raccordement des autres laboratoires, plusieurs comparaisons secondaires sont alors réalisées à l'intérieur des organisations régionales de métrologie (RMO) qui sont au nombre de cinq (AFRIMETS, APMP, COOMET, EURAMET et SIM). La France appartient évidemment à EURAMET.

En 1997, une première vague de comparaison CCPR a été lancée par le BIPM sur 6 grandeurs radiométriques et photométriques.

- CCPR-K1, mesure de la sensibilité spectrale.
- CCPR-K2, mesure de l'éclairement énergétique.
- CCPR-K3, mesure de l'intensité lumineuse.
- CCPR-K4, mesure du flux lumineux.
- CCPR-K5, mesure du facteur de réflexion.
- CCPR-K6, mesure du facteur de transmission.

Les compétences reconnues de la France en matière de mesure de la transmission régulière l'ont amenée à piloter la comparaison clef CCPR-K6, à laquelle ont pris part 15 laboratoires nationaux de métrologie.

La comparaison était sous la forme Pilote – Participant – Pilote. Afin de tester les capacités d'étalonnage à la fois d'un point de vue spectral et d'un point de vue dynamique, il avait été décidé de travailler à 8 longueurs d'onde et sur 5 niveaux de densité. Ainsi, pour le laboratoire, hormis le travail de conception des filtres et de logistique, il avait fallu réaliser $8 \text{ (longueurs d'onde)} \times 5 \text{ (Filtres)} \times 15 \text{ (participants)} \times 2 \text{ (tours)} = 1200$ points d'étalonnage au plus haut niveau d'exactitude ! De son côté, chaque participant a réalisé $8 \times 5 = 40$ points de mesure.

En 2006, les mesures sont terminées. Il faut déterminer la valeur de référence mondiale appelée « Key Comparison Reference Value » (KCRV) pour chacun des 40 points testés lors de CCPR-K6, à partir de l'ensemble de ces mesures. A l'époque, nous ne disposons pour réaliser ce travail que d'un

document à l'état de brouillon appelé « Guidelines for CCPR Comparison Report Preparation version 01 ».

Je m'attelle à cette tâche, qui m'occupera jusqu'en 2008. Au départ, étant complètement naïf sur le sujet, je traite les résultats comme le préconise le guide, inventant des règles de « bon sens » quand la situation particulière de la mesure de la transmission n'est pas traitée dans le guide. Je vais conclure à un moment que certains laboratoires doivent être écartés du calcul de la KCRV car ils sont à mon sens outliers. Nous parlons là d'une comparaison mondiale, impliquant 15 laboratoires de plus haut niveau, et représentant de gros pays industrialisés. Je passe les détails et les états d'âme qui n'ont pas à figurer dans ce manuscrit. Pour résumer, j'ai beaucoup appris.

En novembre 2008, après 6 versions, des mois d'échanges et de discussions, j'ai obtenu le consensus des 15 participants pour valider le rapport final de CCPR-K6, sans en dégrader l'esprit. Il aura quand même fallu repêcher 2 des 3 outliers identifiés dans ma première version pour arriver à ce résultat. Le rapport final, document de 106 pages est accepté par le CCPR et publié dans *métrologia* [47].

2.5.4 Bilan

Lors de cette année en tant qu'ingénieur contractuel, je découvre la photométrie primaire et les références nationales. Les heures passées avec Jean Bastie me permettent d'acquérir les gestes requis pour la manipulation des références nationales et la culture du domaine. J'accède au cercle restreint des experts en photométrie et j'entre sur la scène internationale grâce à CCPR-K6. Parallèlement, le succès rencontré suite à la répétition des mesures de la sensibilité des photomètres primaire me donne confiance dans mes capacités et ma formation.

2.6. Apprentissage : Épilogue

Cette partie a été rédigée comme une autobiographie ce qui n'est peut-être pas l'exercice demandé pour ce type de document. Cependant, cette approche s'est imposée à la rédaction car finalement, elle s'est déroulée de manière complètement linéaire, sans retour en arrière, dans déviation. Entré dans le cycle LMD avec une formation de technicien en mesures physiques, je sors avec un doctorat en métrologie. Cela n'a rien de surprenant. C'est même logique. Je manipule les références nationales, le sommet de la pyramide de traçabilité. Tout cela s'est fait naturellement.

En 2006, alors que je débute la campagne de recrutement de maître de conférences, j'ai clairement identifié mon expertise. Je suis métrologue, spécialiste de la mesure du brillant. Le brillant est un attribut visuel. Pour le mesurer, il faut caractériser la sensation visuelle et la BRDF de la surface. Cela demande des compétences en psychophysique et en spectrophotométrie. Au contact de Françoise Viénot et de Maria Nadal, j'ai acquis ces compétences, l'une après l'autre. Au contact de Jean Bastie, j'ai appris les enjeux de la métrologie primaire, la prise de responsabilité, et j'ai intégré le groupe des experts en photométrie. Je suis dans la salle. Je dispose des compétences et de l'environnement. Il ne me reste plus qu'à m'installer pour développer ma propre recherche, que j'intitule alors « métrologie du brillant ». En mai 2006, je suis classé premier au concours ouvert au CNAM pour le recrutement d'un maître de conférences en section 30, profil « Instrumentation – Mesure ». Fin de l'apprentissage.

3. Mise en œuvre (2008-2017)

En septembre 2007, l'équipe « mesure des rayonnements optiques » du Laboratoire commun de métrologie a déménagé sur le site du Landy, à La Plaine St Denis. Elle est dirigée par Jean Bastie. Elle est constituée de 8 personnes qui sont réparties sur 3 thématiques : radiométrie des Sources, dirigée par Bernard Rougié (IGR), radiométrie des détecteurs, dirigée par Jeanne-Marie Coutin (IGR), photométrie et spectrophotométrie, dirigée par Jean Bastie (IGR) qui sera très bientôt retraité. Je suis le seul enseignant-chercheur de l'équipe. Je vais prendre en charge la thématique photométrie et spectrophotométrie et l'unité opérationnelle d'étalonnage qui y est associée.

L'équipe met en pratique les références primaires pour les grandeurs de la radiométrie-photométrie suivante :

- Eclairage énergétique spectrique
- Luminance énergétique spectrique
- Sensibilité spectrale des détecteurs
- Intensité lumineuse
- Eclairage lumineux
- Flux lumineux
- Facteur de transmission régulier

Ainsi, elle couvre l'intégralité des grandeurs sauf une, le facteur de réflexion diffus. Ce dernier est tracé via la référence allemande, mise en pratique à la PTB.

Mon activité au sein du laboratoire est divisée en 4 grands axes

- ✓ Activité d'enseignement au sein de l'équipe pédagogique « instrumentation-mesure »
- ✓ Activité d'encadrement d'alternants, d'étudiants, de doctorants, de chercheurs contractuels
- ✓ Activité de maintien à niveau des références nationales pour la photométrie et la spectrophotométrie
- ✓ Activité de recherche sur la mesure de l'apparence qui est elle-même séparée en 2 axes, la mesure de la BRDF des matériaux et la mesure de la sensation visuelle.

Ce chapitre est divisé logiquement en 4 parties, qui rendent compte de mon activité sur ces 4 axes.

3.1. Enseignement

L'équipe pédagogique « instrumentation-mesures » est une équipe dynamique composée de 2 professeurs Cnam, 2 professeurs des universités, 5 maîtres de conférences et un ATER. Elle intervient dans de nombreuses formations du Cnam du fait de sa thématique transversale qui est la science de la mesure.

Mon activité est répartie entre les cours de soir (HTT) et l'école d'ingénieur. Mon implication dans l'équipe est grande. Je prends part aux enseignements et suis solidaire. La Figure 13 récapitule mon activité d'enseignement depuis mon recrutement. Tous les membres de l'équipe instrumentation-mesure sont en sur-service. Je ne déroge pas à cette règle. Sur l'année 2007-2008, il m'a fallu m'approprier les enseignements qui m'étaient confiés. Cela représente un travail non négligeable. Cette année-là, mes collègues m'ont préservé et mon service a été contenu à 176 h. A partir de 2008, je vais accepter ma part de la charge de l'équipe. Mon service annuel augmente. Il atteint un sommet en 2013, année où un nouveau maître de conférences est recruté dans l'équipe. Ce recrutement soulage mon service. Depuis 2014, il se stabilise autour de 230 h d'enseignement annuel.

J'interviens auprès des alternants de l'école d'ingénieur du Cnam et des élèves en cours du soir.

A partir de 2010, je prends la responsabilité de 2 unités d'enseignement (UE) :

- UE *Systèmes de mesure*, FIP Maintenance de Véhicules (20h Cours, 20h ED, 20h TP).
- UE *Capteurs et conditionneur*, FIP EPRM (18h cours, 18h ED, 40h TP).

A partir de 2012, je suis sollicité pour intervenir au sein du Master spécialisé *Systèmes de mesure et métrologie* dispensé à l'école des Mines de Douai, pour enseigner un module de 14h sur la métrologie des rayonnements optiques.

A partir de 2015, je suis sollicité pour intervenir au sein du Master spécialisé *Embedded Lighting Systems*, dispensé au sein de l'Institut d'Optique Graduate School (IOGS), pour enseigner 12h sur la métrologie de l'apparence, et les méthodes de mesures psychophysiques. Ce cours est donné en anglais. Depuis 2016, je suis également sollicité par l'IOGS de St Etienne pour donner le même cours.

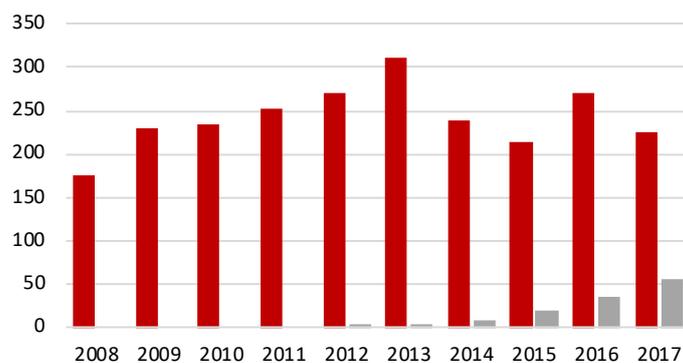


Figure 13. Heures d'enseignement réalisées sur la période 2007-2017 (en rouge). Après une forte augmentation sur les 6 premières années, mon volume horaire est stabilisé. Les heures de référentiels sont en augmentation depuis 2013

Depuis 2015, étant clairement identifié au sein du Cnam comme expert en photométrie, en vision et métrologie de l'apparence, je suis sollicité ponctuellement pour des actions pédagogiques ciblées :

- Vision et éclairage (8h) aux élèves ingénieurs HTT en électronique de puissance (EEP109) (2014-2015)
- Lumière et éclairage (4h) aux appariteurs du Musée du Cnam en vue de la préparation de l'année de la lumière de l'UNESCO(2015)
- L'homme et la lumière (4h) aux élèves ingénieurs Cnam au sein de l'UE ENG210 (2016-2017)
- Lumière et éclairage (3h) aux enseignants du secondaire dans le cadre du plan académique de formation du Musée du Cnam (2016).

J'aime enseigner. Mais j'essaie également de contenir mon activité d'enseignement, afin de pouvoir mener une activité de recherche significative. Alors que les départs en retraite se succèdent et ne sont pas systématiquement remplacés, alors que les formations d'ingénieur en alternance sont en plein boom, la charge d'enseignement par enseignant-chercheur augmente. Conserver un service maîtrisé tout en faisant acte de solidarité avec mon équipe pédagogique est un exercice délicat, qui demande des compromis. Depuis mon recrutement, je fais de mon mieux pour ménager tous les partis.

3.2. Encadrement

Mon activité d'encadrement s'effectue à plusieurs niveaux :

- Tutorat d'élèves ingénieurs en alternance
- Encadrement de stagiaires
- Encadrement de mémoires d'ingénieurs
- Codirection de doctorants
- Encadrement de chercheurs contractuels post- doctorants

3.2.1 Tutorat académique

Dans le cadre de l'école d'ingénieur du Cnam, chaque apprenti bénéficie d'un tuteur académique, enseignant au Cnam, et d'un tuteur industriel, qui représente l'entreprise dans laquelle l'apprenti effectue son alternance. Le rôle des tuteurs est de s'assurer que durant les 3 ans de la formation de l'apprenti, la progression de l'élève est régulière. Il s'agit également, le cas échéant, d'intervenir au sein de l'école ou de l'entreprise afin de lever des verrous ou de résoudre des problèmes qui entravent la progression de l'élève.

Depuis 2014, je suis tuteur académique d'élèves de l'EI Cnam. Au total, j'ai encadré 9 élèves : 3 sur la période 2014 - 2017, 2 sur la période 2015-2018, 2 sur 2016-2019 et 2 sur 2017-2020. Je m'arrange pour maintenir un nombre moyen d'apprentis encadrés de 6 à 7 simultanément. Il me semble que c'est un bon compromis entre la demande d'encadrement élevée requise par l'école et la qualité de l'encadrement que je peux donner, étant donné mes autres activités et responsabilités.

3.2.2 Encadrement de stagiaires

J'ai encadré jusqu'à aujourd'hui 2 stagiaires. Je concède que j'ai eu plusieurs demandes ces dernières années que j'ai dû refuser faute de ne pouvoir dégager le temps que j'estime nécessaire pour fournir un encadrement de qualité :

- Yves Candéla, Stage 2^{ème} année de l'Institut d'Optique Graduate School (6 semaines) intitulé « Premier dimensionnement d'un détecteur pour la mesure de la BRDF à très haute résolution angulaire »
- Florian Régnier, stage de L3 (5+5 semaines) intitulé « Etude de la perception visuelle du brillant sous différents éclairages », année 2014

3.2.3 Encadrement de mémoires ingénieurs Cnam

Pour les auditeurs Cnam inscrits dans le diplôme d'ingénieur, le stage de fin d'étude est un séjour de 9 mois réalisé au sein de l'équipe, sur une problématique de recherche. J'ai encadré 2 élèves ingénieurs pour leur stage de fin d'étude et la rédaction de leur mémoire d'ingénieur :

- Kiran Knowbuth, « *Conception d'un Gonioreflectomètre* », soutenue le 29 janvier 2008
- Guillaume Ged, « *Caractérisation optique et visuelle d'échantillons de surfaces rugueuses* », soutenue le 8 février 2011

3.2.4 Encadrement de doctorants

J'ai été le directeur de travaux de 3 doctorants :

Shiraz Ouarets, « Conception de la détection d'un gonioreflectomètre métrologique pour la mesure de la BRDF des surfaces », soutenue le 3 juin 2015, sous la direction d'Annick Razet.

Guillaume Ged, « Métrologie du brillant : développement et caractérisation psychophysique d'échelles de brillant », soutenue le 26 septembre 2017, sous la direction de Marc Himbert .

Marine Page, « Amélioration des procédés d'impression en relief et de leurs caractéristiques d'apparence (couleur et brillant) : application à la conservation-restauration du patrimoine », démarrée en mai 2016 sous la direction d'Annick Razet. *En cours*

3.2.5 Encadrement de chercheurs et ingénieurs contractuels

Dans le cadre du projet de recherche xDReflect financé par l'Union Européenne au sein du programme EMRP, j'ai encadré :

Ronan Le Breton, chercheur post-doctorant français sur une durée de 12 mois (Sept 2014 – Août 2015). R. Le Breton a quitté l'équipe pour intégrer l'Institut Supérieur de Mécanique à Paris en tant que maître de conférences.

Yang Liu, ingénieur de recherche chinois sur une durée de 4 mois (Octobre 2015 – Janvier 2016). Liu Yang a quitté l'équipe pour un CDI chez St Gobain à Pont- à- Mousson.

Ana Maria Rabal, chercheur post-doctorant espagnole sur une durée de 12 mois (Septembre 2015 – Août 2016). Ana Rabal a ensuite été retenue pour travailler sur le projet de recherche BiRD financé par l'Union Européenne au sein du programme EMPIR. Elle est encore dans l'équipe aujourd'hui, en mars 2018.

L'encadrement des contractuels demande de l'investissement, à la fois administratif et scientifique. Néanmoins, j'ai la satisfaction de constater que Ronan Le Breton et Yang Liu ont trouvé un poste permanent alors qu'ils étaient dans mon équipe. J'espère y avoir été pour quelque chose.

3.3. Activité de maintien à niveau des références nationales pour la photométrie et la spectrophotométrie

3.3.1 Service d'étalonnage

En 2008, je suis nommé responsable de l'Unité Opérationnelle (UO) « Photométrie et spectrophotométrie » du laboratoire LNE-LCM/CNAM, la composante Cnam du Laboratoire Commun de Métrologie. A ce titre, je dois mettre tout en œuvre pour garantir la stabilité, le maintien au plus haut niveau d'exactitude et le transfert des références de photométrie et de spectrophotométrie. Je dois également représenter la France au sein des instances internationales de la métrologie pour les questions de photométrie.

Pour réaliser cette tâche, le laboratoire met à ma disposition un technicien à 90%. Je bénéficie également des crédits alloués par le ministère de l'industrie à la Métrologie Française (MF). L'attribution de ces crédits est arbitrée par le comité de la métrologie. La métrologie française fonctionne en « mode projet » : Les demandes de financement font l'objet d'une demande de projet. Ce projet est examiné

par le conseil scientifique de la MF. S'il est accepté, il est financé à hauteur de la demande. Une fois accompli, un rapport de fin de projet est rédigé et les résultats sont présentés au conseil scientifique.

L'UO photométrie offre 5 services d'étalonnage :

- Mesure de l'intensité lumineuse
- Mesure du flux lumineux
- Mesure de l'éclairement lumineux
- Mesure de la température de couleur
- Mesure du facteur de transmission régulier

N'ont accès à ces services que le Laboratoire National de métrologie et d'Essai (LNE), les laboratoires nationaux de métrologie d'autres pays, et des entreprises françaises qui peuvent justifier que leur besoin de mesure ne peut pas être satisfait par le catalogue de prestations du LNE.

Le service d'étalonnage est placé sous assurance qualité et est conforme aux recommandations exigées par la norme ISO 17025 :2005, « Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais ». Je suis en charge de la mise à jour du manuel opérationnel, des procédures et des fiches de vie des équipements et étalons impliqués dans les cinq prestations d'étalonnage. L'UO est audité annuellement afin de s'assurer de la conformité avec la norme 17025.

Je dirige ce service depuis 10 ans. L'UO photométrie produit le plus de prestations d'étalonnage du LNE-LCM/CNAM. Nous assurons la traçabilité pour la France, le Portugal, le Brésil, la Belgique et la Serbie.

3.3.2 Comparaisons internationales

Comme je l'ai déjà développé au §2.5.3 (voir p. 23), afin de garantir le MRA, le BIPM et les organismes régionaux de métrologie (RMO) organisent des « comparaisons clefs ». Ces comparaisons permettent de comparer et de déterminer l'écart entre les différentes réalisations de grandeurs références pour différents pays. Pour le domaine de la photométrie, les grandeurs sélectionnées sont l'intensité lumineuse (K3a), l'éclairement lumineux (K3b) et le flux lumineux (K4). Pour la spectrophotométrie, les grandeurs sélectionnées sont le facteur de réflexion diffuse (K5) et le facteur de transmission régulière (K6).

Les comparaisons sont organisées à plusieurs niveaux. Une première comparaison est organisée au niveau mondial, elle est appelée « Comparaison CCPR ». Cette comparaison est aujourd'hui restreinte à 12 participants maximum. Pour être acceptés, les candidats doivent démontrer qu'ils maîtrisent la grandeur concernée avec une exactitude au plus haut niveau mondial. Il faut aussi s'assurer que les cinq RMO sont représentées dans cette comparaison. Ainsi, malgré leur niveau métrologique très élevé, le nombre de laboratoires européens appartenant à la RMO EURAMET acceptés dans ces comparaisons est limité à 4 participants.

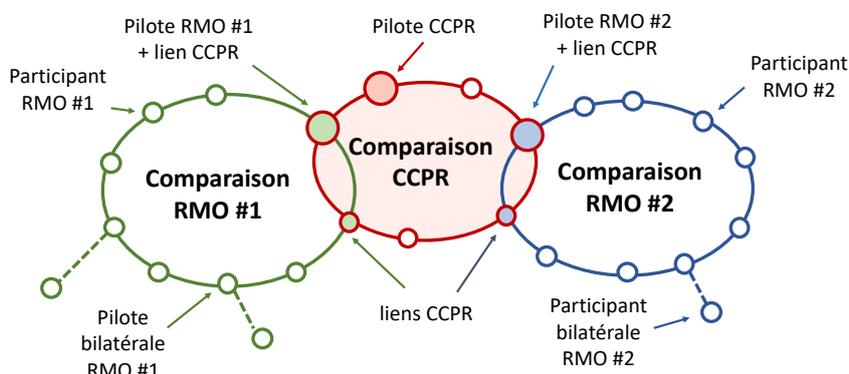


Figure 14. Schéma de principe du système de comparaisons clef permettant de garantir le MRA. Une première comparaison mondiale est réalisée au niveau « CCPR ». Puis une seconde comparaison est réalisée au niveau des RMOs. Le système de lien permet de comparer de proche en proche la réalisation d'un laboratoire établi dans la RMO#1 avec un laboratoire établi dans la RMO#2.

Une seconde comparaison est organisée au niveau régional. En Europe, on l'appelle « Comparaison EURAMET ». Elle est organisée à la suite de la comparaison CCPR. Tous les laboratoires européens qui le souhaitent peuvent participer à cette comparaison. Afin d'assurer un lien métrologique solide entre la comparaison régionale et la comparaison CCPR, on nomme des « laboratoires lien ». Il s'agit de laboratoires qui participent aux deux comparaisons. Traditionnellement, afin de simplifier l'organisation

et le dépouillement des mesures, la comparaison régionale est pilotée pour un laboratoire ayant participé à la comparaison CCPR. Ce laboratoire joue ainsi le rôle de pilote et de lien. La Figure 14 résume ce principe.

Ce système de comparaison, s'il est réalisé de manière coordonnée au niveau mondial, permet de comparer les réalisations des grandeurs clefs de tous les pays signataires du MRA. Cependant, il est lourd à mettre en œuvre. Dans le domaine de la Radiométrie – Photométrie, la durée moyenne d'une comparaison est de 6 ans ! Ainsi, il a été décidé que les comparaisons suivraient une périodicité de 10 ans. La première vague a été lancée en 1997.

Lors de cette première vague, l'UO Photométrie a participé aux comparaisons CCPR-K3a (Intensité lumineuse), CCPR-K3b (Éclairement lumineux) et CCPR-K4 (Flux lumineux) en tant que participant et à CCPR-K6 (transmission régulière) en tant que pilote. Elle a également servi de laboratoire lien pour les comparaisons EURAMET-PR-K3A, EURAMET-PR-K3b et EURAMET-PR-K4 et de pilote pour EURAMET-PR-K6. Cette forte implication dans les comparaisons en fait un service reconnu au plus haut niveau mondial.

Pour cette première série de comparaisons, mon implication a été tardive mais significative puisque j'ai réalisé le dépouillement des mesures et la rédaction des rapports de CCPR-K6 et de EURAMET-PR-K6. Du plus, j'étais en charge de l'UO Photométrie lors du lancement de la comparaison EURAMET-PR-K4 en 2009. J'ai donc réalisé les mesures en tant que laboratoire lien pour cette comparaison et participé à la rédaction du rapport.

La deuxième vague de comparaison est en cours actuellement. Fort de l'expérience de la première vague, la comparaison K3b (éclairage lumineux) a été abandonnée. Sa redondance avec K3a (Intensité lumineuse) était trop forte. En conséquence, K3a devient la K3, car il n'est plus nécessaire de distinguer les deux grandeurs.

Le service a été sélectionné en tant que participant pour les comparaisons CCPR-K3, CCPR-K4 et CCPR-K6, ce qui en fait toujours aujourd'hui un service de premier rang mondial, au même titre que l'Angleterre, l'Allemagne, les USA, le Canada. Pour ces 3 comparaisons, nous sommes participants. Le service sert de lien pour EURAMET-PR-K3. Il est pilote pour EURAMET-PR-K6.

La participation aux comparaisons est importante pour un laboratoire de métrologie. Ces comparaisons sont le miroir du niveau et du rayonnement du laboratoire sur le plan mondial. Malgré la taille réduite de l'équipe, nous nous maintenons au plus haut niveau et, par notre rôle actif en tant que lien ou pilote de comparaisons, nous participons à l'effort collectif destiné à garantir le MRA.

En février 2017, les résultats de la comparaison CCPR-K6-2010 (transmission régulière) ont été publiés. 12 laboratoires ont participé (Singapour, Corée du sud, Japon, Nouvelle Zélande, Canada, USA, Afrique du sud, France, Hongrie, Angleterre, Allemagne, Russie). La comparaison a été réalisée sur 5 filtres présentant des densités allant de 0 à 4, pour des longueurs d'onde variant de 380 nm à 1000 nm. La période de mesure s'est étendue d'octobre 2013 à septembre 2014. Au total, ce sont 40 points de mesures qui ont été comparés, couvrant le domaine de l'unité opérationnelle. Nos incertitudes sont comparables à celles des meilleurs laboratoires mondiaux. Disons pour résumer que nous nous trouvons dans le top 5. Mais surtout, la France est le seul des 12 participants à recouper la valeur de référence pour les 40 points de mesure, pour une incertitude élargie à $K=2$, c'est-à-dire avec un

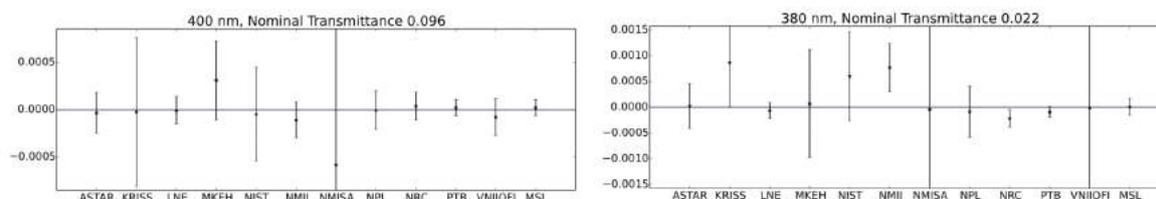


Figure 15. Extrait du rapport final de la comparaison CCPR-K6-2010 [48], exemple de résultat pour le filtre C. L'écart dans la mesure du facteur de transmission est reporté pour les 12 laboratoires participants, à 400 nm et 380 nm. La ligne horizontale est la valeur de référence, établie à partir des mesures. Les incertitudes reportées sont des incertitudes élargies à $K=2$. La France (LNE) a une incertitude comparable aux meilleurs laboratoires. Elle recoupe la valeur de référence pour les 40 points testés. Elle est la seule dans ce cas.

intervalle de confiance de 95%. Ce point est important, car dans ce type d'activité, plus encore que d'avoir une incertitude petite, il est important de convaincre les autres participants que votre incertitude

est correctement évaluée. Il est clair que si, pour une raison ou une autre, vous ne recoupez pas la valeur de référence à $K=2$, cela signifie qu'il y a de fortes raisons de douter de la qualité de l'évaluation des incertitudes du laboratoire. A ce jeu, mon unité opérationnelle sort gagnante. Certes, nous n'avons pas l'incertitude la plus faible, mais nous avons l'incertitude la mieux évaluée.

Depuis septembre 2016, la comparaison EURAMET-PR-K6 a été lancée. Nous pilotons cette comparaison qui implique un laboratoire lien (Allemagne) et 16 participants (Bulgarie, République Tchèque, Serbie, Pologne, Roumanie, Espagne, Portugal, Suisse, Finlande, Suède, Turquie, Hollande, Biélorussie, Moldavie, Ukraine). C'est la plus large comparaison jamais réalisée dans le domaine de la radiométrie – photométrie, et très probablement tous domaines confondus. Je coordonne cette activité qui demande, outre de maintenir au plus haut niveau un spectrophotomètre de référence sur une longue période temporelle, des qualités d'organisation et de communication internationales.

La participation aux comparaisons internationales est une activité clef pour un laboratoire national de métrologie. Elle est source d'émulation scientifique, de reconnaissance et de rayonnement international. Depuis 2008, en tant que responsable de l'UO Photométrie, je suis impliqué dans ces comparaisons et je prends la responsabilité des résultats. A ce titre, je suis membre en tant qu'expert au sein du CCPR, je suis également le délégué français pour les groupes de travail sur les comparaisons clefs (CCPR-WG-KC) et sur la stratégie scientifique (CCPR-WG-SP). C'est également pour cette raison qu'en 2008, je suis devenu le représentant national au sein de la division 2 (mesure de la lumière et des rayonnements optiques) de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE).

3.4. Établissement d'un équipement de référence pour la mesure de la BRDF : le goniospectrophotomètre primaire

Lorsque je rejoins le laboratoire commun de métrologie en septembre 2005, je suis formé à la mesure de la fonction de distribution bi-directionnelle du coefficient de luminance (BRDF). Je suis également expert dans la métrologie du brillant. Mon projet de recherche s'appuie sur 3 axes :

- Mettre en place, pour la métrologie française, un équipement de référence de mesure de la BRDF
- Développer un équipement de recherche pour la mesure du pic spéculaire
- Poursuivre l'étude de la mesure visuelle du brillant.

Ce paragraphe relate les travaux engagés pour satisfaire le premier point de ce programme. Les 2 autres sont développés à la suite.

Ce projet s'inscrit dans le cadre de ma mission de mise en œuvre et du maintien à niveau des références. Il s'agit de doter la métrologie française (MF) d'une réalisation autonome de la mesure du facteur de réflexion diffus. La réalisation de cette mesure requiert de mesurer la BRDF d'un échantillon pour une direction incidente orthogonale à la surface. Cette mesure s'effectue avec un goniospectrophotomètre. Par intégration de la BRDF sur le demi-espace de l'échantillon, on trouve le facteur de réflexion diffus. En 2005, la métrologie française ne dispose pas de référence primaire absolue pour la mesure du facteur de réflexion diffus. La référence nationale est réalisée à l'aide d'une sphère intégrante, dont le facteur de réflexion est raccordé à l'échelle absolue réalisée au PTB, l'institut de métrologie national Allemand. Nous décidons d'équiper la MF d'un goniospectrophotomètre primaire, ce qui permettra de réaliser des mesures de BRDF et ultimement une référence autonome du facteur de réflexion diffus.

Le projet est déposé auprès de la MF en octobre 2006. L'objectif annoncé est de « *doter la métrologie française d'un équipement de référence de mesure de BRDF, un gonioreflectomètre, ayant le niveau requis pour l'étude métrologique de l'apparence des matériaux, dans le domaine UV - Visible (250 nm – 900 nm)* ». Il est accepté par le conseil scientifique en novembre 2006. Le travail de conception commence en février 2007. Le projet sera clos en février 2014. La réalisation de l'équipement a donc duré 7 ans. Elle a été ralentie par des problèmes logistiques liés à la construction de l'extension du bâtiment Maxwell sur le site du LNE à Trappes (78) et au déménagement du gonio sur ce site, durant la période du projet. Ont travaillé sur ce projet :

Kiran Knowbuth, élève ingénieur en HTT dans la spécialité instrumentation mesure option Métrologie Qualité, dans le cadre de son travail de mémoire d'ingénieur intitulé « Conception d'un gonioreflectomètre », soutenu en janvier 2008. Il a été accueilli au laboratoire dans le cadre du programme Fongicif, du 1^{er} février au 31 décembre 2017.

Shiraz Ouarets, ingénieure en électronique et titulaire du Master *optoélectronique et hyperfréquence* de l'université de Montpellier 2, dans le cadre de son travail de doctorat intitulé « Conception de la détection d'un goniorélectromètre métrologique pour mesurer la BRDF des surfaces » [52], soutenue le 3 juin 2015. Elle a été accueillie au laboratoire sur un contrat doctoral MENRT, du 1^{er} décembre 2010 au 31 août 2013, puis comme ATER à 50% du 1^{er} septembre 2013 au 31 août 2014.

Guillaume Ged, ingénieur d'étude au laboratoire, détaché sur ce projet à temps plein à partir de janvier 2008.

Ronan Le Breton, Docteur de l'université de Grenoble, spécialité « Sciences pour l'ingénieur », chercheur contractuel dans l'équipe de Septembre 2014 à Août 2015. Accueilli dans le cadre du projet de Recherche EMRP xDReflect

Ana Maria Rabal, Docteur de l'université de Zaragoza, spécialité « Physique », chercheuse contractuelle dans l'équipe depuis septembre 2015. Accueillie dans le cadre des projets de recherche EMRP xDreflect et EMPIR BiRD.

Yang Liu, ingénieur de recherche chinois en mécanique. Accueilli dans le cadre du projet EMRP xDReflect d'octobre 2015 à Janvier 2016

3.4.1 Equation de mesure

La BRDF est le rapport de la luminance dans la direction observation **R** par l'éclairement dans la direction **I** (voir Figure 16 pour les notations). Dans le cas où les surfaces peuvent être considérées comme petites devant le carré des distances, il est possible d'écrire ce rapport sous la forme d'un rapport de flux énergétique. Nous avons

$$f(\theta_I, \varphi_I, \theta_R, \varphi_R, \Omega_R, \lambda) = \frac{L(\theta_I, \varphi_I, \theta_R, \varphi_R, \Omega_R, \lambda)}{E(\theta_I, \varphi_I, \lambda)} = \frac{\Phi_R(\theta_I, \varphi_I, \theta_R, \varphi_R, \Omega_R, \lambda)}{\Phi_I(\theta_I, \varphi_I, \lambda)} \cdot \frac{S_I}{S_R} \cdot \frac{1}{\Omega \cos \theta_R} \quad (1)$$

où S_I et S_R sont respectivement la surface illuminée de l'échantillon et la surface qui éclaire la détection.

φ_I et φ_R sont respectivement les azimuts de **I** et de **R**

θ_I et θ_R sont respectivement les zéniths de **I** et de **R**

Ω_R est l'angle solide pointant sur l'échantillon et prenant le diaphragme d'entrée de la détection comme surface.

λ est la longueur d'onde

Si l'on s'arrange pour que la surface illuminée soit contenue dans le champ de la détection, alors

$$S_I = S_R \quad (2)$$

Et l'équation de mesure devient

$$f(\theta_I, \varphi_I, \theta_R, \varphi_R, \Omega_R, \lambda) = \frac{L(\theta_I, \varphi_I, \theta_R, \varphi_R, \Omega_R, \lambda)}{E(\theta_I, \varphi_I, \lambda)} = \frac{\Phi_R(\theta_I, \varphi_I, \theta_R, \varphi_R, \Omega_R, \lambda)}{\Phi_I(\theta_I, \varphi_I, \lambda)} \cdot \frac{1}{\Omega |\cos \theta_R|} \quad (3)$$

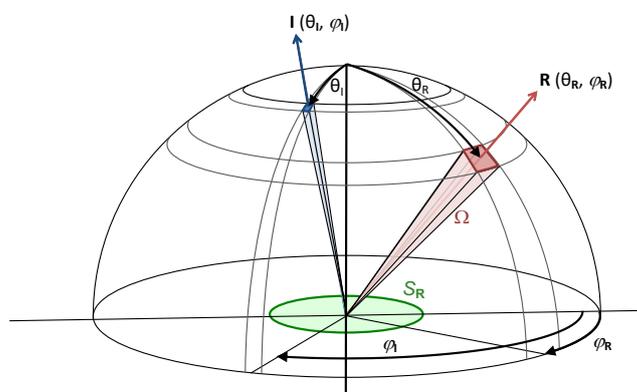


Figure 16. Notations utilisées pour les équations

Mesurer la BRDF revient donc à réaliser une mesure du rapport des flux énergétiques dans la direction **I** et **R**, et de maîtriser l'angle solide Ω . Ce flux est acquis à l'aide d'un détecteur de type photodiode silicium. L'étalonnage absolu de ce dernier n'est pas nécessaire, seul l'étalonnage en linéarité compte, ce qui est un avantage non négligeable compte tenu de la très bonne linéarité du silicium.

3.4.2 Cahier des charges

L'objectif est de créer un appareil de référence pour la mesure de la BRDF. L'étude des équipements existants nous conduit à établir le cahier des charges suivant :

- Pas de déplacement angulaire en réflexion et en illumination $\leq 0,1^\circ$;
- Résolution angulaire de 2° (pour assurer le lien avec la norme ISO 11664 (colorimétrie))
- Résolution spectrale $\leq 0,1$ nm ;
- Diamètre maximal du faisceau en incidence normale \varnothing 15 mm ;
- Largeur de bande ≤ 5 nm ;
- Toutes les géométries possibles dans le demi espace doivent être réalisables ;
- Temps de mesure inférieur à 10 heures ;
- Possibilité de mesure sur échantillons volumineux ;
- Mesure de BTDF partielle à envisager.

3.4.3 Conception mécanique

Un goniospectrophotomètre est systématiquement constitué de 3 éléments : une source lumineuse, un support d'échantillon et un détecteur. Nous avons opté pour un système où l'illumination est fixe. Les 4 rotations nécessaires pour contrôler les 2 zéniths et les 2 azimuts sont réparties sur le support d'échantillon et la détection.

Une solution robotique clef en main a été choisie pour le support d'échantillon. Nos homologues allemands, consultés à plusieurs reprises dans cette phase de réalisation, ont fait ce choix et en sont satisfaits. Suite à l'appel d'offre, 8 fournisseurs avaient répondu. Nous avons opté pour un robot 6 axes, capable de contrôler 3 translations et 3 rotations, de la marque Mitsubishi. Les programmes de pilotage du robot pour déplacer l'échantillon ont été développés en interne. Cette phase a nécessité d'acquérir dans l'équipe une compétence « robotique » que nous n'avions pas. Cette compétence, développée en autodidacte nécessitait à mon sens d'être consolidée afin de garantir la maîtrise totale du robot. Pour cette raison, j'ai recruté en septembre 2014, sur les crédits d'un contrat européen que je coordonnais (xDreflect), un chercheur contractuel spécialisé en robotique, sur une durée de 12 mois. Son séjour a permis de valider les codes et consolider la compétence robotique dans l'équipe.

Trois rotations étant déjà assurées par le robot, il reste à mettre en œuvre la quatrième, qui est obtenue en faisant tourner la détection autour de l'échantillon, dans un plan horizontal. Le faisceau d'illumination faisant 15 mm de diamètre, il peut, dans le cas extrême d'une illumination rasante ayant un zénith de 85° , projeter sur la surface de l'échantillon une ellipse dont le grand axe s'étend sur 18 cm. Dans ces conditions, garantir que la surface illuminée est petite devant les distances au carré impose d'augmenter singulièrement les distances. Nous avons décidé que la détection tournerait à une distance de 120 cm du centre de l'échantillon. Ce choix impose de déplacer la détection sur un cercle de 240 cm de diamètre, dans un plan horizontal, avec la circularité requise pour garantir nos tolérances angulaires, à savoir que les fluctuations de distance entre la détection et le centre du gonio soient contenues dans 1/10 de millimètre.

Il ne s'agit pas là d'un problème simple de mécanique. Un cahier des charges précis a été rédigé et un appel d'offre européen a été lancé. La société Eberlé a été retenue. La solution mécanique a été de réaliser une structure en IPN sur laquelle est boulonné un anneau fondu d'une seule pièce. Une couronne à crémaillère est fixée sur cet anneau. Dans ces conditions, la couronne est posée sur une surface plane. Eberlé 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 était dans les spécifications exigées pour garantir un positionnement angulaire de $0,01^\circ$ sur la direction d'illumination et la direction d'observation.

Enfin, le schéma mécanique général a été pensé pour faciliter les alignements et permettre de faire éventuellement des mesures sur des échantillons qui peuvent être volumineux. Ainsi, nous avons pris soin de dégager l'espace et fait en sorte que l'accès au robot soit aisé. Pour cela, l'entraînement de la détection est déporté sous un faux plancher qui vient affleurer la couronne. Ainsi, l'opérateur peut accéder confortablement au support d'échantillon. La Figure 17 présente une vue 3D de l'équipement.

3.4.4 Conception optique

Le faisceau est mis en forme sur la table optique. Nous utilisons une source de type LDLS (Laser Driven Light Source). Ce type de source présente des caractéristiques spectrales similaires à un arc xénon, mais la position du point lumineux est mieux maîtrisée que pour un arc. Après avoir été mis en forme, le faisceau entre dans un monochromateur simple dont le réseau est blasé à 550 nm. La fente de sortie

du monochromateur est placée au foyer d'une lentille convergente. Un diaphragme est placé juste après la lentille, dans le faisceau collimaté. Un système optique permet de projeter l'image de ce diaphragme sur le centre du gonio, là où se situe l'échantillon. Le calcul des optiques permet le grandissement nécessaire pour avoir 15 mm de diamètre au niveau de l'échantillon tout en maintenant la divergence en dessous de 1°, ce qui garantit de pouvoir mesurer le flux incident sans modifier le diaphragme de la détection.

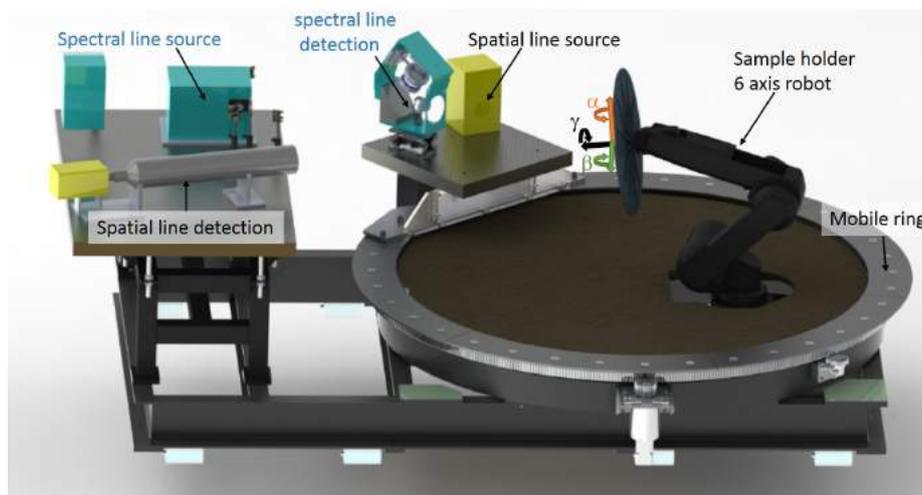


Figure 17. Schéma d'ensemble des goniospectrophotomètres. Le faux plancher n'est pas représenté. L'échantillon est monté à l'extrémité du bras robot. Ce bras permet de contrôler 3 translations, et 3 rotations. La partie bleue concerne le goniospectrophotomètre primaire. La partie source est immobile sur la table optique. La détection est mobile, placée sur la couronne. La partie jaune concerne ConDOR (voir §3.5.1, p. 34). La détection conoscopique est sur la table. La source est mobile, placée sur la couronne.

La détection est composée d'un diaphragme de précision de 42 mm de diamètre, qui permet de définir l'angle solide Ω (voir équation de mesure, p 31). Pour notre équipement,

$$\Omega = 0,0009570(9) \text{ sr}$$

Un miroir parabolique hors d'axe, placé derrière le diaphragme permet de focaliser la lumière sur une photodiode en silicium de type Hamamatsu 13. Le photocourant collecté est directement injecté à l'entrée d'une détection synchrone. Afin de prévenir d'éventuelles dérives, une partie du faisceau incident est prélevée et ses fluctuations sont contrôlées en parallèle des mesures réalisées.

3.4.5 Pilotage

L'ensemble de l'expérience est automatisé. Un programme de contrôle développé sur Labview gère la rotation de la couronne, les déplacements du robot, l'optimisation des paramètres de la détection synchrone et réalise le protocole de mesure. Toutes les mesures sont doublées en bloquant le faisceau incident pour acquérir la lumière parasite. Aujourd'hui, la réalisation d'un point de mesure prend environ trois minutes, compte tenu des temporisations requises pour filtrage et l'amplification du signal. Cette estimation ne prend pas en compte le temps nécessaire à mettre l'expérience en condition de mesure (montage et alignement de l'échantillon, vérification de l'étalonnage du monochromateur, temps de chauffe de la lampe, etc...).

3.4.6 Validation

Les premiers résultats ont été présentés lors de la 28^{ème} session de la CIE à Manchester en juin 2015 [49]. L'équipement a ensuite été validé en janvier 2016 à l'occasion d'une comparaison internationale menée dans le cadre du projet de recherche xDReflect. Cette comparaison s'appuyait sur 6 échantillons : 3 céramiques grises, de réflectance approximative 88 %, 40 % et 5 %, et 3 céramiques colorées (rouge, verte et bleue), pour des longueurs d'onde variant de 380 nm à 780 nm. 11 laboratoires européens ont participé. Notre incertitude type relative a été évaluée à 2% [50].

Durant le second semestre de l'année 2017, l'équipe a repris le travail sur cet équipement. Les progrès réalisés permettent aujourd'hui de prétendre à une incertitude type relative inférieure à 1%. Nous espérons valider cette nouvelle incertitude durant l'année 2018.

3.5. Conception de « ConDOR », équipement dédié à l'étude du pic spéculaire

Ce projet s'inscrit dans le cadre de ma recherche sur la métrologie du brillant. Comme je l'ai mentionné plus tôt, à l'issue de mon travail de doctorat, je suis convaincu que l'observateur extrait la sensation de brillant non pas du flux réfléchi dans la direction spéculaire, mais de la forme du pic spéculaire. Pour avancer dans ce domaine, il faudrait pouvoir mesurer le pic spéculaire des surfaces brillantes avec une résolution angulaire au moins égale à celle d'un observateur humain. Une recherche bibliographique permet d'estimer que, pour un objet bien éclairé et contrasté, le pouvoir de résolution de l'œil humain correspond à 2 minutes d'angle soit $0,03^\circ$ [51]. On sait également que, pour un niveau d'adaptation donné, la dynamique de l'œil est de l'ordre de 6 décades.

En 2005, il n'existe pas d'instrument de mesure de la BRDF ayant une résolution de $0,03^\circ$ et pouvant travailler sur une dynamique de 6 décades. Ainsi, en parallèle de la conception du goniospectrophotomètre primaire pour l'établissement des mesures de BRDF absolues (voir § 3.4), je développe un second instrument dédié cette fois-ci à la mesure de la BRDF à très haute résolution angulaire, pour pouvoir étudier la forme des pics spéculaires et progresser dans l'étude du brillant.

Ont participé à ce travail :

Shiraz Ouarets, Ana Rabal et Ronan Le Breton, déjà cités au § 3.4.

Guillaume Ged, ingénieur d'étude au laboratoire, dans le cadre de son travail de doctorat intitulé « Métrologie du brillant : développement et caractérisation psychophysique d'échelles de brillants », soutenue le 26 sept 2017

Yves Candela, étudiant en 2^{ième} année à IOGS (Sup-Optique) dans le cadre de son module de « conduite de projet », entre octobre 2007 et avril 2008.

3.5.1 Conception générale

Un tel système est très spécifique. Mesurer la BRDF avec une résolution de $0,03^\circ$, c'est acquérir la luminance de la surface éclairée au travers d'un diaphragme de 0,5 mm de diamètre se déplaçant à une distance d'un mètre autour de l'échantillon. Ceci pose 2 problèmes majeurs :

- Problème de flux : Le flux qui traverse ce minuscule diaphragme est très faible et la détection doit être suffisamment sensible pour acquérir le signal et présenter une dynamique de 6 décades. Dans ce contexte, il faut renoncer à l'étude spectrale du signal.
- Problème de temps de mesure : Imaginons un pic de largeur angulaire de 5° . Si nous mesurons ce pic avec une résolution de $0,03^\circ$, il nous faudra 1,5 millions de points de mesure pour le décrire intégralement. Outre le fait qu'il s'agisse d'une quantité énorme de points, il n'est pas envisageable de déplacer le diaphragme mécaniquement autant de fois tout en maîtrisant le temps de mesure.

La solution adoptée est empruntée à la technologie développée par la société Eldim, société qui conçoit l'EZ-Contrast, équipement avec lequel j'avais travaillé durant ma thèse. Elle substitue les déplacements mécaniques des éléments par un système optique appelé « 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.

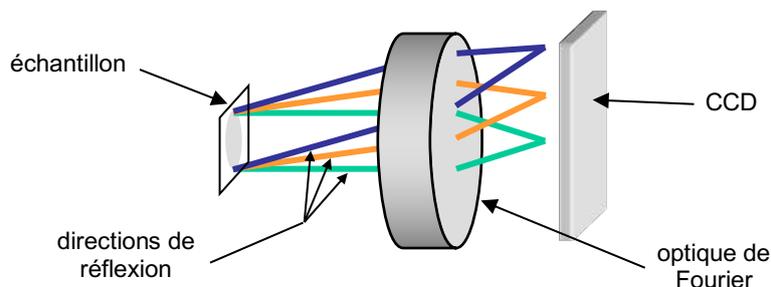


Figure 18. Schéma de principe du conoscope.

Si l'on conçoit un tel système avec un capteur CCD de 2 millions de pixels, on mesure, à chaque cliché, la luminance dans 2 millions de directions d'observation. La résolution angulaire est définie par la taille du pixel. La dynamique de mesure est assurée par le convertisseur analogique numérique et le temps d'exposition. Il faut pour cela utiliser une caméra CCD garantissant un bruit thermique suffisamment faible pour aller chercher des temps d'exposition longs, car nous savons que nous aurons peu de lumière. Il faut aussi s'assurer que la lumière parasite sera faible.

Nous disposons déjà du châssis développé pour le goniospectrophotomètre primaire. Nous nous installons sur le même châssis. La détection sera posée sur la table. L'illumination tournera autour de l'échantillon, qui sera manipulé par le robot (Voir figure Figure 17, p. 33).

3.5.2 Développement de la détection

L'intégration d'un conoscope dans un système goniorélectométrique académique est une première. La principale difficulté vient de l'éloignement du dispositif par rapport à l'échantillon à mesurer. En effet, dans un système conoscopique classique, l'optique est très « enveloppante » et placée très proche de l'échantillon. Dans notre cas, la détection se trouve à 1500 mm du centre de l'échantillon. Cette contrainte est essentiellement due au fait que la partie source tourne à une distance fixe de 1,2 m de la surface mesurée. Dans ces conditions, il est hors de question de recueillir la lumière dans une zone angulaire trop large sous peine d'augmenter considérablement la taille de la première lentille de la détection et d'avoir à gérer des aberrations importantes. Afin d'assurer la traçabilité de l'équipement avec le goniospectrophotomètre primaire, nous avons décidé de recueillir la lumière dans un cône de $\pm 1^\circ$.

L'équipement n'est pas spectral. Ceci n'est pas bloquant car le brillant n'est pas spectral. Néanmoins, afin de garantir là encore la traçabilité des mesures, nous travaillons en unités photométriques. Ainsi, les BRDF que nous mesurons sont issues du rapport de la luminance lumineuse dans une direction donnée, par l'éclairement lumineux provenant d'une direction définie. La grandeur mesurée reste en inverse stéradian. Dans ce contexte photométrique, les calculs de flux disponibles nous permettent de trouver une caméra CCD qui pourra satisfaire nos exigences. Nous acquérons une caméra ORCA-BT-512G (512 x 512 pixels), refroidie sur élément Peltier à -70°C , qui permet de couvrir les 6 décades recherchées.

Un premier jet du système optique a été réalisé en 2008 en collaboration avec un étudiant en deuxième année de Sup-Optique. Ce projet s'appuyait exclusivement sur l'utilisation de miroirs sphériques. Cependant, bien que les simulations aient été concordantes avec notre objectif, je ne l'ai pas retenu car il présentait un risque trop élevé (ingénieur en formation, système très sensible aux alignements, parties mécaniques minces). En 2011, je sollicite la société Eldim pour réaliser cette détection, via une action d'incitation du LNE.

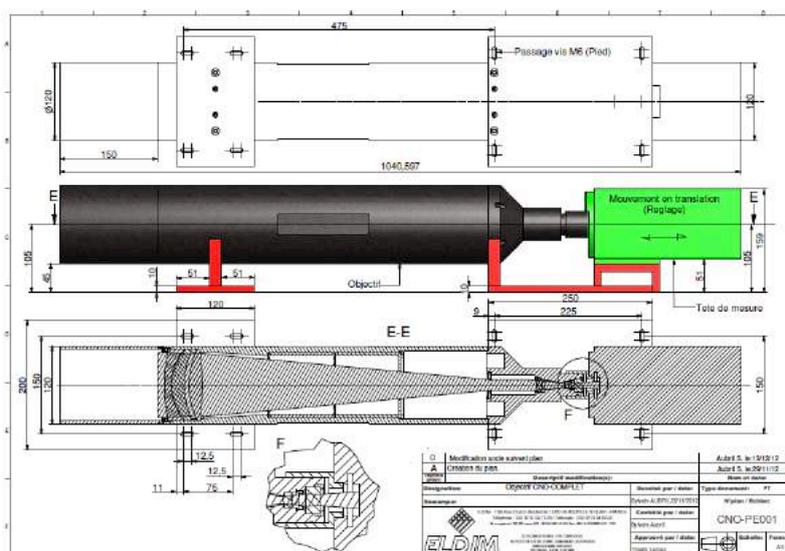


Figure 19. Page extraite du rapport de conception de la détection. Elle est constituée de 4 lentilles. Les simulations laissent penser qu'une résolution angulaire de $0,004^\circ$ est possible. Ce système optique n'est donc pas limitant pour notre détection.

Les caractéristiques recherchées sont les suivantes :

- Champ de $\pm 1^\circ$;
- Zone mesurée sur l'échantillon : jusqu'à 40 mm de diamètre, sachant que le système est « diaphragmé » par le spot d'illumination prévu pour être de 20 mm de diamètre ;
- Résolution angulaire supérieure à 0.01° ;
- Distance à l'objet supérieure à 1500 mm ;

- Optimisation pour les longueurs d'ondes visibles 450 nm, 550 nm & 650 nm ;
- Champ image adapté à la caméra ORCA-BT-512G (512 x 512 pixels de 24 μm), soit 12,29 mm de diamètre au maximum.

La collaboration a été effective et fructueuse. Nous sommes allés chercher l'objectif à Hérouville St Clair le 11 janvier 2013. En théorie, ce dispositif a une résolution angulaire ultime de $0,004^\circ$ (Figure 19).

3.5.3 Développement de l'illumination

Pour avoir une résolution angulaire de $0,03^\circ$, il est nécessaire d'éclairer l'échantillon avec un faisceau dont la divergence est plus faible que $0,03^\circ$. Nous optons pour un système simple utilisant un doublet achromatique $f = 400$ mm. Un sténopé de diamètre $\varnothing = 200$ μm est placé dans le plan focal ce qui nous donne une divergence théorique de $0,029^\circ$. La lampe utilisée est une lanterne QTH 200 W du laboratoire, réglée à 2800 K et régulée en courant par une alimentation stabilisée Drush. Un filtre optimisé pour transmettre un spectre proche de $V(\lambda)$ à 2800 K est placé sur le trajet optique.

Afin d'éviter que la température du sténopé ne s'élève trop et génère des déformations importantes, un premier système optique de grossissement $\gamma = 1$ image le filament de la lampe sur le sténopé. Un sténopé spécifique est fabriqué afin de limiter la lumière parasite. Derrière la lentille de collimation nous plaçons une série de 4 diaphragmes qui permettent de « nettoyer » le diamètre du faisceau à 20 mm.

3.5.4 Caractérisation du dispositif

Plusieurs corrections doivent être réalisées avant de pouvoir utiliser la détection conoscopique, à savoir :

La correction flatfield

Cette correction vise à corriger les écarts locaux d'efficacité quantique des pixels du CCD ainsi que les déformations du front d'ondes induites par les optiques. Cette correction est évaluée pour chaque pixel à partir de clichés réalisés en utilisant une sphère intégrante comme simulateur d'échantillon lambertien.

La correction de non-linéarité temporelle

La présence d'un obturateur mécanique dans la caméra induit des effets de non linéarité en temps. Les pixels situés au plus proche du point d'ouverture du diaphragme voient leur flux majoré par rapport à leurs voisins non encore exposés. Cette correction est évaluée en étudiant la réponse du CCD à flux constant pour 11 temps d'exposition entre 0,02 s et 20,48 s. La réponse du pixel corrigée du temps d'exposition du cliché est modélisée par une loi de puissance dont les paramètres sont ajustés pour chaque pixel.

La correction de non-linéarité dynamique

Les écarts à la linéarité dynamique sont une propriété intrinsèque du CCD. Leur étude est réalisée en utilisant une méthode d'addition de flux à temps d'exposition constant, appliquée avec des variations permettant de couvrir la dynamique de 16 bits de la caméra. La non-linéarité est corrigée pour chaque pixel.

La correction des bruits

Nous sommes confrontés à deux types de bruit. Le bruit thermique, que nous déterminons à partir du signal d'obscurité du capteur à différents temps d'expositions. Le bruit optique qui est proportionnel à la quantité de lumière reçue par le CCD. Son niveau est estimé à partir des zones non exposées du CCD, pour différents flux reçus. Ces deux bruits sont modélisés par des fonctions affines.

Ce travail d'évaluation des corrections, balayé ici en quelques lignes, est un travail titanesque et original. Les types de corrections sont bien connus et ont été identifiés dans la littérature. Cependant, nos besoins spécifiques, liés à notre activité métrologique d'une part et à la faiblesse des flux mesurés d'autre part, nous ont amené à développer des bancs annexes pour qualifier les corrections, à implémenter de nouveaux modèles et à remettre plusieurs fois nos modèles sur le métier, à mesure que nous progressions et affinons les corrections. Ce long travail de correction a été initié pendant la thèse de doctorat de Shiraz Ouarets [52] et clos durant la thèse de doctorat de Guillaume Ged [53]. Il a donné lieu à plusieurs communications orales dans des congrès internationaux de métrologie [54][55][56].

3.5.5 Fonction d'appareil et résolution angulaire atteinte

La résolution angulaire de ConDOR est acquise sur mesure du flux direct issu de l'illumination. La fonction obtenue est la signature de l'équipement. La mesure est obtenue par multi-exposition temporelle. Aux temps courts, le pic est correctement résolu par la dynamique de 16 bits du CCD. Aux temps longs, le capteur sature mais les pieds du pic sont mieux résolus. Les pixels saturés et leurs

proches voisins sont supprimés lors de la reconstruction. Les temps d'exposition utilisés pour tracer la fonction d'appareil suivent une progression logarithmique.

La Figure 20 résume les progrès effectués entre 2015 et 2017. Nous avons en juin 2015 une résolution spatiale correspondant à la largeur à mi-hauteur du pic de $0,03^\circ$. Grâce à une meilleure maîtrise de l'alignement de la partie source nous avons pu diminuer la taille du sténopé et descendre à une résolution de $0,013^\circ$, soit une performance supérieure à celle de l'œil humain. Les progrès les plus spectaculaires ont été réalisés sur la diminution de la lumière parasite, qui a permis d'améliorer considérablement le rapport signal sur bruit et par extension, la dynamique de l'instrument. D'une dynamique proche de trois décades, nous sommes passés à un système évoluant sur presque sept décades. Ces performances en font aujourd'hui le goniospectrophotomètre présentant la meilleure résolution angulaire au monde.

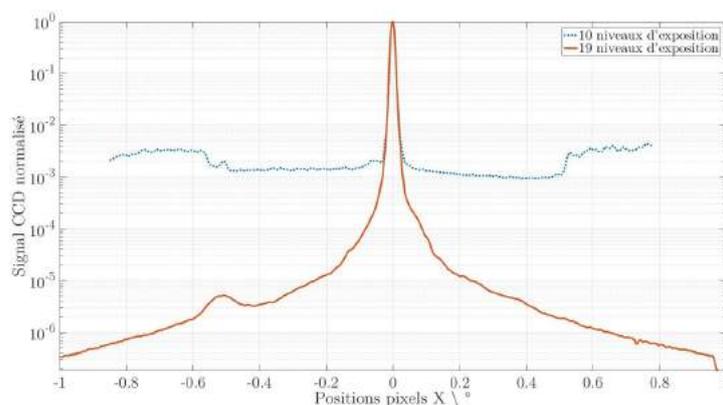


Figure 20. Fonctions d'appareil successives de ConDOR. La courbe bleue est la fonction d'appareil en juin 2015. La courbe rouge présente la fonction d'appareil en Septembre 2017. Entre temps, la lumière parasite et les corrections de linéarité ont permis d'améliorer le signal. La résolution angulaire est de $0,013^\circ$. La dynamique est de 6 décades.

3.5.6 Validation métrologie

L'équipement a été validé en comparant la mesure de BRDF sur un artefact de spectralon® réalisée avec ConDOR et avec le goniospectrophotomètre primaire. La configuration retenue est une illumination à 0° et une détection à 45° .

La mesure avec le goniospectrophotomètre primaire donne une valeur $f_r = (0,319 \pm 0,003) \text{ sr}^{-1}$ à $K=1$

La mesure sur ConDOR est effectuée à un temps unique d'exposition de 1 500 s. Elle est représentée sur la Figure 21. La valeur médiane obtenue est $f_r = (0,318 \pm 0,005) \text{ sr}^{-1}$ à $K=1$. L'écart entre les 2 instruments est de 1%. L'homogénéité relative des pixels sur le CCD est de $\pm 3\%$.

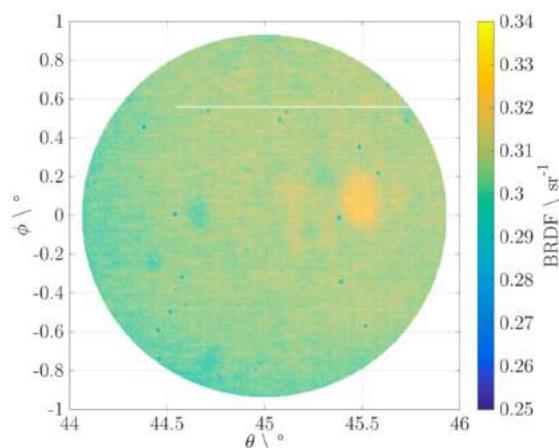


Figure 21. Mesure la BRDF d'un étalon diffus dans la configuration $\{0^\circ:45^\circ\}$, représentée dans le plan de Fourier. Chaque pixel représente une direction de mesure. Le disque complet représente un angle d'observation de 2° . Notre BRDF médiane présente un écart de 1% avec la valeur mesurée sur le goniospectrophotomètre primaire. On perçoit la non-lambertianité du spectralon sur l'axe horizontal, due à l'azimut d'illumination.

Ce résultat est tout à fait remarquable, compte tenu du fait que la validation est réalisée sur un échantillon diffusant. Il s'agit donc de la configuration la plus défavorable pour cet outil, dédié à la mesure du pic spéculaire. ConDOR n'a pas été conçu pour mesurer ce type d'échantillons. Il est néanmoins capable de la faire, au prix d'un temps d'exposition très long. Ce résultat témoigne de la qualité des corrections utilisées.

3.5.7 Multi-exposition angulaire

L'équipement mesure la BRDF avec une résolution exceptionnelle, mais restreinte à un cône de l'espace de 1° de demi-ouverture. Pour mesurer la BRDF sur un domaine angulaire plus étendu, il est nécessaire de tourner l'échantillon et la direction d'illumination de manière à placer la détection conoscopique dans un autre secteur, adjacent au précédent. En procédant ainsi et en prenant soin de ménager une zone de recouvrement entre les 2 secteurs, on étend le secteur angulaire. L'exemple ci-dessous montre la mesure de la BRDF d'un échantillon semi-brillant. La mesure est réalisée dans le plan d'incidence, pour une étendue zénithale de $\pm 11^\circ$ autour de la direction spéculaire. On recueille ici environ 2,5M de points de mesures.

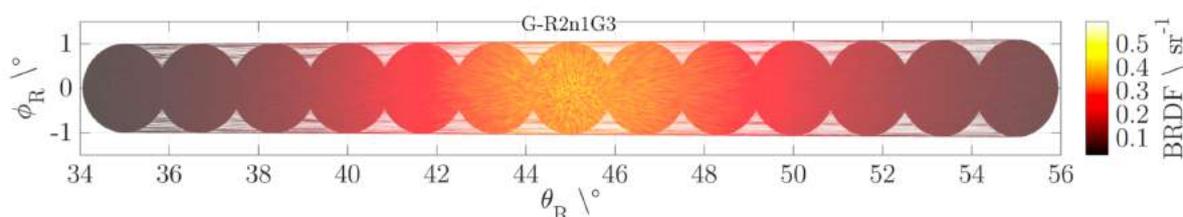


Figure 22. Exemple de multi-exposition spatiale utilisée pour couvrir un secteur angulaire supérieur à l'ouverture de la détection conoscopique. L'échantillon est un verre semi-brillant. Illumination selon un zénith de 45° . Le secteur couvert est dans le plan d'incidence, pour un zénith compris entre 34° et 56° . L'azimut est compris entre -1° et 1° (extrait de [53], p. 137).

3.5.8 Bilan

Cet équipement a été baptisé ConDOR, pour Conoscopic Device for Optical Reflectometry. Il permet de mesurer la BRDF « photométrique » des surfaces pour n'importe quelle direction d'illumination et d'observation, avec une résolution de $0,013^\circ$ et une dynamique de plus de 6 décades, c'est-à-dire avec des performances supérieures à l'œil humain. Cette résolution est la meilleure au monde. ConDOR ouvre des possibilités de mesures nouvelles, inédites, qui vont permettre d'explorer pour la première fois le pic spéculaire des surfaces brillantes dans le détail. Il n'existait pas. Je l'ai développé pour pouvoir poursuivre ma recherche sur la compréhension et la métrologie du brillant, pour offrir à la communauté un instrument permettant de caractériser les propriétés réfléchives des matériaux, des surfaces fonctionnelles. Pour cela, j'ai cherché les crédits auprès de la métrologie Française grâce au pilotage d'un projet national, auprès de l'Union Européenne grâce au pilotage d'un projet européen dans le cadre du programme EMRP. J'ai cherché l'expertise quand elle n'était pas dans l'équipe, avec Eldim, avec Eberlé. J'ai étudié des plans d'architectes pour donner les spécifications de la salle qui devait l'accueillir. J'ai émis des appels d'offre nationaux, européens pour respecter les règles des marchés publics. J'ai encadré 2 thèses sur son sujet et contractualisé 2 post-doc. Bien plus qu'un instrument de mesure, ConDOR a été pour moi une école de la recherche, du management et de la conduite de projet. Aujourd'hui, il est opérationnel. Il ouvre des possibilités de recherche nombreuses, Il est au cœur de mon programme de recherche.

3.6. Etude psychophysique du brillant

Comme je l'ai rappelé dans l'introduction de ce manuscrit, la métrologie de l'apparence impose de rassembler d'un côté des mesures optiques, de l'autre des mesures psychophysiques. Pour les mesures optiques, nous avons développé le goniospectrophotomètre primaire et ConDOR. En parallèle de cette activité, j'ai installé un laboratoire dédié à l'étude de la perception visuelle et aux mesures psychophysiques. Les moyens mis en jeu n'ont rien à voir avec ceux développés pour la goniospectrophotométrie. Néanmoins, il était important d'initier la construction de ce laboratoire afin d'être autonome sur la thématique de la métrologie de l'apparence.

La cabine à lumière dédiée à l'étude perceptive du brillant que j'avais construite durant ma thèse a été cédée par le Muséum National d'Histoire Naturelle au Conservatoire National des Arts et Métiers. Des

échantillons de références, dédiés à l'étalonnage des spectrophotomètres, des colorimètres et des brillancemètres ont été acquis. Un spectroradiomètre, un luxmètre, un jeu de filtres neutres ont été affectés à cette salle. Un évier a été installé. Des stores ont été posés aux fenêtres et les murs ont été peints en gris. Progressivement, la salle a pris des allures de laboratoire de vision. En 2013, les premières expériences pouvaient commencer.

Une des conclusions de mes travaux antérieurs était que la sensation de brillant est indépendante de la direction d'illumination bien que la BRDF des surfaces y soit au contraire très sensible. Ce résultat a été appelé la « constance de brillant ». Il s'appuie sur l'hypothèse que notre système visuel est coutumier des changements de position de la source ou de la direction d'observation et qu'il a appris à défalquer les variations radiométriques qui leur sont liées, pour retrouver le brillant propre de l'objet. Pourtant, des travaux antérieurs menés par R. Sève avaient montré que la sensation de brillant produite par un pot de cosmétique était modifiée lorsque le pot est éclairé par une lumière collimatée ou par une lumière diffuse [57]. Il est aussi d'usage, dans les boutiques et restaurants, d'utiliser des éclairages collimatés pour renforcer la sensation de brillant. Cette opération est aujourd'hui de plus en plus courante depuis l'arrivée des LED blanches. La constance de brillant n'est donc peut-être pas si constante que cela.

Après avoir testé l'influence de la direction d'illumination sur la sensation de brillant, nous avons décidé de tester l'influence de la convergence de l'illumination et de l'environnement sur la sensation de brillant. Guillaume Ged a développé ce travail durant son doctorat [53].

La cabine d'observation a été équipée de sources lumineuses permettant de générer 2 ambiances : L'éclairage « diffus » est réalisé par des tubes fluorescents placés derrière 2 diffuseurs. Il simule l'éclairage d'un ciel nuageux. L'éclairage « collimaté » ajoute à l'éclairage diffus une source collimatée placée au-dessus de la tête de l'observateur, et dont l'étendue et l'angle de divergence ont été calculés pour égaler ceux du soleil. Il simule l'éclairage d'un ciel ensoleillé. Les éclairages au niveau de l'emplacement des échantillons sont ajustés pour être égaux dans les 2 configurations. L'intérieur de la cabine est modulaire. Il peut être équipé de deux environnements distincts : un intérieur uniforme et noir, et un intérieur correspondant à un environnement de bureau (Figure 23)

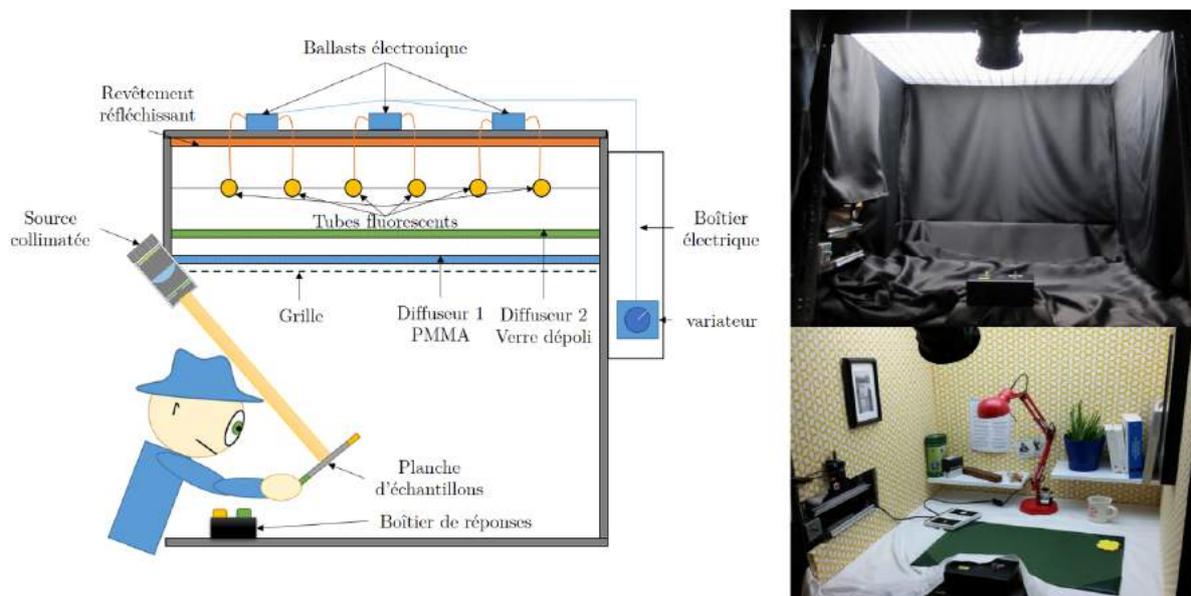


Figure 23. Cabine d'observations visuelles de brillant. Gauche : schéma des configurations d'éclairage. Droite haut : environnement uniforme noir. Droite bas : environnement de type bureau.

La cabine à lumière est employée pour présenter des paires d'échantillons brillants à des sujets « naïfs ». Les échantillons utilisés proviennent d'une échelle d'échantillons brillants commerciale à sept niveaux répartis entre 2 g.u. (très mat) et 95 g.u. (très brillant), fournis par la compagnie suédoise Natural Colour System (NCS). Ils sont gris.

Le protocole utilisé est une comparaison de paires. 29 observateurs ont participé aux expériences. Les évaluations ont été réalisées dans 4 configurations différentes (Noir/Diffus, Noir/Collimaté, Bureau/Diffus, Bureau Collimaté). Pour chaque configuration, les jugements de brillant recueillis sont concaténés et traités par un algorithme de maximisation de la vraisemblance (*Maximum Likelihood Difference Scaling* ou MLDS) basé sur un modèle linéaire généralisé [58]. Nous obtenons, pour chaque

configuration une échelle perceptive pour un observateur global, que nous normalisons par sa valeur maximale. Les incertitudes associées à chaque niveau perceptif sont estimées via une méthode de rééchantillonnage de type « bootstrapping ».

3.6.1 Effets de la convergence de l'illumination sur la sensation de brillant

De manière générale, les échelles perceptives mesurées sont en accord avec les courbes classiques décrivant la perception du brillant décrites par Hunter [8], Obein [29] et Ji [25]. Nous distinguons trois régions correspondant à trois sensibilités différentes des observateurs au brillant spéculaire : une haute sensibilité pour les échantillons mats et très brillants, une sensibilité moindre pour les échantillons intermédiaires.

L'analyse de ces fonctions tracées Figure 24 nous indique en premier lieu que les échantillons brillants, c'est-à-dire d'un niveau de brillant spéculaire supérieur à 50 g.u. sont perçus de manière identique par l'observateur, quelle que soit l'illumination. Cette observation est en accord avec la notion de constance de brillant.

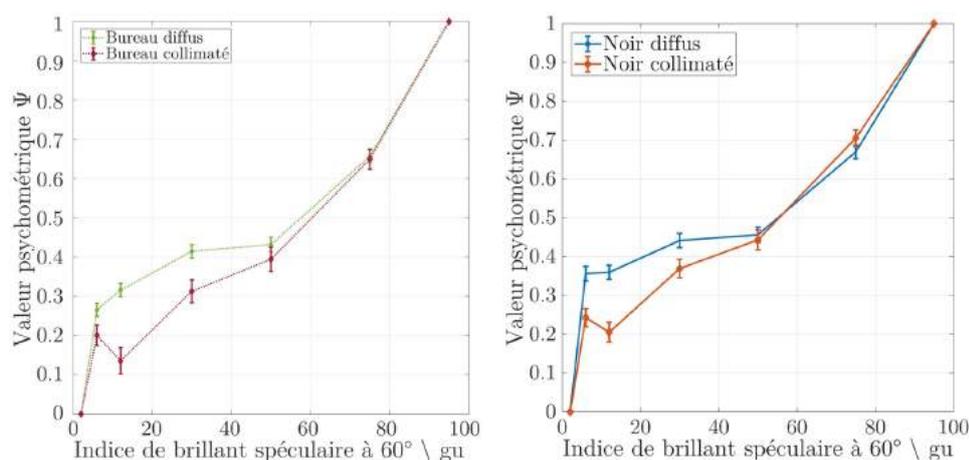


Figure 24. Comparaison des fonctions psychométriques de brillant déterminées sous éclairage diffus et collimaté. A gauche, environnement noir, à droite, environnement bureau. L'effet de la collimation joue sur la perception des surfaces mates.

Dans un deuxième temps, il faut remarquer la différence notable entre les deux types d'éclairage dans le domaine des échantillons mats. Nous y mesurons des valeurs perceptives significativement distinctes pour les échantillons #2, #3 et #4. Les valeurs perceptives mesurées sous éclairage diffus sont supérieures à celles mesurées sous éclairage collimaté. Les échantillons sont plus durs à discriminer dans cette première situation que dans la seconde. Lors des mesures visuelles, les sujets rapportaient d'ailleurs la présence d'un double critère d'évaluation des échantillons à cet endroit, mettant en opposition couleur et brillant des artefacts. Rappelons ici que ces échantillons ont tous la même teinte, leur clarté est peut-être l'élément auquel les observateurs faisaient allusion. L'inversion des échantillons #2 et #3 en terme de valeur psychométrique est bel et bien mesurée. Cela témoigne d'un autre problème, à savoir que le glossmètre n'est pas adapté pour décrire l'apparence de ces échantillons perçus sous éclairage diffus.

Ainsi, il semble que la constance de brillant soit un phénomène perceptif qui permette d'assigner à une surface un niveau de brillant qui lui est propre, indépendamment des variations d'éclairage, qu'elles soient de nature directionnelle ou de nature diffus/collimatée. Après tout, cela n'a rien d'étonnant car nous sommes en permanence amenés à évaluer le brillant d'un objet sous ces différents types d'éclairage. Cependant, cette expérience montre que la constance de brillant a ses limites. Elle ne fonctionne que pour les échantillons brillants. Dans le cas, relativement extrême, de l'évaluation de surfaces mates éclairées sous un éclairage diffus, la constance disparaît. L'apparence brillant de l'échantillon devient alors dépendante de l'éclairage utilisé. Ce résultat est en accord avec les travaux de R. Sève [57]

3.6.2 Effet de l'environnement sur la sensation de brillant

A partir de ces mesures, il est possible d'étudier l'effet de l'environnement sur la sensation de brillant. Cette question qui a beaucoup été étudiée pour la couleur (voir par exemple [59]), n'a en revanche jamais été étudiée pour le brillant dans un contexte d'échantillons réels. Nos résultats montrent que la nature de l'environnement semble jouer un rôle dans notre discrimination d'échantillons brillants. Les

échelles déterminées sous environnement noir présentent systématiquement des valeurs psychométriques plus élevées que celles obtenues en environnement réaliste de type bureau.

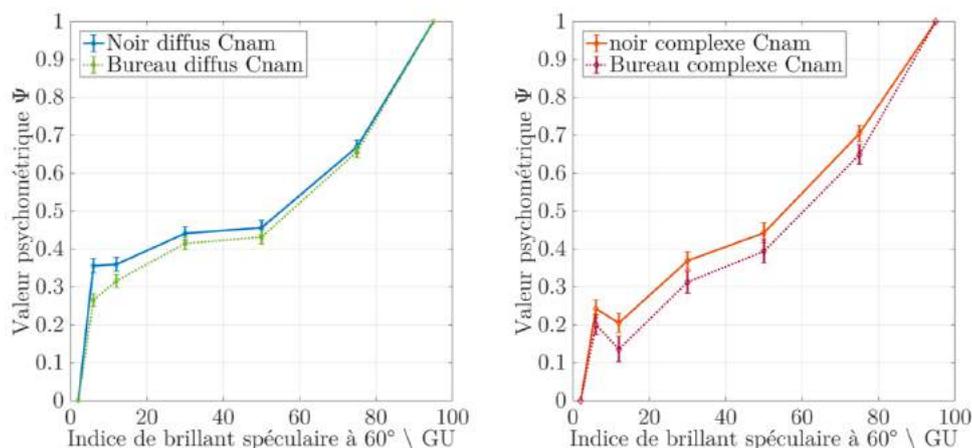


Figure 25. Comparaison des fonctions psychométriques de brillant déterminées dans l'environnement « Noir » et l'environnement « Bureau ». A gauche, éclairage diffus, à droite, éclairage collimaté. L'effet de l'environnement est faible. L'environnement « bureau » augmente la sensibilité au brillant pour les échantillons brillants

Il ne faut pourtant pas conclure hâtivement que l'environnement noir permet d'augmenter la sensation de brillant. L'étude de la pente des courbes montre que la sensibilité de l'observateur est la même pour tous les segments sauf le dernier (échantillons #6 et #7) où elle est plus forte en ambiance bureau. Nos échelles étant normalisées, le segment entre les échantillons #1 et #2 est raccourci pour compenser l'augmentation de sensibilité sur les brillants. Ainsi, il y a fort à parier que sans cette contrainte de normalisation, les deux échelles seraient superposées, à l'exception de l'échantillon #7 qui aurait une valeur supérieure dans l'ambiance bureau par rapport à l'ambiance noire.

L'ambiance « bureau » augmente la dynamique de l'échelle perceptive de brillant. En conséquence, dans la situation d'éclairage diffus, là où l'observateur n'arrive pas à discriminer les échantillons mats en ambiance noire, il en est capable en ambiance réaliste. Il trouve vraisemblablement dans l'environnement d'autres indices qui lui permettent d'accomplir la tâche. Ce résultat, inédit en environnement réel, est en accord avec les constatations de Fleming obtenues en environnement virtuel [60].

3.6.3 Bilan de l'étude psychophysique du brillant

Cette étude, réalisée à l'occasion du projet xDReflect durant la thèse de Guillaume Ged, nous a permis de mettre en service le laboratoire de vision au sein de mon équipe de recherche. Ce laboratoire vient compléter les équipements de goniospectrophotométrie développés durant la première phase de mon activité au sein du Laboratoire Commun de Métrologie. Il nous rend autonome pour étudier et développer des méthodes de mesure de l'apparence des matériaux.

L'intégration d'un laboratoire de vision au sein d'un institut national de métrologie n'est pas chose courante. La métrologie aime les effets répétables et force est de constater que le vivant, surtout quand il est humain, n'est pas un instrument d'une formidable stabilité. Pourtant, le système visuel humain est, en termes de sensibilité et de dynamique, largement supérieur à tout système d'instrumentation. Il est donc, pour le métrologue, source d'inspiration et de challenge. A force de prêcher ce discours et d'expliquer la démarche, je pense avoir réussi à changer un peu les mentalités au sein de l'institut, au point que ce laboratoire de vision est maintenant accepté, voir présenté comme un atout lors des visites. C'est une bonne chose.

3.7. Coordination de la métrologie de l'apparence au niveau Européen

Avant de clore cette partie sur la mise en œuvre de mon activité de recherche, je souhaite, bien que cela ne soit pas à strictement parler de la recherche, mentionner une activité annexe qui m'occupe depuis 2011 et qui a, je pense, sa place dans ce manuscrit. Il s'agit du rôle d'animateur et de coordinateur de projet que j'occupe au sein de la métrologie Européenne, dans le cadre des appels à projet EMRP (European Metrological Research Program) et EMPIR (European Metrological Program for Innovation and Research).

En effet, en 2007, EURAMET et la commission européenne lance le programme de recherche EMRP, dans le cadre de l'article 169 du traité européen. EMRP vise à renforcer la collaboration entre les instituts nationaux de métrologie membres de EURAMET, à leur faire partager les équipements de mesure et à augmenter l'impact de la recherche produite. L'objectif global du programme EMRP est d'accélérer l'innovation et la compétitivité en Europe tout en continuant à soutenir une recherche qui améliore la qualité de la vie.

En pratique, EMRP propose des appels à projet sur des thématiques annoncées : Système International des unités, Santé, Énergie, Industrie, Environnement et appel blanc. 2 thématiques sont pourvues chaque année selon une rotation préétablie.

3.7.1 *xDReflect, première expérience de coordination Européenne*

En 2012, le goniospectrophotomètre de référence et ConDOR sont quasi-opérationnels. Au niveau de l'équipe, nous sommes prêts. 2012 est l'année de l'appel sur la thématique « industrie ». C'est le moment idéal pour nous lancer. Nous faisons une proposition de JRP (Joint Research Project) sur la thématique de la « métrologie de l'apparence ».

Monter un tel projet n'est pas une petite affaire. Le budget recommandé par la commission européenne est de 3M€ par projet. Il s'agit donc de faire une proposition ambitieuse, portée par un consortium crédible. C'est ainsi, qu'avec le soutien de mes collègues européens, je vais monter le JRP [xDReflect](#) (multidimensional reflectometry for industry), le défendre devant le jury du programme EMRP, et me classer 2^e des 20 propositions qui avaient été sélectionnées parmi les 83 propositions initiales pour participer à la phase finale. Le projet a donc été financé. L'aventure est lancée.

xDReflect réunit 7 laboratoires nationaux de métrologie européens (France, Allemagne, Finlande, République Tchèque, Italie, Espagne, Suède), 1 laboratoire national de métrologie hors Union Européenne (Nouvelle Zélande), 2 laboratoires universitaires (Université catholique de Leuven, Université d'Alicante) et un institut de recherche industriel (Innventia), soit un total de 11 partenaires. Autour de ce consortium gravitent 31 collaborateurs industriels, dont des grands noms comme Audi, BASF, Merck, St Gobain, LVMH ou Konika-Minolta. Le budget du projet est de 2,8 M€ répartis sur 3 ans.

Le projet a pour objectif de mettre à niveau la métrologie dans le domaine des mesures de la réflectance et des attributs visuels de l'apparence. Il s'agissait de s'attaquer à 4 objectifs en particulier :

- Améliorer les références métrologiques et les équipements de mesure primaires pour la mesure bidirectionnelle de la réflectance (BRDF)
- Progresser dans notre compréhension de la corrélation entre la BRDF et l'apparence visuelle des surfaces.
- Développer des modèles, des méthodes d'échantillonnage et des méthodes d'archivage pour les mesures de BRDF.
- Développer des procédures de mesure et de nouveaux étalons de transfert permettant de favoriser l'émergence d'une nouvelle génération d'instruments de mesure de l'apparence visuelle.

Le projet est structuré en 3 groupes de travail thématiques (WP1, WP2, WP3) et 2 groupes de travail transversaux (WP4 et WP5). Les groupes de travail thématiques ont pour objectif de développer de nouveaux équipements de mesures, de nouveaux protocoles de caractérisation et de nouveaux artefacts dans le domaine du goniochromatisme (WP1), du brillant (WP2) et de la fluorescence (WP3). Les groupes de travail transversaux s'occupent de sujets qui sont communs et utiles aux 3 groupes thématiques. Il s'agit des outils mathématiques (WP4) et de la mesure de la perception visuelle (WP5). A cette structure s'ajoute un groupe travaillant pour la valorisation et l'impact du projet (WP6) et un groupe de management (WP7)

Le CNAM a pris la coordination de ce projet européen et le pilotage du groupe 2, dédié à l'étude du brillant. Ces fonctions se sont imposées naturellement car elles se placent dans la continuité du travail de recherche que mon équipe développe depuis 6 ans au sein du laboratoire. Elles confortent également la position référente du laboratoire dans le domaine de la métrologie du brillant au niveau Européen.

Le projet xD-Reflect a débuté le 1^{er} septembre 2013 et s'est terminé le 31 août 2016. Je reporte ci-dessous les principaux résultats du projet.

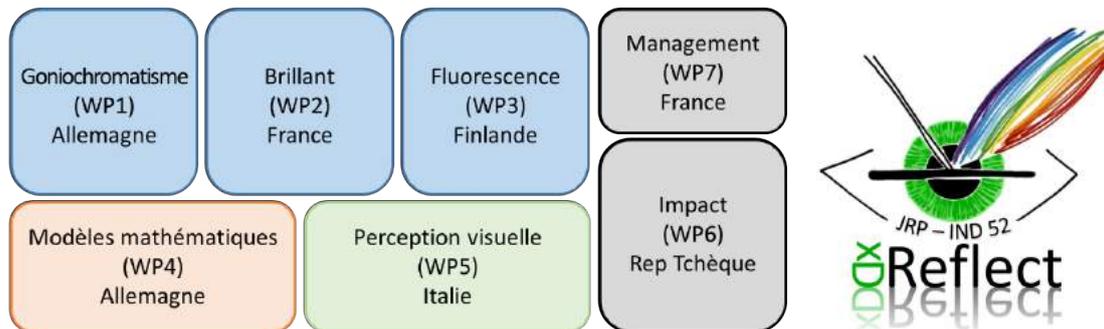


Figure 26. Structure du projet : xDReflect est composé de 6 workpackages. Le CNAM est leader du WP2 (Brillant) et WP7 (Management). A droite, le logo du projet

Une comparaison des goniospectrophotomètres a été réalisée pour la géométrie normalisée 0/45 dans la gamme 380 – 780 nm. 8 Instituts Nationaux de Métrologie ont participé (INM). Les mesures ont été réalisées sur 3 niveaux de gris (88 %, 20 % et 5 %) et pour 3 tuiles colorées (rouge, verte et bleue). Il s'agissait de la première comparaison de BRDF de grande ampleur. Les résultats ont montré que les laboratoires maîtrisent la quantité. Ils ont pointé aussi les faiblesses de nos machines, ce qui nous a permis de cibler les pistes de progression. Cette comparaison a été l'occasion de confronter notre tout nouveau goniospectrophotomètre primaire aux autres goniospectrophotomètres européens de premier plan.

Des équipements commerciaux prêtés par les partenaires industriels du projet ont également été testés sur les mêmes échantillons. Ils présentaient des incertitudes de mesure environ 10 fois supérieures à celles des INM. Ce résultat nous a satisfaits. Il confortait le fait que nous maîtrisions suffisamment la quantité pour répondre au besoin industriel.

Toujours dans le même esprit, d'autres comparaisons plus intimes ont été réalisées. La comparaison précédente a été élargie dans l'infrarouge jusqu'à 2 100 nm pour 2 des participants (Allemagne et Espagne) et a montré un accord entre eux sur tout le domaine. Une comparaison de mesure de BRDF dans la direction spéculaire a été réalisée entre 2 autres partenaires (France et Belgique) et a permis de mettre clairement des chiffres sur l'effet de l'angle solide de détection sur la mesure pour les échantillons brillants. Une autre comparaison a eu lieu sur la mesure du facteur de luminescence bidirectionnel, la première du genre (Finlande – Espagne).

En plus des 12 artefacts de haute qualité qui ont été développés pour la comparaison des goniospectrophotomètres, une nouvelle échelle de brillant a été fabriquée. Elle est en verre. Elle se compose de 48 artefacts. Elle présente 4 niveaux de brillant, 3 différents types de rugosité, 3 niveaux de clarté et 2 indices de réfraction. Cette échelle est le fruit d'une collaboration entre le Cnam et St Gobain, collaborateur du projet. La BRDF de ces échantillons a été mesurée et des modèles ont été testés.

Plus de 80 échantillons présentant un effet de « sparkling » ont été réalisés. Ils ont différentes couleurs, différents niveaux de « sparkling » et différents types de « sparkling ». Ces échantillons ont été développés en collaboration avec Azko Nobel et Merck. Ils ont permis l'étude de la mesure du « sparkling ». Enfin, une nouvelle génération d'étalons de transfert pour la mesure de la fluorescence a été réalisée afin de réduire le problème de non lambertianité découvert à l'occasion du projet.

Chaque partenaire, en fonction de ses centres d'intérêt, a saisi l'opportunité de ce projet pour améliorer les performances de son goniospectrophotomètre. Ainsi, nous avons maintenant un nouveau « gonio » absolu qui rejoint la famille (Rép Tchèque). L'Allemagne, l'Espagne et la Nouvelle Zélande ont étendu leur domaine spectral dans l'UV et l'IR. De nouvelles détections capables de mesurer des femto-ampères ont été développées (Rép Tchèque, Nouvelle Zélande). La France a amélioré la résolution angulaire de son « gonio » et est passée sous 0,1 μ sr. L'Italie, l'Espagne et l'Allemagne ont ajouté des caméras CCD sur leurs équipements pour étudier le *sparkle*. La Finlande et l'Espagne ont modifié leur « gonio » pour mesurer le facteur de luminescence bidirectionnel. Donc d'une manière générale, nous pouvons dire qu'xDReflect a permis de faire un grand saut en avant dans le domaine de la mesure de la BRDF au plus haut niveau et de repousser l'état de l'art un peu plus loin.

Côté fluorescence, le facteur de luminescence bidirectionnel a été mesuré sur les artefacts classiques utilisés dans l'industrie. Ces mesures ont permis de prouver que le facteur de luminescence n'est pas lambertien. Ce comportement était suspecté depuis un moment par les INM mais n'avait jamais été mis en évidence. Grâce à xDReflect, c'est fait et c'est important car cela va permettre de diminuer les incertitudes de mesures pour cette quantité.

A côté de ces milliers de mesures, nous avons également généré des modèles de BRDF. Une nouvelle proposition de représentation de la BRDF a été publiée. Elle s'appuie sur l'apparence visuelle de la forme 3D de la BRDF. Nous avons également résolu le problème de l'échantillonnage des mesures pour la caractérisation des surfaces goniochromatiques de type interférométrique. Nous avons montré qu'avec 10 configurations angulaires bien choisies, nous pouvons prédire la couleur de l'échantillon quelle que soit la direction d'illumination et la direction d'observation.

Nous avons réalisé des échelles visuelles de brillant et de *sparkle*. Nous avons réalisé des comparaisons de ces échelles entre 2 laboratoires. Ces échelles attendent maintenant que nous développons les quantités radiométriques appropriées qui permettront d'établir des corrélations linéaires entre la sensation et la mesure. Ceci permettra de lancer de nouveaux instruments sur le marché et de soutenir les industriels dans leur contrôle qualité.

Enfin, nous avons publié une proposition pour la mesure du « sparkling », basée sur la combinaison de 2 paramètres extraits de mesures à haute résolution angulaire de la BRDF de ces échantillons.

Voilà, résumé en une page, les grandes avancées réalisées dans le domaine de la mesure de l'apparence visuelle par xDReflect. Bien sûr, cela n'est qu'un bref aperçu. Au final, xDReflect c'est presque 300 mois de travail cumulés sur 3 ans et répartis sur onze partenaires. C'est 47 publications, 31 présentations orales dans des congrès internationaux, 4 workshops, 1 tutorial CIE. Le projet s'est terminé en septembre 2016 par l'organisation du 4^{ème} symposium CIE sur l'apparence visuelle. Cet événement a eu lieu à Prague et a rassemblé 162 personnes provenant de 27 pays.

En tant que coordinateur du projet et leader du workpackage sur le brillant, j'ai été au cœur d'xDReflect. 127 des 128 livrables prévus au contrat ont été livrés à l'EMRP. Le projet s'est très bien déroulé. Il a été évalué à mi-parcours comme « 8 - Strong/dominant » sur le plan technique et comme « 3 - Substantial » pour l'impact scientifique et sociétal. Des liens forts se sont créés entre les partenaires et aucune dispute n'a eu lieu. Ces liens vont tenir dans le temps.

Cependant ; ce bilan positif est à mettre en regard du travail important que demande la coordination d'un projet de cette envergure. Pour rester uniquement factuel, je résume en quelques chiffres l'activité liée à la coordination :

En termes de travail rédactionnel, la coordination d'xDReflect requiert :

- 1 PRT (Project Research topic), (6 pages)
- 1 proposition de JRP(80 pages)
- 6 rapports de progression intermédiaire (25 pages, 27 pages, 26 pages, 25 pages, 26 pages, 26 pages)
- 6 résumés publiables qui ont évolué de 3 à 4 pages au cours du projet
- 1 document d'auto évaluation pour la *mid-term review* (7 pages)
- 1 résumé publiable (7 pages)
- 1 rapport final publiable (50 pages)
- 3 newsletters destinées aux collaborateurs (2 pages chacune)

En termes de travail de relecture, la coordination d'xDReflect requiert :

- Lecture, correction de 3 propositions de REG (*Research excellence Grant*), 46 pages, 25 pages, 12 pages
- Lecture des 3 x 6 = 18 rapports de progression REGs (20 pages chacun)
- La réception et souvent discussion des 127 livrables.

En termes de travail de représentation, la coordination d'xDReflect requiert :

- la négociation et la rédaction du contrat avec l'EMRP, qui n'est pas une mince affaire.
- la rédaction du consortium agreement
- la préparation de la *Review Conference* et la rédaction du poster qui lui est associée.
- la préparation et l'animation de 6 meetings de progression (en moyenne 25 participants)
- la préparation de l'évaluation à mi-parcours et la présentation orale qui lui est associée.
- le maintien du lien avec les collaborateurs du projet.

Il s'agit là d'un travail substantiel, quotidien, et impliquant de nombreuses prises de décisions, qui est à mon avis comparable au travail d'encadrement d'une thèse. En contrepartie, la coordination d'un projet comme celui-ci occasionne un rayonnement scientifique important du laboratoire et tout particulièrement de mon équipe. Depuis xDReflect, nous sommes très bien identifiés au niveau européen et mondial. Pour preuve, j'ai eu l'honneur d'être désigné président du conseil scientifique du 4^{ème} symposium CIE sur l'apparence visuelle, qui a rassemblé 162 personnes provenant de 27 pays.

3.7.2 *BiRD, second projet européen*

xD-Reflect a produit beaucoup de science. Cette science doit servir et, puisque nous étions financés dans le cadre de la thématique « industrie », la science produite doit servir l'industrie Européenne.

Les travaux réalisés dans le WP1 (*Gonichromatism* et *Sparkle*) et WP2 (Brillant) peuvent rapidement être intégrés dans l'industrie, monnayant un effort de simplification et de recadrage, que j'ai proposé, rédigé et défendu dans un nouveau projet, toujours soutenu par mes partenaires européens.

Après un échec en 2016, ce projet, intitulé « **Bi-directionnal Reflectance Definitions** » (BiRD) a passé les sélections en 2017 et a été financé dans le cadre du programme européen EMPIR dans la thématique « pré-normalisation ». [BiRD](#) est un projet de moindre envergure qu'xDReflect, qui regroupe 11 partenaires (France, Espagne (x2), Nouvelle Zélande, République Tchèque, Suisse, Belgique, Suède, Finlande, Allemagne) pour un budget de 536k€ et 76 mois de travail sur 3 ans. L'objectif de ce projet est de clarifier la manière dont les mesures de BRDF doivent être réalisées pour caractériser les échantillons goniochromatiques, brillant et sparkly. Il s'agit également de proposer une méthode d'archivage des mesures de BRDF, afin de simplifier la communication entre les instruments de mesure et les utilisateurs.

Je coordonne ce projet, qui a démarré le 1^{er} mai 2017 et courra jusqu'au 30 avril 2020. Mon équipe s'investira essentiellement dans le travail sur la mesure de la BRDF et la mesure du brillant, pour rester en accord avec notre expertise dans ces domaines. Etant directeur du TC2-85 de la CIE, qui traite de ces questions de BRDF, il y a une cohérence dans le programme de ce JRP, le programme du TC2-85, et les activités de mon équipe.

3.8. Mise en œuvre - Epilogue

Ainsi se clos cette partie sur la mise en œuvre de mon activité de recherche sur la mesure de l'apparence, depuis mon recrutement comme maître de conférences en Septembre 2006. On peut dire qu'elle s'est déroulée en 2 temps : Une première phase pendant laquelle j'ai développé les instruments nécessaires à ma recherche : le goniospectrophotomètre primaire, CondOR et le laboratoire de vision. Une seconde phase où nous avons commencé à produire des résultats et à animer la discipline.

J'ai bénéficié de la confiance du conseil scientifique « Température et Rayonnement » du LNE et du financement de la métrologie française au travers d'un projet national pour la première phase. Ce soutien était indispensable pour équiper le laboratoire et initier les activités

J'ai ensuite recherché les crédits auprès des programmes de recherches européens, et en particuliers auprès d'EMRP et EMPIR, qui sont particulièrement bien ciblés pour mon activité de recherche en métrologie. J'ai pu ainsi encadrer Guillaume Ged pour sa thèse, et recruter des chercheurs contractuels pour m'épauler (plus de 36 mois de contractualisation à l'heure actuelle). Il m'a fallu en contrepartie prendre le leadership de l'activité au niveau européen, ce qui représente un surcroît d'activité non négligeable.

En parallèle de cette activité de recherche, j'ai accepté un certain nombre de responsabilités collectives nécessaires pour faire vivre l'activité photométrie et spectrophotométrie au niveau national (responsable de l'unité d'étalonnage photométrie, responsable amont du département photonique, responsable de la division 2 de CIE-France) et international (responsable CIE-France, représentant français au sein des comités de travail Euramet-PR et CCPR, directeur de comité technique à la CIE, coordinateur de projets européens, pilote de la comparaison clef Euramet-PR-K6).

En mars 2018, les choses sont bien engagées : BiRD assure un financement et une pérennisation de mon équipe et de ma thématique de recherche jusqu'en avril 2020. Et j'ai des idées qui pourront intégrer et bâtir de futurs projets pour les années à venir. Ce sont ces idées qui composent le programme de recherche que je propose de développer dans la dernière partie de ce manuscrit, intitulée « Projets

4. Projets

Mon projet de recherche se situe dans la ligne directrice de ce que j'ai entrepris jusque-là. L'objectif poursuivi est de fournir des éléments métrologiques, conceptuels, perceptifs ou mathématiques pour progresser dans le domaine de la mesure de l'apparence des matériaux. Il est appliqué, c'est-à-dire qu'il est motivé par l'envie de servir le besoin industriel. Il se situe volontairement en amont de ce besoin, mais avec une anticipation temporelle raisonnable. J'estime en gros que les concepts développés doivent devancer de 5 à 7 ans le moment où ils seront réellement déployés dans l'industrie. Les secteurs industriels impactés par cette recherche sont nombreux car le contrôle de l'apparence est trans-sectoriel. Les principaux domaines sont l'industrie automobile, les cosmétiques, le textile, l'alimentaire, la réalité virtuelle, l'impression 2D et 3D, les objets de luxe (maroquinerie, bijoux, smartphone).

J'écris ce programme avec optimisme, en considérant que demain, je conserverai le même nombre de permanents dans l'équipe et que le jeu de la recherche sur contrat européen jouera toujours en ma faveur et m'offrira l'attractivité et le financement me permettant de contractualiser des doctorants et post-doctorants afin de poursuivre les efforts engagés et mener à bien les propositions de recherche développées dans ce chapitre.

Je le développe ci-dessous en 5 axes, qui, s'ils représentent chacun une thématique indépendante, tireront bénéfice d'évoluer en parallèle.

- Étudier les liens entre microtopographie de surface, BRDF et perception visuelle du matériau
- Aller plus loin dans la compréhension de la BRDF
- Développer des références de mesure pour la BSSRDF
- Offrir un service de mesure
- Progresser dans la mesure du brillant

4.1. Étudier les liens entre microtopographie de surface, BRDF et perception visuelle du matériau

ConDOR mesure la BRDF des surfaces avec une résolution et une dynamique égale à celle de l'observateur humain. Ainsi, nous disposons aujourd'hui du signal qui entre dans l'œil, avec toute sa complexité, avec toute sa vérité. C'est à partir de ce signal que le système visuel construit l'apparence de la surface et identifie la nature du matériau. Qu'est ce qui fait que lorsque je regarde une table d'école, je n'ai pas besoin de la toucher ou de la sentir pour savoir qu'elle n'est pas en bois, mais qu'il s'agit d'une feuille de papier collée sur un support ? Quels indices analysent mon cerveau pour diagnostiquer instantanément et avec certitude que cette poire est en plastique et celle-ci réelle ? (Figure 27)



Figure 27. Il est très facile pour l'observateur de trouver la nature du matériau à partir de l'information visuelle.

Nous devons progresser sur cette question. C'est important. La réponse intéresse le monde de la réalité virtuelle, des sciences cognitives, de l'impression 2,5D et 3D.

Les travaux réalisés par Guillaume Ged durant son doctorat ont permis d'amorcer cette recherche. En collaboration avec St Gobain Recherche (Auvervilliers, 93), il a développé des échantillons en verre dont la microtopographie de surface, la clarté et l'indice de réfraction sont contrôlés. L'originalité de ce travail vient du fait qu'il a été capable, sur ces échantillons à 3 degrés de liberté (microtopographie, clarté et indice de réfraction), de faire varier les paramètres un à un. Ainsi, pour un indice et une

microtopographie donnée, il fait varier la clarté sur 3 niveaux, noir, gris et blanc. Pour une microtopographie et un niveau de clarté, il dispose de 2 indices de réfraction. Enfin, pour un indice et une clarté, il propose 6 microtopographies réparties en 2 familles, l'une présentant une rugosité de type « blanche », l'autre présentant une rugosité de type « passe-bas ». Au total, c'est presque 40 échantillons qui ont été fabriqués [61] et dont la microtopographie et la rugosité ont été mesurés [62].

La mesure de ces échantillons avec ConDOR a permis de mettre en évidence que l'information sur la rugosité (blanche ou passe-bas) est présente dans la BRDF, lorsque celle-ci est mesurée avec une résolution angulaire égale à celle de l'œil humain [63]. Cela signifie que le système visuel a accès à l'information optique qui permet de remonter à l'information sur la rugosité et/ou la microtopographie de la surface. Le fait-il ? Et si oui, comment ? Sous quelles conditions ?

Nous devons travailler sur ce sujet et étudier ce lien entre microtopographie de surface, BRDF et perception. La mise en œuvre de cette recherche nécessite de :

- Générer des surfaces « école », à rugosité contrôlée,
- Acquérir un dispositif de mesure de microtopographie (ou initier des collaborations),
- Maintenir ConDOR à niveau et le rendre plus rapide, plus autonome, plus convivial
- Développer des modèles mathématiques pour modéliser la BRDF issue des mesures de ConDOR
- Évaluer les propriétés visuelles des surfaces « école »

Une fois ce travail réalisé sur des surfaces « école », nous le réitérerons sur des matériaux réels (bois, pierre, feuille, textile, peau) afin de trouver les paramètres physiques à l'origine de la perception des matériaux

Ce travail de recherche est déjà engagé sous plusieurs feux. Guillaume Ged a généré des surfaces « école » en verre. Marine Page a généré des surfaces « école » en résine pour l'étude de la reproduction de l'apparence des matériaux mates (Thèse de Marine Page : *Amélioration des procédés d'impression en relief et de leurs caractéristiques d'apparence (couleur et brillant) : application à la conservation-restauration du patrimoine*, démarrée en mai 2016 sous la direction d'Annick Razet, co-encadrée par le C2RMF, Océ Printers et le Cnam). Nous devons élargir cette étude à tous les matériaux dans les années à venir.

4.2. Comprendre la BRDF

Je l'ai relaté dans la partie précédente, la métrologie mondiale a réalisé des progrès significatifs durant ces 5 dernières années dans le domaine de la goniospectrophotométrie grâce notamment au projet de recherche xDReflect. Nous avons participé à cet effort. Quand la métrologie progresse, elle ouvre de nouvelles questions. En ce qui nous concerne, les mesures de ConDOR nous ont ouvert de nouvelles perspectives que nous souhaiterions étudier.

4.2.1 BRDF et speckle

La BRDF a une allure continue et lisse lorsqu'on la mesure avec un instrument peu résolvant d'un point de vue angulaire. Cependant, si l'on augmente la résolution angulaire, on s'aperçoit que la BRDF devient beaucoup plus complexe et non lisse. Des mesures réalisées sur le pic spéculaire d'un échantillon brillant issu de l'échelle NCS avec 2 instruments présentant une résolution angulaire différente, permettent de s'en convaincre aisément (Figure 28).

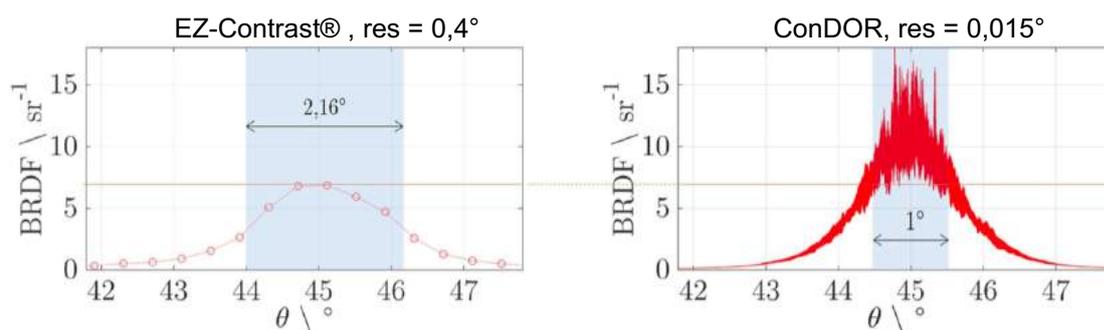


Figure 28. Coupe dans le plan d'incidence de la BRDF de l'échantillon #6 de l'échelle NCS ($\text{gloss}_{60^\circ} = 75 \text{ gu}$) pour une direction d'illumination de 45° . Seule la zone du pic spéculaire est montrée. A gauche, mesure avec l'EZ-Contrast (résolution 0.4°). A droite, mesure avec ConDOR (résolution $0,015^\circ$).

ConDOR mesure le signal photométrique, c'est-à-dire intégré sur le domaine spectral défini par la courbe $V(\lambda)$ de l'observateur standard photopique. Imaginons maintenant qu'à la finesse angulaire de ConDOR, nous additionnions une finesse spectrale ? L'illumination prendrait alors l'allure d'une onde cohérente, que la surface rugueuse va diffracter, générant ainsi des motifs granuleux qu'on appelle communément "speckle". Dans un tel contexte, que mesure-t-on vraiment ? Est-ce la BRDF ? Est-ce une autre quantité ? Et si oui, comment établir la frontière entre BRDF cohérente et non cohérente ?

Aujourd'hui (et en théorie), ConDOR n'a pas une résolution spectrale suffisamment fine pour pouvoir faire apparaître le speckle lorsqu'il mesure la BRDF des surfaces. Cependant, des essais réalisés en substituant la source lumineuse de l'instrument par un laser HeNe à 633 nm ont clairement montré le speckle dans les mesures. Mais là n'est pas l'intérêt. Ce qu'il faut, c'est se mettre dans une situation où nous pouvons voyager entre la situation de mesure réalisée dans des conditions type « laser » et dans des conditions type « lumière incohérente », et étudier le comportement de la BRDF dans la transition.

Réaliser une telle étude permettrait de mieux comprendre la BRDF elle-même, en tant que quantité radiométrique, de faire le lien entre les mesures en lumière cohérente et incohérentes, et d'anticiper les futurs problèmes qui ne risqueront pas de survenir lorsque les fabricants de spectrophotomètres commenceront à augmenter la résolution angulaire de leurs instruments. Notons à ce sujet que la société Rhopoint a mis sur le marché il y a 2 ans un instrument (Rhopoint IQ Flex 20) capable de mesurer des profils de luminance dans le plan d'incidence avec une résolution angulaire de $0,1^\circ$. D'autres suivront.

Nous allons travailler sur ce sujet. S'il n'est pas envisageable de diminuer la largeur de bande sur ConDOR jusqu'au nanomètre, il est probablement possible de descendre à une dizaine de nanomètres, si tant est que l'échantillon soit modérément diffusant. Nous parlons là de mesures extrêmes, qui sont, par le seul fait qu'elles sont réalisées, déjà originales ! Leur exploitation permettra de faire avancer la compréhension de la BRDF.

4.2.2 BRDF des surfaces courbes

Les mesures de BRDF sont réalisées sur des surfaces planes. Mais il existe dans la nature un certain nombre de surfaces qui ne se trouvent pas planes. La catégorie des fruits et légumes en est un exemple. De plus, il faut admettre que la plupart des surfaces, si elles sont caractérisées planes, sont exploitées courbes. C'est le cas de la carrosserie automobile, du cuir, du mobilier.



Figure 29. De nombreuses surfaces ne se trouvent pas à l'état plan. D'autres sont mesurées à plat, mais exploitées courbées. Le lien entre les mesures dans la situation courbe et plane nécessite des opérations de convolution ou déconvolution qui ne sont pas établies et validées aujourd'hui et qui présentent un intérêt pour l'industrie

Comment prédire et rendre sur écran l'apparence d'une surface courbe à partir d'une mesure réalisée sur surface plane ? Comment comparer des mesures de BRDF réalisées sur des tomates ayant des rayons de courbure différents ?

La réponse à la première question peut sembler faisable en utilisant un algorithme de lancer de rayon et une décomposition de la surface en petits éléments. C'est d'ailleurs ce qui est fait aujourd'hui. Cela n'en est pas moins insatisfaisant dans de nombreux cas, comme par exemple pour simuler une surface présentant un effet de sparkle.

La réponse à la deuxième question est largement plus complexe, puisqu'elle implique l'utilisation d'un procédé de déconvolution entre la fonction d'appareil de l'instrument de mesure et la courbure de la surface. Cette opération n'est pas triviale. Régulièrement évoquée quand il s'agit de mesurer le brillant des fruits, elle n'a encore jamais été réalisée.

ConDOR a une fonction d'appareil d'une finesse inégale. On peut raisonnablement assumer que cette fonction est un Dirac au regard du pic spéculaire d'une tomate modérément brillante. Dans ce contexte la déconvolution devient envisageable. Elle peut ensuite être testée pour différentes fonction d'appareil,

et validée face à des mesures de ConDOR réalisées avec une résolution angulaire dégradée. Le chemin inverse est également possible. Nous pouvons concevoir et valider des algorithmes de convolution de BRDF par des surfaces courbes et valider les résultats par des mesures.

Nous avons au laboratoire tous les éléments pour avancer sur cette problématique. Nous devons nous lancer. Nous allons nous lancer.

4.2.3 Propagation de la BRDF de surfaces sub-micrométriques vers des surfaces centimétriques ?

L'apparence d'un objet dépend de la distance à laquelle on se situe par rapport à cet objet. Si l'on prend l'exemple d'un textile, il apparaît uniforme vu à une distance de quelques mètres. Il est texturé vu à une distance de quelques centimètres. Il est filamenteux vu à une distance de quelques millimètres. Comment mesurer l'apparence de ce matériau qui change en fonction de la distance d'observation ?

La solution envisagée est de mesurer la BRDF de la fibre de textile car c'est elle qui est à l'origine de l'apparence du matériau complet. Ensuite, connaissant le motif de tissage, il doit être possible de simuler l'apparence vue de n'importe quelles distances. Les algorithmes de lancer de rayon, en prenant en compte les réflexions multiples de la lumière entre les fibres, les mailles et les courbures, peuvent permettre de rendre l'apparence de l'objet macroscopique, à partir de son apparence microscopique. Les applications de cette recherche sont faramineuses. On parle de prototypage virtuel. Il s'agit de prédire l'apparence du vêtement complet à partir de la mesure réalisée sur la fibre. Ainsi, on peut le voir avant même de l'avoir tissé. Cette approche est également prisee dans le domaine des cosmétiques, où l'on aimerait prédire l'apparence de la chevelure à partir de la mesure réalisée sur un seul cheveu. Une autre application importante concerne le domaine de l'agriculture, où l'on aimerait pouvoir faire le lien entre les paramètres optiques de la feuille et l'apparence du champ surveillé par des satellites !

Devant ces applications très variées et à l'impact hautement économique, la science a avancé et il existe aujourd'hui de nombreux algorithmes dont la sophistication est élevée, qui fournissent de bons résultats sur écran, pour ce qui est du textile, ou de l'architecture. Mais l'écran n'est pas la réalité. Ainsi, même lorsque le prototypage virtuel est validé, il arrive fréquemment que le produit réel soit décevant.

Pour progresser, les développeurs de modèles de rendu ont besoin de valider leurs algorithmes sur des mesures réalisées sur des objets réels.

Notre goniospectrophotomètre peut fournir des mesures de la BRDF d'une surface illuminée variant de 5 mm de 20 mm de diamètre, ce qui correspond en termes de simulation, à une distance d'observation variant de 2,5 m à 10 m. Nous sommes donc limités à l'apport de mesures correspondant à des distances d'observation éloignées. Mais il va exister très bientôt un équipement de très haut niveau qui pourra mesurer la BRDF de surface de quelques 1/10e de millimètre de diamètre. Cet équipement est en cours de montage au laboratoire national de métrologie Suisse (METAS). Ainsi, la mise en commun des mesures fournies par les 2 instruments pourrait permettre de couvrir toute la gamme d'observation, de la fibre au canapé. Ces mesures seront d'un grand support pour la communauté des scientifiques travaillant sur les modèles de rendu.

Une telle recherche n'est donc pas développable de façon autonome dans l'équipe. Elle impose la mise en place de collaboration. Cependant, elle est faisable et utile. Nous comptons participer activement à cet effort collectif.

4.2.4 Influence de l'instrument dans la mesure de la BRDF pour des surfaces présentant des effets visuels spécifiques de type brillant ou scintillement

L'équation de mesure de la BRDF a été développée au début de ce manuscrit (voir §3.4.1, équation (1), p.31). Dans cette équation apparaît au dénominateur un angle solide Ω . Cet angle solide est considéré comme infinitésimale. Dans la réalité, il ne l'est pas. Il dépend de la distance Echantillon / Détecteur et de la taille du diaphragme de la détection.

Il apparaît donc que la valeur de la BRDF mesurée dépend de la conception optique de l'instrument ? La réponse est oui et c'est un problème, notamment lorsqu'il s'agit de comparer des mesures réalisées sur des équipements n'ayant les mêmes angles solides. C'est d'ailleurs le rôle du TC2-85 de la CIE, intitulé « Recommendation on the geometrical parameters for the measurement of the BRDF » que de recommander des angles solides normalisés, adaptés à chaque catégorie de surface mesurée.

Il faut néanmoins dédramatiser ce problème. Lorsque les variations angulaires de la BRDF sont faibles devant l'angle solide de la détection de l'appareil, l'effet de Ω disparaît. Ainsi, pour des mesures

réalisées sur un échantillon de spectralon®, il a été montré que l'accord entre 2 appareils peut être meilleur que 0,5% en relatif, bien qu'ils aient des angles solides de collections très différents [64].

Cependant, lorsque les variations angulaires de la BRDF sont rapides devant l'angle solide de la détection, on ne peut négliger cet effet. Il devient même prépondérant dans le cas de mesures réalisées dans la direction spéculaire, en particulier pour des surfaces brillantes. Des écarts de 300% ont ainsi pu être observés entre 2 instruments métrologiques dans un cas extrême [65].

ConDOR a une fonction d'appareil dont la largeur angulaire peut être considérée comme négligeable devant la plupart des matériaux, hormis les miroirs ou échantillons très brillants. Cette résolution peut être dégradée si nous augmentons volontairement la convergence du faisceau incident. Nous pouvons alors étudier l'évolution de la BRDF mesurée en fonction de la largeur de l'angle solide. Le résultat de cette étude intéresse les fabricants de goniospectrophotomètres et de brillancemètres. Il est également attendu par le TC2-85 de la CIE pour pouvoir statuer sur les angles à utiliser. Nous sommes les seuls à pouvoir fournir des mesures fiables à la communauté mondiale sur ce sujet. La réalisation et la publication de ces mesures sont à mon programme.

Voilà en quelques points d'action ciblés les réponses que nous pouvons apporter sur le sujet de la mesure de la BRDF. Ces réponses sont attendues pour lever des verrous actuels, qui entravent les progrès de secteurs industriels importants, comme celui de la réalité virtuelle, de la peinture automobile ou du prototypage virtuel.

4.3. Développer une nouvelle référence de mesures spectrophotométriques dédiées à la caractérisation de la translucidité :

L'apparence d'une surface est décrite par ses attributs visuels, que sont la couleur, le brillant, la texture et la translucidité. La couleur a été largement étudiée au cours de XXe siècle. Le brillant a bénéficié d'un gros intérêt scientifique depuis les années 90. Mais quid de la translucidité et de la texture ? L'étude métrologique de la texture ne me semble toujours pas mûre. Mais j'ai la conviction que la mesure et la caractérisation de la translucidité vont susciter un grand intérêt scientifique à compter d'aujourd'hui.

La demande industrielle est là, dans les cosmétiques, l'alimentaire, l'automobile, les matériaux, la synthèse d'image, l'agriculture.



Figure 30. La translucidité est un attribut important de l'apparence, dont la mesure nécessite la mise en place d'une nouvelle référence radiométrique, la fonction de distribution bidirectionnelle de la réflectance diffuse (BSSRDF).

La grandeur est là. Elle a été décrite par Nicodemus en 1977 [5]. Il s'agit de la fonction de distribution bidirectionnelle de la réflectance diffuse, dénommée sous son acronyme anglais BSSRDF.

La BSSRDF est le rapport de la luminance dans une direction donnée pour un élément de surface, par l'éclairement selon une direction donnée pour un autre élément de surface. Cette grandeur est difficile d'accès car, outre le fait qu'elle soit infinitésimale, elle dépend de 8 paramètres (azimut et zénith de la direction d'illumination, azimut et zénith de la direction d'observation, coordonnées x et y de la surface observée, longueur d'onde et polarisation).

On comprend qu'aucun institut de métrologie ne se soit lancé jusqu'à aujourd'hui dans la mesure de cette quantité. Pourtant il est temps ! La BRDF permet d'accéder à la couleur et au brillant. C'est bien. La BSSRDF permet d'accéder à l'ensemble des attributs de l'apparence couleur, brillant, texture et translucidité. C'est mieux. C'est la quantité ultime pour caractériser les propriétés optiques des matériaux. Ce n'est qu'avec sa mesure que l'on pourra appréhender l'apparence de matériaux complexes comme la peau, la chevelure, le marbre. Il est d'ailleurs aisé de se rendre compte des progrès qu'il reste à accomplir dans ce domaine en regardant un dessin animé réalisé en synthèse

d'images. En général, les textiles et les bâtiments sont convaincants. Mais la peau et les cheveux sont décevants. Pourquoi ? Parce que la peau et les cheveux sont des matériaux translucides et que la mesure de leur apparence requiert des mesures de BSSRDF.

Alors allons-y ! Après tout, le saut n'est pas énorme pour passer d'un instrument de mesure de BRDF à une mesure de BSSRDF. En ce qui nous concerne, nous devons concevoir une nouvelle illumination et une nouvelle détection. Mais nous pouvons conserver le robot et la couronne, utilisés pour ConDOR et le goniospectrophotomètre primaire.

Développer une grandeur seule n'a cependant qu'un intérêt limité pour le métrologue. Pour pouvoir développer une quantité, il faut être au moins deux, afin de pouvoir valider les réalisations indépendantes par une comparaison et donner confiance à l'utilisateur. Ainsi, si nous voulons fournir à l'industrie une référence de BSSRDF, il est nécessaire d'engager un effort collectif des laboratoires de métrologie. Cela passe vraisemblablement par un projet commun, qui devra être déposé dans un programme de financement. Le consortium d'xDRreflect travaille aujourd'hui sur ce point, afin de préparer les références de demain.

Il sera également nécessaire de développer une nouvelle génération d'artefact qui pourra servir d'étalon de transfert de BSSRDF entre les laboratoires nationaux de métrologie et les fabricants de spectrophotomètres. Les industriels de ce domaine devront être mis à contribution. Il faudra enfin engager un travail de normalisation auprès de la CIE, afin d'éventuellement simplifier la mesure en stipulant des configurations angulaires pertinentes. Cette étape est importante, elle est le passage obligé pour initier la réalisation d'équipements commerciaux.

La route est donc longue sur ce chemin de la mesure de la BSSRDF, mais il est passionnant et éminemment important, car il est le seul chemin possible vers la mesure de l'apparence totale. Nous comptons participer à cet effort, et même éventuellement être moteur dans sa réalisation au niveau de la métrologie européenne et mondiale.

4.4. Être utile pour l'industrie et les laboratoires en proposant un service de mesure

Les instruments que nous avons développés sont uniques par leur exactitude (goniospectrophotomètre primaire) et leur résolution angulaire (ConDOR). Ils alimentent notre recherche, nos idées, nos envies. Mais nous ne sommes pas seuls. D'autres communautés peuvent tirer parti de ces instruments : pour étalonner un instrument moins performant, pour valider un modèle d'apparence sur échantillon réel, pour progresser dans la compréhension des interactions lumière-matière, pour caractériser les propriétés d'une surface fonctionnelle (Figure 31).

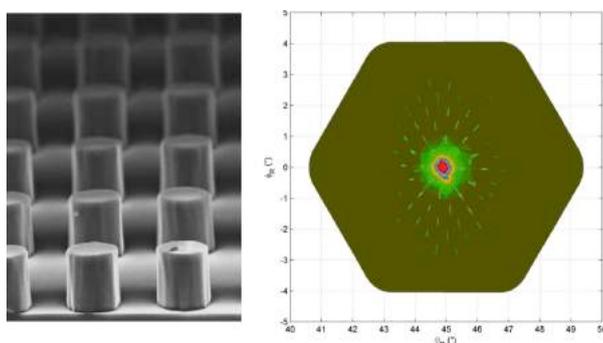


Figure 31. Mesure de la BRDF restreinte à la zone spéculaire, d'une surface fonctionnelle composée de micro-piliers cylindriques répartis selon un pas de 80 μm . Zénith d'incidence 45°. La diffraction à 550 nm présente une période de 0.4°. Elle est parfaitement résolue par ConDOR [66].

Nous pouvons répondre à ces besoins. Il y a tout à gagner. La collaboration avec des chercheurs ayant des problématiques différentes des nôtres est un enrichissement, elle fait progresser. Elle cultive. Elle inspire. La collaboration avec l'industrie est une de nos missions. Elle permet de rester au contact du besoin industriel et apporte réalisme et pragmatisme.

Enfin, il ne s'agit pas seulement de mesurer pour les autres, il s'agit également de former les futurs chercheurs à ces techniques de mesure. Ce service doit donc dans le futur permettre l'accueil de

doctorants et de jeunes chercheurs étrangers sur des séjours courts à mi-long. En cela, il devra être situé à proximité de mon lieu d'enseignement, afin de garantir un taux d'encadrement décent pour les visiteurs. Un déménagement des équipements de Trappes à St Denis devra donc être réalisé.

La réalisation de ce service nécessite de :

- Valider des CMCs (Calibration and Measurement Capabilities) auprès du CCPR pour la mesure du facteur de réflexion diffus, de la BRDF, et plus tard, de la BTDF et de la BSSRDF.
- Développer un site web permettant de présenter l'offre de mesure
- Mettre en place une base de données de mesures en libre accès pour permettre d'alimenter la recherche sur les modèles de rendu de demain
- Déménager les équipements de Trappes à St Denis

Ces actions seront engagées dans les 5 ans à venir.

4.5. Progresser dans la compréhension du brillant

J'ai gardé cet axe de recherche pour la fin volontairement. Il clôt cette partie sur le programme de recherche et ce manuscrit.

La mesure du brillant est mon fil rouge. C'est mon jardin à défricher. J'ai commencé à travailler sur ce sujet il y a 19 ans. Au début j'avais bien. En quelques mois, j'avais écrit un programme pour modéliser les pics spéculaires, à base de fonction de distribution des micro-facettes suivant une fonction Lorentzienne. A cette allure, tout allait être bouclé en 36 mois. La lorentzienne marchait bien, mais pas pour les surfaces mates. J'ai donc repris le modèle mais pour cela il me fallait de nouvelles mesures, plus précises. J'ai refait des mesures. Là j'ai pu proposer un modèle basé sur l'inversion des mesures et la déduction d'une densité de probabilité des micro-facettes expérimentale (voir § 2.3.4, p. 16). Cela marchait beaucoup mieux. Surtout sur les surfaces mates. Mais il y avait un problème de résolution angulaire pour utiliser cette technique sur les surfaces brillantes. Il m'aurait fallu un instrument mieux résolu. C'était déjà la fin de la thèse.

Je n'ai pas lâché prise. S'il faut augmenter la résolution pour résoudre le problème sur les surfaces brillantes, je vais le faire. ConDOR est né et je me suis précipité pour mesurer les échantillons précieusement conservés pendant toutes ces années. J'ai ressorti mon vieux modèle d'inversion des mesures. Mais ce que nous offrait ConDOR n'était pas modélisable avec ce modèle simplifié. La réalité du pic spéculaire est bien plus complexe que je ne l'imaginais. Il s'agit d'une explosion radiale, très chahutée, qui ne peut pas être représentée par un modèle à quelques paramètres.

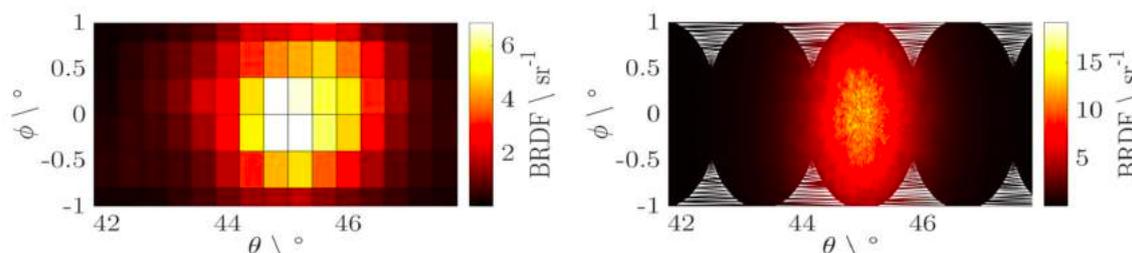


Figure 32. BRDF du pic spéculaire de l'échantillon 3C2 (encre noire déposée sur papier, brillant spéculaire de 75 gu). Zénith d'illumination 45°. A gauche, mesure réalisée avec l'EZ-Contrast en 2003, résolution angulaire 0.4°. A droite, mesure réalisée avec ConDOR en 2016, résolution 0,015°. Une nouvelle génération de modèle doit être pensée.

Le travail doit donc continuer. Nous allons rassembler différents matériaux et mesurer leur pic spéculaire. Nous allons inventer une nouvelle génération de modèles de BRDF plus fidèles à la réalité du pic. Les résultats des recherches engagées dans les points 1 et 2 de ce programme servent cette tâche et seront exploités.

Menée seule, même si elle progresse bien, l'étude la BRDF ne vaut rien. La mesure du brillant requiert des données visuelles. Certes nous avons bien progressé sur l'influence de l'illumination sur la perception du brillant. J'ai découvert la constance de brillant en 2004. J'ai encadré le travail qui a démontré les limites de cette même constance de brillant en 2017. Outre la source elle-même, nous savons que l'environnement joue un rôle. On peut dire que côté source on est presque bon.

Mais qu'en est-il côté échantillons et côté observateur ?

Côté observateur, on sait qu'il existe une grande variabilité inter-observateur mais elle ne m'inquiète pas. Elle était également présente pour la photométrie. L'utilisation d'un observateur standard a réglé le problème. Nous pourrions, en temps voulu, faire le même travail auprès de la CIE pour le brillant.

Le problème est que l'on ne connaît toujours pas la dimension du brillant. Certes des propositions de 2 ou 3 dimensions ont été faites, mais elles sont limitées au nombre de degrés de liberté des modèles ou objets utilisés [67][68]. L'effet de la couleur ou de la clarté n'a toujours pas été clairement mesuré sur échantillons réels. Il faut avancer sur ce point. Nous pouvons le faire. Il faut pour cela réaliser des mesures psychophysiques sur échantillons réels et variés. En combinant les mesures psychophysiques, les mesures faites sur ConDOR et des méthodes d'analyse en composantes principales, nous pourrions sûrement avancer sur ce sujet et faire une proposition solide.

Mon travail dans ce domaine n'est pas fini. Aujourd'hui, j'ai les outils métrologiques. J'ai le laboratoire de vision. J'ai la réputation. Je vais continuer à travailler, à former et faire progresser la métrologie du brillant.

5. Conclusion

Je suis entré au Muséum National d'Histoire Naturelle en 1999 pour un stage de DEA. J'y ai découvert le monde de la recherche dans toute sa réalité. Il y avait l'envie, les idées, le travail, les rencontres, peu d'argent mais assez pour faire avancer les choses. J'ai aimé cet environnement et j'ai décidé d'y prendre part et d'y passer ma vie.

Françoise Viénot m'a offert le sujet de la mesure du brillant. C'était un sujet quasi vierge, qui demandait des compétences en mesure et en vision. Je mesure bien, j'ai été formé pour cela par un parcours technique. Pour la vision j'ai appris au contact des experts. Cependant il ne faut pas m'en demander trop. Je ne suis pas à l'aise pour m'attaquer aux fonctions avancées du système visuel. Je préfère le considérer comme un capteur, un instrument de mesure avec ses forces (étendue, sensibilité) et ses faiblesses (non linéarité, instabilité). Ce n'est pas très poétique.

Ainsi, ma recherche n'est pas de très haut niveau. Elle est appliquée. Je me situe en amont du besoin industriel, mais pas très en amont, juste quelques marches au-dessus. Les équipements que j'ai développés dans le domaine de la métrologie ou de la vision sont destinés à servir ma recherche. Ils sont performants. Le seul fait qu'ils mesurent quelque chose est en soit un résultat original, une avancée. C'est bien. Et maintenant ?

Maintenant il y a 2 chemins :

Le premier est d'exploiter ces équipements exceptionnels pour faire avancer la science. La science de la vision, avec l'étude du brillant et de l'identification des matériaux. La science de la mesure, avec l'étude du speckle, de la courbure, de l'influence de l'angle solide. La science des autres, avec le partage de données en open access, ou la réalisation de prestations et d'études. Ce chemin là, je le perçois comme un cheminement horizontal, voir descendant. La construction de ConDOR a placé l'équipe sur une vire dominante. Elle est étroite mais elle est bien placée. Nous nous installons sur cette vire et lançons des études pour défricher les alentours, en espérant qu'un jour d'autres personnes nous rejoindront et que l'emplacement devienne confortable et animé.

Le second est de continuer à construire des équipements métrologiques de très haut niveau pour mesurer de nouvelles quantités destinées à la mesure de l'apparence. Là on ne parle plus de couleur ou de brillant, on parle de l'apparence totale. C'est le travail sur la BSSRDF. Je le perçois plus comme un cheminement vertical, la recherche d'une nouvelle vire, sûrement plus étroite, mais plus surplombante. J'ai l'expertise et la position pour initier cette recherche. Elle est nécessaire pour favoriser le mouvement ascendant et préparer l'avenir.

La métaphore montagnarde est commode pour moi. Hier au pied de la falaise, je me sentais très optimiste sur le fait que j'allais arriver en haut et régler le problème de la mesure du brillant. Aujourd'hui, après des années de travail, je m'aperçois que le sommet est bien plus haut que je ne le pensais et que ma progression requiert beaucoup plus de moyens et de temps que je ne l'imaginais. Je doute même d'arriver en haut.

Néanmoins, j'espère avoir convaincu le lecteur de ce manuscrit que je ne me perds pas en route. Depuis mon recrutement, j'ai pris les initiatives et mis en œuvre les travaux qui permettent de progresser vers la mesure du brillant et même de l'apparence des surfaces et des matériaux sans faire de détour. Les équipements développés sont documentés et s'inscrivent dans un système qualité qui pérennise leur exploitation. J'ai commencé à former des doctorants et des post-doctorants qui ont acquis les techniques et les compétences pour apporter des éléments nouveaux à cette magnifique problématique.

L'objectif reste le sommet mais pas en solitaire.

6. Références

- [1] Christie, J. S., « Evaluation of the attribute of appearance called gloss », *CIE-Journal*, **5**, 2, 41-56, 1986.
- [2] CIE 175:2006 A Framework for the Measurement of Visual Appearance, 92 pages, 2006
- [3] C. Strothkämper, K.-O. Hauer, Andreas Höpe, "How to Efficiently Characterize Special Effect Coatings", *J. Opt. Soc. Am A*, **33**(1), p 1-8, 2016
- [4] A. Ferrero, B. Bernad, J. Campos, E. Perales, J. L. Velázquez, and F. M. Martínez-Verdú, "Color characterization of coatings with diffraction pigments", *J. Opt. Soc. Am. A*, **33**(5), p. 1978-1988, 2016
- [5] Nicodemus, F. E.; Richmond, J. C.; Hsia, J. J.; Ginsberg, I. W.; Limperis, T., "Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance", Technical Report NBS MN-160, National Bureau of Standards, 1977
- [6] ASTM E284-17, "Standard Terminology of Appearance", ASTM, 1999
- [7] A. Ferrero, S. Bayón, "The measurement of Sparkle", *Metrologia*, **52**, 317-323, 2015
- [8] Hunter, R., Judd, D., « Development of a Method of Classifying Paints According to Gloss », *ASTM Bulletin March 1939*, 11-18, 1939
- [9] Harrison, V., Poulter, S., "Gloss measurement of papers – the effect of luminance factor", *British Journal of Applied Physics*, **2**, 92-97, 1951
- [10] Billmeyer, F. W., O'Donnell, F. X. D., Visual Gloss Scaling and Multidimensional Scaling Analysis of Painted Specimens, *Color Research and Application*, **12**, 6, 315-326, 1987.
- [11] Zorll, U., « New aspects of gloss of paint film and its measurement », *Progress in Organic Coatings*, **1**, 113-155, 1972.
- [12] Blake, A., Bülthoff, H., "Does the brain know the physics of specular reflection?", *Nature*, **343**, 165-168, 1990.
- [13] Bloj, M. G., Kersten, D., Hurlbert, A. C., "Perception of three-dimensional shape influences colour perception through mutual illumination". *Nature*, **402**, 877-879, 1999.
- [14] Fleming, R. W., Dror, R. O., Adelson, E. H. "Real-world illumination and the perception of surface reflectance properties". *Journal of Vision*, **3**(5), 347-368, 2003.
- [15] Hunter, R. S., "The Measurement of Appearance", John Wiley & Sons, 1^{ière} édition, 347 pages, 1975. 2^{ième} édition par Hunter R., S., et Harold, R., W., 1987, même éditeur.
- [16] Viénot F., Brettel H., Domont S., Bordenave E., 1999, Predictique simulation of mesopic vision, *CIE, Warsaw*.
- [17] Ginsburg A.P., 1978, Visual information processing based on spatial filters constrained by biological data, *Doctoral dissertation*, University of Cambridge, England.
- [18] Hess R.F., Sharpe L.T., Nordby K., 1990, Night Vision, *Cambridge University press*, p 41-42.
- [19] Obein G., Domont S., Brettel H., Viénot F., 2000, Contrast appearance under mesopic adaptation. A comparison between a simulation and the reality, *NPL Colour and Visual Scales 2000*, 3-5 April 2000, Egham, GB, 4 pages.
- [20] ASTM D523 – 89, "Standard Test Method for Specular Gloss", *ASTM standards on color and appearance measurement*, 6th édition ASTM, 16-20, 2000
- [21] Vocabulaire International de la CIE, 4^{ième} édition, publication CIE n°50(845), Bureau central de la CIE, Paris, 1987.
- [22] Maloney, L. T., Yang, J. N., 2003, "Maximum likelihood difference scaling", *Journal of Vision*, **3**, 573-585.
- [23] Czepluch, W., "Zusammenhänge Zwischen Binokularer Betrachtungsweise und Visuellem Glanzeindruck", *Lichttechnik*, **28**, 16-18, 1976.
- [24] Obein G., Pichereau T., Harrar M., Monot A., Knoblauch K. & Viénot F., "Does binocular vision contribute to gloss perception?", *Fall Vision Meeting, October 14-17, Rochester, USA*, *Journal of Vision*, **4**(11), 2004

- [25] Ji, W. , Pointer, M. R. , Luo, R. M., & Dakin, J. « Gloss as an aspect of the measurement of appearance”. *J. Opt. Soc. Am. A* **23**, 22-33, 2006.
- [26] Leloup, F., Pointer, M., Dutré, P., Hanselaer, P., "Geometry of illumination, luminance contrast, and gloss perception", *J. Opt. Soc. Am. A*, **27**(9), 2010
- [27] Hansmann-Roth S., Pont Sylvia, Mamassian P., "Contextual effects on real bicolored glossy surfaces", *Journal of Vision* 2017;17(2)
- [28] Helmholtz, H., "Optique Physiologique", Tome I, Editions Jacques Gabay, Sceaux, 1989.
- [29] Obein G., Knoblauch K., Viénot F., 2004, Difference scaling of gloss: Nonlinearity, binocularity, and constancy. *Journal of Vision*, 4(9), 711-720, <http://journalofvision.org/4/9/4>
- [30] Gunnar Wendt, Franz Faul, Vebjørn Ekroll, Rainer Mausfeld; "Disparity, motion, and color information improve gloss constancy performance", *Journal of Vision* 2010;**10**(9):7, 2010.
- [31] Chadwick AC, Kentridge RW, "the perception of gloss : a review", *Vision Res.* **109**-221-35, 2015.
- [32] Leroux T., "Fast contrast vs viewing angle measurements of LCDs", Eurodisplay, Strasbourg, 447 (1993)
- [33] Cook, R., Torrance, K., "A Reflectance Model for Computer", *ACM Transactions on Graphics*, **1**, 1, 7-24, 1982.
- [34] Obein G., Leroux T., Viénot F., "Bi-directional reflectance distribution factor and gloss scales", *Human vision and electronic imaging VI, proceedings of SPIE, vol 4299*, 22-25 January 2001, San Jose, USA, pages 279-290.
- [35] Obein G., Leroux T., Viénot F., "Gloss & BRDF, Reconstructing the BRDF from a limited number of measurements", *Inter Society of Color Council, Symposium on Appearance & Color*, 21-23 April 2002, Pontiac, USA.
- [36] Obein G., Leroux T., Knoblauch K., Viénot F., "Visually relevant gloss parameters", *Proceedings of 11th international Metrology congress*, Toulon, 20-23 octobre 2003, 6p.
- [37] Viénot F., Obein G., "Is gloss recognized as a surface property?", *Proceedings of 1st International Workshop on Materials and Sensations*, Pau, France, 27-29 October 2004, pages 77-82.
- [38] Nadal M. E., Thompson E. A., "NIST Reference Goniophotometer for Specular Gloss Measurements", *Journal of coatings technologies*, **73**(917), 2001
- [39] Proctor JE, Barnes Y., "NIST High Accuracy Reference Reflectometer-Spectrophotometer", *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 101(5):619-627, 1996
- [40] Obein G., Bousquet R, Nadal M., "New NIST Reference Goniospectrometer", *Optical Diagnostics, Proceedings of SPIE Vol. 5880*, 31 July – 4 August, San Diego, USA, pages T1-T10, 2005.
- [41] Hünerhoff, D., Grusemann, U. and Höpe A., "New robot-based gonireflectometer for measuring spectral diffuse reflection", *Metrologia*, **43**, S11–S16, 2006.
- [42] BIPM, Le système international d'unité, SI Brochure 8^{ème} édition, 2006, page 116
- [43] Jean Bastie, « Conséquences pratiques du changement de définition de la candela », LUX, n° 145, novembre – décembre 1987, page 9-15
- [44] Gonzalez Galvan L. P., « Matérialisation de la candela à l'aide de photomètres dont la chaîne de raccordement au radiomètre cryogénique primaire est parfaitement établie », Thèse de doctorat du Conservatoire National des Arts et Métiers, 22 décembre 2005
- [45] Obein G., Gonzalez-Galvan L., Bastie J., « Nouvelle réalisation de la candela au LNE-INM/CNAM », *revue française de métrologie*, 12, p19-28, 2007 .
- [46] Obein G., Gonzalez-Galvan L., Bastie J., "A new realization of the candela at the Lne-Inm/Cnam", *Proceedings of the 26th session of the CIE*, Vol. 1, part. 1, pp192-195.
- [47] Obein G., Bastie J, "Report on the CCPR Key Comparison K6: Spectral regular transmittance", *Metrologia*, **46**, 02002
- [48] Koo A., 2016, "Report on the consultative committee for photometry and radiometry key comparison of regular spectral transmittance 2010 (CCPR-K6.2010)", *Metrologie*, **54**, technical supplement

- [49] Le Breton R., Ged G., Obein G., "Out of plane BRDF measurement at LNE-Cnam using "ConDOR" our primary goniospectrophotometer", *Proceedings of 28th CIE Session*, Manchester, UK, 1401 – 1407, 2015.
- [50] Strothkämper C., Ferrero A., Koo A., Jansson P., Ged G., Obein G., Källberg S., Audenaert J., Leloup F., Verdu F., Perales E., Schirmacher A., Campos J., "Multilateral Spectral Radiance Factor Scale Comparison", *Applied Optics*, **56**(7), p1996-2006, 2016.
- [51] Surrel Joëlle, « *Optique Instrumentale Optique de Fourier* ». Paris ; Ellipses, 1996.
- [52] Ouarets S., « Conception de la détection d'un gonioreflectomètre métrologique pour mesurer la BRDF des surfaces », thèse du CNAM, spécialité Lasers, nanosciences et métrologie, soutenue le 3 juin 2015
- [53] Ged G., « Métrologie du brillant : développement et caractérisation psychophysique d'échelles de brillants », thèse du CNAM, spécialité Lasers, nanosciences et métrologie, soutenue le 26 sept 2017
- [54] Ouarets, S, Leroux, T., Rougie B., Razet, A., Obein G., "A high resolution set up devoted to the measurement of the Bidirectional Reflectance Distribution Function around the specular peak, at LNE-CNAM", *Proceedings of Metrologie 2013*, octobre 2013, Paris
- [55] Ged G., Flys O., Silvestri Z., Källberg S., Tayeb-Chandoul F., Le Breton R., Himbert M., Obein G., "Characterizations of specular peaks from a metrological gloss scale", *Proceedings of 28th CIE Session*, Manchester, UK, 344 - 354
- [56] Ged G., Rabal A. M., Obein G., 2017 "Absolute BRDF measurements with ultra-high angular resolution for the characterization of optical surfaces", *NEWRAD 2017 Proceedings*, Tokyo, Japan.
- [57] Sève, R., "Problems Connected with the Concept of Gloss", *Color Research and Application*, **18**, 4, 241-252, 1993
- [58] Knoblauch K. and Maloney L. T., *Modeling Psychophysical Data in R*. New York, NY: Springer New York, 2012.
- [59] Chubb, C., Sperling, G., Solomon, J.A. "Texture interactions determine perceived contrast". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **86**, 9631-9635, USA, 1989.
- [60] R. W. Fleming, "Visual perception of materials and their properties," *Vision Res.*, vol. 94, pp. 62–75, Jan. 2014.
- [61] Ged G., Teisseire J., Garre E., Himbert M., Obein G., 2014, 'Development of a controlled metrological gloss scale', *NEWRAD 2014 proceedings*, Espoo, Finland.
- [62] Flys, O., Källberg, S., Ged, G., Silvestri, Z., Rosén, B., "Characterization of surface topography of a newly developed metrological gloss scale", *Surface Topography: Metrology and Properties*, **3**(4), 2015
- [63] Ged G., Obein G., Himbert M., Turbil C., Rabal A. M., 2017, "Does the visual system extracts more information than gloss in the specular direction?", *Proceedings of the Conference at the CIE Midterm Meeting, CIE x044:2017*, p.396-403.
- [64] Cooksey C., Nadal M., Allen D., Hauer K. and Höpe A., "Bidirectional reflectance scale comparison between NIST and PTB," *Appl. Opt.* **54**, 4006-4015, 2015.
- [65] Obein G., Audenaert J., Ged G., Leloup F., 2015, Metrological issues related to BRDF measurements around the specular direction in the particular case of glossy surfaces', *Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance, Proceedings of SPIE Vol. 9398*, San Francisco, USA.
- [66] Turbil C., Gozhyk I., Teisseire J., Obein G., Ged G., 2016, "Predicting changes in visual appearance of periodic surface from BRDF measurements", *Proceedings of 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance, CIE x043:2016*, Prague, CZ.
- [67] Ferwerda, J. A., Pellacini, F., Greenberg, D. P., 2001, "A psychophysically-based model of surface gloss perception", *Proceedings of SPIE*, vol **4299**, 291-301.
- [68] Ged G., Obein G., Silvestri S., Le Rohellec J., Viénot F., 2010, recognizing real materials from their glossy appearance, *Journal of vision*, **10** (9)18.

Annexe A – CV

Gaël OBEIN

Maître de conférences

44 ans

☎ : 06 29 55 34 04

✉ : gael.obein@lecnam.net



FORMATION

depuis 2006	Maître de conférences au Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris.
2006 – 2005	Ingénieur de Recherche contractuel à l'Institut National de Métrologie, CNAM, Paris.
2004 – 2005	Guest Researcher au National Institute of Standards and Technology (NIST), USA
2002 – 2004	ATER à l'université de Paris VI.
1999 – 2003	Thèse de doctorat du CNAM, option « Systèmes Physiques et Métrologie »
1998 – 1999	DEA « Lasers, Métrologie, Communications », CNAM-Paris 13, major de promotion.
1994 – 1997	Licence et Maîtrise « Physique Appliquée », Université de Nantes.
1991 – 1994	DUT Mesures Physiques option : Techniques Instrumentales, IUT St Nazaire.

ACTIVITE DE RECHERCHE

Depuis 2006	Matérialisation et maintient au niveau des références nationales de photométrie (candela, lumen, lux) et spectrophotométrie (facteur de transmission, facteur de réflexion)
Depuis 2005	Direction de l'activité « Métrologie de l'apparence » au laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM.
2017–2020	Coordinateur Project EMPIR « BiRD », projet de recherche Européen, 36 mois, 10 partenaires européens, 536 k€
2013–2016	Coordinateur Project EMRP « xDReflect », projet de recherche Européen, 36 mois, 10 partenaires européens, 2.9 M€
2007 – 2013	Chef de projet BRDF : Réalisation d'un goniospectrophotomètre pour la mesure de BRDF absolue.
2004 – 2005	Post-Doc au National Institute of Standards and Technology (Gaithersburg, US). Mise en place d'un goniospectrophotomètre au sein de l'Optical Thermometry and Spectral Methods Group, Maintient et transfert de la mesure de brillant spéculaire du NIST.
1999 – 2003	Doctorant au Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris. Titre de la thèse : « Caractérisation optique et visuelle du brillant », soutenue le 6 octobre 2003, Développement d'une mesure du brillant des surfaces et évaluation de la sensation visuelle de brillant.
1998 – 1999	Stage de DEA au Muséum National d'Histoire Naturelle : Etude de la dégradation des contrastes dans le mésopique.

ACTIVITE D'ENSEIGNEMENT

Depuis 2006	Maître de Conférences au CNAM, EPN03 - "Instrumentation Mesure" - Responsable de l'UE « Systèmes de mesures » (FIP MV, FIP EPRM). - Encadrement de 4 auditeurs en vue de l'oral probatoire. - Encadrement de 3 mémoires d'élève ingénieur CNAM. - Responsable de Travaux pour 3 doctorants (2 thèses soutenues, 1 thèse en cours). - Encadrant de 2 chercheurs contractuels (12 mois + 32 mois) et 1 ingénieur contractuel (4 mois). - Tuteur académique de 9 élèves ingénieurs en alternance.
2002 – 2004	ATER au sein de l'UFR 924, à l'université de Paris VI. Temps plein. 192h/an

RESPONSABILITES COLLECTIVES

Niveau Laboratoire :

Responsable amont du département « Photonique » du laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM (depuis 2018)
Responsable d'étalonnage de l'unité opérationnelle « Photométrie ». (depuis 2006)

Niveau National

Président de CIE-France, comité miroir national de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) (depuis 2017)
Délégué national pour la division 2 de la CIE (depuis 2007)
Contact français pour les comparaisons clef des grandeurs photométriques du CCPR ou de Euramet (depuis 2006).
Lauréat de la médaille Augustin Fresnel décernée par l'Association Française de l'éclairage (2012)

Niveau International

CIE : Directeur d'un comité technique (TC2-85), membre de 4 Comités Technique (TC2-81, TC2-77, TC2-57, JTC12)
Invité du groupe de travail EURAMET-PR, en charge de la stratégie de recherche la thématique « innovation »
Coordinateur des comparaisons clefs CCPR-K6 et EURAMET-K6 (comparaison du facteur de transmission).

Annexe B – Liste des publications

Au 31 mars 2018, je totalise

- 14 articles dans des revues à comité de lecture dont 7 en premier auteur
- 37 articles dans des actes de congrès dont 15 en premier auteur

REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE

- OBEIN G.**, SIMIONESCU M., DUBARD J., SEUCAN A., BASTIE J., 2017, "Luminous intensity bilateral comparison using lamps as transfer standards between LNE (France) and INM-RO (Roumanie)", *Metrologia*, **54**, Tech. Suppl., 02003.
- STROTHKÄMPER C., FERRERO A., KOO A., JANNSON P., GED G., **OBEIN G.**, KÄLLBERG S., AUDENAERT J., LELOUP F., VERDU F., PERALES E., SCHIRMACHER A., CAMPOS J., 2016, "Multilateral Spectral Radiance Factor Scale Comparison", *Applied Optics*, **56**(7), p1996-2006,
- LELOUP F., AUDENAERT J., **OBEIN G.**, GED G., HANSELAERE P., 2016, "Repeatability and reproducibility of specular gloss meters in theory and practice", *J Coat Technol Res.* **13**: 941
- COMARD, A., BARET, F., **OBEIN, G.**, SIMONOT, L., MENEVEAUX, D., VIÉNOT, F., DE SOLAL, B., 2014, ACT: A leaf BRDF model taking into account the azimuthal anisotropy of monocotyledonous leaf surface, *Remote Sensing of Environment*, **143**, 112–121.
- LELOUP, F., **OBEIN, G.**, POINTER, M., HANSELAER, P., 2013, Toward the soft metrology of surface gloss: A review. *Color Res. Appl.*. doi: 10.1002/col.21846
- BALASSE M., **OBEIN G.**, UGHETTO-MONFRIN J., MAINLAND I., 2012, Investigating seasonality and season of birth in past herds: a reference set of sheep enamel stable oxygen isotope ratios, *Archaeometry*, **54**, 2, p 349-368.
- OBEIN G.**, BASTIE J., ŠKEROVIC V., VUKADIN P., 2011, Report on the bilateral comparison between ZMDM (Serbia) and LNE-INM (France) (Euramet Project 766) EURAMET.PR-K6.1: Spectral regular transmittance, *Metrologia*, **48**, Tech. Suppl., 02003
- OBEIN G.**, BASTIE J., 2011, Report on the key comparison EUROMET-PR-K6: Spectral regular transmittance, *Metrologia*, **48**, Tech. Suppl., 02002
- GED G., **OBEIN G.**, SILVESTRI S., LE ROHELLEC J., VIÉNOT F., 2010, recognizing real materials from their glossy appearance, *Journal of vision*, **10** (9)18.
- OBEIN G.**, BASTIE J., 2009, Report on the CCPR Key Comparison K6: Spectral regular transmittance, *Metrologia*, **46**, 02002
- SIMONOT, L., **OBEIN, G.**, 2007, Geometrical considerations in analyzing isotropic or anisotropic surface reflections, *Appl. Opt.* **46**, 2615-2623
- OBEIN G.**, PICHÉREAU T., HARRAR M., MONOT A., KNOBLAUCH K. & VIÉNOT F., 2004, Does binocular vision contribute to gloss perception?, *Journal of Vision*, **4**(11).
- OBEIN G.**, KNOBLAUCH K., VIÉNOT F., 2004, Difference scaling of gloss: Nonlinearity, binocularity, and constancy. *Journal of Vision*, **4**(9), 711-720.

REVUES NATIONALES A COMITE DE LECTURE

- OBEIN, G.**, GONZALEZ-GALVAN, L., BASTIE, J., 2007, Nouvelle réalisation de la candela au LNE-INM/CNAM, *revue française de métrologie*, **12**, p19-28.

ACTES DE COLLOCQUE INTERNATIONAUX

- GED G., **OBEIN G.**, HIMBERT M., TURBIL C., RABAL A. M., 2017, "Does the visual system extracts more information than gloss in the specular direction?", *Proceedings of the Conference at the CIE Midterm Meeting, CIE x044:2017*, p.396-403.
- GED G., RABAL A. M., **OBEIN G.**, 2017 "Absolute BRDF measurements with ultra-high angular resolution for the characterization of optical surfaces", 2017, *NEWRAD 2017 Proceedings*, Tokyo, Japan.
- PAGE, M., **OBEIN, G.**, BOUST, C., & RAZET, A. , 2017, "Adapted Modulation Transfer Function Method for Characterization and Improvement of 3D printed surfaces", *Electronic Imaging*, 2017(8), 92-100.
- TURBIL C., GOZHYK I., TEISSEIRE J., **OBEIN G.**, GED G., 2016, "Predicting changes in visual appearance of periodic surface from BRDF measurements", *Proceedings of 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance*, Prague, CZ.

- PAGE M., BOUST C., MÉLARD N., ROBCIS D., **OBEIN G.**, ORTIZ SEGOVIA M., 2016, "3D surface acquisition : Comparison of two microtopographic equipments when measuring materials of cultural heritage", *Proceedings of 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance*, Prague, CZ.
- GED G., LELOUP F., DE WIT Y., **OBEIN G.**, 2016, "Intercomparison of visual gloss psychometric scales", *Proceedings of 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance*, Prague, CZ.
- COOKSEY C., **OBEIN G.**, GEORGIEV G., DURELL C., SCHARPF D., MCKEE G., L'HEUREUX M., 2015, Creation and Validation of Spectralon BRDF Targets & Standards, *Proceedings of SPIE Vol 9639-49*, 12p.
- GED G., FLYS O., SILVESTRI Z., KÁLLBERG S., TAYEB-CHANDOU F., LE BRETON R., HIMBERT M., **OBEIN G.**, 2015, Characterizations of specular peaks from a metrological gloss scale, *Proceedings of 28th CIE Session*, Manchester, UK, 344 - 354
- LE BRETON R., GED G., **OBEIN G.**, 2015, Out of plane BRDF measurement at LNE-Cnam using "ConDOR" our primary goniospectrophotometer, *Proceedings of 28th CIE Session*, Manchester, UK, 1401 – 1407.
- OBEIN G.**, AUDENAERT J., GED G., LELOUP F., 2015, Metrological issues related to BRDF measurements around the specular direction in the particular case of glossy surfaces', *Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance, Proceedings of SPIE Vol. 9398*, 8 February, San Francisco, USA.
- GED G., TEISSEIRE J., GARRE E., HIMBERT M., **OBEIN G.**, 2014, 'Development of a controlled metrological gloss scale', *NEWRAD 2014 proceedings*, Espoo, Finland.
- OBEIN G.**, 2014, 'xDReflect, a European Joint Research Project devoted to the metrology of the appearance of surfaces', *ISCC Bridge Session at Color, Light & Appearance Week at NIST*, June, Gaithersburg, USA.
- HÖPE A., KOO A., FORTHMANN C., VERDÚ F.M., MANOOCHERI F., LELOUP F., **OBEIN G.**, WÜBBELER G., GED G., CAMPOS J., HAUER K-O., YANG L., ŠMÍD M., LANGOVOY M., IACOMUSSI P., JAANSON P., KÁLLBERG S., 2014, 'xD-Reflect - "Multidimensional Reflectometry for Industry" a research project of the European Metrology Research Program (EMRP)', *NEWRAD 2014 proceedings*, Espoo, Finland.
- OBEIN G.**, OUARETS, S., GED, G., 2014, Evaluation of the shape of the specular peak for high glossy surfaces (invited paper), *Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance, Proceedings of SPIE Vol9018*, 4-5 February, San Francisco, USA.
- HÖPE, A., KOO, A., VERDU, F., LELOUP, F., **OBEIN, G.**, WÜBBELER, G., CAMPOS, J., IACOMUSSI, P., JAANSON, P., KÁLLBERG, S., ŠMÍD, M., 2014, "Multidimensional Reflectometry for Industry" (xD-Reflect) an European research project, *Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance, Proceedings of SPIE Vol. 9018*, 4-5 February, San Francisco, USA.
- OUARETS, S., LEROUX, T., ROUGIE B., RAZET, A., **OBEIN G.**, 2013, A high resolution set up devoted to the measurement of the Bidirectional Reflectance Distribution Function around the specular peak, at LNE-CNAM, *Proceedings of Metrologie 2013*, octobre 2013, Paris
- OUARETS, S., GED, G., RAZET, A., **OBEIN G.**, 2012, A new gonioreflectometer for the measurement of the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) at LNE-CNAM, *Proceedings of CIE 2012 "lighting quality and energy efficiency"*, p687-691, 19 - 21 September 2012, Hangzhou, China
- GED G., **OBEIN G.**, VIENOT F., 2011, Assessing material visual gloss – Evaluer le brillant visuel d'un matériau, *15^{ème} Congrès International de Métrologie*, octobre 2011, Paris, France, 6 pages.
- OBEIN G.**, GED G., RICHARD A., 2010, A new gonioreflectometer dedicated to the measurement of the appearance of materials at the LNE-Cnam, *2nd CIE Expert symposium on Appearance*, 8-10 septembre, Gand, Belgique.
- POUSSET N., **OBEIN G.**, RAZET A., 2010, Visual experiment on LED lighting quality with "Color quality scale" colored samples, *CIE 2010 : « Lighting quality and energy efficiency »*, 14-17 mars 2010, Vienne, Autriche
- NADAL, M., **OBEIN G.**, 2008, NIST goniospectrometer for surface color measurements, *Proceedings of the CIE Expert Symposium on advances in Photometry and Colorimetry*, CIE publication x033:2008, 134-138 (2008)
- N. POUSSET, A. RAZET, **G. OBEIN**, A. RICHARD, J. BASTIE, 2007, Métrologie des diodes électroluminescentes, *actes des conférences métrologie 07*, éditions poisson-soluble (ISBN : 2-915416-06-0), 13^{ème} congrès international de métrologie, 18-21 juin 2007, Lille, France
- RAZET A., POUSSET N., **OBEIN G.**, BASTIE J., VIENOT F., 2007, Métrologie de l'apparence, Actes des conférences Métrologie 07, éditions poisson-soluble (ISBN : 2-915416-06-0), *13^{ème} Congrès international de métrologie*, 18-21 juin 2007, Lille, France
- OBEIN G.**, GONZALEZ-GALVAN, L., BASTIE, J., 2007, A new realization of the candela at the Lne-Inm/Cnam, *Proceedings of the 26th session of the CIE*, Vol. 1, part. 1, pp192-195.
- OBEIN G.**, VIENOT, F., 2007, Modelling the BRDF of a series of matt to glossy black samples, *Proceedings of the CIE Expert Symposium on Visual Appearance*, CIE publication x032:2007, 67-74 (2007)

- 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.
- NADAL M., BOUSQUET R., **OBEIN G.**, 2005, NIST Reference Colorimeter, *AIC Colour 05 Proceedings, 10th Congress of the International Colour Association*, Grenada, 701-704.
- VIÉNOT, F., **OBEIN G.**, 2004, 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.
- OBEIN G.**, LEROUX T., KNOBLAUCH K., VIÉNOT F., 2003, Visually relevant gloss parameters, *Proceedings of 11th international Metrology congress*, Toulon, 20-23 octobre 2003, 6p.
- OBEIN G.**, KNOBLAUCH K., CHRISMENT A., VIÉNOT F., 2002, Perceptual scaling of the gloss of a one-dimensional series of painted black samples, *25th European Conference on Visual Perception*, August 25-29, Glasgow, UK, Perception, vol 31, p 63.
- OBEIN G.**, LEROUX T., VIÉNOT F., 2002, Gloss & BRDF, Reconstructing the BRDF from a limited number of measurements, *Inter Society of Color Council, Symposium on Appearance & Color*, 21-23 April 2002, Pontiac, USA.
- OBEIN G.**, LEROUX T., VIÉNOT F., 2001, Bi-directional reflectance distribution factor and gloss scales, *Human vision and electronic imaging VI, proceedings of SPIE, vol 4299*, 22-25 January 2001, San Jose, USA pages 279-290.
- OBEIN G.**, LEROUX T., VIÉNOT F., 2000, Variability of the 3d repartition of haze with the incident beam geometry. *First international Conference on Color Graphics and Image Processing*, October 1-4, 2000, Saint-Etienne, France. Pages 296-299.
- OBEIN G.**, DOMONT S., BRETTEL H., VIÉNOT F., 2000, Contrast appearance under mesopic adaptation. A comparison between a simulation and the reality. *NPL Colour and Visual Scales 2000*, 3-5 April 2000, Egham, GB, 4 pages.

ACTES DE COLLOCQUE NATIONAUX

- OBEIN G.**, 2011, Le brillant du noir, *Ecole thématique interdisciplinaire CNRS, Le noir et le blanc*, Okhra, Roussillon, p 127-141.
- OBEIN G.**, VIÉNOT F., 2003, Rapport de contrat pour le Bureau National de Métrologie, contrat MNHN 0465 – BNM 003005.
- VIÉNOT F., MONOT A., **OBEIN G.**, 2001, Sensation visuelle : Effets de moirés, de brillant, de lustre et de transparence, *Colloque «Jouer la lumière : le textile, la lumière et l'œil»*, Musée de la mode et du textile / Union centrale des arts décoratifs, 12-13 novembre, Paris, 12 pages.

Résumé

En 1998, je pousse la porte du laboratoire de photobiologie au Muséum d'Histoire Naturelle pour y réaliser mon stage de DEA. Je suis alors loin de me douter que ce couloir rectiligne que j'ai devant les yeux est ma trajectoire de chercheur. J'ai eu la chance d'apprendre au contact des maîtres. Françoise Viénot pour la psychophysique et la vision. Jean Bastie pour la photométrie et la manipulation des références primaires. Maria Nadal pour la goniospectrophotométrie. Tous les trois enfin, pour leur rigueur scientifique et métrologique, la passion et le partage.

J'ai eu à nouveau de la chance quand les étoiles se sont alignées et que j'ai décroché un poste de permanent au CNAM, et une quasi carte blanche de la part de la direction de la métrologie française pour développer mon projet de mesure de l'apparence. Dans ce contexte confortable, j'ai pu donner corps à mes idées et commencer à creuser mon sillon. Quel est-il ?

C'est le même depuis le début de l'histoire. De toutes façons, les métrologues n'aiment pas beaucoup les déviations. Je mesure le brillant depuis 15 ans. À l'œil, avec un glossmètre ou à l'aide du goniospectrophotomètre que j'ai pensé, monté, démonté, remonté. Je mesure des BRDF. Je trace des pics spéculaires, des petits des gros des minces des beaux.

Et demain ? Je mesurerai toujours le brillant, mieux qu'aujourd'hui. Je démarrerai le chantier de la mesure de la translucidité. J'apporterai ma contribution à la quête de la mesure de l'apparence totale et à la compréhension du fonctionnement du système visuel. En tant qu'acteur de cette recherche d'abord. En tant que pourvoyeur de mesures bidirectionnelles ensuite, pour les chercheurs qui en ont besoin. En tant qu'animateur de cette communauté enfin, en faisant des propositions de projet, en formant des chercheurs, en participant au travail normatif et en assurant le lien entre recherche et industrie.

Ce document relate les grandes étapes de ma progression en tant qu'enseignant chercheur de 1998 à 2018. Il contient également mon programme de recherche pour 2018 – 2025.