Synthèse d'image iso-photographique pour la conception de l'apparence assistée par ordinateur

Thomas Muller

▶ **To cite this version:**

Thomas Muller. Synthèse d'image iso-photographique pour la conception de l'apparence assistée par ordinateur. Autre [cs.OH]. Conservatoire national des arts et metiers - CNAM, 2021. Français. NNT : 2021CNAM1289 . tel-03470085

HAL Id: tel-03470085
https://theses.hal.science/tel-03470085

Submitted on 8 Dec 2021

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

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

le cnam

ÉCOLE DOCTORALE EDITE
Centre d'études et de recherche en informatique et communications

THÈSE DE DOCTORAT

présentée par : **Thomas MULLER**
soutenue le : **08 juillet 2021**

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

Discipline / Spécialité : **Informatique**

Synthèse d'image iso-photographique pour la Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur

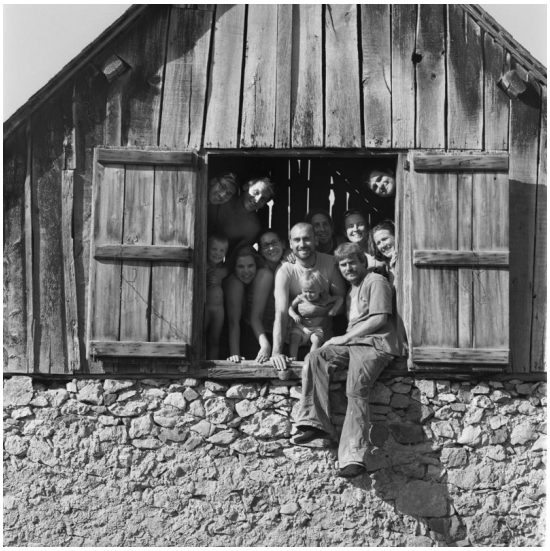
THÈSE dirigée par
M. Cubaud Pierre-Henri — *Professeur des universités, Conservatoire national des arts et métiers, Paris*

RAPPORTEURS
M. Jessel Jean-Pierre — *Professeur des universités, Université Paul Sabatier, Toulouse*
M. Meneveaux Daniel — *Professeur des universités, Université de Poitiers, Poitiers*

PRÉSIDENTE DU JURY
Mme. Thouvenin Indira — *Professeure, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne*

EXAMINATEUR
M. Fuchs Philippe — *Professeur émérite, MINES ParisTech, Paris*

MEMBRES INVITÉS
M. Porral Philippe — *Docteur, United Visual Researchers, Paris*



Remerciements

La photographie, cet instantané surgissant du passé, stimule presque directement le cerveau pour y recréer l'image mentale d'un moment vécu et son lot d'émotions. C'est ce qui se produit lorsque je regarde ce cliché de mon ami Mathias Deschamp à l'été 2012. Cette photo me rappelle que, par bonheur, on n'est jamais seul dans une aventure. Cette thèse fut une belle et longue aventure. Si j'ouvrai ici mon album photo on pourrait y voir Philippe Porral manipulant le Spectro-Sun pour mesurer la voute céleste de Santiago du Chili. On y verrait également Patrick Callet en bottes paysannes convertir de la bouillie bordelaise en un plaquage cuivre du plus bel effet tout en décrivant le modèle de couches mince associé. Nous avons tous nos mentors, moi j'en ai deux géniaux ! En allant directement à la fin de l'album, comme on lit une conclusion avant de feuilleter un mémoire, on pourrait voir l'impétrant face à son jury. Je suis très touché et reconnaissant que Jean-Pierre Jessel, Daniel Meneveaux, Indira Thouvenin et Philippe Fuchs, aient chacun aussi promptement accepté d'en être membre. Merci de vos remarques bienveillantes et de la qualité de vos questions. Je remercie tout particulièrement Pierre-Henri Cubaud pour son suivi, son soutien et ses conseils toujours très avisés.

S'il y avait une photo de famille ce serait celle de *United Visual Researchers*, Philippe Porral, Loïs Mignard-Debise, Romain Hoaraux, Clémentine Petit, Joël Randrianandrasana et Cyrille Lachaise. La dream team de génies capables d'imaginer, de concevoir et de créer des outils de simulation sans équivalent. Vous réalisez un rêve né dans la communauté de l'infographie des années 70 : prédire l'image exacte d'un objet avant qu'il n'existe.

On y trouverait aussi des *images confondantes* de Cluny et d'ailleurs lorsqu'avec Jean-Michel Sanchez, Julien Roger, et toute l'équipe d'*on-situ* nous cherchions déjà à composer réel et virtuel automatiquement et sans coutures visibles. En regardant ces photos je revois des esprits remarquables, innovants et sensibles qui continuent à m'inspirer encore aujourd'hui.

Comme cette aventure a commencé il y à plus de vingt ans mon travail s'est nourrit de grands amours et de l'énergie d'une multitude de belles personnes, en premier lieu ma merveilleuse compagne Stéphanie, alias Ms Fantastic.

Enfin, on retrouverait quelques photos, cheveux longs et patte d'eph, très classe, de Michel, Patty et compagnies. Ils ont inventé mon monde et m'ont appris à le regarder avec amour.

Merci à tous [1] !

1. Particulièrement à l'extraordinaire Dr. Faustroll, pataphysicien émérite, qui sut remettre aimablement à leur place certains glyphes de ce mémoire égarés par-ci par-là de façon souvent assez créative.

Résumé

La notion de « Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur » (CA²O), est apparue dans les années quatre-vingt-dix sous différents vocables. C'est une branche de la « Conception Assistée par Ordinateur » (CAO) ayant trait à la simulation de l'aspect visuel des objets tant d'un point de vue esthétique que fonctionnel. La CA²O pourrait être un outil extrêmement pertinent pour la prise de décision lors des phases de conception de produits manufacturés. Pourtant, alors que de nos jours la maquette numérique a presque totalement supplanté la maquette physique, le choix de la forme, des couleurs et des matières passe encore essentiellement par la réalisation d'un ou plusieurs prototypes réels. Les raisons pour lesquelles la CA²O ne s'est pas encore imposée dans les processus de conception sont ainsi examinées pour déterminer quels sont les verrous technologiques encore présents, et quels sont ceux que le présent travail contribue à lever ?

Le but est de proposer une démarche éclairée accompagnant la mise en place de la chaîne de simulation prédictive des interactions lumière-matière. Il sera en particulier discuté de l'approche basée mesures, qui trouve son origine dans nos travaux sur la simulation optique des peintures à effet pour l'industrie automobile (*PSA*), et dans l'étude sur l'*illumination photo-réaliste interactive en environnement distant* (*ENSAM*), qui aboutira plus tard au projet *ray-on* porté par la société *on-situ*, agence de création numérique. Ce n'est pourtant que récemment, dans le cadre du projet *Lumière Interactions Matériaux Aspect* (L.I.M.A.) porté par *Mines-ParisTech - PSL*, qu'une chaîne complète de validation pour la simulation de l'apparence a pu être mise en place après la réalisation d'une étude sur le rendu prédictif des matériaux composites exploitant des données du *Centre de Morphologie Mathématique*. Les résultats de la simulation ont ensuite été confrontés au réel dans l'article *Objective Colorimetric Validation of Perceptually Realistic Rendering*, en proposant une métrologie de bout en bout appelée plus tard « *iso-photographie* : de l'émission goniométrique spectrale des sources à la réponse quantique du capteur ».

Mots-clés : synthèse d'image, iso-photographie, rendu prédictif, BRDF, conception de l'apparence

Abstract

The concept of « Computer Aided Appearance Design » [2] (CA²D), first appeared in the 1990s under various names. It is a branch of "Computer Aided Design" (CAD) dealing with the simulation of the visual aspect of objects from an aesthetic and functional point of view. CA²O could be an extremely relevant tool for decision making in the design phases of manufactured products. However, while nowadays digital models have almost completely superseded physical models, the choice of shape, colours and materials still depends essentially on the elaboration of one or more real prototypes. The reasons why CA²O has not yet become an established part of the design process are examined to determine what are the remaining technological barriers, and which ones will the present work help to remove ?

The aim is to propose a discerning approach to the implementation of a predictive simulation chain of light-matter interactions. More specifically, the following pages deal with an approach measurements based, which originated in our works on the optical simulation of effect paints in the automotive industry (*PSA*), and the study on *interactive photo-realistic illumination in remote environments* (*ENSAM*), then leading to the *ray-on* Project within *on-situ*, a digital creation agency. However, it is only recently, within the framework of the *Lumière Interactions Matériaux Aspect Project* (L.I.M.A.) supported by *Mines-ParisTech - PSL*, that a complete validation chain for the simulation of appearance was set up after the completion of a study on predictive rendering of composite materials using data from the *Centre de Morphologie Mathématique*. In the paper entitled *Objective Colorimetric Validation of Perceptually Realistic Rendering*, the results of the simulation were eventually compared with the real world by proposing an end-to-end metrology later called « *iso-photography* : from the spectral goniometric emission of the sources to the quantum response of the sensor ».

Keywords : computer generated images, iso-photography, predictive rendering, BRDF, appearance design

2. In French « Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur », which will be referred to in the remainder of this work with the French acronym CA²O.

Table des matières

Introduction **11**

1 Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur **17**

1.1 Introduction au chapitre . . . 18

1.2 Définition de la CA²O . . . 21

1.3 Etat de l'art et verrous scientifiques . . . 22

1.3.1 L'image vraie . . . 22

1.3.1.1 Origine de l'apparence . . . 22

1.3.1.2 Perception de l'apparence . . . 28

1.3.1.3 Capture de l'apparence . . . 32

1.3.1.4 Restitution de l'apparence . . . 33

1.3.2 Le rendu vrai . . . 36

1.3.2.1 Equation du rendu . . . 38

1.3.2.2 Méthodes de résolution . . . 46

1.3.2.3 Premier verrou scientifique . . . 47

1.3.3 Un comparable fiable . . . 48

1.3.3.1 Comparer le réel et le virtuel . . . 49

1.3.3.2 Deuxième verrou scientifique . . . 51

1.4 Proposition pour une chaîne iso-photographique de conception de l'apparence . . . 51

1.4.1 Lever le deuxième verrou pour un comparable fiable . . . 51

1.4.1.1 Rendu versus photographie . . . 52

1.4.1.2 Simuler l'image RAW . . . 54

1.4.1.3 Calculer la distance entre la photographie et l'iso-photographie . . . 58

1.4.2 Lever le premier verrou pour un rendu « vrai » . . . 60

1.4.2.1 Moteur de rendu prédictif basé mesures . . . 60

1.4.2.2 Matériaux mesurés 60
1.4.2.3 Sources de lumière mesurées 61
1.4.2.4 Instruments caractérisés 62
1.4.3 Chaîne de rendu iso-photographique basé mesure 63
1.4.4 Discussion : La photographie comme référentiel ? 64
1.4.4.1 Médium photographique 64
1.4.4.2 Limites du modèle 65
1.5 Conclusion du chapitre 66

2 Contribution : « Rendu prédictif de matériaux composite - une approche multi-échelle » 69
2.1 Présentation de la contribution 70
2.2 Publication 70
2.3 Discussion 85

3 Contribution : « Validation objective iso-photographique en environnement contrôlé » 87
3.1 Présentation de la contribution 88
3.2 Publication 88
3.3 Discussion 105
3.4 Résultats récents 105
3.4.1 Description du setup 105
3.4.2 Caractérisation 106
3.4.3 Simulation iso-photographique 111
3.5 Conclusion du chapitre 112

4 Contribution : « Illumination photo-réaliste interactive en environnement distant ». 115
4.1 Présentation de la contribution 116
4.2 Publication 116
4.3 Résultats faisant suite à ces travaux 121
4.4 Conclusion du chapitre 122

Conclusion et perspectives 125

Annexes 135

Introduction

Problématique

Au milieu des années 80, la CFAO (Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur) fait son apparition, tout d'abord dans le domaine militaire, suivie ensuite par le monde industriel. Durant les années 90, elle s'est largement implantée en substitution des plans papier pour finalement supplanter presque totalement la maquette physique au cours des années 2000. On parle alors de maquette numérique. Actuellement, le calcul informatique permet de valider des paramètres physiques tels que la résistance mécanique de matériaux, mais aussi d'évaluer la forme, y compris en immersion et à l'échelle 1 :1, grâce aux environnements de réalité virtuelle. Cette évolution a fait gagner un temps considérable dans les cycles de conception. À titre d'exemple, le temps de conception d'une automobile est passé de 5 à 3 ans en moins de deux décennies !

Il reste toutefois un domaine où la maquette physique est encore la norme : c'est le domaine du design *couleur et matière*. La grande majorité des produits manufacturés font toujours l'objet de maquettes pour l'évaluation de l'adéquation teinte-forme. En effet, en plus d'être liée à une appréciation hautement subjective, la matière ne s'apprécie qu'une fois appliquée à la forme et ceci dans un environnement lumineux donné. Une modification, même minime, de certains paramètres, comme la continuité de forme ou le spectre d'éclairage, peuvent avoir une répercussion majeure sur la perception de l'apparence d'un objet. On parle d'*évaluation subjective multi-factorielle*. Alors que pour d'autres situations d'évaluations sensorielles, telles que l'appréciation tactile d'une matière, il est possible de travailler sur de simples échantillons ; Pour l'évaluation de l'apparence visuelle, il est nécessaire de prendre en compte la forme de l'objet et son environnement lumineux.

L'utilisation spécifique d'outils de Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur [3] (CA²O) se révèle indispensable pour s'affranchir des maquettes physiques dans la représentation de l'apparence. En suivant la même approche que pour les autres domaines de la CAO, ces outils permettront la simulation prédictive de l'apparence d'objets sur la base de la maquette numérique. Le résultat de cette simulation pourrait alternativement être donné sous forme d'indicateurs scalaires, de tableaux ou de graphiques. Mais l'évaluation de l'apparence étant hautement subjective, il est naturel d'envisager de proposer un résultat sous forme d'image réaliste, plus à même de nous permettre une représentation mentale juste. Dès son origine, dans les années 70, la communauté scientifique de l'Informatique Graphique s'est intéressée à la synthèse d'image et, en particulier, à la synthèse d'image réaliste. Les progrès ont depuis été continus, si bien qu'actuellement la synthèse d'image est couramment utilisée dans des domaines aussi divers que l'industrie manufacturière, le cinéma, les jeux, la médecine, etc.. Aussi réalistes [4] soient-elles, les images de synthèse ne sont pas encore utilisées pour faire des choix définitifs de matières et restent confinées au domaine illustratif.

3. L'acronyme CA²O, utilisé tout au long de ce travail, permet de différencier la « Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur » de la « Conception Architecturale Assistée par Ordinateur », habituellement désignée par l'acronyme CAAO.

4. La notion de « réalisme » sera discutée plus loin dans ce document.

Ce manque de « confiance » dans l'image de synthèse est principalement dû au fait que, pendant longtemps, les algorithmes ne permettaient pas de calculer de façon juste et complète l'état d'équilibre lumineux d'une scène. Il fallut ensuite attendre plusieurs décennies pour que les performances des calculateurs permettent de produire des images en un temps raisonnable. Enfin, comme nous le verrons à la section 1.3, la réponse de la matière à un flux lumineux est le résultat de phénomènes complexes se produisant à différents niveaux d'échelle qui doivent nécessairement être fidèlement reproduits afin d'obtenir un résultat juste.

Mais les limites techniques et scientifiques ne sont pas la seule raison pour laquelle il n'existe pas encore de système de CA^2O réellement fonctionnel. Il manque également un lien cognitif fort entre le virtuel et le réel. En effet, aucun dispositif de restitution d'images (écran, projecteurs, HMD, etc.) n'est en mesure de reproduire l'ensemble du spectre, de la profondeur et de la dynamique pouvant être perçu par l'œil humain. Il est peu probable qu'un tel dispositif soit disponible dans les prochaines années. C'est la raison pour laquelle des algorithmes dits de « tone mapping » ont été développés. Mais ces algorithmes, qui modifient la couleur et la dynamique de l'image pour la rendre perceptuellement plus proche de la sensation visuelle du réel, réduisent paradoxalement d'autant la confiance puisqu'ils correspondent *in fine* à une adaptation réductrice, voire un « trucage ».

Contexte et question de recherche

Arrêtons-nous un instant, regardons en arrière, dans le temps. Que voyons-nous ? Sans doute les multiples chemins aux ramifications infinies parmi lesquelles se trouve la seule et unique voie qui nous a menés jusqu'ici. Imaginons maintenant qu' *ici* se trouve la réponse à une question de recherche qui était *là-bas,* au tout début de notre histoire scientifique. Alors, en nous basant sur le principe de réciprocité de Helmholtz, nous savons qu'il est possible de provoquer ce retournement temporel [Ler+04]. Il existe en effet un chemin cohérent, une sorte de ligne polygonale, d'*ici* à *là-bas* telle que chaque changement de direction est déterminé par une certaine fonction de distribution bidirectionnelle. Cette fonction est une fonction diffuse où la réflexion cartésienne, une *raison pure*, n'occupe qu'une place infime, bien que généralement prépondérante. Fait étrange : en optique, il existe une fonction de diffusion [5] où la réflexion cartésienne, la réflexion spéculaire pure, n'occupe qu'une place infime, bien que généralement prépondérante. Descartes percevait-il les chemins de la pensée comme ceux de la lumière ? C'est le « paradigme optique appliqué à l'esprit » [Lur17]. Quoi qu'il en soit, nous venons de découvrir simultanément l'algorithme du tracé de chemin inverse et le principe du doctorat par Validation des Acquis de l'Expérience(VAE) ! Le contexte de cette VAE m'invite donc à proposer d'abord une *réponse* : « Le rendu iso-photographique basé mesure ». C'est sans doute l'étape la plus évidente de ce travail car la société United Visual Researchers (UVR), dont je suis l'un des deux co-fondateurs, est née de cette *réponse*. Le rendu iso-photographique basé mesure peut se définir

5. La diffusion de la lumière par la matière est décrite par une fonction de distribution nommée, en anglais, Bidirectional Scattering Distribution Function (BSDF).

comme un calcul prédictif d'images de synthèse dont les données d'entrée sont des mesures (matériaux, sources de lumières, etc.) et dont la sortie est, dans l'absolu, identique à une photographie. Formulons ensuite une question de recherche. Krishnamurti affirmait que « la réponse est dans la question ». La réciproque est-elle vraie ? Oui, sans doute. En effet, la *question de recherche* qui m'anime depuis le début des années 2000 est celle de la Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur, la CA²O :

⇒ Comment utiliser les capacités de calcul d'un ordinateur afin de permettre des choix d'apparence avant même que l'objet n'existe ?.

Ce travail est donc un mémoire de thèse par VAE. Il regroupe un certain nombre de travaux réalisés entre 2000 et 2018 autour de la notion de Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur. Ces travaux se sont déroulés pour la plupart dans le monde académique (*Institut de Recherche en Informatique* de Toulouse, *Institut Image de l'École nationale supérieure d'arts et métiers*, *Mines ParisTech* et le *Conservatoire National des Arts et Métiers*) et souvent en lien avec l'industrie, en particulier avec PSA et Saint-Gobain.

Organisation du mémoire et contributions

Organisation du mémoire

Le mémoire qui suit est organisé de la manière suivante :

Le chapitre1 : **Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur**, introduit ce nouveau champ d'étude de la simulation numérique qu'est la CA²O. Après en avoir donné une définition la plus claire et concise possible, j'en expose les domaines d'application, principalement dans l'industrie. Le lecteur trouvera ensuite une approche pragmatique de la mise en œuvre d'une chaîne de conception de l'apparence basée sur un comparable fiable : la photographie.

Le chapitre 2 : **Rendu prédictif de matériaux composite - une approche multi-échelle**, présente une première contribution abordant la conception de l'apparence des matériaux composites, optiquement homogènes : « Predictive rendering of composite materials : A multi-scale approach » publiée dans les actes de la conférence *IS& T/SPIE Electronic Imaging* (San Francisco, 2015). [Mul+15] . Ce chapitre illustre la conception de l'apparence par la formulation : Comment l'indice optique homogène, obtenu à partir des mesures des propriétés optiques et morphologiques à l'échelle microscopique, peut-il être utilisé pour la simulation de l'apparence à l'échelle macroscopique ?

Le chapitre 3 : **Validation objective iso-photographique en environnement contrôlé**, présente une deuxième contribution mettant en œuvre la chaîne complète de conception de l'apparence iso-photographique : « Objective colorimetric validation of perceptually realistic rendering : a study of paint coating materials » parue dans le *Journal of Electronic Imaging* en 2016. Ces travaux ont débuté dans le cadre du projet L.I.M.A. [Med+16] et ont été poursuivi au sein de la société UVR. Ce chapitre illustre ainsi la démarche avec des résultats récents.

Le chapitre 4 : **Illumination photo-réaliste interactive en environnement distant**, présente une troisième contribution, plus ancienne, donnant son titre au chapitre. Elle a été publiée dans les actes de la conférence *Virtual Retrospect* (Biarritz 2003. La problématique de l'interactivité dans le cadre de la composition de simulation et d'image filmée en direct avec évolution de l'éclairage naturel y est abordée [Mul+03b] . La problématique du temps réel et de l'expérience utilisateur en environnements interactifs sera discutée en fin de chapitre.

Contributions scientifiques

Outre les 3 publications qui constituent le coeur de ce mémoire, j'ai participé aux publications suivantes :

Article de journal

— Victor Medina, Thomas Muller, Dominique Lafon-Pham, Alexis Paljic et Philippe Porral. "Objective colorimetric validation of perceptually realistic rendering : a study of paint coating materials". In : *Journal of Electronic Imaging* 25.6 (2016), p. 61609

Article de conférence

— Thomas Muller, Jean-Michel Sanchez, Julien Roger et Olivier Prat. "Interactive Photo-realistic Illumination for Distant Environments". In : *Virtual Retrospect*. 2003, p. 97-99

— Ofelia Ortega, Thomas Muller et Louis-François Fléri. "New technologies and iconography language in thecreativity process". In : *CST International Conference, J.* Barcelona, 2004

— Philippe Porral, Patrick Callet, Philippe Fuchs, Thomas Muller et Etienne Sandré-Chardonnal. "High dynamic, spectral, and polarized natural light environment acquisition". In : *SPIE-IS&T*. Sous la dir. de Ralf Widenhorn et Antoine Dupret. T. 9403. 0. SPIE, 2015, 94030B

— T. Muller, P. Callet, F. da Graça, A. Paljic, P. Porral et R. Hoarau. "Predictive rendering of composite materials : a multi-scale approach". In : *SPIE-IS&T*. Sous la dir. de Maria V. Ortiz Segovia. T. 9398. SPIE, 2015, p. 939804

— Patrick Callet, Thomas Muller et Philippe Porral. "Metallic Reflections in the City". In : *AIC2016 Interim Meeting*. Santiago (Chile) : AIC, 2016, p. 1-5

— Joël Randrianandrasana, Arnaud Chanonier, Hervé Deleau et al. "Multi-user predictive rendering on remote multi-GPU clusters". In : *2018 IEEE 4th VR International Workshop on 3D Collaborative Virtual Environments, 3DCVE 2018*. 3DCVE. 2018, p. 1-4

— P Porral, Laurent Lucas, T Muller, J Randrianandrasana et L Lucas. "Iso Photographic Rendering". In : *Workshop on Material Appearance Modeling*. 2018

— P Boher, T Leroux, T Muller et P Porral. "Accurate physico-realistic ray tracing simu-

lation of displays". In : *IS and T International Symposium on Electronic Imaging Science and Technology*. T. 2019. 6. 2019

Communication

— Patrick Callet, Yann Tabouret et Thomas Muller. "Les Peintures à Effet". In : *Ecole de printemps sur la couleur des matériaux*. Roussillon (France) : okhra/CNRS, 2001

— Thomas Muller, Jean Michel Sanchez, Julien Roger et Thomas Dumorey. "Espace et lumière, vers une simulation interactive de l'éclairage". In : *Maquette Virtuelle et Patrimoine*. Cluny (France), 2003, p. 13-14

— Joël Randrianandrasana, Arnaud Chanonier, Alexis Paljic et al. "Rendu prédictif interactif sur clusters hybrides multi-GPU". In : *AFIG*. 2017

Poster

— Philippe Porral, Thomas Muller et Patrick Callet. "Spectral and Polarized Environment Imaging". In : *AIC2016 Interim Meeting*. T. Poster. 2016

Chapitre 1

Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur

1.1 Introduction au chapitre

« *L'apparence représente la première étape dans un jeu de séduction* », cette phrase de Catherine Krunas, créatrice et designeuse contemporaine, résume en quelques mots l'importance cruciale de l'apparence dans l'attractivité d'un produit. Ici, lors d'une interview, il était question d'un flacon de parfum mais tout produit manufacturé sera effectivement évalué en premier lieu sur sa seule apparence visuelle. Lorsque l'on parle d'apparence, on pense d'abord à l'**apparence esthétique**, notion très subjective et sensible aux modes, que l'on illustrera par cette chaise de 1956 (figure 1.1). Mais le design de l'apparence c'est aussi le design de l'**apparence fonctionnelle** qui rentre en jeu, par exemple, dans la conception de l'affichage « tête haute" du cockpit d'un avion (figure 1.2), la lisibilité d'un écran au soleil, ou la réflexivité d'un vitrage de bâtiment aux propriétés thermiques. Fonctionnalité et esthétique sont d'ailleurs très souvent intrinsèquement liés dans le processus créatif.

FIGURE 1.1 – Eero Saarinen, Tulip Chair, 1956

L'apparence est, de fait, centrale dans la notion de « qualité perçue », notion essentielle à l'industrie car elle désigne « le niveau de qualité d'un produit tel qu'il est perçu par le consommateur de manière plus ou moins subjective » [1]. L'apparence transmet au consommateur, dès le premier coup d'œil, des informations très précises sur la gamme du produit, sa qualité et son niveau de prestations.

On comprend alors aisément que l'industrie manufacturière investisse des sommes considérables dans le design, en réalisant des maquettes physiques au plus proche de la réalité. Ce processus est, de toute évidence, chronophage et limité à un nombre réduit de combinaisons forme-matière, principalement du fait qu'il a peu profité des avancées de la simulation numérique. Nous pouvons par exemple observer (figure 1.3) comment la *clay* (argile à modeler) de l'industrie automobile est toujours utilisée

1. https ://www.definitions-marketing.com/definition/qualite-percue/ (consultée le 21 décembre 2020)

FIGURE 1.2 – C-130J : head-up display du co-pilote.

pour l'évaluation de la forme, bien sûr, mais aussi de la matière. Elle sera, éventuellement, apprêtée et peinte pour juger de la façon dont la forme « prend » la lumière (ici la carrosserie a été peinte en gris). Par ailleurs, les harmonies de teintes sont évaluées sur des formes standardisées afin de travailler sur des comparables à moindre coût.

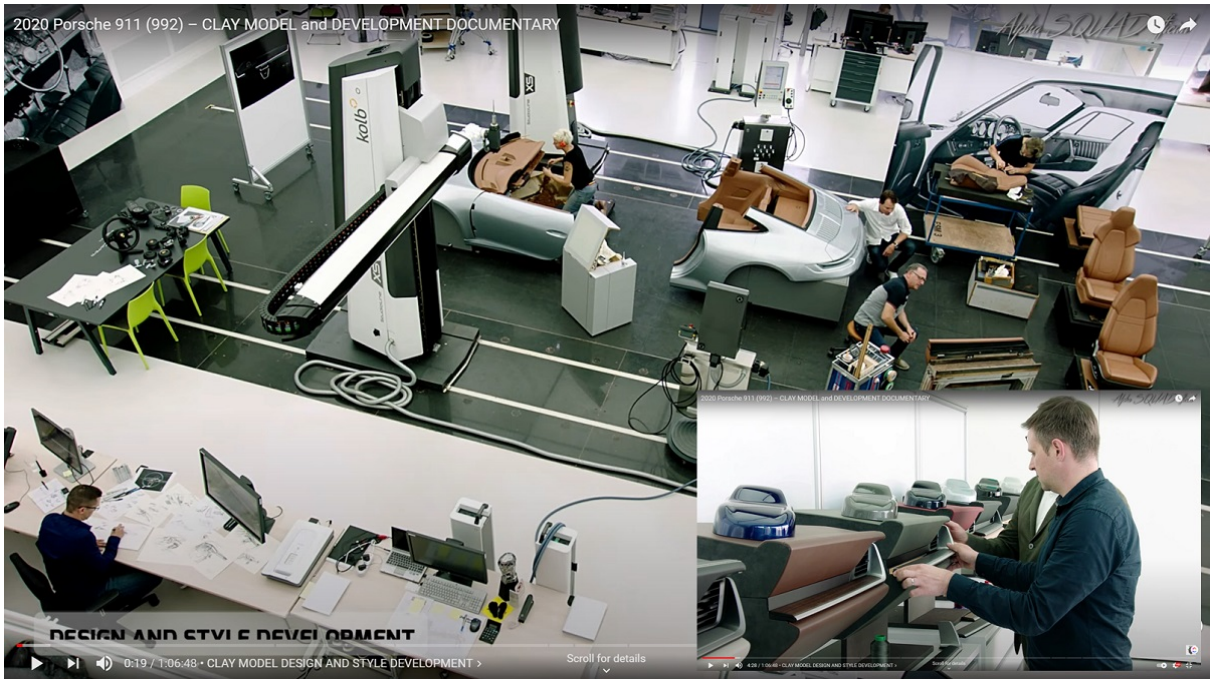


FIGURE 1.3 – Plateau de design automobile en 2020 : Maquettage en clay. Illustration tirée du documentaire "2020 Porsche 911 (992) – Clay model and development" © Alpha SQUAD.

Nous observons également, sur la figure 1.3, une machine à commande numérique, ici de marque Kolb [2]. Cette machine, de conception récente, permet de créer un pont entre maquette numérique et maquette physique. En effet, ce robot dispose à la fois d'une fraiseuse et d'un scanner 3D qui lui permet de produire une maquette brute en clay, affinée ensuite manuellement par des designers hautement qualifiés, puis de la re-numériser afin de la réintégrer dans la chaîne numérique. La maxime « la fin justifie les moyens » prend ici tout son sens... l'objectif est clair : minimiser autant que possible **la rupture de la chaîne numérique** (figure 1.4) provoquée par la maquette physique afin d'accélérer et de simplifier le processus de conception.

Le futur de l'industrie, qu'on nomme actuellement « industrie 4.0 », ou nouvelle révolution industrielle, passe par la mise en place d'une chaîne numérique fiable visant à contrôler numériquement les flux d'information, depuis la conception jusqu'à la fabrication du produit. Ce lien direct entre différents outils informatiques doit donc connecter tous les services de l'entreprise. La maquette physique en est de tout évidence le maillon faible.

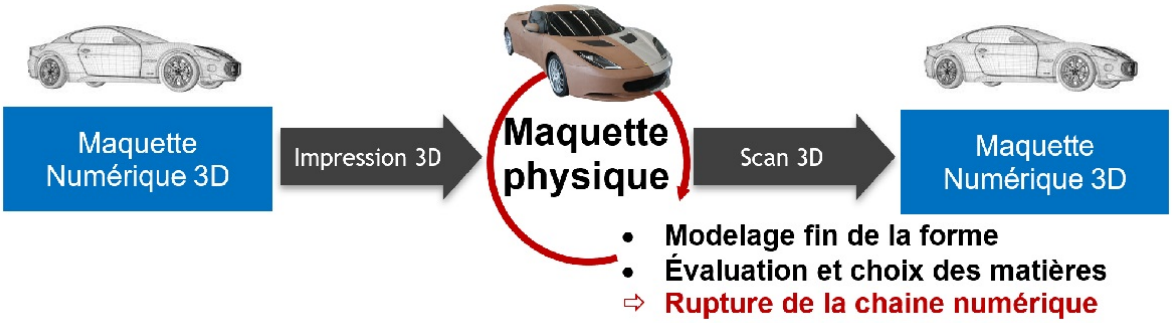


FIGURE 1.4 – Maquette physique en rupture de la chaîne numérique

De façon générale, la maquette arrive trop tard dans la chaîne de conception, la forme est déjà figée au moment du choix des matières. De nombreux problèmes ne peuvent pas être anticipés. Cela induit des coûts et des retards importants non maîtrisés. Par exemple, lorsque le nombre d'options est important, il n'est pas possible de prototyper toutes les combinaisons. Si un problème n'est pas détecté en amont, il ne sera signalé qu'en sortie de chaîne de production ou, pire encore, par le client lui-même. De plus, certains aspects liés à l'apparence ne sont tout simplement pas évalués : comme le cas d'un immeuble dans son environnement réel, ou du vieillissement des matériaux.

Dans ce contexte, et à la vue de la nécessaire réduction du temps des cycles de conception, nous constatons que les industriels devront rapidement abandonner la maquette physique de design, ou du moins se limiter à un nombre très réduit d'itérations afin de confirmer les choix faits numériquement. La solution passe par le maintien de l'intégrité de la chaîne numérique dans son ensemble sans aucune

2. https ://www.kolb-technology.com/en/

rupture. Il est donc naturel de chercher à appliquer les méthodes de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) à la conception de l'apparence. Effectivement, dans de nombreux domaines, la CAO a permis de réduire efficacement les coûts et les temps de conception tout en fiabilisant les procédés. Mais la Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur (CA²O) doit répondre à une problématique extrêmement sensible : La **confiance** dans l'image résultant de la simulation numérique.

Dans la suite de ce chapitre, après avoir formulé une définition formelle de la CA²O, nous allons étudier et comprendre les attributs de ce que j'appellerai une « image vraie » c'est-à-dire une image conforme à de la réalité. Je précise les verrous scientifiques qui, à mon sens, ont limité le développement de la CA²O et montre comment en lever certains afin de présenter, en fin de chapitre, une chaîne complète de conception de l'apparence fiable et répétable. J'ai choisi d'introduire, au fur et à mesure, dans ce chapitre les fondamentaux de l'optique, là où le contexte le justifie et en favorise la compréhension. Les lecteurs souhaitant explorer plus en profondeur les notions d'optiques fondamentales, sont invités à se référer au textes classiques [BW99 ; Hec16].

1.2 Définition de la CA²O

La Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur est une branche de la CAO. Elle a trait à l'aspect visuel des matériaux. Le dictionnaire Larousse donne la définition suivante pour la CAO : « Ensemble des techniques informatiques utilisables dans le processus de conception d'un produit nouveau » [3]. Nous proposons par conséquent de définir ainsi la CA²O : « Ensemble des techniques informatiques utilisables dans le processus de conception de l'apparence d'un produit nouveau ».

Il est toutefois utile de préciser le sens du mot *apparence*. Il s'agit ici de « l'aspect conforme à la réalité sous lequel quelque chose apparaît à la vue ou à l'esprit » [4]. La conception de l'apparence peut, en cela, se référer au processus visant à mettre en adéquation visuelle la forme et la matière constituant un objet. Elle peut aussi se référer au processus de conception de la matière elle-même, visant à produire un effet optique particulier.

La CA²O est un concept relativement récent, théorisé à la fin du XXe siècle, entre autres, par Patrick Callet [Cal98] sous le vocable de *CAO de la Couleur*. On trouve aussi dans la littérature les termes d'*Aspect coloré* ou d'*Apparence visuelle* pour désigner le même domaine d'application. J'ai sciemment choisi d'utiliser le mot *apparence*, à l'instar de certaines publications internationales [KL11], sans l'adjonction du mot *colorée* car la couleur est une notion intrinsèquement liée à la physiologie de l'œil. Nous verrons plus loin que, dans le domaine de la CA²O, il est paradoxalement primordial de faire abstraction de l'observateur humain. De plus, le mot couleur ne fait généralement pas référence à la notion d'intensité lumineuse ou de contraste. On utilise pour cela un autre mot : le *brillant*. Enfin la notion d'*apparence* peut aisément être étendue à des domaines non visibles comme l'infrarouge ou les

3. https ://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/conception/17878# locution (consulté le 17/01/2021).
4. https ://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/apparence/4639 (consulté le 17/01/2021).

rayons X. Malgré tout, j'utilise les termes d'*apparence visuelle* ou *colorée* lorsque je fais référence au domaine spectral qui nous occupe principalement, celui de la lumière visible, de 380 à 780 nm suivant les recommandations de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE).

1.3 Etat de l'art et verrous scientifiques

1.3.1 L'image vraie

À chaque étape du processus de conception, des décisions sont prises qui peuvent impacter le produit final ou son mode de fabrication. Ces décisions doivent être argumentées et soutenues par des aides **objectives** et **fiables,** afin d'être prises de la façon la plus rapide et la plus agile possible tout en minimisant les risques d'erreurs. En termes d'apparence, le designer va s'intéresser, par exemple, à l'harmonie et aux écarts de teintes, au brillant, à l'éblouissement, à la visibilité, à la prise de lumière, etc., autant d'attributs plus ou moins subjectifs qui devront être évalués par une ou plusieurs personnes. L'information d'apparence est donc une information complexe qui doit être partagée, analysée et interprétée par le cerveau humain afin d'en évaluer l'esthétique et la fonctionnalité. L'apparence est évaluée avant tout sur la base d'une image mentale, ainsi que nous l'avons noté dans la définition du dictionnaire Larousse : « [...qui] apparaît à la vue ou à l'esprit ». La phrase suivante va donc nous servir de base de réflexion tout au long de cette section :

⇒ Le support de décision du designer est l'**image mentale** qu'il se fait de l'objet qu'il conçoit

Plus cette image mentale sera conforme à la réalité, plus la décision sera fine et juste. La question est donc de savoir comment produire cette représentation mentale et comment la transmettre le plus fidèlement possible à d'autres personnes. Vaste question, j'en conviens, qui nous renvoie à l'évolution des moyens de communication : les gestes, le dessin, la parole, l'écriture, etc. Autant de façons d'activer des unités de mémoire qui, une fois assemblées, forment l'imagination : car il est entendu que « les choses qui nous sont représentées [...] ne peuvent être formées qu'à la ressemblance de quelque chose de réel et de véritable » [Des41]. Cette approche philosophique est essentielle à la compréhension première de notre problématique car Descartes, philosophe et physicien, révèle que tout mode de communication pose un problème fondamental d'**interprétation**. L'objectif premier de nos travaux est donc de réduire constamment cette marge d'interprétation tout en fournissant l'information la plus complète possible sur l'apparence.La première chose à faire est d'objectiver le sujet de cette interprétation, en étudiant l'origine de l'apparence : comment est-elle perçue par l'œil humain, comment la capturer et comment la restituer ? C'est ce que nous allons voir dans les prochaines sections.

1.3.1.1 Origine de l'apparence

L'apparence a pour origine la perception visuelle de la lumière en interaction avec la matière. Les phénomènes physiques en jeu dans ces interactions sont relativement complexes et font encore

l'objet de recherches fondamentales, tant en optique qu'en physiologie, afin de définir des modèles unifiés. Toutefois, les connaissances scientifiques établies au milieu du XXe siècle fournissaient déjà un ensemble de modèles permettant la formalisation de l'apparence pour l'informatique graphique. Tout commence par l'apport d'énergie à la matière sous forme d'électricité, de chaleur, d'une action mécanique ou de toute autre forme d'énergie. Atomes et molécules excités produisent de la chaleur ou de la lumière [5] en fonction de la quantité d'énergie reçue et de leur structure propre. La lumière est modélisée de façon duale, à la fois ondulatoire et corpusculaire [BW99 ; Hec16]. C'est pourquoi, suivant la situation, nous devrons aborder le problème sous l'aspect quantique, avec comme unité le photon, ou sous l'aspect ondulatoire, avec comme unité la longueur d'onde, sans qu'il n'y ait d'opposition fondamentale entre les deux modèles qui ne sont, *in-fine*, que des vues d'un seul et unique phénomène. Par exemple, la loi de Planck (voir annexe 4.4) établit une relation entre la luminance énergétique spectrale émise par un *corps noir* et sa température T. Elle fait intervenir simultanément la longueur d'onde λ et le quantum d'énergie porté par un photon, égal à $h \cdot c/\lambda$, où h représente la constante de Planck et c la vitesse de la lumière dans le vide.

La lumière se propage en ligne droite dans le vide à la vitesse maximale c de 299 792 458 m/s. La vitesse de la lumière est moindre dans la matière, elle est alors déterminée par la formule $v = c/n$ où n est l'indice optique du milieu considéré. À l'interface d'un dioptre, frontière de deux milieux, la lumière est en partie réfléchie et en partie transmise en suivant les lois de Snell-Descartes (4.4). Du fait de la vitesse fixe de la lumière dans un milieu, la partie de la lumière transmise est donc soit ralentie, soit accélérée, par rapport à sa vitesse dans le milieu incident. Ce changement de vitesse s'accompagne d'un changement de direction, déterminé également par les lois de Snell-Descartes, qui induit par conséquent un changement de densité de flux lumineux tel qu'illustré par la figure 10 en annexe. La proportion de lumière réfléchie et transmise est, elle, déterminée par le calcul des coefficients de Fresnel (4.4).

Il est important de noter à ce stade que les interactions lumière-matière se produisent à une échelle inférieure au micromètre. En effet, la lumière est une onde électromagnétique, au comportement décrit par les équations de Maxwell-Lorenz (4.4), dont la longueur d'onde se situe entre $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$=[380,780] nanomètres. De ce fait lorsque nous évoquons un dioptre idéalement plan, il s'agit d'une surface localement plane à l'échelle de la lumière, donc dotée d'une « rugosité » [6] inférieure à $\sim$ 50 nanomètres [7] et d'un rayon minimal de l'ordre de $\sim$ 50 micromètre [8]. Il faut ici avoir conscience que 1 millimètre-cube de matière peut contenir des milliers de particules de cette taille sans qu'il y ait percolation [9]. Cela explique qu'un matériau composé de deux milieux, d'indices optiques différents, parfaitement transparents et entremêlés sous forme de particules fines de quelques microns,

5. En réalité, toute onde électromagnétique et pas uniquement la lumière visible
6. Si le mot « rugosité » peut avoir une signification à cette échelle.
7. Critère de Rayleigh \ cite{ Simonot2019}
8. Plus de 90% de la surface produit une diffusion géométrique. Moins 10% de diffusion par diffraction en bordure de la particule.
9. C'est-à-dire, sans que les particules ne se regroupent en amas.

puisse diffuser la lumière dans toutes les directions en ayant, par conséquent, un aspect visuel [10] mat tel qu'illustré par la figure 1.5. Le lait, par exemple, est composé de graisse et d'eau, la peinture blanche, d'oxyde de titane et de résine, le sucre en poudre, d'air et de cristaux de saccharose (figure 1.6). Pour une compréhension approfondie des notions qui vont suivre, le lecteur est invité à consulter l'ouvrage collectif « Quand la matière diffuse la lumière » [SBV19].

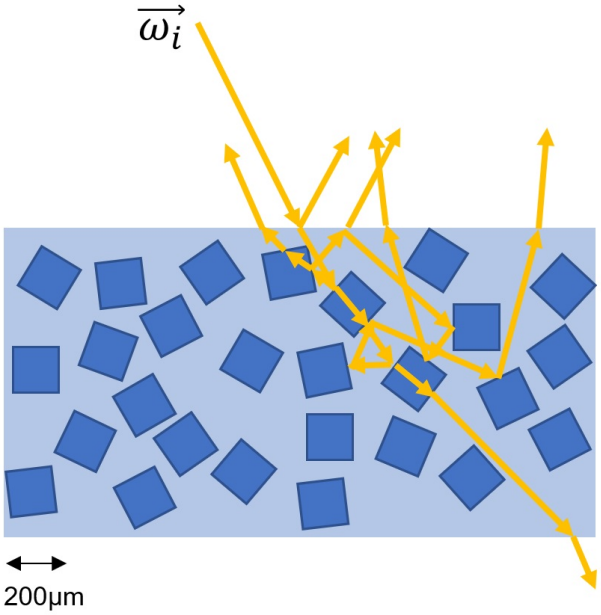


FIGURE 1.5 – Diffusion multiple dans un matériau inhomogène. Quelques chemins.

FIGURE 1.6 – Sucre en poudre, illustration de la diffusion multiple

Il est courant qu'un milieu ait des propriétés de réflexion et de transmission dépendantes de la longueur d'onde. Cela se traduit visuellement par une apparence colorée et s'exprime mathématique-

10. Sujet de la section suivante

ment à l'aide d'un indice optique spectral $\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$. La partie réelle n détermine la vitesse de phase comme vu précédemment $v(\lambda) = c/n(\lambda)$ et la partie imaginaire k détermine l'absorption spectrale du milieu. Lorsque l'indice de réfraction $n(\lambda)$ a une dépendance spectrale on observe une dispersion chromatique au passage d'un dioptre comme illustré par l'expérience du prisme réalisée par Isaac Newton au XVIIIe siècle figure 1.7. Dans la nature, on observe aisément des phénomènes semblables de dispersion chromatique, par exemple lors de l'apparition d'un arc en ciel. Lorsque l'indice d'absorption $k(\lambda)$ a une dépendance spectrale, on observe une coloration en réflexion et/ou en transmission. C'est le cas pour la couleur en transparence d'un vitrail (figure 1.8) ou en réflexion d'un métal comme l'or.

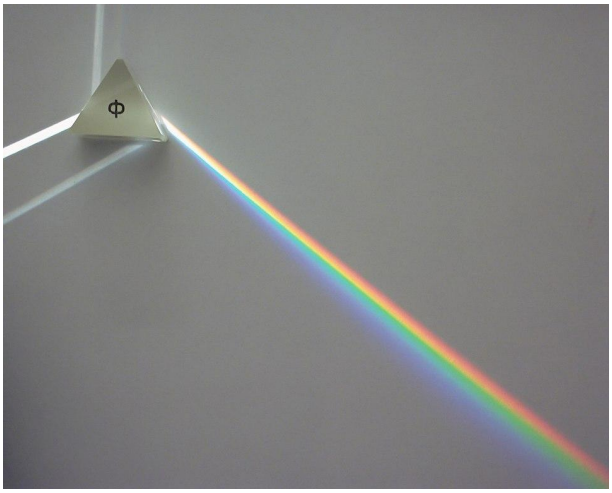


FIGURE 1.7 – Dispersion chromatique par un prisme

FIGURE 1.8 – Vitrail montrant une absorption spectrale

L'apparence colorée peut également être produite par une structuration régulière de la matière. À

une échelle proche de la longueur d'onde, jusqu'à quelques micromètres, un empilement de couches minces produit des phénomènes d'interférences constructives et destructives qui ont pour effet de sélectionner les longueurs d'ondes, et de produire des effets aux couleurs très pures comme à la surface des bulles de savon ou des ailes de papillon (figure 1.9). Lire à ce sujet « La couleur des papillons ou l'impérative beauté » de Serge Berthier [Ser00] et revoir l'extraordinaire court métrage « Papillon » dans la série "Relief de l'invisible II » [Lév+99] .

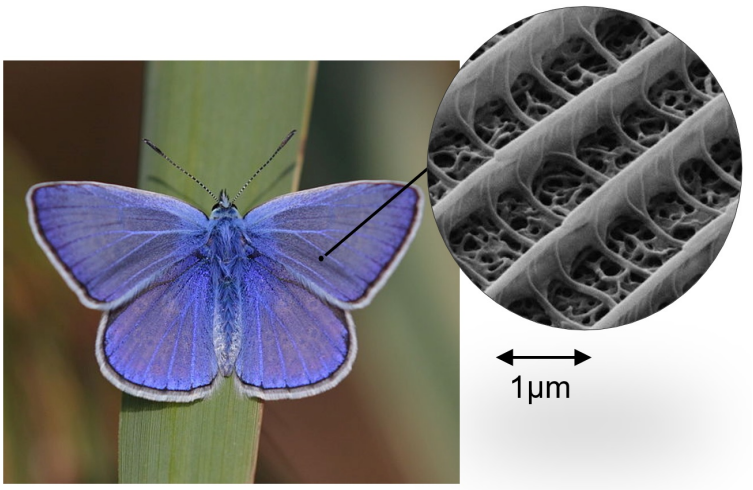


FIGURE 1.9 – Papillon Polyommatus Icarus. Vue au microscope. La membrane supérieure des écailles est constituée d'une structure spongieuse de chitine extrêmement fine. Photographie de Serge Berthier (theconversation.com)

Lorsque les particules présentes dans un milieu composite sont plus petites que la taille minimale d'un dioptre plan comme décrit précédemment, alors la théorie de Mie s'applique. Celle-ci décrit la diffusion élastique[11] de la lumière par des particules de taille inférieure à $2.\lambda$[12]. On peut voir la distribution angulaire de la diffusion en fonction de la taille des particules à la figure 1 de la contribution au chapitre 2 . Dans le cas de particules très petites par rapport à la longueur d'onde ($< 10nm$), la solution de Mie se simplifie sous la forme d'une diffusion de Rayleigh dont le diagramme goniométrique est symétrique par rapport au plan orthogonal à la direction d'incidence. La diffusion de Rayleigh explique, par exemple, la couleur du ciel clair et des vitraux. La diffusion de Mie, plus générale, explique la couleur des émaux, de la fumée, des nuages, etc. Plus la particule est petite, plus la dépendance spectrale est importante. Nous verrons au chapitre 2 que la diffusion de Mie s'applique de façon générale aux matériaux composites optiquement homogènes non percolés et qu'il est alors possible d'établir, pour lesdits matériaux, un indice optique homogène. La diffusion de Mie est une diffusion simple, c'est-à-dire ne faisant pas intervenir d'interaction avec de multiples particules. C'est

11. Sans changement de longueur d'onde.
12. En réalité la diffraction causée par une particule sphérique peut encore être calculée avec une bonne précision par la solution de Mie jusqu'à un diamètre de 50μ m

la traduction du phénomène de diffraction d'une onde électromagnétique par une petite particule sphérique.

A tout cela il faut ajouter, qu'en plus de la diffuser, la matière polarise la lumière. La lumière est constituée de deux champs intriqués, l'un électrique $\vec{E}$ et l'autre magnétique $\vec{B}$, perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation (figure 1.10). Ceci a une implication visuelle non négligeable. En effet, la variation temporelle de l'orientation du champ électrique définit la polarisation de la lumière. Considérant que la matière, en interaction avec la lumière, filtre et/ou modifie cette polarisation, on comprend que l'intensité des réflexions d'un objet sur l'autre est directement liée à ce phénomène. Contrairement à ce qui est dit dans de nombreux ouvrages, la polarisation n'est donc pas négligeable en ce qui concerne l'apparence, surtout si l'on considère que la lumière provenant d'un ciel clair est polarisée [Por16] . Pour se convaincre de l'importance de la polarisation sur l'apparence des reflets, il suffit d'observer la figure 1.11 où l'on peut constater que la lumière est polarisée par toutes les réflexions spéculaires y compris sur un vernis ou un tissu.

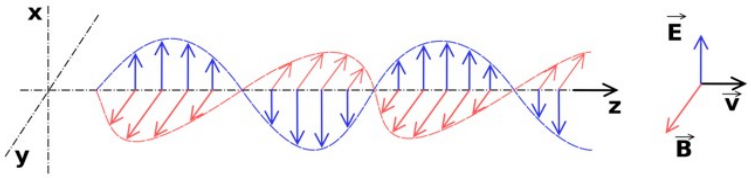


FIGURE 1.10 – La lumière est une onde électromagnétique constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique intriqués.

FIGURE 1.11 – Photographie avec filtre polariseur (à gauche), et sans filtre (à droite).

De façon générale, les équations de Maxwell-Lorentz (4.4) permettent de modéliser la propagation de la lumière et son interaction avec la matière à toutes les échelles. La théorie de Mie, les lois de Snell-Descartes, les coefficients de Fresnels et les interférences structurelles peuvent être déduites et démontrées à partir de ces équations fondamentales [BW99].

En résumé, l'apparence visuelle résulte des interactions entre lumière et matière. En interaction avec une particule simple de très petite taille face à la longueur d'onde, la lumière est diffusée autour de ladite particule avec une distribution angulaire fixe [13] et une distribution spectrale qui est dépendante de la longueur d'onde et de la nature de la particule. Lorsque la matière est structurée à une échelle plus proche de la longueur d'onde (dioptre à transition d'indice, couches minces, particules fines, etc.), la distribution spectrale et angulaire de la diffusion est déterminée par cette structure ayant comme cas limite la diffusion géométrique qui définit deux directions privilégiées en réflexion et en transmission. Lorsque la lumière est diffusée par un grand nombre d'éléments structurés ou non, on obtient à nouveau un cas limite aboutissant à une distribution lambertienne (4.4). Si l'on résume encore, la lumière est diffusée autour de particules de très petites tailles à des échelles **nanoscopiques** et inférieures. Cette diffusion devient réfraction et réflexion pure lorsque ces particules se structurent en surfaces planes à l'échelle de la longueur d'onde, donc à l'échelle **microscopique**, puis elle est à nouveau diffusée par un ensemble de surfaces planes aux directions de normales aléatoires à une échelle supérieure. On comprend que l'échelle a une grande importance dans ces interactions, comme illustré à la figure 1.13 de l'étude sur le rendu prédictif des matériaux composites (chapitre 2). À chaque échelle, la diffusion peut avoir une dépendance spectrale, créant la sensation colorée (sujet que nous abordons dans la section suivante), et induire une polarisation ou une dépolarisation de la lumière.

1.3.1.2 Perception de l'apparence

Comme nous venons de le voir, l'apparence visuelle d'un objet résulte de la physique des interactions lumière-matière, mais elle résulte également de la réponse électrochimique de l'œil et de l'interprétation psychosensorielle qui en est faite par le cerveau humain. Rappelons que l'apparence est associée à une image mentale, il faut donc prendre en compte la captation par l'œil et l'interprétation par le cerveau de la scène observée. Ce n'est, bien sûr, pas l'objet de cette étude de décrire l'ensemble des phénomènes mis en œuvre dans la chaîne perceptuelle très bien décrite par ailleurs par Robert Sève dans l'ouvrage « Physique de la couleur » [Sèv97]. Toutefois, prenons quelques instants pour rappeler la nature de l'apparence et l'instrument qui permet de la percevoir : notre œil.

L'œil humain est un système optique complexe formé par la cornée, le cristallin, l'iris et la rétine (voir la figure 1.12). Lorsque l'image se forme sur le fond de la rétine, des cellules sensibles à la lumière réagissent et transmettent l'information au cerveau par le biais du nerf optique. Ces cellules sont de deux types : les cônes et les bâtonnets. Il existe trois types de cônes qui sont sensibles, grâce à leurs pigments, à des spectres déterminés dont les maximums respectifs sont à $\sim$ 510nm, $\sim$ 560nm et $\sim$ 620nm figure 13. Chacun de ces cônes génère une sensation colorée respectivement autour du bleu, du vert et du rouge. C'est la base de la couleur et de son aspect trichromatique. Les bâtonnets, quant à eux, sont sensibles aux faibles luminosités. Ils ne fournissent qu'une information en luminance, C'est pour cette raison que nous ne percevons que très peu les couleurs la nuit.

13. Diffusion de Rayleigh.

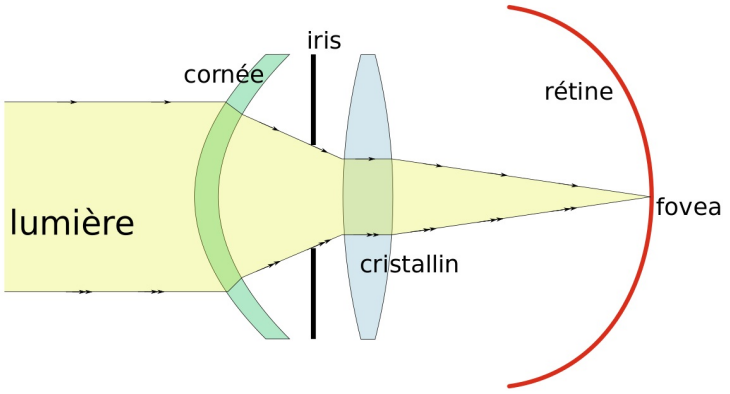


FIGURE 1.12 – Système optique de l'œil humain

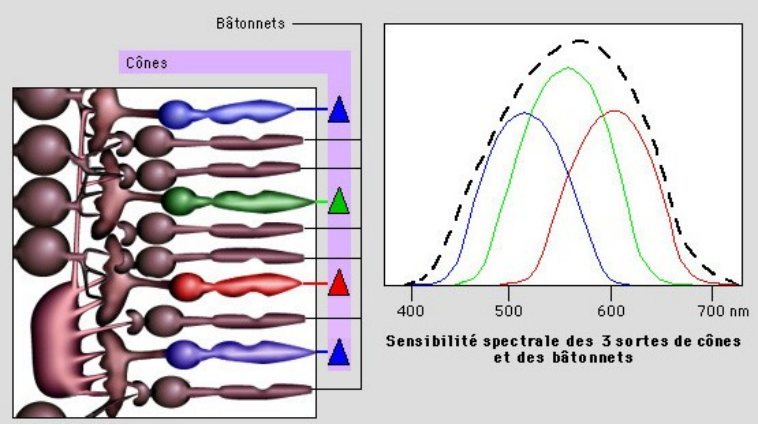


FIGURE 1.13 – Sensibilité spectrale des 3 sortes de cônes et des bâtonnets.Illustration de Mc Gill university (http ://lecerveau.mcgill.ca/).

L'œil est donc un capteur sensible à la partie dite *visible* des ondes électromagnétiques. La réponse de l'œil à la lumière n'est ni uniforme ni linéaire. La sensation colorée varie avec le niveau de luminance. Et la perception visuelle est variable d'un individu à l'autre. La Commission internationale de l'éclairage (CIE) a fait un travail important de normalisation afin de proposer des courbes de réponses spectrales moyennes et des espaces de couleurs normalisés figure 1.14 . Un domaine de l'optique est spécifiquement dédié à la mesure du rayonnement lumineux tel qu'il est ressenti par la vision humaine : La photométrie.

On pourrait, à première vue, comparer l'œil humain à un appareil photographique, mais comme

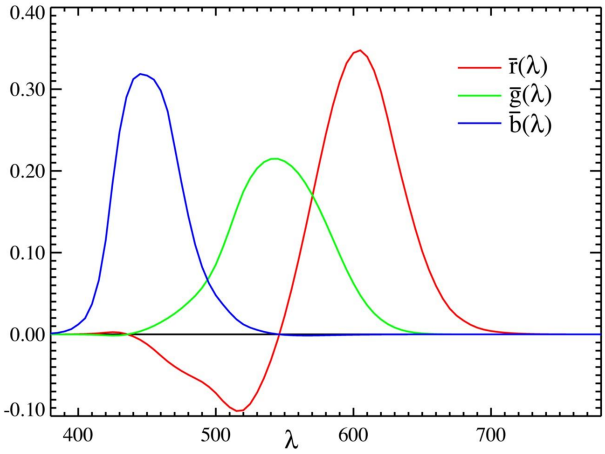


FIGURE 1.14 – Fonctions colorimétriques de l'espace CIE RGB

le souligne Grey Walter dans « Le cerveau vivant » [Wal54] : » [...]L'analogie avec la photographie s'écroule quand nous venons à regarder le mécanisme de la vision... il est vrai que la lentille de l' œil ressemble à celle d'un appareil photographique à bon marché, mais, d'un point de vue plus important, la rétine, sur laquelle l'image est projetée, n'est pas du tout semblable à un film photographique. La surface entière du film photographique possède un grain uniforme : les particules de matière chimiquement sensible qui la composent, sont réparties à une distance égale les unes des autres et sont d'une sensibilité égale. La rétine ne possède pas cette uniformité. Seule une toute petite surface d'environ un tiers de millimètres (figure 1.15), au centre de la rétine, a un grain suffisamment fin pour recevoir et transmettre une image très détaillée ». La figure 1.16 illustre l'image captée par la rétine et transmise au cerveau. On observe en effet que cette image est de très mauvaise qualité. Ce n'est pourtant pas la sensation visuelle que nous avons de la réalité. C'est que notre cerveau effectue un « post-traitement » complexe de l'information afin de reformer l'image mentale complète. Une analogie avec le traitement d'image en informatique a, d'ailleurs, permis de révéler des similitudes et d'améliorer certains algorithmes informatiques [Ben07].

L'acuité visuelle maximale est obtenue en vision diurne au niveau de la fovéa, la zone centrale de la rétine dans l'axe optique. Pour un humain moyen en bonne santé, le pouvoir séparateur de l'oeil est alors de une minute d'arc [14]. Cela signifie, par exemple, qu'à une distance de deux mètres l'œil ne discerne plus correctement deux points séparés à l'échelle du millimètre. Et qu'à la distance minimale d'accommodation de l'ordre de 20 cm, la résolution de l'œil est, au mieux, de 0.1 mm. Nous avons vu, dans la section précédente, que les phénomènes liés aux interactions entre la lumière et la matière se produisent à des échelles bien inférieures : **nanoscopiques** et **microscopiques**. Nous avons également noté qu'au-dessus de l'échelle microscopique, la géométrie 3D des surfaces distribue la lumière angulairement. Tous ces phénomènes sont perceptuellement moyennés par l'œil jusqu'à

14. Un soixantième de degré

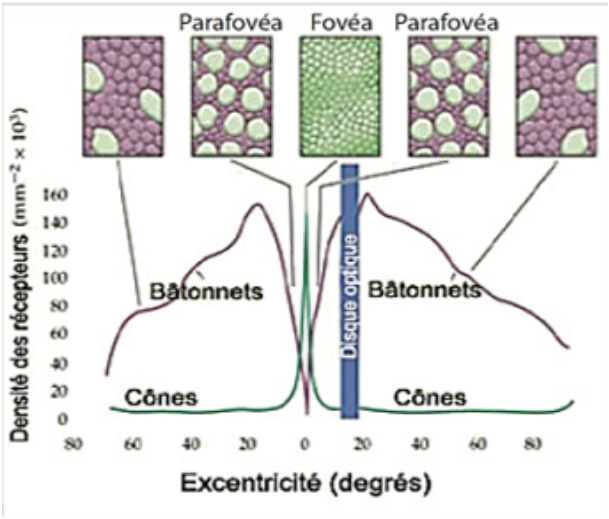


FIGURE 1.15 – Concentration des photorécepteurs en fonction de l'excentricité. Illustration de Mc Gill university (http ://lecerveau.mcgill.ca/).

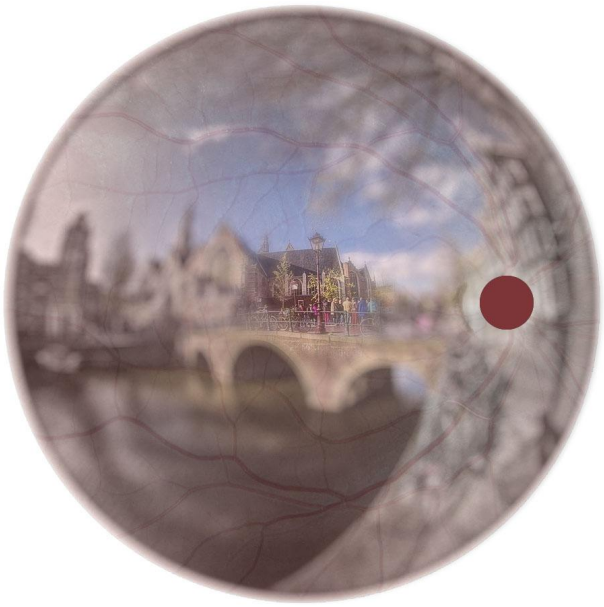


FIGURE 1.16 – Illustration de l'image captée par la rétine. La partie centrale, la fovéa, est colorée et nette contrairement à la zone périphérique. Le cercle désigne une zone aveugle à l'extrémité du nerf optique.

l'échelle **macroscopique** dont la frontière basse est déterminée par la distance d'observation. Entre les échelles microscopiques et macroscopiques, il existe donc une échelle intermédiaire communément nommée échelle **mésoscopique** [**Cal17**].

Nicodemus introduit en 1965 la Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF, annexe 4.4) dans le but de fournir un outil mathématique permettant de représenter le comportement optique d'un matériau à l'échelle macroscopique [Nic65]. Cette fonction de réflectance intègre l'ensemble des phénomènes décrits plus haut aux échelles nano, micro et mésoscopique. La BRDF est une dérivée, reliant l'éclairement incident pour une direction donnée à sa contribution à la luminance réfléchie dans une autre direction. Elle a pour unité le sr^{-1}. Il est courant d'introduire la BRDF dans la section consacrée aux « interactions lumière-matière », puisqu'elle décrit la réflectance d'un matériau. Pourtant on peut lire dans la norme parue en 1977 [Nic+77], qu'une « ..relatively large area of reflecting surface is irradiated by a well collimated beam of incident radiation... ». Ce qui montre l'importance de l'échelle d'observation et implique donc un observateur ou un appareil de mesure. C'est pourquoi, j'ai choisi d'introduire la BRDF dans la section « perception ». La BRDF est liée à une condition d'observation, donc à une échelle. De nouveau, la frontière macroscopique est directement liée à la distance d'observation et à la résolution optique de l'instrument (œil ou capteur). Il est parfaitement possible de traiter de la BRDF d'un champ de blé pourvu que la distance d'observation soit adéquate ; dans le cas d'une vue satellitaire par exemple. Depuis Nicodemus, un certain nombre de fonctions de distributions BxDF ont été introduites, pour la transmittance (BTDF), pour la diffusion sous-surfacique (BSSRDF), etc. Je garderai dans la suite de ce document le terme plus générique de BSDF pour « Bidirectional Scattering Distribution Function ».

En résumé, nous percevons l'apparence grâce à un instrument de mesure du rayonnement électromagnétique visible : l'œil, couplé à une analyse cognitive complexe. L'information captée, relativement pauvre et parcellaire, est largement reconstruite par le cerveau afin de produire une image mentale de la réalité observée. Cette image mentale comporte une information de couleur qui résulte de la conversion de la luminance énergétique spectrale perçue en un stimuli trichromatique. L'acuité visuelle de l'œil humain étant limitée, la luminance perçue correspond à l'intégration des interactions lumière-matière à des échelles inférieures. L'apparence peut donc être décrite et mesurée à une échelle macroscopique.

1.3.1.3 Capture de l'apparence

Comment mémoriser l'apparence d'un objet afin de la restituer ultérieurement ?

La première façon de capturer l'apparence est, bien sûr, de la mémoriser mentalement. Nous avons cette capacité de mémoriser l'image mentale et de la faire réapparaître plus tard à l'esprit. Nous verrons dans la section suivante qu'en plus du problème de fiabilité de la mémoire (on oublie, transforme et interprète ce qui a été vu), il y a une difficulté de transmission de cette information. Bref, nous sommes bien loin de la fiabilité recherchée. Par contre, il est utile de s'intéresser à la mémorisation de l'apparence par le cerveau humain, pour mieux comprendre la donnée à capturer. Ce que l'on mémorise ce n'est pas seulement une image d'un objet mais également les propriétés optiques de cet objet. Lorsque nous voyons un objet dans une situation donnée, nous sommes en mesure de

l'imaginer, de le représenter mentalement, dans une situation différente. Pour ce faire, nous en avons analysé la forme et la matière. Ce mécanisme nous permet également de reconnaître un objet dans un environnement lumineux quelconque, tel qu'illustré par la figure 1.17.

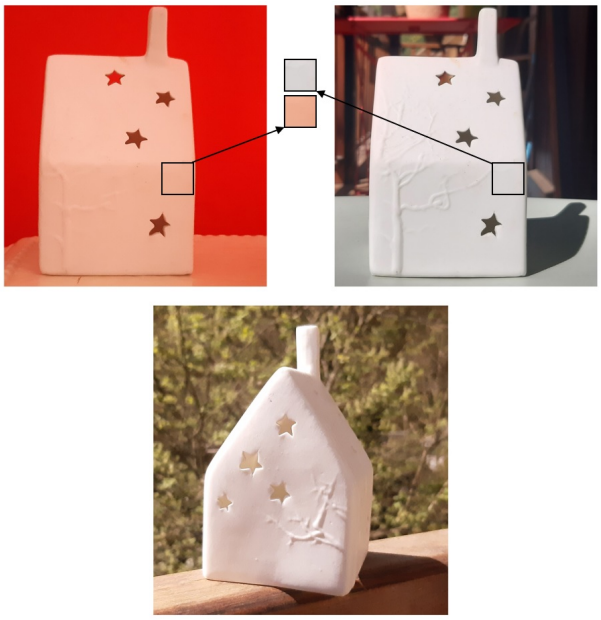


FIGURE 1.17 – Un objet dans trois situations différentes. Il est reconnu par le système visuel humain dans chaque situation, sa matière étant perçue comme blanche et diffuse, indépendamment de l'environnement.

Le cerveau humain fait donc une analyse objective de l'apparence. Prendre une photographie permet de capturer l'apparence dans une situation donnée mais ne permet pas de caractériser les propriétés intrinsèques de l'apparence. Pour cela il faut capturer les propriétés de forme et de matière de l'objet conjointement ou séparément. La capture de la forme d'un objet est réalisée grâce à un scanner 3D ou par de multiples photographies, suivie d'un processus de photogrammétrie [De 09]. La saisie des propriétés optiques de la matière consiste à capturer la BSDF à l'aide d'un spectro-gonioreflectomètre. Nous verrons au chapitre 3, lors de l'étude sur la validation objective, l'utilisation pratique de différents outils pour la capture de la BSDF.

1.3.1.4 Restitution de l'apparence

Le vocabulaire pour la description textuelle de l'apparence est très riche : brillant, mat, clair, intense, fade, profond, etc. Cela inclut également le vocabulaire des couleurs : azur, barbeau, Berlin, bleuâtre, bleuet, bleui, bleuté, cæruleum, et ainsi de suite, sans fin, pour toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. Le vocabulaire lié à la forme ou à la lumière n'est pas moins fourni. Pourtant, malgré cette richesse extraordinaire, la description textuelle de l'apparence fait largement appel à l'interprétation,

au vécu et à l'imaginaire (figure 1.18).

« …
Sa robe de pourpre au Soleil,
A point perdu ceste vesprée
Les plis de sa robe pourprée,
Et son teint au vostre pareil
… »

FIGURE 1.18 – Exemple de description textuelle de l'apparence (Pierre de Ronsard, Ode XVII)

Heureusement, l'incertitude générée par la description verbale ou textuelle est largement levée par une approche scientifique sur la base d'indices numériques qui permettent de décrire de façon unique une couleur, une forme ou un indice de luminance. Le calcul numérique par ordinateur : La **simulation,** permet de manipuler ces nombres, de les comparer, de les assembler sous forme de tableau ou sous forme d'images et de les partager de façon fiable. La figure 1.19 montre comment l'apparence peut être décrite sous forme numérique. L'information est complète et, si le calcul est non biaisé, elle peut être considérée comme fiable et répétable. Par contre cette information pose un problème de re-projection mentale. En effet, il est très difficile pour un être humain, à la lecture d'une information numérique, de juger de l'esthétique et des adéquations entre les différents éléments constituant la scène. L'analyse de ces données demande donc des connaissances expertes et répond essentiellement aux problématiques de l'apparence fonctionnelle dont nous parlions au début de ce chapitre.

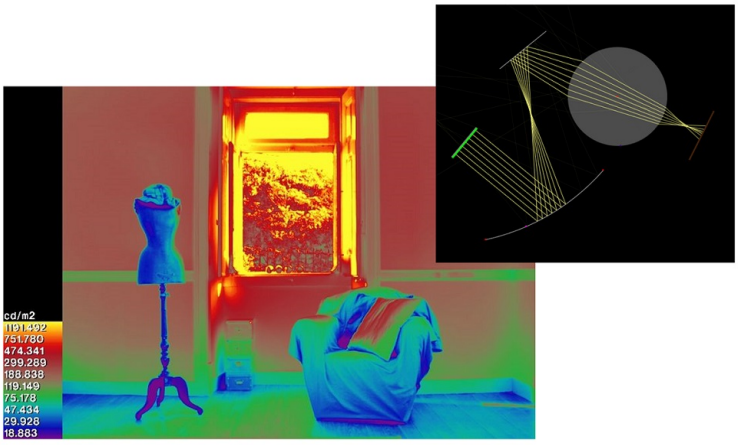


FIGURE 1.19 – Exemple de description numérique de l'apparence

Puisque l'information textuelle ou numérique n'est pas suffisante pour formuler et transmettre l'apparence de façon non-équivoque, il faut stimuler la vue comme elle le serait en présence de la scène réelle. En d'autres termes :

⇒ l'apparence doit être présentée en **situation** et à destination de l'**œil humain**.

L'objet qui se forme sur la rétine est une image. Il faut donc superposer à la réalité, une image « vraie », qui soit diffusée par un périphérique stimulant l'œil de façon à permettre la formation d'une image mentale au plus proche de celle qui se formerait à la vue de la réalité.

Restituer la couleur semble simple puisqu'il suffit de stimuler l'œil sur trois canaux, rouge, vert et bleu. C'est d'ailleurs sur ce principe que fonctionnent la plupart des écrans en couleurs additives RGB [15] et l'impression papier en couleurs soustractives CMJ [16]. Pourtant ce n'est pas si simple, l'ensemble des couleurs visibles ne peut être reproduite par seulement trois canaux car, comme le montre la figure 1.14, il faudrait pour cela être en mesure de créer des sources de lumière à intensité négative sur une partie du spectre visible. La figure 1.20 montre par exemple le gamut [17] standard appliqué aux écrans du commerce.

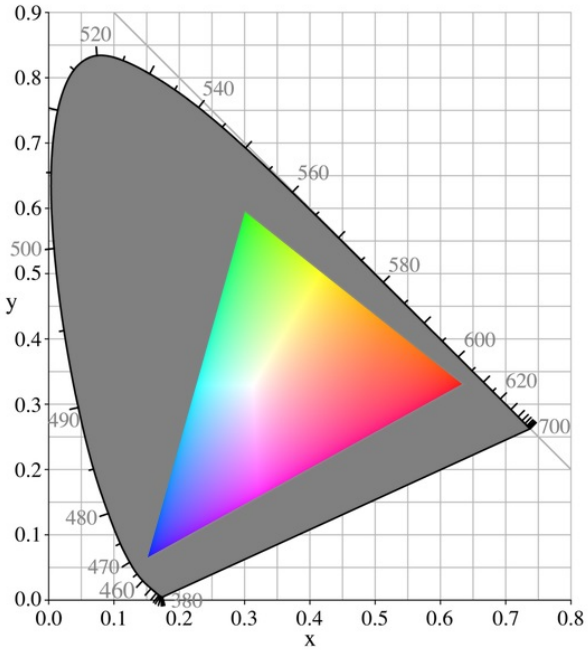


FIGURE 1.20 – Gamut CIE-1931 sRGB

Il en est de même pour la dynamique en luminance. Lœil humain peut percevoir la luminance de 10^{-6} à 10^{8} cd m^{-2} alors qu'un écran HDR sera, au mieux, en mesure de produire une luminance de 1 à 10^{3} cd m^{-2}. L'œil a donc une dynamique globale de l'ordre de 2^{46} et un écran une dynamique de 2^{10} . Toutefois la dynamique d'un écran est suffisante en situation statique (sans variation de l'iris) car la dynamique de la rétine seule est de l'ordre de 2^{7}.

15. Rouge, Vert, Bleu
16. Cyan, Magunta, Jaune
17. Le gamut est l'ensemble des couleurs qu'un dispositif permet de reproduire.

La vision en relief peut être reproduite en superposant à chaque œil l'image d'une même scène (photographiée ou simulée) avec une parallaxe correspondante à l'écart entre les deux yeux. C'est le principe des stéréoscopes du XIXe siècle et des casques de réalité virtuelle actuels. Les yeux convergent alors vers le point d'intérêt comme dans la réalité.

L'oeil accommode en permanence à la distance du point observé. Le cristallin est déformé par les muscles cilliaires afin de focaliser l'image sur la rétine. Il n'existe pas à notre connaissance de périphérique de reproduction, autre que l'holographie, permettant d'accommoder sur l'objet comme dans la réalité. Sur un écran d'ordinateur comme dans un casque de réalité virtuelle, l'accommodation se fait sur la surface de l'écran. Dans un système de vision en relief la distance d'accommodation ne correspond donc pas au point de vergence [FMP01]. Cela provoque le conflit oculomoteur illustré par la figure 1.21.

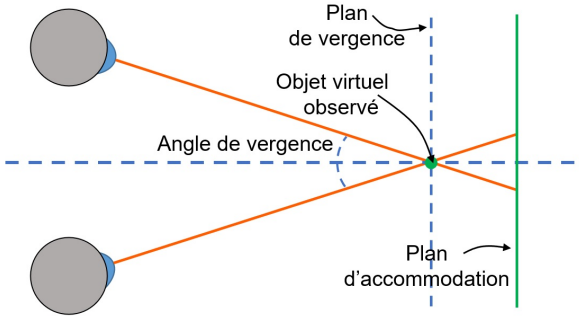


FIGURE 1.21 – Plans de vergence et d'accommodation dans les dispositifs de visualisation en relief

Il n'existe pas actuellement de périphérique de restitution de l'information lumineuse qui couvre totalement les capacités visuelles de l'œil humain. Malgré tout, les technologies d'affichage évoluent rapidement. Certains écrans HDR fournissent déjà une information riche couvrant la dynamique de la rétine, à défaut de toute la dynamique de l'œil, et un gamut élargi, au niveau de la recommandation UIT-R BT.2020 par exemple. Certains écrans atteignent également une résolution proche du pouvoir séparateur de l'œil à une distance d'observation donnée. En conclusion, les périphériques d'affichage actuels reproduisent une information incomplète mais riche, fiable et répétable dans leur espace de restitution. C'est le meilleur support dont nous disposions pour permettre à l'utilisateur de construire une image mentale au plus proche de la réalité perçue.

1.3.2 Le rendu vrai

Simuler l'apparence en situation, à destination de l'œil humain, est l'objectif premier d'un domaine de recherche de l'informatique graphique : la Synthèse d'Image. Comme l'écrivait déjà Bui Phong en 1975 « Obtaining a close image correspondence to the eye's subjective interpretation of the real object is the goal. » [Pho75]. Je reviendrai plus loin sur cette citation de Phong.

Dans la suite de ce chapitre, je développe pas à pas l'idée d'appliquer la Synthèse d'Image à la Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur avec, comme élément central de réflexion, la **fiabilité ainsi que** nous l'avons vu précédemment, comme facteur de confiance indispensable à l'utilisateur. Quelques travaux de recherche se sont penchés sur la problématique de la conception de l'apparence par ordinateur. Gary Meyer, puis Clement Shimizu, introduisent l'idée de la conception de l'apparence colorée [Mey00] [Shi09] en proposant au designer de choisir les couleurs spéculaires et diffuses d'un modèle numérique de peinture et de retrouver sa formulation physique. Duck Kim et Kwan Lee, remarquant que que les modèles numériques sont trop éloignés de la réalité, proposent pour leur part, de concevoir l'apparence en se basant sur des mesures de matériaux [KL11]. Patrick Callet explique qu'il n'est pas envisageable d'espérer un résultat juste en simulation numérique de l'apparence colorée sans prendre en compte les connaissances acquises au cours des siècles sur la physique des interactions lumière-matière [Cal98], mais aucune de ces recherches ne définit formellement de comparable fiable avec la réalité. Un prérequis à toute décision prise sur la base d'une image simulée est d'être assuré que la méthode de simulation est juste. A l'heure actuelle, l'état de l'art en synthèse d'image permet d'obtenir des rendus photo-réalistes, c'est-à-dire qu'ils ressemblent à des photos de la même manière que les peintures photo-réalistes d'artistes ressemblent à des photos (figure 1.22).

FIGURE 1.22 – Peinture photoréaliste - John's Diner with John's Chevelle, John Baeder, 2007, huile sur toile.

Au cours du temps, la prise en compte d'un certain nombre de phénomènes optiques a amélioré la qualité visuelle des images de synthèse de telle sorte qu'il est quelquefois difficile de savoir si une image a pour origine une simulation ou une prise de vue réelle. Pourtant, la problématique du monde de la simulation n'est pas de produire des images qui ont « l'air » réelles, mais de produire des images prédictives (figure 1.23). Accepterions-nous que la simulation physique d'un crash-test ait seulement « l'air vrai » ? Toute simulation doit pouvoir être vérifiée sur un cas réel avec une marge d'erreur connue et contrôlée.

Afin de comprendre ce qu'il manque à la synthèse d'image pour atteindre le niveau de la simulation nous allons, dans la section suivante, revoir le fondement des algorithmes de rendu en introduisant les

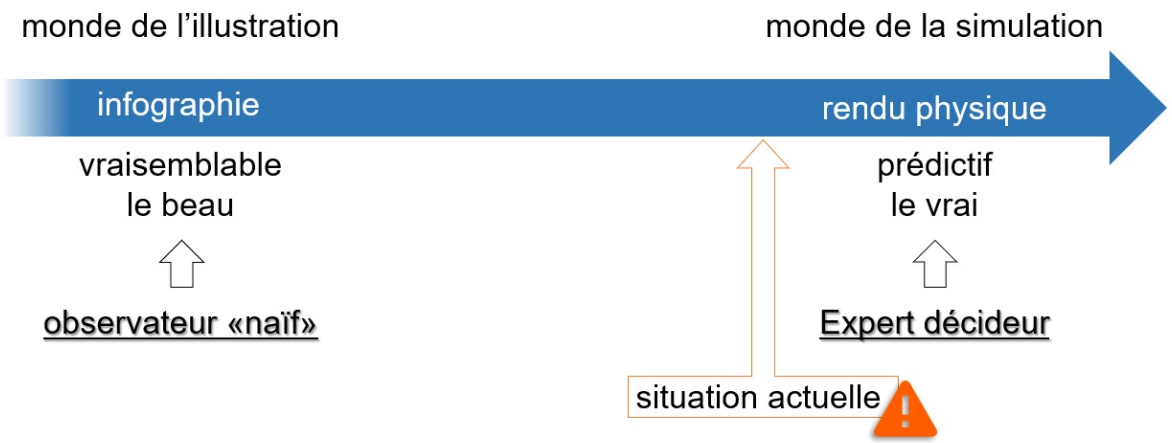


FIGURE 1.23 – Monde de l'illustration versus monde de la simulation

éléments d'optique indispensables à la génération d'une image prédictive.

1.3.2.1 Equation du rendu

Au cœur des algorithmes de synthèse d'image se trouve l'équation bien connue du rendu eq.(1.1) proposée par james kajiya en 1986 [Kaj86] .

$$L_o(x,\vec{\omega}_o) = L_e(x,\vec{\omega}_o) \; + \int_\Omega \rho(x,\vec{\omega}_i,\vec{\omega}_o) L_i(x,\vec{\omega}_i)\cos(\theta_i)\,\mathrm{d}\,\omega_i \tag{1.1}$$

Cette équation exprime, de façon finalement assez simple, que la luminance réfléchie L_o en un point x dans la direction $\vec{\omega_o}$ est égale à la luminance propre L_e en ce point, dans cette même direction (cas où le point x est également une source de lumière), ajouté à la somme des luminances incidentes L_i provenant de toute des directions $\vec{\omega_i}$ de la sphère Ω de centre x pondérées par la BSDF ρ du matériau. Enfin, le facteur $\cos(\theta_i) = (\vec{\omega_i} \cdot \vec{n})$ issu de la loi de Lambert , traduit l'affaiblissement de l'éclairement avec l'augmentation de l'angle d'incidence. L'équation du rendu est récursive car la luminance incidente L_i au point x peut aisément [18] être déduite de la luminance réfléchie L_o du point x' tel que représenté sur la figure 1.24 .

Nous retrouvons dans cette équation l'ensemble des éléments intervenant dans l'équilibre lumineux de la scène : Les sources de lumières, les géométries et les matériaux (figure 1.25).

L'équation du rendu est paramétrée par le matériau, défini par sa BSDF ρ. Comme nous l'avons vu précédemment, cette fonction peut avoir plusieurs noms et plusieurs formes associées. Dans sa forme la plus simple, c'est une fonction de dimension 4 liée aux directions incidente et réfléchie en coordonnées

18. En supposant un milieu ambiant d'indice homogène.

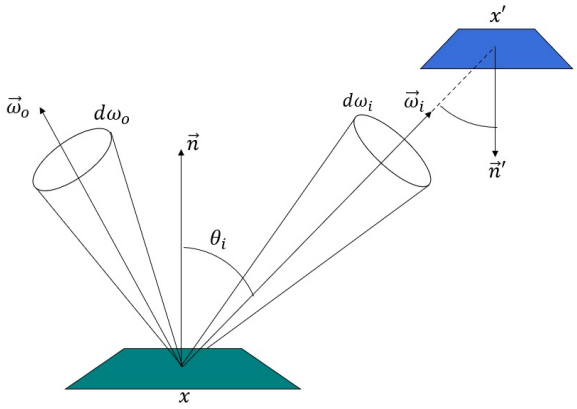


FIGURE 1.24 – Géométrie de la réflexion

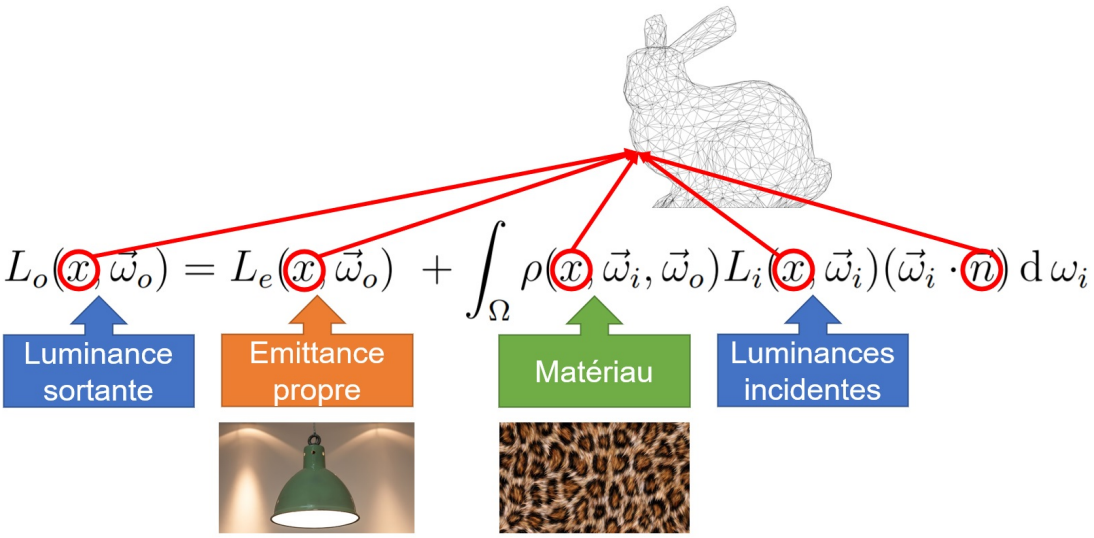


FIGURE 1.25 – L'équation du rendu imagée

polaires : $\rho(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o) = \rho(\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r)$. Elle a alors pour unité le sr^{-1}et exprime la proportion de flux sortant pour les directions $\vec{\omega}_i$ et $\vec{\omega}_o$ par unité d'angle solide. Si les propriétés du matériau varient spatialement, dans le cas des matériaux texturés par exemple, elle est alors nommée « Spatially Varying Bidirectional Scattering Distribution Function » (SVBSDF) et est de dimension 7 (6 si l'on ne prend en compte que les variations en surface, en 2D). C'est cette dernière définition qui apparaît dans l'équation de rendu eq.(1.1).

1.3.2.1.1 Spectral Dans le chapitre précédent, nous avons beaucoup parlé de l'apparence en présence de l'observateur. Cet observateur ne devrait logiquement pas apparaître dans l'équation du rendu car cette dernière vise à calculer l'état d'équilibre radiométrique de la scène y compris sans observateur. Pourtant, il apparaît implicitement deux fois dans l'équation : D'abord, comme nous l'avons vu à la section 1.3.1.2, au travers de la BSDF ρdu matériau car celle-ci est *a minima* liée à une échelle de mesure de l'observateur-instrument. Ensuite, comme l'œil humain ne perçoit la luminance que sur trois canaux (1.3.1.2), les algorithmes de simulation d'éclairage se limitent, pour la plupart, au spectre visible et aux trois canaux rouge, vert et bleu. Canaux qui sont également présents dans tous systèmes de reproduction : écran, impression, photographie argentique, etc. De ce point de vue, notre équation du rendu eq.(1.1) inclut implicitement une dimension C pour la couleur. En particulier la BSDF, définitivement liée à l'observateur, s'exprime par canal de couleur afin de représenter simplement l'apparence des matériaux.

Hélas, le raccourci consistant à résoudre l'équation du rendu sur 3 canaux indépendants n'est pas valide du point de vue de la simulation. Il permet, en effet, de calculer des images réalistes, voire photo-réalistes, pouvant être agréables à l'œil, et confondre aisément l'observateur non averti. Mais cette solution maintient l'image de synthèse dans le domaine de l'illustration (cf figure 1.23). Du fait du passage de l'espace spectral continu à un espace trichrome, plusieurs spectres, même très différents, peuvent produire la même sensation colorée. C'est ce que l'on nomme le métamérisme, ou spectres métamères. Dans des cas extrêmes mais relativement courants, des matières synthétiques autant que naturelles comme la chlorophylle, peuvent présenter des pics d'absorption particulièrement étroits dans le spectre visible figure 1.26, et des sources de lumière présenter des pics d'émission fins à l'instar des sources fluorescentes figure 1.27. Il est alors probable que la réponse spectrale du matériau ne soit pas alignée avec la distribution spectrale de la source lumineuse et donc que la couleur apparente soit inattendue et non prédictible par le calcul trichrome tel qu'illustré en figure 1.28.

La dispersion chromatique et les phénomènes produisant des couleurs interférentielles sont également directement liés à l'aspect spectral de la lumière (1.3.2.1.2). Par exemple, la prise en compte de seulement trois canaux pour la couleur ne permet pas de simuler l'expérience du prisme de Newton (figure 1.7) de façon conforme à la réalité, mais seulement de simuler la transmission de trois faisceaux distincts (figure 1.29).

La dispersion chromatique et le métamérisme sont donc des phénomènes largement présents dans notre environnement ; ils sont directement liés à l'aspect spectral de la lumière et ont un effet visible sur l'apparence des objets. Par conséquent, la simulation prédictive de l'apparence implique de réaliser les calculs en mode spectral. L'équation de rendu prend alors la forme suivante eq.(1.2) en y intégrant la longueur d'onde λ :

$$L_o(x, \vec{\omega}_o, \lambda) = L_e(x, \vec{\omega}_o, \lambda) \; + \int_\Omega \rho(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \lambda) L_i(x, \vec{\omega}_i, \lambda) \cos(\theta_i) \, \mathrm{d}\, \omega_i \tag{1.2}$$

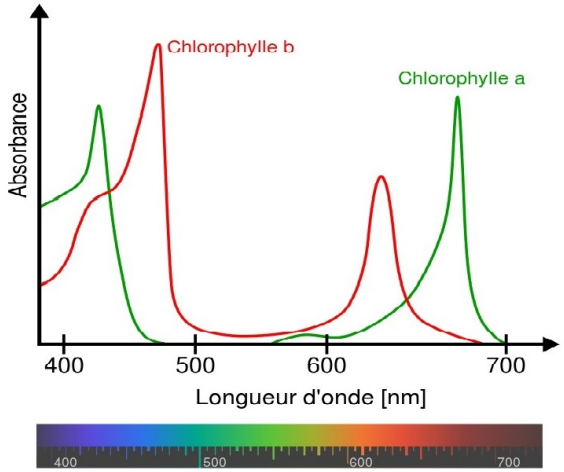


FIGURE 1.26 – En vert le spectre d'absorption de la chlorophylle a et en rouge le spectre d'absorption de la chlorophylle b.

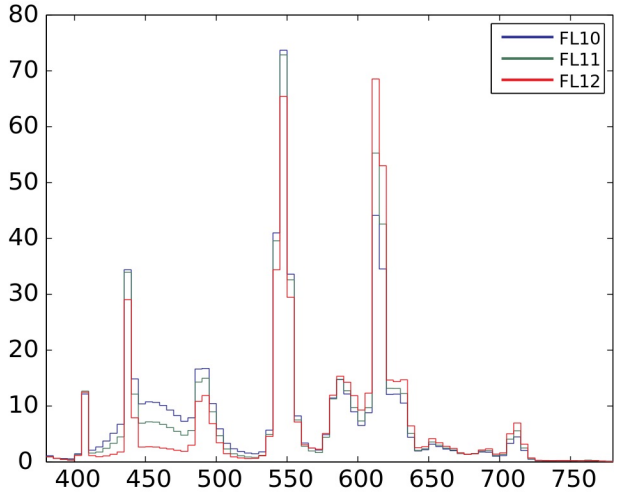


FIGURE 1.27 – Exemple de sources normalisées à bandes minces.

1.3.2.1.2 Polarisé Dans la section (), nous avons montré que la polarisation de la lumière est loin d'avoir un impact négligeable sur l'apparence finale des objets. Par conséquent, il est indispensable, dans l'intention de produire une simulation prédictive, de prendre en compte cette propriété de la lumière dans l'équation de rendu.

Il existe plusieurs notations mathématiques pour représenter la polarisation [Hec16], mais la plus courante est sans doute la paramétrisation de Stokes sous forme vectorielle introduite par George Gabriel Stokes en 1852. Les quatre paramètres sont les suivants :

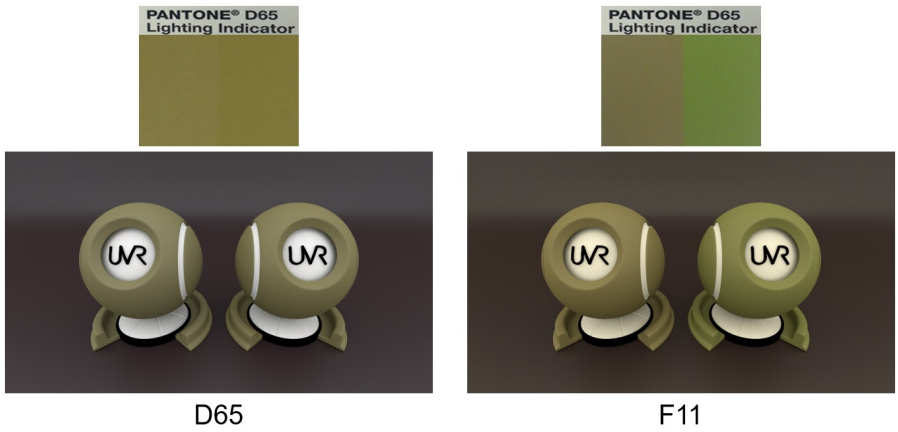


FIGURE 1.28 – Situation de métamérisme. À gauche, deux matériaux différents apparaissent semblables sous un éclairage de type D65. À droite, les mêmes matériaux apparaissent différents sous un éclairage de type F11.

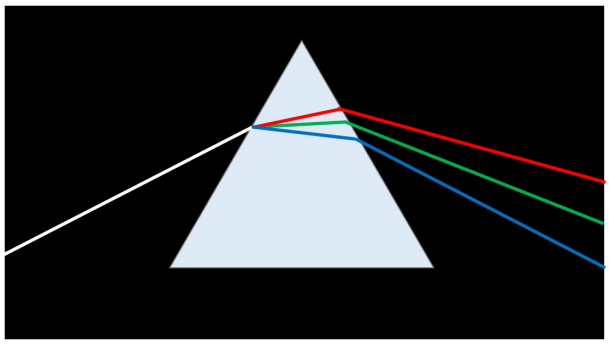


FIGURE 1.29 – Expérience de Newton pour trois longueurs d'onde monochromatiques distinctes.

— I L'intensité totale du flux ;
— Q La composante horizontale de la polarisation linéaire ;
— U La composante verticale de la polarisation linéaire ;
— V L'intensité de la polarisation circulaire.

La polarisation linéaire peut alors être représentée sous forme complexe $Q + iU = e^{i2\theta}$ avec θ l'angle de polarisation et $|Q + iU|$ l'intensité de la polarisation linéaire. Notons que la paramétrisation de Stokes permet de calculer un certain nombre d'attributs utiles en informatique graphique [Por16], comme par exemple le degré de polarisation DoP qui se calcule simplement grâce à la formule donnée en eq.(1.3) .

$$DoP = \frac{I_{Pol}}{I_{Tot}} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I^2} \tag{1.3}$$

Afin de rendre compte de l'aspect polarisé de la lumière dans l'équation de rendu, il est donc indispensable d'adopter une notation vectorielle pour la luminance $\vec{L}$.

L'état de polarisation de la lumière est modifié lorsqu'elle interagit avec la matière. On dit que la matière polarise ou dépolarise la lumière. Afin de prendre en compte l'effet de la matière sur la polarisation de la lumière, la BSDF doit manipuler les vecteurs de Stokes. Les matrices de Mueller ont été introduites dans les années 1940 à cette fin [Col09]. Elles sont formées par une matrice 4x4 de telle sorte que, lorsqu'un rayon de lumière dans un état défini par le vecteur de Stokes $\vec{S}_i$ traverse ou est réfléchi par un élément optique défini par sa matrice de Mueller M, il en ressort dans un état $\vec{S}_o$ tel que : $\vec{S}_o = \mathrm{M}\vec{S}_i$. Les matrices de Mueller étant associatives, une succession d'éléments optiques sera représenté par une matrice de Mueller égale à la composition des matrices représentant chacun des éléments. Par exemple, un polariseur linéaire sera représenté par la matrice suivante :

$$M_{pola} = 1/2 \begin{pmatrix} 1 & \cos(2\alpha) & \sin(2\alpha) & 0 \\ \cos(2\alpha) & \cos^2(2\alpha) & \cos(2\alpha)\sin(2\alpha) & 0 \\ \sin(2\alpha) & \cos(2\alpha)\sin(2\alpha) & \sin^2(2\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{1.4}$$

Avec l'introduction de la polarisation l'équation du rendu prend alors la forme suivante :

$$\overrightarrow{L_o(x, \vec{\omega}_o, \lambda)} = \overrightarrow{L_e(x, \vec{\omega}_o, \lambda)} + \int_\Omega \rho_{[]}(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \lambda) \overrightarrow{L_i(x, \vec{\omega}_i, \lambda)} \cos(\theta_i) \, \mathrm{d}\, \omega_i \tag{1.5}$$

Avec $\rho_{[]}$, la BSDF polarisée fournissant la matrice de Mueller en x pour les directions $\vec{\omega}_i$ et $\vec{\omega}_o$ et la longueur d'onde λ.

1.3.2.1.3 Fluorescence Nous n'avons pas beaucoup parlé de la fluorescence dans la section sur l'origine de l'apparence (1.3.2.1.2), elle est pourtant largement présente dans notre environnement [MFW18]. La fluorescence correspond à une diffusion non élastique et a une longueur d'onde différente de la longueur d'onde incidente. Cet effet est spectaculaire avec un éclairage ultraviolet invisible car les objets semblent devenir luminescents. Mais le même phénomène se produit avec un éclairage visible. Pour s'en convaincre il suffit d'utiliser une source monochrome (figure 1.30).

En incluant la fluorescence, l'équation du rendu prend la forme suivante avec la longueur d'onde sortante λ_o, pouvant être différente de la longueur d'onde incidente λ_i :

$$\overrightarrow{L_o(x, \vec{\omega}_o, \lambda_o)} = \overrightarrow{L_e(x, \vec{\omega}_o, \lambda_o)} + \int_\Omega \int_\Lambda [\rho(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \lambda_i, \lambda_o)] \overrightarrow{L_i(x, \vec{\omega}_i, \lambda_i)} \cos(\theta_i) \, \mathrm{d}\, \omega_i \, \mathrm{d}\, \lambda_i \tag{1.6}$$

1.3.2.1.4 Phosphorescence La phosphorescence est un phénomène proche de la fluorescence mais avec un décalage temporel important (figure 1.32). Comme pour la fluorescence, la lumière est diffusée

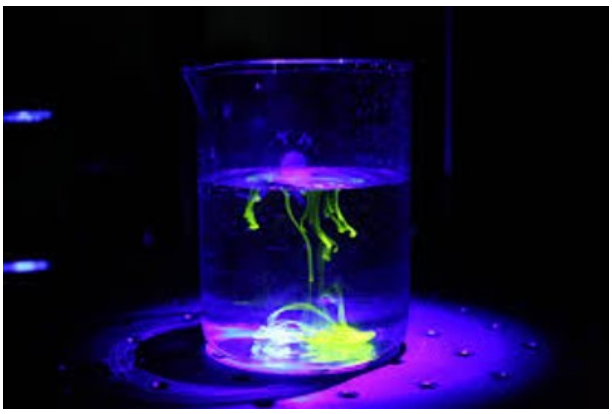


FIGURE 1.30 – Illustration de la fluorescence. Une source de lumière ultra-violette est diffusée dans le visible par la matière.

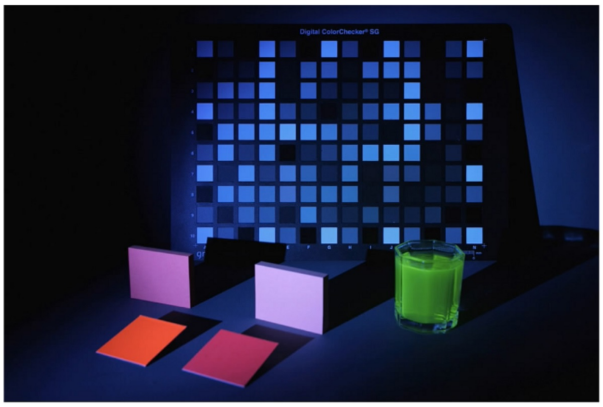


FIGURE 1.31 – Photographie d'objets fluorescents et non-fluorescents éclairés par une source monochrome bleue à 400nm. [MFW18]

par le matériau et a une longueur d'onde différente de la longueur d'onde incidente mais bien après avoir été éclairée. La durée du phénomène peut être de plusieurs dizaines de minutes. Pour diffuser la lumière, le nuage électronique d'un atome ou d'une molécule doit revenir à un état stable après avoir été excité. Dans le cas de la phosphorescence, ce retour à l'état stable nécessite un apport de chaleur. La vitesse de réémission de l'énergie lumineuse est donc dépendante de la température.

Pour prendre en compte la phosphorescence dans l'équation du rendu, il faut donc intégrer une notion temporelle. Ajouter le paramètre temps est d'ailleurs également utile pour la prise en compte de matériaux dont l'apparence varie dans le temps.

FIGURE 1.32 – Illustration de la Phosphorescence : Un objet restitue de la lumière longtemps après avoir été éclairé

$$\overrightarrow{L_o(x,\vec{\omega}_o,\lambda_o,t_o)} = \overrightarrow{L_e(x,\vec{\omega}_o,\lambda_o,t_o)} + \int_\Omega \int_\Lambda \int_T [\rho(x,\vec{\omega}_i,\vec{\omega}_o,\lambda_i,\lambda_o,t_i,t_o)] \overrightarrow{L_i(x,\vec{\omega}_i,\lambda_i,t_i)} \cos(\theta_i)\,\mathrm{d}\,\omega_i\,\mathrm{d}\,\lambda_i\,\mathrm{d}\,t_i \tag{1.7}$$

1.3.2.1.5 Diffusion sous surfacique Dans le cas de certains matériaux, la lumière pénètre la matière et en ressort en un point qui diffère du point d'incidence à l'échelle macroscopique. C'est le cas des matériaux dits translucides comme la peau, le marbre ou une coquille (figure 1.33).

FIGURE 1.33 – Coquille en carbonate de calcium. Illustration de la diffusion sous-surfacique.

Dans ce cas, il devient nécessaire de différencier le point d'incidence du point de sortie et l'équation

de rendu s'écrit alors :

$$\overrightarrow{L_o(x_o, \vec{\omega}_o, \lambda_o, t_o)} = \overrightarrow{L_e(x_o, \vec{\omega}_o, \lambda_o, t_o)} + \int_\Omega \int_\Lambda \int_T \int_A [\rho(x_i, x_o, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \lambda_i, \lambda_o, t_i, t_o)] \overrightarrow{L_i(x_i, \vec{\omega}_i, \lambda_i, t_i)} \cos(\theta_i) \, \mathrm{d}\,\omega_i \, \mathrm{d}\,\lambda_i \, \mathrm{d}\,t_i \, \mathrm{d}\,x_i \tag{1.8}$$

Finalement, l'équation du rendu totalise 14 dimensions (12 si l'on considère que les points d'incidence et de sortie sont surfaciques). Nous avons démontré qu'aucune de ces dimensions n'est négligeable dans le cadre du rendu prédictif. Toutefois, les contributions que je présente aux chapitres 2, 3 et 4 prennent en compte uniquement l'aspect spectral et polarisé de la lumière. Les autres aspects feront l'objet de perspectives.

1.3.2.2 Méthodes de résolution

Nous avons noté que l'équation de rendu est récursive. Pour calculer la luminance en un point de la scène, il est nécessaire de connaître la luminance de chacun des autres points de cette scène qui eux-mêmes doivent être calculés de la même manière... C'est un état d'équilibre pour lequel il n'est pas possible de fournir une solution analytique. De nombreuses méthodes de résolution, complète ou partielle, de l'équation du rendu ont été proposées depuis sa formulation en 1986 : *Raytracing*, *Radiosité*, *Photon mapping*, etc. Je n'en retiens qu'une ici : le *path tracing*, qui est une solution « de force brute » ayant pour avantage d'être complète et non biaisée. Elle a été introduite par Kajiya en même temps que l'équation du rendu. Comme dans beaucoup de domaines, lorsque la vitesse de calcul des processeurs augmente en suivant la loi de Moore [19], il advient que la méthode la plus simple (nécessitant le moins d'instructions) soit la plus performante. Le *path tracing* est un algorithme de résolution de l'équation de rendu basé sur la résolution de l'intégrale par la méthode de Monte-Carlo. C'est-à-dire qu'elle repose sur un tirage aléatoire d'échantillons, ici des chemins de lumière. C'est une méthode qui se prête très bien à la parallélisation du code.

La méthode du *path tracing* consiste à construire une marche aléatoire X0, X1, ... , Xn en partant du centre optique de la caméra et en passant par un pixel donné. Le rayon arrivant en un Xi est renvoyé dans une direction aléatoire donnée par la fonction de densité de probabilité spécifique au matériau, la BSDF. Lorsqu'une source lumineuse est atteinte, cela contribue à une estimation de la valeur du pixel. C'est donc après un grand nombre de chemins tracés que l'on obtient une bonne estimation du pixel. La méthode du *path tracing* est largement implémentée dans les moteurs de rendu photo-réalistes en mode RGB mais peu prennent en compte l'aspect spectral de la lumière. Le logiciel *open source* PBRT inclut une implémentation spectrale du *path tracing* [PJH16]. Un nouveau moteur de rendu basé sur la méthode du *path tracing* prenant en compte l'aspect spectral et polarisé de la lumière a été implémenté

19. Prédiction empirique du doublement du nombre de transistors présents sur une puce de microprocesseur tous les deux ans.

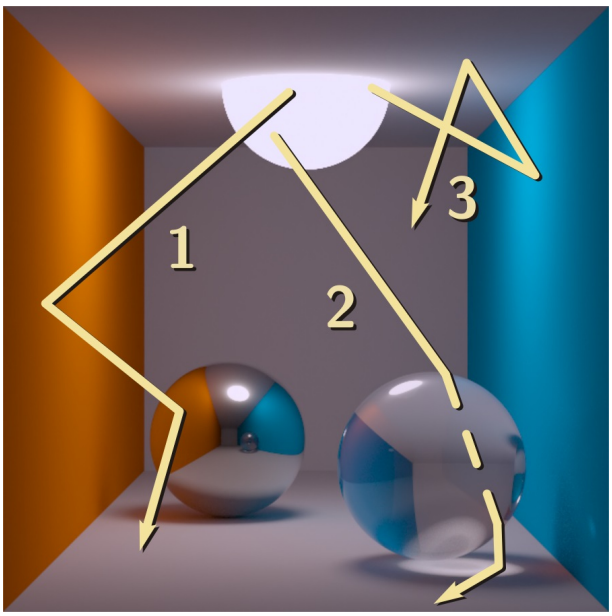


FIGURE 1.34 – Chemins lumineux dans une scène.

au cours du projet ANR L.I.M.A [20], auquel j'ai eu la chance de participer (Chapitre). Par la suite le logiciel *Mitsuba 2* a également pris en compte le spectre et la polarisation pour le rendu physique [Nim+19]. Aucun de ces moteurs, publics, de rendu n'intègre la fluorescence ni la phosphorescence. Pour des scènes ne contenant pas ces deux phénomènes, ils peuvent tous être considérés comme non biaisés. C'est-à-dire qu'ils convergent vers la même solution exacte du calcul. Pourtant, le fait que le calcul soit juste ne veut pas dire qu'il soit représentatif de la réalité. En effet, comme dans tout calcul les hypothèses de départ conditionnent le résultat.

1.3.2.3 Premier verrou scientifique

Lorsque nous avons étudié l'équation du rendu, nous avons noté qu'elle prend en entrée des informations sur les sources de lumière et sur les matériaux de la scène (figure 1.35). Ces données sont les conditions de la véracité du rendu. Nous avons montré qu'il est nécessaire que l'algorithme de rendu soit non biaisé, qu'il prenne en compte tous les phénomènes ayant un impact sur l'apparence mais il faut aussi que lui soit fourni, en entrée, des données conformes au réel.

Il existe un grand nombre de modèles *basés physique* pour les lumières et les matériaux dans la littérature scientifique. Nous avons cité, au début de ce chapitre, la loi de Planck décrivant la production de lumière par un corps théorique chauffé à une température donnée 4.4. C'est une loi physiquement juste qui reflète le cas idéal d'un corps noir hypothétique. Du côté des modèles de matériaux nous pouvons citer, par exemple, le modèle classique de Cook-Torrance [CT82] qui se base sur un ensemble

20. Lumière Interactions Matériaux Aspect

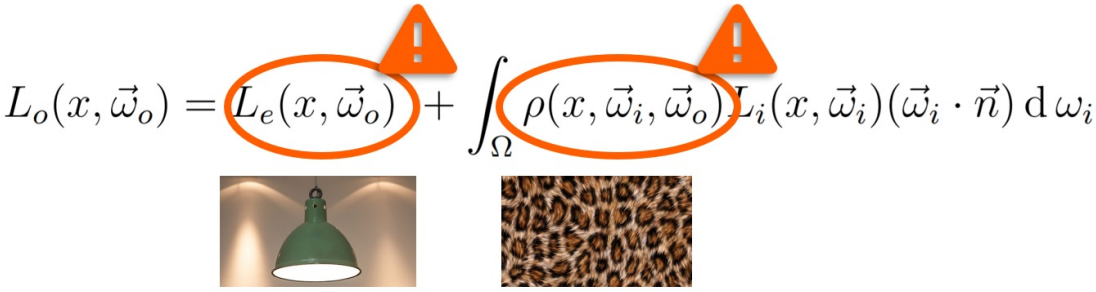


FIGURE 1.35 – Données d'entrée de l'équation du rendu.

de micro-facettes planes et isotropes, se comportant chacune comme un réflecteur parfait. C'est un modèle de BSDF à deux échelles mésoscopique et macroscopique : à l'échelle macroscopique, la surface est perçue comme localement plane alors qu'à l'échelle mésoscopique, les micro-facettes ont une orientation déterminée par une distribution D. Depuis Cook-Torrance, les fonctions de distribution Dont beaucoup évolué en particulier pour permettre un échantillonnage stochastique performant, indispensable pour le *path-tracing*, et simuler par exemple des matériaux translucides. Walter *et al.* ont montré que dans un certain nombre de cas la distribution GGX [Wal+07] peut représenter des matériaux réels par ajustement [21]. D'autres modèles réalistes de matériaux existent, en particulier la famille des modèles à couche, spéculaires [SM92] ou diffus [KM31]. Randrianandrasana propose en 2020 un modèle intermédiaire pour l'empilement de couches mésoscopiques, prenant en compte des interfaces de rugosités arbitraires et des phénomènes de diffusions volumiques, utilisant les propriétés de convolution de la fonction de phase de Henyey-Greenstein [Ran20 ; RCL21] .
Hélas, l'ensemble de ces modèles, bien que très performants, représente une réalité hypothétique. Le fait qu'ils soient basés sur des lois physiques permet d'assurer que, si le matériau ou la source de lumière existait, alors elle produirait bien l'apparence que le modèle permet de simuler. Mais cela ne donne ni la formule pour fabriquer la matière ou la source en question, ni la garantie même que cette formule existe. Comment produire, par exemple, un matériau dont les micro-facettes flottent dans l'air ?

Le premier verrou scientifique pour réaliser un rendu vrai réside donc dans l'obtention des données de matériaux et de sources de lumière qui soient représentatifs du réel et dont on ait l'assurance qu'ils puissent être fabriqués.

1.3.3 Un comparable fiable

21. Ajustement des paramètres d'un modèle pour qu'il colle à une mesure. Fitting en anglais.

1.3.3.1 Comparer le réel et le virtuel

Dans la phrase de Phong déjà citée précédemment : « Obtaining a close image correspondence to the eye's subjective interpretation of the real object is the goal. », il y a la nécessité de produire une image à destination de l'œil. Nous avons effectivement confirmé que cette image doit être une « image vraie », représentative de la réalité et interprétable par l'œil humain. Comme nous traitons ici de simulation pour la CA²O, c'est donc d'un « rendu vrai » qu'il s'agit. Mais cette phrase pointe « l'interprétation subjective »... sujet également soulevé en introduction et qui perturbe la démarche scientifique. Dans toute démarche scientifique, il est nécessaire de définir un référentiel de travail afin de pouvoir *comparer des choses comparables*. Le premier référentiel qui vienne à l'esprit quand il s'agit de simulation est de se positionner dans le référentiel du réel. En d'autres termes, de comparer la simulation avec la réalité. C'est ce que proposent, par exemple, Kim *et al.* [KL11] ou Shimizu *et al.* [Shi09]. Nous pouvons voir, sur la figure 1.36 qui montre le montage utilisé par Kim *et al.*, comment est réalisée la validation des simulations par comparaison avec la réalité. Un écran et une scène à éclairage contrôlé, en cabine lumière, sont mis côte à côte. La scène est constituée d'une sphère peinte éclairée par les sources de la cabine. L'écran présente une simulation prédictive de la scène reproduisant les conditions de la scène réelle.

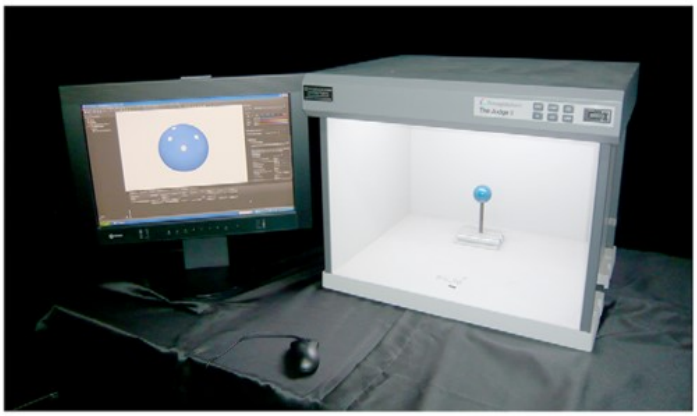


FIGURE 1.36 – Comparaison visuelle entre un échantillon réel et un échantillon simulé [KL11].

Cette approche serait exacte, considérant que l'image simulée comporte l'information vraie et complète, si le dispositif d'affichage était effectivement absolu : s'il couvrait totalement les capacités de l'œil humain. Hélas nous avons pointé le fait qu'aucun dispositif d'affichage actuel n'est en mesure de produire un signal complet en dynamique, colorimétrie et profondeur (figure 1.37).

Il est donc permis de dire que, le référentiel n'étant absolument pas commun, il n'est pas possible actuellement de comparer en vision directe l'apparence d'un objet réel avec une simulation numérique de ce même objet. Ceci quel que soit le dispositif d'affichage et quand bien même la simulation serait

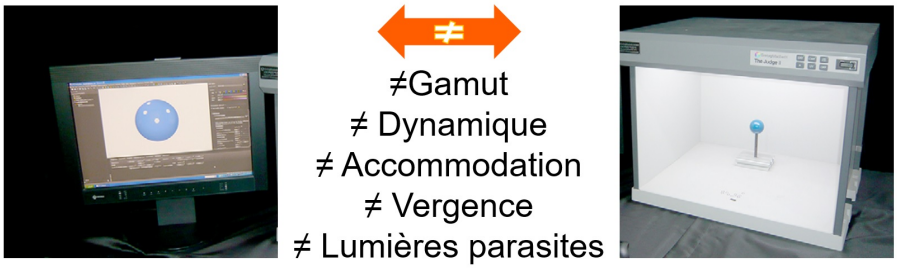


FIGURE 1.37 – Aucun périphérique d'affichage n'est actuellement en mesure de reproduire l'espace perceptuel de l'œil humain.

totalement physique et prédictive.

De la même manière, lorsque Wilkie et al. présentent en 2009 au *Siggraph Asia* un cours très complet sur le rendu prédictif [Wil+09], l'accent est mis, avec justesse, sur l'importance du rendu basé physique mais le mode de visualisation proposé passe par l'utilisation d'un opérateur de *tonemapping* plausible (figure 1.38). Le mot « plausible » est ici dissonant dans le discours général du rendu prédictif qui s'oppose directement au rendu « vraisemblable ».

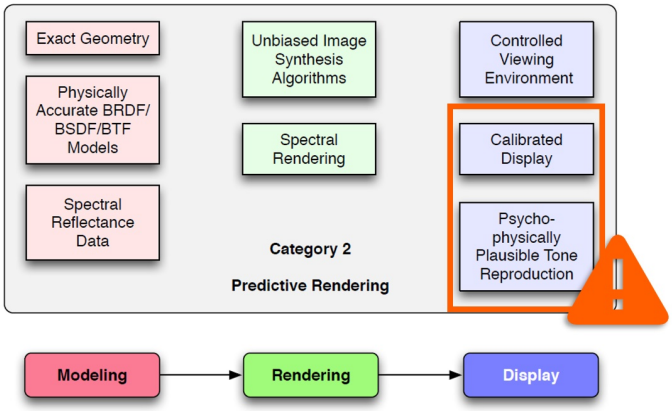


FIGURE 1.38 – Chaîne de rendu prédictif présenté par au SIGGRAPH ASIA 2009 [Wil+09] . L'introduction d'une reproduction de ton "plausible" psychophysique crée de l'incertitude.

Un opérateur de *tone mapping* est un algorithme qui convertit une image à haute plage dynamique (HDR) en une image à basse plage dynamique (LDR) plus adaptée à un écran classique 3x8 bits. L'objectif de ces opérateurs intelligents est de maintenir la sensation visuelle que l'on pourrait avoir en regardant la scène correspondante avec toute sa dynamique en luminance. Pourtant, bien que certains opérateurs soient basés sur une étude poussée de la perception humaine [JF03] [LSC04], aucun ne donne pleinement satisfaction ni ne se démarque réellement des autres, comme le montre l'étude comparative [Led+05].

1.3.3.2 Deuxième verrou scientifique

La CA²O est du domaine de la simulation numérique, cela implique donc une démarche rigoureuse permettant :

— La validation comparative avec une vérité terrain ;

— L'appréciation visuelle de l'apparence par l'œil humain.

La validation par la mesure purement radiométrique n'est donc, encore une fois, pas suffisante. Nous avons vu que comparer directement le réel et le virtuel n'est pas envisageable, même en tentant de simuler la sensation du réel sur un écran à l'aide d'un opérateur de *tonemapping*.

Le deuxième verrou scientifique pour un comparable fiable réside dans le fait de définir un référentiel visuel commun entre la vérité terrain et la simulation.

1.4 Proposition pour une chaîne iso-photographique de conception de l'apparence

L'étude de l'état actuel des connaissances dans ce domaine nous a permis de révéler que définir une chaîne de conception de l'apparence se heurtait à deux verrous scientifiques :

1. La simulation prédictive d'un possible : Le rendu vrai ;
2. Le choix d'un référentiel et d'une vérité terrain : Le comparable fiable.

Dans ce chapitre, je fais deux propositions permettant de lever ces verrous. Je commence par le deuxième verrou car pour mettre en place une chaîne de simulation prédictive, il faut avant tout déterminer quel est l'objet exact de la simulation : quel est notre comparable fiable ?

1.4.1 Lever le deuxième verrou pour un comparable fiable

Il existe un appareil de mesure optique qui capte la luminance d'une scène et la mémorise sous forme d'une image pouvant être lue par l'œil humain afin d'apprécier l'apparence de ce qui a été. Cet appareil de mesure, largement répandu, c'est l'appareil photographique. En effet, la photographie est à la fois une mesure optique fiable, répétable et objective : « la scène est là, captée mécaniquement, mais non humainement. Le mécanique est ici gage d'objectivité. » [Bar64] , et à la fois, un support d'observation permettant à l'œil humain de transmettre au cerveau une information à même de générer une image mentale juste. Nous discutons de la justesse de la re-projection mentale à partir d'une photographie un peu plus loin, à la section 1.4.4.

La photographie est la capture numérique, ou analogique, de la projection d'une scène sur le plan image tel qu'elle se présente, sans intervention humaine autre que le choix de l'instant et du cadre. En cela elle se différencie du dessin qui, même réalisé avec les meilleures techniques, ne pourrait garantir cette objectivité. L'invention de la photographie en 1824 [22] bouleversa profondément et dura-

22. Nicéphore Niépce, Louis Daguerre, Fox Talbot. Don de la France au monde du daguerréotype, ancêtre de la

blement l'humanité justement parce qu'elle donnait pour la première fois l'*image d'une réalité passée* ***incontestable***. Son impact fut si total et profond (sociologie, art, psychologie, sciences, histoire, philosophie, politique, communication, divertissement, enseignement, etc.) qu'il serait plus simple pour en mesurer l'ampleur, d'énumérer les domaines qu'elle n'a pas touchés. Prenons une minute pour y penser... bouleversant, n'est ce pas ! Synthétiser une image **iso-photographique**, c'est-à-dire une image intrinsèquement égale [23] à une photographie, lui confèrerait ses attributs, en particulier son objectivité. Je soutiens que la synthèse d'image iso-photographique aiderait à lever la barrière du manque de confiance dans l'image de synthèse. Elle pourrait alors autoriser un lien cognitif entre réel et virtuel pour l'évaluation de l'apparence et ainsi favoriser l'émergence de la CA²O.

⇒ La chaîne de CA²O est validé par le **comparable photographique**

Une photographie peut être imprimée sur papier, affichée sur un écran ou sur tout autre dispositif d'affichage, elle peut ainsi être appréciée visuellement mais aussi être comparée à une autre photographie dans un espace de reproduction parfaitement identique. De la même manière, une iso-photographie pourra être comparée visuellement à une photographie dans ce référentiel commun, sur le même écran par exemple. En complément de l'analyse visuelle, le fait de disposer de deux images numériques, l'une capturée l'autre simulée, permettra de réaliser une analyse de distance (Toutes choses égales par ailleurs : matériaux, point de vue, lumière, instant).

1.4.1.1 Rendu versus photographie

Étrangement, il est extrêmement rare de voir dans la littérature scientifique une photographie présentée à côté d'une image de synthèse et ainsi permettre une comparaison visuelle directe. Pourtant, comme le font remarquer Ulbricht, Wilkie *et al.* [UWP05], ces dernières années, de nombreux travaux ont été publiés dans le domaine de l'infographie photoréaliste concernant des algorithmes de rendu plus précis, des descriptions plus détaillées des surfaces, des algorithmes de *tonemapping* plus réalistes et de nombreuses autres améliorations pour le processus de rendu d'images prédictives. Concernant la juxtaposition d'images photographiques et de synthèse, je liste ici, de façon non exhaustive, l'ensemble des références que j'ai pu trouver, elles ne sont pas nombreuses [24] :

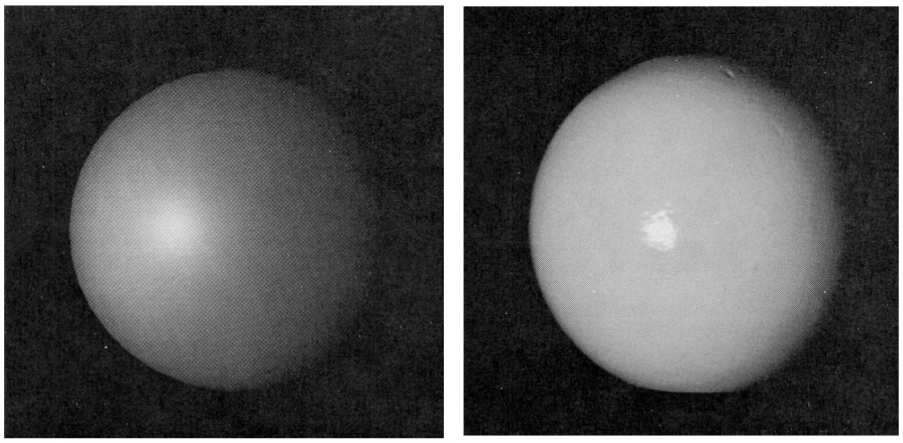
Il faut, sans doute, du courage pour présenter une simulation et une photographie côte à côte. De toute évidence la grande majorité des études obtiennent des résultats visuellement éloignés de la *vérité terrain*. Pourtant à chaque résultat correspond une avancée importante où l'œil perçoit les différences mais peut aussi s'émerveiller des similitudes. L'université de Cornell a poussé l'étude, initiée par Cindy Goral, sur près de deux décennies en améliorant la caractérisation optique du *setup* y compris du système imageur [25] [Mey+86] [Pat+97] . Les derniers résultats présentés, en figure 1.43,

photographie, le 19 août 1839, considéré par certains comme la première licence libre.

23. Le préfixe iso- a pour origine le grec ancien et signifie égal à.

24. Il existe également un certain nombre d'images de synthèse réalisées à partir d'un modèle photographique. Même si l'illusion est belle, ces productions sont l'œuvre d'artistes. Elles font partie du monde illustratif.

25. L'appareil photographique.



A sphere displayed with the improved shading. A photograph of a real sphere.

FIGURE 1.39 – Simulation (à gauche) vs photographie (à droite). "Illumination for computer generated pictures" [Pho75].

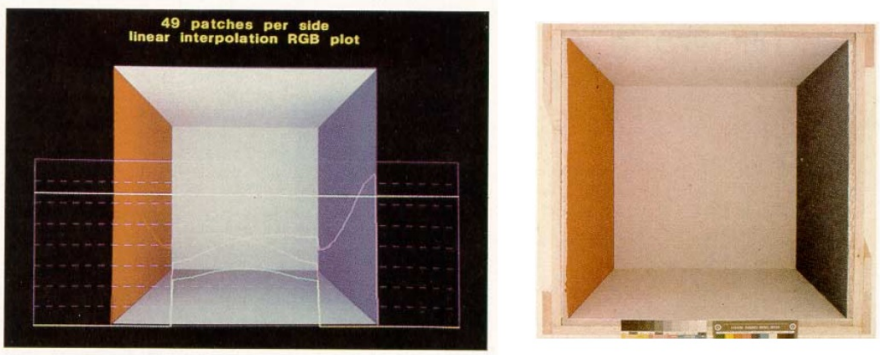


FIGURE 1.40 – Simulation (à gauche) vs photographie (à droite). "Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces" [Gor+84].

ont été réalisés en comparaison avec une capture matricielle prise par une caméra photométrique : Un vidéo-colorimètre, dont la calibration radiométrique est décrite dans le rapport suivant [Shi+96]. Cet appareil permet de mesurer, en chaque pixel, la valeur de la luminance lumineuse Y et des coordonnées chromatiques xy de la scène. La simulation, réalisée à partir de données goniométriques spectrales, est calculée dans l'espace photométrique en coordonnées xyY. Le référentiel commun, à la simulation et à la *vérité terrain*, est donc l'espace photométrique. L'expérience est par conséquent difficile à reproduire puisqu'elle nécessite l'utilisation d'un appareil spécifique. Notre proposition iso-photographique est plus simple à mettre en œuvre avec un référentiel plus largement disponible. Nous remplaçons le référentiel photométrique par un référentiel photographique accessible à tous.

FIGURE 1.41 – Simulation (à droite) vs photographie (à gauche). "Accurate rendering technique based on colorimetric conception" [Tak+90].

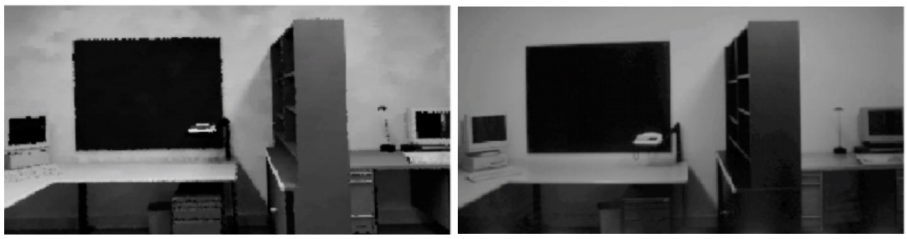


FIGURE 1.42 – Simulation (à gauche) vs photographie (à droite). "A Concept for Evaluating the Accuracy of Computer Generated Images" [KP96].

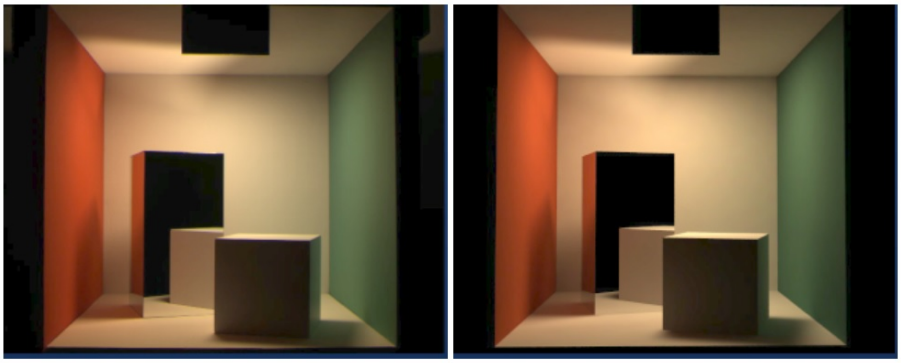
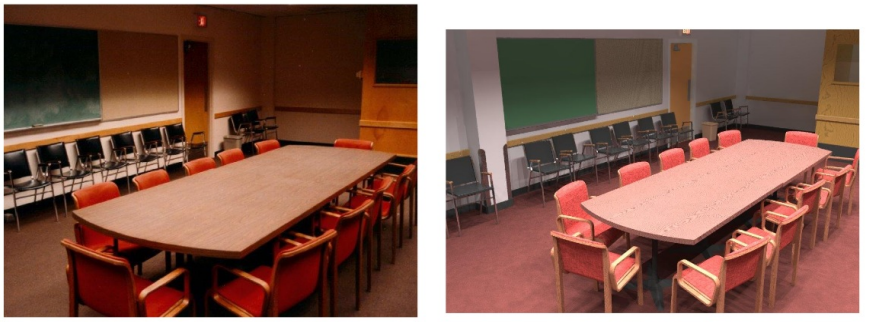


FIGURE 1.43 – Simulation (à gauche) vs photographie (à droite). "Cornell Box Comparison" 04/30/98 @ http ://www.graphics.cornell.edu/online/box/

1.4.1.2 Simuler l'image RAW

Au cœur d'un appareil photographique se trouve la surface photosensible. Dans le cas d'un appareil photo numérique (APN), cette surface est un capteur imageant matriciel : Un composant électronique photosensible servant à convertir la lumière en un signal électrique analogique. Au cours de son expo-



Photograph of a Conference Room *Photo-Realistic Rendering of the Conference Room*

FIGURE 1.44 – Simulation (à droite) vs photographie (à gauche). "Visual Perception in Realistic Image Synthesis" [McN01].

FIGURE 1.45 – Simulation (en bas) vs photographie (en haut). "Visualizing Lighting with Images : Converging Between the Predictive Value of Renderings and Photographs" [ESM13].

sition à la lumière, une charge électrique est produite en chaque élément du capteur (pixel) proportionnellement [26] à l'énergie lumineuse reçue. Une conversion analogique-numérique permet ensuite de produire une image *brute de capteur* appelée aussi image RAW [27]. Enfin, l'image RAW est traitée pour obtenir une photographie numérique dans un processus qui est souvent comparé au développement des anciens films argentiques (figure 1.47).

De la production des photons, par une source de lumière, jusqu'à leur conversion en valeur numérique RAW au niveau du pixel d'un capteur, l'ensemble des interactions suivent les lois de l'optique et de la physique (figure 1.48). Elles sont donc parfaitement prédictibles. Le *développement numérique* fait, par contre, appel à des algorithmes paramétrés par l'utilisateur et/ou dépendant du périphérique d'affichage. Cette dernière étape n'est donc pas prédictible.

⇒ Le point de rencontre entre la simulation et la photographie numérique est l'image RAW.

26. Suivant une loi linéaire pour les CCD et une loi en logarithme pour les CMOS.
27. De l'anglais « brut », « cru », « pur ».

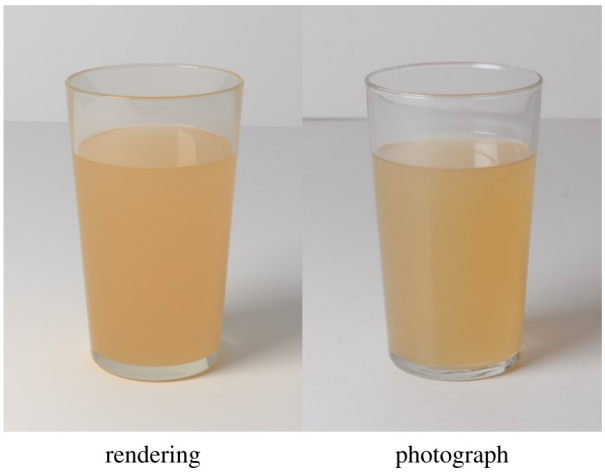


FIGURE 1.46 – Simulation (à gauche) vs photographie (à droite). "Interactive Appearance Prediction for Cloudy Beverages" [Dal+16].

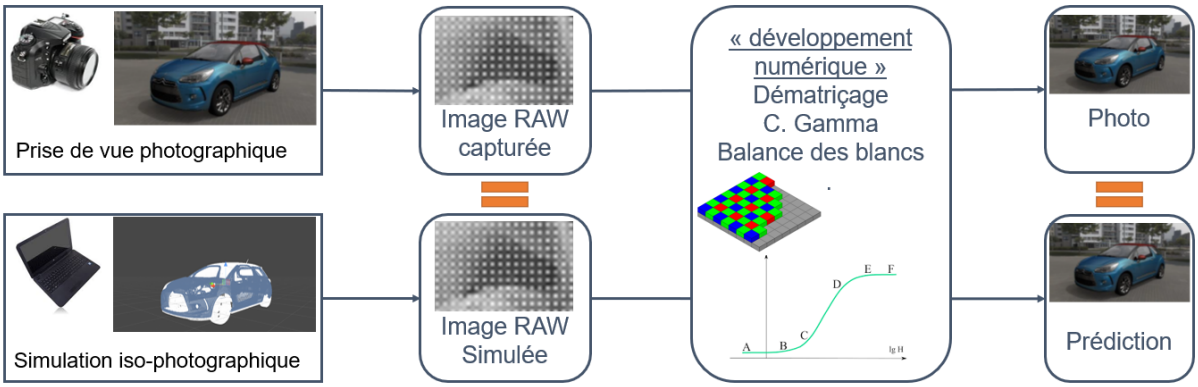


FIGURE 1.47 – L'iso-photographie vise à simuler en tout point l'image RAW produite par un appareil photo numérique.

Les capteurs photographiques couleur sont dotés de filtres colorés par pixel rouge, vert et bleu. Ce filtre matricé coloré s'appelle un filtre de Bayer. A chaque pixel R, G et B est associée une courbe de réponse spectrale correspondant à l'efficacité quantique du capteur dans la plage de chacun des filtres. Ces courbes, dont un exemple est donné en figure 1.49 , représente le rapport entre la quantité d'électrons produits et le nombre de photons reçus de longueur d'onde donnée.

L'exposition [28] du capteur, c'est à dire la quantité d'énergie reçue par le capteur durant le temps d'exposition, se calcule de la façon suivante :

28. Aussi appelée lumination du capteur

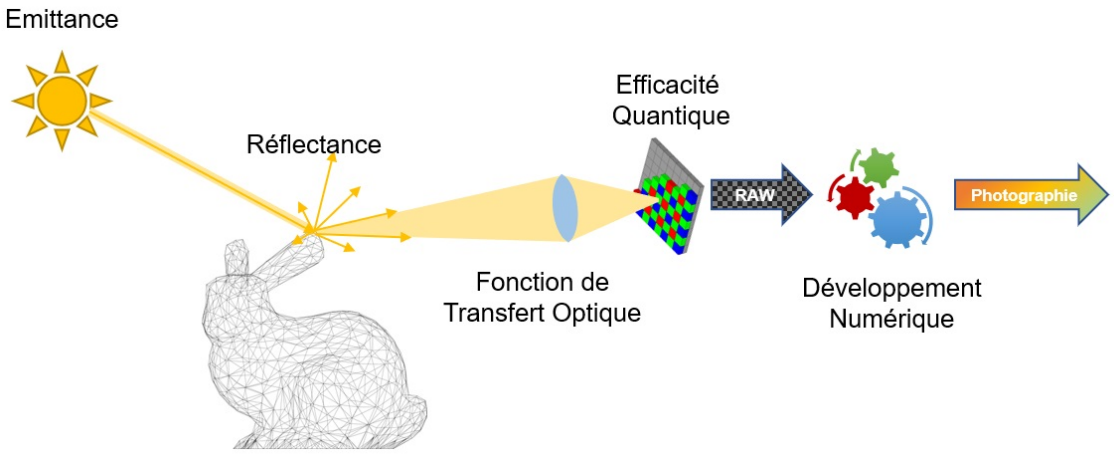


FIGURE 1.48 – Étapes de la formation d'une photographie numérique. Seul le développement n'est pas lié à un phénomène physique.

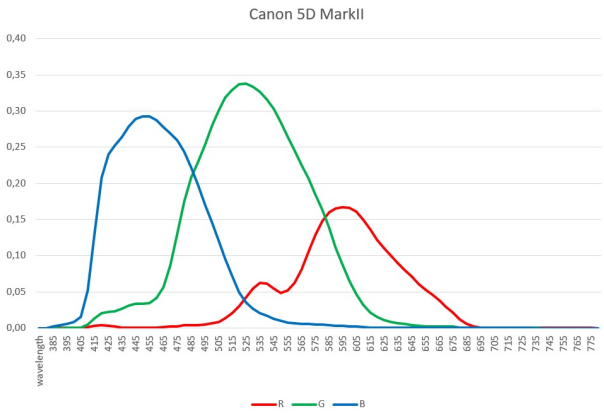


FIGURE 1.49 – Exemple de courbes de réponse spectrale (Canon 5D Mark II).

$$H(x,\lambda) = t.E(x,\lambda) = t.\int_{\Omega} L_i(x,\vec{\omega},\lambda)\cos(\theta)\,\mathrm{d}\,\omega \tag{1.9}$$

Avec t le temps d'exposition , E l'éclairement du capteur au point x et L_i la luminance incidente au même point x. H s'exprime donc en $\mathrm{J\,m^{-2}}$.

Alors la réponse V du pixel i se calcule en fonction des courbes de réponse spectrales $W_c$du canal $c = R|G|B$ de la façon suivante :

$$V_i = \int_A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_c(\lambda).H(x,\lambda)d\lambda dx \tag{1.10}$$

Avec $\int_A dx$ pour l'aire d'un pixel.

Dans le cas d'une photographie couleur (ou d'une iso-photographie couleur) l'image RAW est donc une image en niveau de pixel matricée. Affichée à l'écran, elle apparaît en niveau de gris comme sur la figure 1.48. Pour former l'image couleur il faut appliquer le dématriçage (figure 1.50) qui permet d'obtenir une image composée de trois canaux rouge, vert et bleu par pixel.

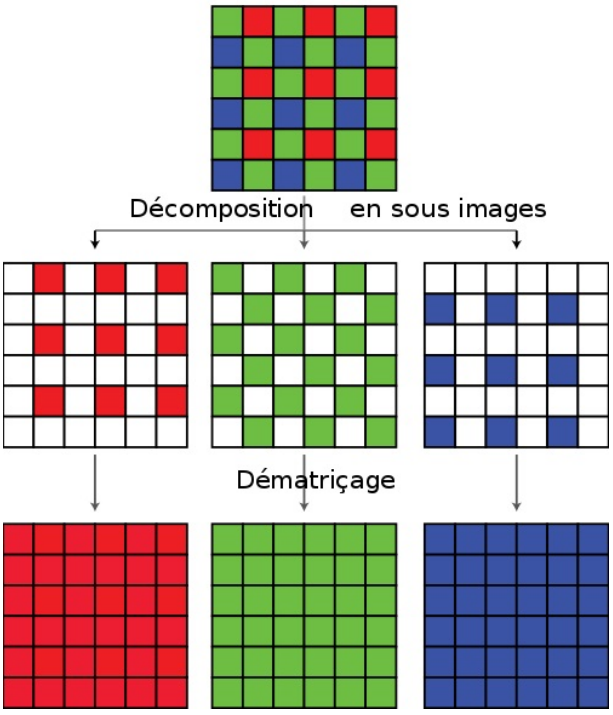


FIGURE 1.50 – Dématriçage d'une image RAW.

On notera que le système optique servant à former l'image, dans notre cas l'objectif de l'appareil photographique, peut être modélisé en 3D par un assemblage d'éléments optiques mais peut aussi être représenté par une fonction de transfert optique qui relie la luminance sortante de l'espace objet à la luminance incidente de l'espace image. Elle modélise la façon qu'a le système optique de distribuer la lumière dans l'espace image.

1.4.1.3 Calculer la distance entre la photographie et l'iso-photographie

La plupart des études comportant une comparaison entre réel et virtuel incluent une validation via des mesures radiométriques ou photométriques. Lorsque de surcroît la comparaison est faite avec une photographie, la distance entre l'image simulée et l'image photographique est généralement évaluée sur la base d'une simple différence absolue entre les deux images (figure 1.51) [Pat+97] [Tak+90].

Calculer la distance perceptuelle entre deux images n'est pas quelque chose de simple. Mais il existe un outil, le Delta-E, permettant de calculer la distance perceptuelle entre deux couleurs, bien

FIGURE 1.51 – Image de la différence absolue entre la simulation et la photographie. "Cornell Box Comparison" 04/30/98 @ http ://www.graphics.cornell.edu/online/box/

plus performant qu'une simple différence absolue dans l'espace RGB. Il a été établi par la CIE en 1976 [29] en même temps que l'espace de couleur associé L∗ a∗ b∗ (figure 1.52). Dans cet espace le Delta-E se calcule simplement comme une distance euclidienne :

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \tag{1.11}$$

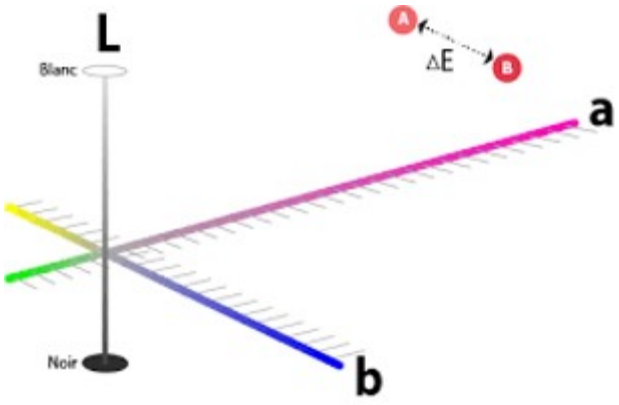


FIGURE 1.52 – Espace de couleur L*a*b* et représentation du Delta-E.

Espace de couleur L∗ a∗ b∗ et représentation du Delta-E.

Au chapitre 3, je présente une étude complète de validation par iso-photographie développant la

29. Puis mis à jour en 1994 et 2000.

chaîne de la création de l'image à la comparaison des delta-E en passant par le développement des images RAW photographiées et simulées.

1.4.2 Lever le premier verrou pour un rendu « vrai »

1.4.2.1 Moteur de rendu prédictif basé mesures

Lever le premier verrou, c'est obtenir une simulation de l'apparence qui soit la reproduction exacte, en mémoire numérique, d'une situation réelle [30]. Pour cela, à mon sens, il faut mettre en oeuvre un moteur de rendu :

— Prédictif, physique et non biaisé prenant en compte l'ensemble des phénomènes liés aux interactions lumière-matière : Spectral, polarisation, fluorescence et phosphorescence ;
— Qui admette en entrée des données réelles caractérisées optiquement : sources de lumière, matériaux et système imageur [31].

⇒ Une chaîne de CA²O fiable doit mettre en œuvre un moteur de rendu prédictif **basé mesures**.

Nous avons vu qu'il existe peu de moteurs de rendu qui répondent aux critères *spectral* et *polarisé* et qu'aucun moteur public n'intègre, pour le moment, la fluorescence et la phosphorescence. Être « basé mesures » signifie que le moteur de rendu prend en priorité des données mesurées en entrée et que ces données sont utilisées de façon complète sans être adaptées à un modèle ou réduites en dimensions. Toutes les informations présentes dans la mesure, pouvant avoir un impact sur l'apparence finale, doivent être prises en compte. Je participe actuellement au développement d'un moteur de rendu basé mesures : Le moteur OMEN de la société *United Visual Researchers* [Ran+17] [Por+18] [Ran+18] [Boh+19]. C'est une chance incroyable car ce moteur permet de simuler des situations réelles et donc de valider la prédiction en iso-photographie.

Bien entendu, l'idée d'utiliser ici des mesures de matériaux [KL11] et là des mesures de lumières [Dav01] n'est pas nouvelle, mais jusqu'à présent aucune chaîne de bout en bout n'avait été réalisée qui intègre la caractérisation optique de tous les éléments y compris du capteur photographique et de son filtre de Bayer.

1.4.2.2 Matériaux mesurés

Nous verrons dans les chapitres 2 et 3 que les mesures de matériaux peuvent être réalisées à différentes échelles :

— À l'échelle macroscopique, sous la forme d'une BSDF. La mesure peut alors être réalisée, par exemple, au spectro-gonio-réflectomètre afin obtenir une BRDF échantillonnée ou à l'ellipsomètre afin d'obtenir un indice optique complexe utilisable dans les équations de Snell-Descartes

30. Ou que l'on ait les garanties qu'elle puisse devenir réelle.
31. Appareil photo, caméra, etc.

et les coefficients Fresnel ;

— À l'échelle microscopique, par la mesure de la morphologie et des indices optiques des composants d'un matériau composite. Cette approche ouvre la perspective de la conception de l'apparence par la formulation.

Le point absolument essentiel, dans le cadre de la conception de l'apparence, est de disposer en permanence d'un lien avec une réalité physique formulable. Il faut garantir à l'utilisateur que la simulation est, bien entendu, prédictive mais aussi qu'elle sera effectivement réalisable. Sans l'assurance de faisabilité, on retourne au cas illustratif précédent. La mesure optique des matériaux garantit donc la véracité mais contribue aussi à l'assurance de faisabilité. Lorsqu'il s'agit de matériaux composites, le matériau est soit formulé, produit puis mesuré (cas n° 1) soit c'est la formulation qui est simulée à partir de mesures à plus petite échelle. Ce que nous apprend l'étude que nous avons réalisée dans le cadre du projet ANR L.I.M.A. [Mul+15] , c'est qu'il est effectivement possible de prédire l'apparence de certains matériaux à partir de la mesure des indices optiques de ses constituants.

1.4.2.3 Sources de lumière mesurées

Les sources de lumière réelle, qu'elles soient naturelles ou artificielles, sont toujours caractérisées par la distribution spectrale et angulaire de l'émission. Les sources quasi ponctuelles, de type LED par exemple, peuvent être mesurées en laboratoire à l'aide d'un gonioradiomètre ou d'un goniophotomètre. Les source de plus grande taille [32] sont mesurées en champ proche [Dav01], c'est-à-dire en mesurant la source en plusieurs points échantillonnés sur la surface(figure 1.53).

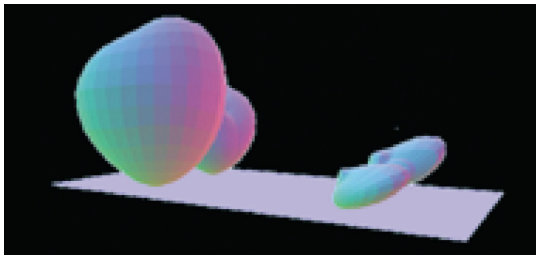


FIGURE 1.53 – Photométrie en champ proche. Représentation 3D des solides photométriques [Dav01].

La mesure d'un environnement lumineux est un cas particulier puisque ce n'est pas une source de lumière en tant que telle que l'on souhaite représenter mais le résultat des interactions lumière-matière distantes. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une capture panoramique à 360° x180° . En synthèse d'image il est usuel d'utiliser des captures d'environnements panoramiques en haute dynamique. Les captures HDRI [33], réalisées à partir de photographies, ont été introduites par Paul

32. À l'échelle de la scène.
33. High Dynamic Range Image

Debevec en 1997 [PDM98]. Elles sont très utiles en mode illustratif y compris pour la composition réel-virtuel pour le cinéma mais ne peuvent être utilisées pour la conception de l'apparence car elles sont représentées communément dans une base trichrome. Pour produire des images prédictives il est nécessaire de connaître en tous points la luminance spectrale incidente. De plus, la lumière issue d'un environnement naturel est très souvent polarisée par des reflets diélectriques (verres de façade, étendues d'eau, etc.) ou tout simplement par la diffusion de Rayleigh d'un ciel clair. Le degré de polarisation du ciel peut amplement dépasser 65% comme comme j'ai pu le constater lors de mesures que j'ai réalisées avec Philippe Porral dans le désert d'Atacama[34] en 2016 [Por16] ou qui ont été reportées suite à des observations à Kiev en 1921 [Kar25].

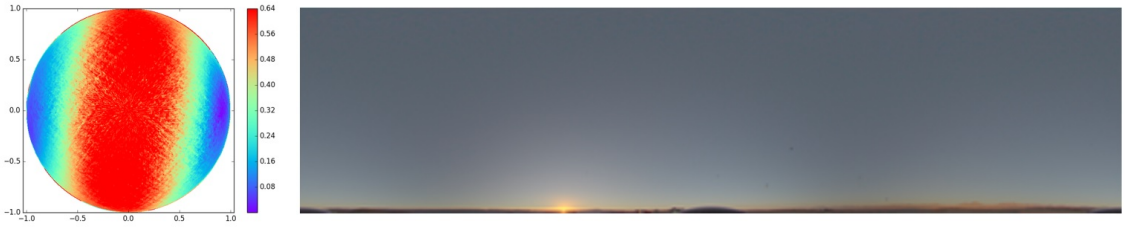


FIGURE 1.54 – Capture d'environnement lumineux polarisé. Degré de polarisation (à gauche), vue équirectangulaire (à droite). Désert d'Atacama, Chili, 24 octobre 2016, 22h35

⇒ Pour la simulation iso-photographique il est donc essentiel de réaliser des captures d'environnements en luminance énergétique spectrale et polarisée [Por16].

1.4.2.4 Instruments caractérisés

L'appareil photographique, la caméra ou tout autre capteur du flux électromagnétique doit également être caractérisé. C'est une nécessité induite par la solution que je donne au premier verrou : l'iso-photographie. Deux éléments principaux constituent un système imageur : son système optique et son capteur.

Caractériser le capteur est réalisé à l'aide un montage optique constitué d'un monochromateur (appareil sélectionnant la longueur d'onde d'une source par dispersion spectrale) et d'un spectromètre. Dans la pratique, une sphère intégrante et une photodiode sont nécessaires pour calibrer correctement le système (voir la manipulation au chapitre). Nos travaux nous ont également amenés à réaliser la calibration du système optique d'une caméra via le calcul de ses paramètres intrinsèques (figure 1.55). Cela comprend la modélisation de la distorsion, et le calcul de la matrice de projection (généralement asymétrique).

Cela semble fonctionner très bien dans la plupart des cas mais ce n'est en réalité pas totalement satisfaisant. Les méthodes habituelles de reprojection permettent d'ajuster un modèle théorique [Zha00]

34. San Pedro de Atacama, Chili, alt : 2 500 m , 22° 53'33.5"S 68° 13'14.1"W

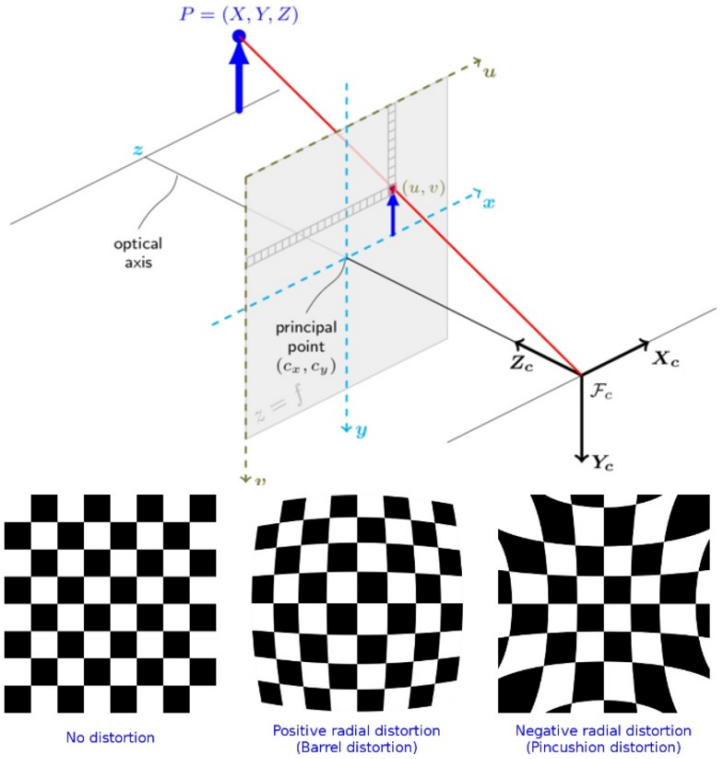


FIGURE 1.55 – Modèle de caméra sténopé (en haut), Distorsions types (en bas) - source : OpenCV

mais ne prennent en compte, ni des aberrations chromatiques dues à la dispersion spectrale, ni la mesure du flou de profondeur, ni le vignettage spectral. Pour cela il faudrait mesurer la fonction spectrale de transfert optique. C'est un sujet que j'ai abordé uniquement sous l'aspect du vignettage spectral dans la l'étude sur la validation iso-photographique (chapitre 3).

1.4.3 Chaîne de rendu iso-photographique basé mesure

Nous disposons maintenant de l'ensemble des éléments nécessaires pour décrire une chaîne complète pour la conception de l'apparence assistée par ordinateur. Cette chaîne exploite un moteur de rendu prédictif spectral et polarisé basé mesures (figure 1.56). Elle produit des images de synthèses iso-photographiques comparables à des photographies réelles. La comparaison avec une photographie sert de preuve de vérité et fait donc passer la synthèse d'image du monde de l'illustration au monde de la simulation.

La synthèse d'image iso-photographique est un sous-ensemble du rendu prédictif qui lui-même fait partie du rendu physico-réaliste, et ainsi de suite comme illustré à la figure 1.57.

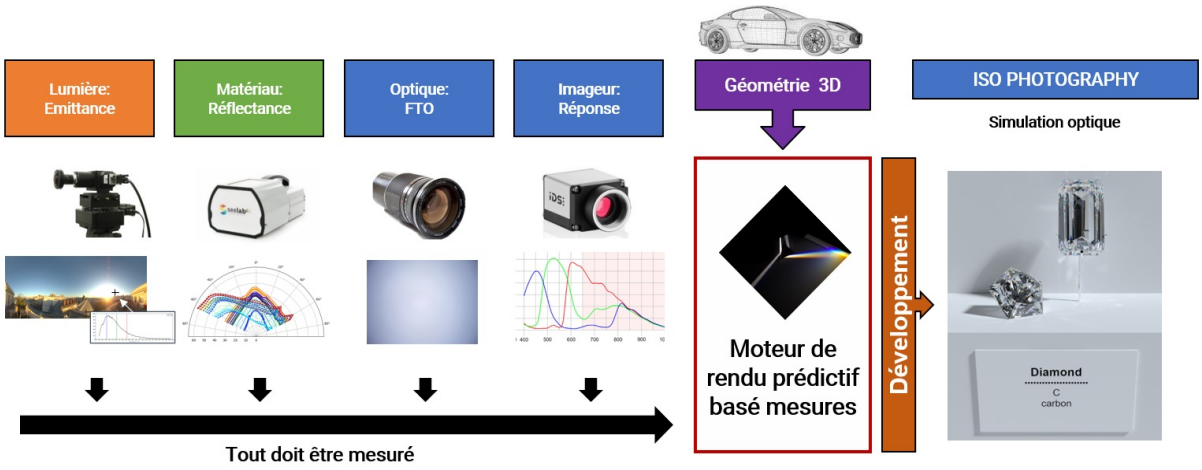


FIGURE 1.56 – Chaîne de simulation prédictive basée mesures.

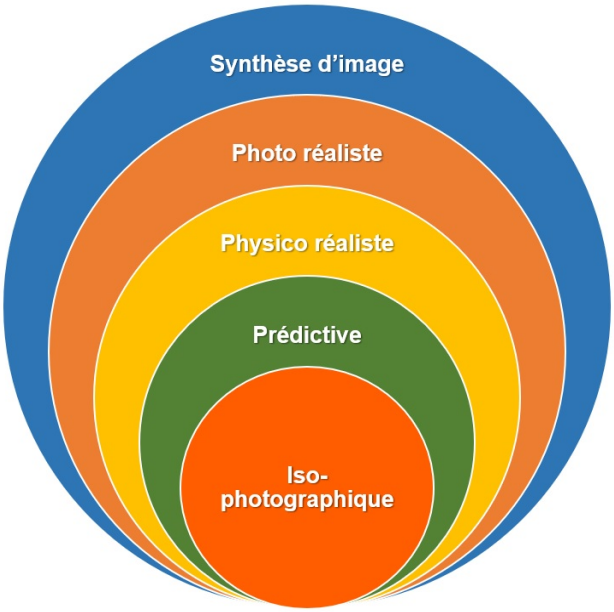


FIGURE 1.57 – Hiérarchie des qualités de rendu.

1.4.4 Discussion : La photographie comme référentiel ?

1.4.4.1 Médium photographique

Il est légitime de se poser la question de la validité du référentiel photographique en tant que tel. Est-il possible de prendre des décisions fiables sur la base d'une simple photographie ? Je ne réponds

pas ici formellement à cette question. Elle nécessitera sûrement d'autres travaux. Toutefois je peux introduire quelques réflexions personnelles à ce sujet.

Constatons, dans un premier temps, quel est l'apport de l'iso-photographie à la CA²O. À la section 1.3.3, nous avons constaté que la comparaison directe entre l'image simulée et une scène réelle n'est pas fiable car le référentiel n'est pas commun (différence de gamut, de dynamique, de profondeur, etc.). Notre solution iso-photographique permet de se placer dans le même référentiel et donc d'obtenir un affichage dans un référentiel à iso-conditions (figure 1.58).

FIGURE 1.58 – Iso-photographie : comparaison visuelle entre la photographie et la simulation à iso-conditions.

Du fait de la définition d'un référentiel commun et d'un comparable fiable, il est donc maintenant possible de réaliser une comparaison objective entre photographie et simulation. La phrase de Bui Phong, qui nous a servi de fil conducteur tout au long de ce premier chapitre, pourrait alors prendre la forme suivante pour l'iso-photographie :

« Obtaining a close image correspondence to the eye's **objective** interpretation of the real object is the goal. ».

Tout ceci pour un mot ! Mais un mot tellement important : *l'objectivité*.

1.4.4.2 Limites du modèle

Il reste une variable non maîtrisée qui réside dans l'interprétation de l'image, par le système visuel humain. À la vue d'une photographie, nous formons une image mentale en fonction de ce que nous connaissons par ailleurs et de notre état psychologique à l'instant de l'observation. Quelle fiabilité alors ? Quelle marge d'erreur attendre ? Difficile à dire... Mais on peut certainement noter que la perception d'une situation réelle est sujette à la même interprétation variable d'un individu à l'autre. La variabilité est toutefois moindre qu'à la vue d'une photographie car la perception du réel n'est pas limitée par les performances d'un dispositif d'affichage. Un jour, lorsque les évolutions technologiques

le permettront, il sera certainement possible de couvrir l'ensemble des capacités de l'œil humain. A ce moment-là, l'écart d'interprétation entre le réel et la simulation pourra être considéré comme nul. Ce qui, bien entendu, ne veut pas dire que la variance d'un individu à l'autre ou d'un instant à l'autre sera réduite à zéro. En d'autres termes, concernant l'apparence des choses, de toutes choses égales par ailleurs, il y aura toujours *des goûts et des couleurs*.

Comment alors fiabiliser au mieux les choix faits sur la base de photographies (« iso » ou non puisque qu'on a travaillé à ce que ce soit effectivement la même chose) ? Sans doute par l'apprentissage et l'**expertise**. En effet l'expert(e) qui a déjà l'expérience sensorielle d'une scène similaire dans le réel saura se projeter mentalement à la vue d'une image construite dans les mêmes conditions. Par exemple, l'observation et la prise de vue photographique du précédent modèle d'un produit donné dans un environnement lumineux contrôlé (un dôme, une cabine lumière, etc.) permet de se projeter dans cette situation à la vue d'une iso-photographie du nouveau modèle, simulée dans les mêmes conditions. La méthode est simple, elle se base sur un objet que l'on manipule tous les jours : la photographie, elle est répétable d'une situation à l'autre et fiable puisque comparable.

1.5 Conclusion du chapitre

Au cours de ce premier chapitre, j'ai construit un argumentaire pour un comparable fiable consacré à la conception de l'apparence : l'iso-photographie. Lorsque c'était nécessaire, j'ai précisé quelques concepts et des notions-clefs d'optique pour la synthèse d'image. Cela nous a permis de lever certains verrous mais surtout de construire un modèle de chaîne de CA^2O. Dans les chapitres suivants je présente des contributions réalisées à différentes étapes de mon travail de recherche. Elles illustrent de façon pratique la mise en œuvre de la chaîne à deux étapes : la formulation (chapitre 2), l'iso-photographie (chapitre 3).

Il y a pourtant un sujet essentiel que nous n'avons pas abordé dans ce chapitre, c'est le sujet de l'expérience utilisateur et de son implication dans la perception de l'apparence. En effet, les mouvements de tête de l'utilisateur et les changements de point de vue, par exemple, participent autant à la perception du relief que la vision binoculaire [FMP01]. Le toucher, l'odorat et les autres sens participent également à la perception du monde et se combinent pour former la fameuse image mentale dont nous avons amplement parlé au cours de ce chapitre. C'est un sujet que j'ai eu la chance d'aborder sous l'aspect de l'interactivité. Il est central dans un grand nombre de situations. En premier lieu, pour l'évaluation de l'apparence. Certains matériaux, surtout les matériaux spéculaires, s'apprécient dans le mouvement. Parmi les cas extrêmes, on citera la taille des diamants qui nécessite absolument de jouer avec les lumières et l'angle de vue pour exprimer toute leur beauté. L'interactivité est également centrale dans le cadre d'un éclairage évolutif pour des applications de réalité augmentée par exemple. Enfin, la manipulation d'objets en environnement virtuel nécessite un rendu allant au-delà même de la notion d'interactivité, il faut alors atteindre le temps réel. Nous verrons dans la dernière contribution,

au chapitre 4, que l'interactivité et, en général, l'*expérience de l'utilisateur* n'est pas uniquement une question de puissance de calcul.

Chapitre 2

Contribution : « Rendu prédictif de matériaux composite - une approche multi-échelle »

2.1 Présentation de la contribution

La première contribution que je présente traite du sujet de la conception de l'apparence par la formulation. Comment prédire l'apparence d'une matière à partir de sa composition et de sa morphologie à l'échelle microscopique ? Ces travaux ont été menés en 2014-2015 au cours du projet ANR L.I.M.A au CAOR (Centre de Robotique) de Mines ParisTech avec la collaboration d'équipes pluridisciplinaires (Centre des Matériaux, Centre de Morphologie Mathématique, Institut des Nanosciences). L'élément central de l'étude est l'indice optique complexe. Nous montrons qu'il est un point de passage entre l'échelle microscopique et l'échelle mésoscopique pour des matériaux physiquement composites mais optiquement homogènes : qui comprennent des inclusions de taille inférieure ou proche de la longueur d'onde. Nous montrons également que l'indice homogène, calculé numériquement, est un élément déterminant dans la prédiction de l'apparence de matériaux composites en image de synthèse.

2.2 Publication

Predictive rendering of composite materials: A multi-scale approach

T. Muller[a], P. Callet[a,b], F. da Graça[a], A. Paljic[a], P. Porral[a], R. Hoarau[a]

[a]MINES ParisTech, PSL-Research University, Centre for Robotics,60 Bd St Michel 75006 Paris, France; [b]Applied Mathematics and Systems Laboratory, CentraleSupélec, Paris, France

ABSTRACT

Predictive rendering of material appearance means going deep into the understanding of the physical interaction between light and matter and how these interactions are perceived by the human brain. In this paper we describe our approach to predict the appearance of composite materials by relying on the multi-scale nature of the involved phenomena. Using recent works on physical modeling of complex materials, we show how to predict the aspect of a composite material based on its composition and its morphology. Specifically, we focus on the materials whose morphological structures are defined at several embedded scales. We rely on the assumption that when the inclusions in a composite material are smaller than the considered wavelength, the optical constants of the corresponding effective media can be computed by a homogenization process (or analytically for special cases) to be used into the Fresnel formulas.

Keywords: rendering, composite materials, optical constants, effective media, spectral rendering, polarization, multi-scale

1. INTRODUCTION

Over the past years we have been working towards improving the rendering process both for industry and cultural heritage. Automotive paints give a fantastic case study, especially when dealing with metallic, pearlescent or flip-flop coating effects [1] [1] [2]. The spectral simulation of polychromy appearance in medieval architecture and sculpture brings to light that humans have for a long time investigated making complex optical materials - for esthetic and symbolism. In both cases we can observe a wide range of effects involving the interaction between light and matter: reflection (and shininess), refraction (and transparency or translucency), scattering, chromatic dispersion, interferences (thin film and nacre), birefringence, polarization, de-polarization, fluorescence, etc.

Until now, too little attention has been paid in computer graphics to the intrinsic nature of materials. Of course since the early 80s, researchers have proposed and developed physical models of materials' optical behavior [3] [4]. But these models have been used only a few times in practical cases. Generally, computer graphics' materials focus on believable appearances by reproducing the effects (e.g. iridescence, gloss, etc.) without accounting for the origin of the effects (layered structure, single or multiple scattering, etc). This gives nice results for situations where cognition is involved. But when the rendered image has to exactly refer to the reality, i.e. when predictive rendering [5] is needed, it becomes necessary to rely on accurate physical models of the materials.

The first part of this paper shows and illustrates with a few practical cases, that none of the light's properties are negligible when focusing on predictive rendering of composite materials. To do so we start by relating the history of research on the "gloss from the deep"[1] as an example of the human obsession with the magic of light. This phenomenon occurs, for instance, in metal-oxide glaze, colored crystals and the atmosphere. We address some key models for the multiple scattering of light. Then we describe the pearlescent effect present in a wide range of manufactured composite materials such as car paint, makeup, etc. Finally we introduce the concept of effective medium that permits under certain conditions to substitute a composite material with an optical *continuum*.

[1] A sentence from Michaël Rössler (Merck) that refers to structural colors generated inside a composite material.

Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance 2015, edited by Maria V. Ortiz Segovia, Philipp Urban, Francisco H. Imai, Proc. of SPIE-IS&T Vol. 9398, 939804 · © 2015 SPIE-IS&T · CCC code: 0277-786X/15/$18 · doi: 10.1117/12.2077920

Downloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

2. OPTICS OF COMPOSITE MATERIALS

2.1 The gloss from the deep

When an isolated small particle, whose size is the same order or smaller than the wavelength[2], is stimulated by an electromagnetic wave it re-radiates part of the received energy all around. This process is known as "single scattering" of light. Gustav Mie (1908) elaborated a general theory that permits the complete evaluation of the distribution of light intensity and polarization for the scattered field for the special case of a spherical particle. This single scattering occurs everywhere in our natural environment. The blue color of the sky originates in a single molecular scattering process for which the particle diameter is less than the wavelength of the incident light; this is known as "Rayleigh scattering" and can also efficiently be used to explain the color of the solar disk at sunrise or sunset.

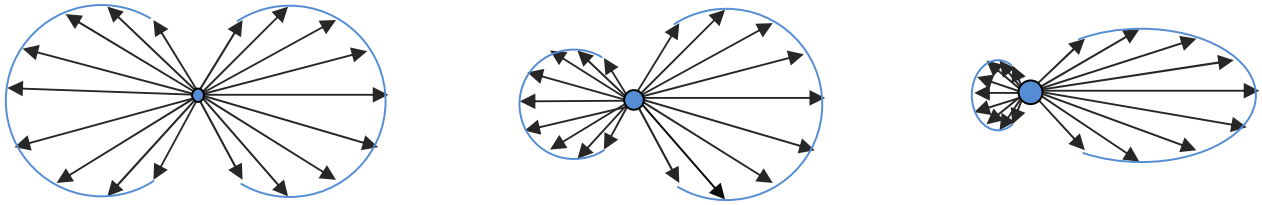


Figure 1. Intensity diagram for the Mie scattering of light by a spherical particle. Three particle size domains are illustrated.

According to Maxwell's equations the intensity and polarization of the scattered field depends on the size, shape and nature of the particle, all terms linked to the wavelength of the incident field. If we consider a diluted medium[3], each small particle can be considered as acting independently. This is the case of diluted composite materials formed by a dielectric binder and a small proportion of metallic or organic small particles. As the intensity of the scattering depends on the wavelength this kind of material resonator acts as a frequency selector. In the visible light domain, this produces notably saturated color effects.

The Ancient Egyptians were probably the first humans to produce glaze on ceramic by covering the pottery with salt water before the firing. This technique forms a simple sodium aluminosilicate glaze. From the Middle Ages the use of metals-oxide glaze became common allowing a wide range of colorful effects.

In the Renaissance period, in European countries, various painting techniques were used to create similar visual effects today named "gloss from the deep" by Michaël Rössler. Small pigments were very weakly concentrated in linseed oil (a dielectric binder) and this kept them in suspension acting as a visual composite material. The *sfumato* technique, practiced by Leonardo da Vinci consists of superimposing very thin layers of weakly pigmented paints that are dried successively. More than twenty layers of about one micrometer of oil with a very low concentration of pigments generate a special depth effect that is obviously not due to the thickness of a single layer of about 20µm. In this case, as all the layers being made from the same material (oil), and as the refractive indices do not change through the layers, an illusion of thicker material uniformly pigmented and thus, delicately colored, is produced.

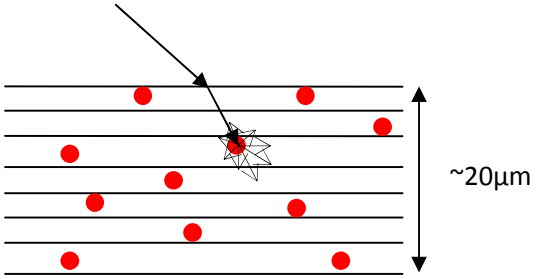


Figure 2. Light interaction in a weakly pigmented layered paint (glaze).

[2] 380 to 780nm for the visible light
[3] The space between each particle is far larger than the particle size

ownloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

The famous art historian Erwin Panofsky when describing [6] the very subtle effects obtained by The Master of Flémalle (cf., "Early Netherlandish Painting", Chapter 6, pp. 152-153) writes:

The whole picture was built up from bottom to top by superimposing "rich" and therefore translucent paint (viz., pigments tempered with a fat medium, mostly, though not exclusively, oil) upon "lean" and therefore more or less opaque paint (viz., pigments tempered with other, aqueous media or, possibly, an emulsion). Lighter and darker tones were produced by applying the translucent colors over an opaque underpainting ---significantly called dood-verw, "dead color", in Dutch and Flemish--- which pre-established the light values and, to some extent, the general color; and finer gradation --- in certain cases even an optical mixture of two colors--- was achieved by applying further films of pigment. As a result, the light is not entirely reflected from the top surface of the picture, where opaque pigments appear only in the shape of highlights. Part of the light penetrates the coat or coats of translucent paint to be reflected from the nearest layer of opaque pigment, and this is what endows the pictures of the old masters with their peculiar "depth". Even the darkest tones could never turn opaque, and ultimately the whole multiple coat of paint would coalesce into a hard, enamel like, slightly uneven but uniformly luminous substance, irradiated from below as well as from above, excepting only those sporadic white or yellow lights which, by their very contrast to the transparent depth of the surrounding pigments, assume the character of "high lights".

As explained earlier, this phenomenon is not only linked to the wavelength of the light but also to its polarization [4]. In other words, the spectrum and polarization of light cannot be omitted when simulating the interaction of light with diluted composite materials.

2.2 Multiple scattering

The multiple scattering of light occurs when the mean distance between the inclusions inside the binder (or the matrix) is relatively small. It is predominant in dense media as clouds, powders, pigments, concentrated solutions, etc. A range of models has been defined to describe this phenomenon [4]. The Melamed model is a phenomenological model that describes a medium composed of a compact layer of identical adjacent spherical particles under a homogeneous substrate. The Kubelka-Munk model describes a medium composed of a plane layer of a scattering and absorbing material on a substrate. To determine the emergent flux the absorbing material is abstracted as a thin layered structure of the same material.

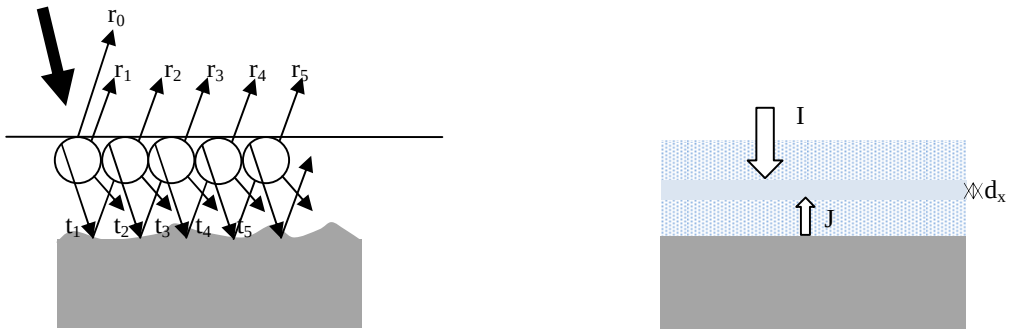


Figure 3. Schematic descriptions of two phenomenological models for multiple scattering of light; Melamed model (left) and the two flux Kubelka-Munk model (right)

We notice that these models are only applicable to specific cases. Indeed, there is no general theory at this scale, only models whose mathematical complexity increases with the structural complexity of the material. They rely on morphologies that always end at some scale on the Snell-Descartes or Mie solutions. It means, for instance, that there is currently no solution for scattering by fractal surfaces.

2.3 The pearlescent effect

The spectral nature of light is the source of various interference phenomena commonly observed in our environment. Usually those effects are due to the multilayer film structure of iridescent objects. Soap bubbles, pearls and nacres, beetle cuticles, butterfly wings, bird feathers, fish scales, etc. are the most striking visual effects. But we can also observe multilayer film structure at a nanoscale, and therefore some iridescence, within a wide range of objects and natural structures such as: hairs, skin (sebum thin film), wet surfaces, minerals, plants, etc. In those cases the iridescence is

ownloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

embedded within the scattering phenomenon and it is not always noticeable, but this does not mean that it is negligible at all. Inside some minerals, an optical anisotropy creates a very demonstrative optical effect, e.g. the presence of very small inclusions inside opals (water and silica – crystallized and amorphous) where all optical known laws acts simultaneously.

Thus, we discover that the color properties do not exclusively depend on the absorption properties of the materials, but also on the arrangement made at a given scale. Defining a basic pattern and many rules of arrangement such as alignments, superimposition, rotation, inversion, etc. the tiling process at nanoscale creates impressive effects for our visual system; although these effects are not necessarily for human destination. Considering pearls, it is easy to understand that they are not produced for interacting with light as they are built, secretly, in darkness.

Natural pearls are hexagonal crystals of aragonite assembled in concentric thin layers (~ 0,5µm thick). The same layered construction can be found within the nacre of sea shells.

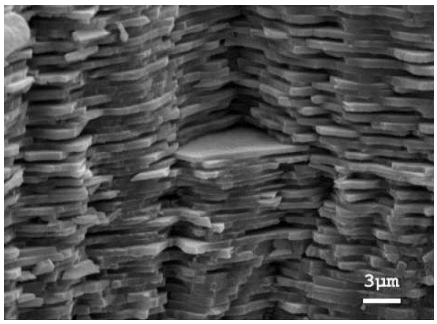


Figure 4. SEM (Scanning Electron Microscopy) image of a fractured surface of nacre[4].

This layered structure is at the origin of the "pearlescent effect". The material also acts as a frequency selector: after a first refraction inside the material, the reflected rays are successively shifted by the same amount. Those rays will interfere (constructively or destructively) depending on the phase difference that is directly linked to the length of the light path. The interferences only occur when the thickness H of the layer is within the size of the wavelength and when the base material maintains the homogeneity and coherence of the incident ray.

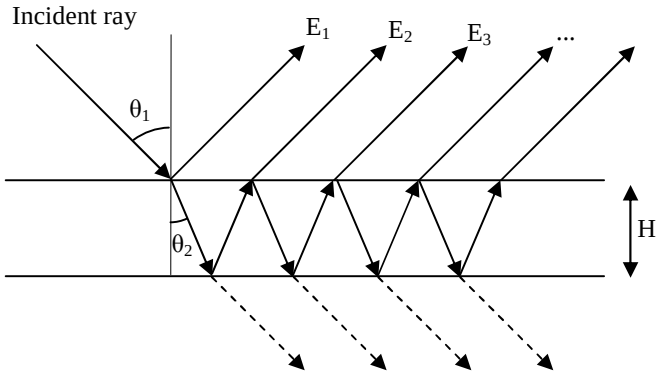


Figure 5. Interference modeling from a single layer film structure of ridge.

The optical role of these goniochromatic effects at the same scale was applied to the effect pigments manufacturing in the multilayer system of dielectric materials. They are commonly used in automotive paint design but the iridescence effect can also be observed in many manufactured objects: packaging, makeup, etc.

[4] CC BY-SA 3.0 - Fabian Heinemann

ownloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

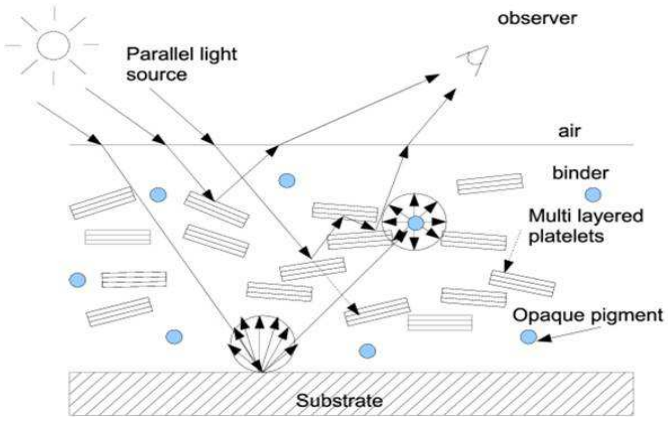


Figure 6. An example of automotive paint layered structure. The "substrate" is also a layered structure resulting in a colored scattering medium.

A dielectric material tends to polarize the reflected and transmitted field proportionally to its electric susceptibility χ as expressed in the following equation where $\vec{P}$ is the dielectric polarization density, $\vec{E}$ the electric field and ε_0 the vacuum permittivity.

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} \tag{1}$$

A smooth metallic material tends to preserve the polarization of the incident field after reflection. Therefore, if a metallic material is combined to a dielectric diopter, e.g. metallic flakes in a dielectric binder this will create a complex medium for which the effect of the polarization of light cannot be neglected.

2.4 Effective medium

A *dis-continuum* constituted by composite material may, under certain conditions, be replaced by an equivalent *continuum* [4] [7]. If the size of the heterogeneities exceeds the wavelength but are small enough to be unnoticeable by the observer (this notion is explained in section 4) we refer to it as a *visual continuum*. If the sizes of the heterogeneities are by far smaller than the wavelength then it is defined as an *optical continuum*. Then the material can be optically characterized by its effective complex index of refraction as if it were a homogeneous medium.

More precisely, when the wavelength of light is much larger than the typical size of the heterogeneities inside the material, then the quasi-static approximation of the Maxwell equations remain valid [7].

$$\nabla \cdot D(x) = 0\,, \qquad \nabla \times E(x) = 0 \tag{2}$$

$D(x)$ is the local electric displacement at point x, $E(x)$ is the local electric field, $\nabla\cdot$ is the divergence operator and $\nabla\times$ the curl operator.

The effective medium theory is built on the concept of unit cells as illustrated in figure 7. Each cell is defined as a small volume of the heterogeneous material that reacts to an electromagnetic field exactly in the same way as a hypothetic homogeneous material would do. Therefore, the effective permittivity of the medium ε_e can be deduced from the relative permittivity of the matrix ε_m and of the inclusions ε_i. This theory is only valid if we assume that the cells do not scatter the light (i.e. the scattering cross section of the cells *S(0)* is equal to 0). The concept of index of refraction is only meaningful and defined for continuous and homogeneous media (isotropic or not).

ownloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

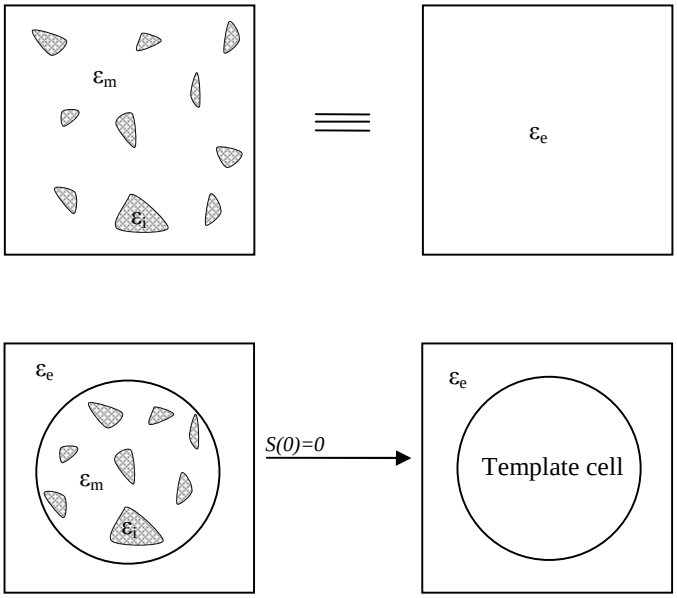


Figure 7. Unit cell concept as illustrated by Serge Berthier [7].

Maxwell Garnett [8] approximated the effective medium by considering a single type of inclusion in a dielectric binder.

The original Maxwell Garnett equation is:

$$\frac{\varepsilon_e - \varepsilon_m}{\varepsilon_e + 2\varepsilon_m} = \delta_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_m}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m} \tag{3}$$

And its solution:

$$\varepsilon_e = \varepsilon_m \frac{2\delta_i(\varepsilon_i - \varepsilon_m) + \varepsilon_i + 2\varepsilon_m}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m + \delta_i(\varepsilon_m - \varepsilon_i)} \tag{4}$$

where δ_i is the volume fraction of the inclusions.

The complex refractive index of a material or medium is defined as:

$$\hat{n} = \sqrt{\hat{\varepsilon}\hat{\mu}} \tag{5}$$

Where ε is the relative electric permittivity and μ the relative magnetic permeability. μ is equal to one for most of the natural materials in the visible light domain. Therefore we can write:

$$\hat{n} = n + ik = \sqrt{\hat{\varepsilon}}$$

n is linked to the phase velocity of the propagating wave and k to its absorption.
n and k are not independent; they are always linked by the Kramers–Kronig relationships [4].

ownloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

3. ACQUIRED EXPERIENCE AND PRACTICAL EXPERIMENTS

In the introduction we have shown that human beings have always been fascinated by the colorful effects generated by the interaction between light and matter. Regularly, for thousands of years, new techniques appear to produce new saturated color sensations. Along these lines, we tried to reproduce these effects by using computer-generated images. In this section we talk about our own practical experience in the field of predictive rendering.

3.1 Car paint simulation

The pearlescent effect is one of the effects the chemical industry has imitated from nature. For instance, the multilayered structure of the automotive paint's pearlescent flakes is largely inspired from the structure of nacre. In the early 2000s, we had the chance to work on the physical rendering of car paint [9] for the automotive industry. Intuitively our first idea was to do a measurement of the BRDF of a physical sample of paint and focus our efforts on the fast global illumination rendering.

The results were convincing in terms of global colorimetry and gloss but we were unable to account for the sparkling effect. In this particular case (see figure 8), the rendering is the result of a pre-convolution of the spectral BRDF by an HDR sky. As highlighted by Martin Rumpin [10], "metallic and pearlescent paint pose serious challenges to computer graphics since they have high frequencies in both angular and spatial domains, and have a complex, pure stochastic spatial structure and angular dependent color shifts".

Figure 8. A car virtually painted by using a measured spectral BRDF[5]. Limited precomputed spectral radiance transfer is achieved by convolving the BRDF by the HDR sky (rescaled to D65 spectrum). Final image rendered by fast scan line algorithm. The other material models (for plastic, glass, etc) remain believable (not predictive).

Because the spatial sampling resolution of our BRDF measurement device was much larger[6] than the typical size of the flakes, the iridescences generated by the multilayered structure of the flakes was averaged as well as the sparkling effect. BTF measurements [11] and re-sampling [10] of flakes give good results but do not allow modifying the intrinsic feature of the flakes. That is why we proposed new physically based simulation of flakes [1] [4] [2] and pearls [12]. These studies have shown that a prerequisite for predictive rendering is taking into account the spectral and polarized nature of the light.

[5] Peugeot SA, France, 2000
[6] About one millimeter in orthogonal view.

ownloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

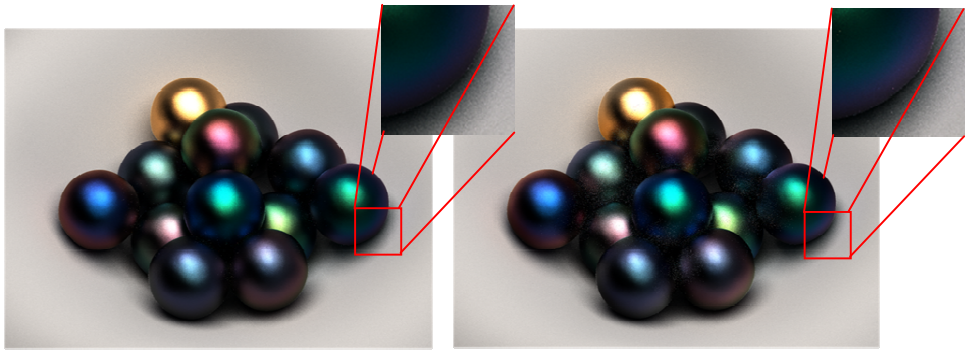


Figure 9. Simulation of spheres coated by special-effect paints [12]. Rendered with Virtuelium[7]. The pigments are aluminum flakes covered by a layer of magnesium fluoride (MgF2) and a layer of chromium. The variations in the appearance of the spheres is only due to the thickness of the MgF2 layer (from 201nm to 514nm). The right image is filtered by a linear polarizer. The left image is not filtered. We can observe that the two images are significantly different.

3.2 Medieval polychromy simulation

The simulation of the medieval polychromy is another challenge for the computer graphic scientist. Polychrome sculptures were produced at a time when the sources of artificial lighting were very different from those used today. These were candles or oil lamps, always flames. The painted statues that stand outside churches were commonly oriented to capture the light of the rising sun at the equinoxes or solstices and to create an ecstatic wonder sensation associated to the power of God. A wide diversity of techniques was used to create the medieval polychrome effect, usually by successively applying layers of pigmented paint.

When we produced the polychrome simulation of the "Beau Dieu" at the Amiens cathedral for a mixed reality installation, we realized that we were not able to actually account for the exact appearance of the statue as it was seen in the 14th century. In this installation the present lighting of the visitor space is used to illuminate the polychrome simulation. The statue from the past is immersed in the present light giving a chance for the visitor to see it as if it had traveled unspoiled through time up to the present. The result is an amazing time travel, but as the polychrome reflectance was not spectrally and morphologically characterized.

Figure 10. Mixed reality restitution of the "Beau Dieu" at the Amiens cathedral[8]. The exhibited statue in “Cité de l'architecture et du patrimoine” (Paris) is a white and slightly patinated plaster copy of the original. It serves as a reference for the visitor who can compare the simulated (left image) and the real statue. The real statue is also used as a probe for the diffuse environment lighting of today at the museum.

[7] http://sourceforge.net/projects/virtuelium/
[8] Cité de l'architecture & du patrimoine - citechaillot.fr -. Installation by On-Situ - on-situ.com -

ownloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

The polychromy simulation of the recumbent statue of Philippe Dagobert [13] was the result of an extensive work on the physical characterization of the painted layers and metallic-leaf. The physical rendering of the statue cannot be done without a deep knowledge of spectrophotometry and extrinsic physical parameters such as the paint film thickness and the concentration of each set of pigments. In this case the data acquisition has been performed without contact. First the shape was scanned with a structured light projector linked to a camera and then the spectrophotometric data were acquired on 81 wavelength bands.

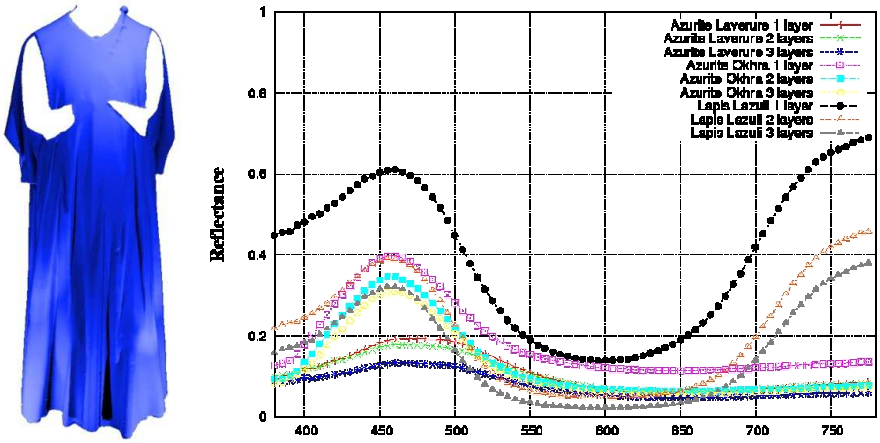


Figure 11. (left) Philippe Dagobert's cappa magna rendered in lapis-lazuli blue pigment by the radiosity software Candelux. (Right) Reflectance factors of the blue pigments, azurite and lapis-lazuli depending on the paint film thickness

The appearance of the Philippe Dagobert's cappa magna is especially interesting from a colorimetric point of view. Only the finishing layer contains lapis lazuli pigments. Because it is a rare and expensive pigment, only a small amount of lapis lazuli was used. It implies that the lower layers were also involved in the final appearance. The azurite pigment, more common and obviously less expensive, was used for the under coating. It is a blue pigment very similar to the lapis lazuli when viewed under "cold lighting" as the standard day light (D65) but under the lighting of a candle the lapis lazuli appears as a deep purple (see Fig. 11 to observe the high reflectance in the red part of the spectrum). This property is clearly visible in its reflectance curve. Around 750nm, at the limit of the visible light, the spectral response of the lapis lazuli is much higher than the azurite. This is where a candle emits more light (figure 12). Once again, this demonstrates that predictive rendering works with spectral rendering.

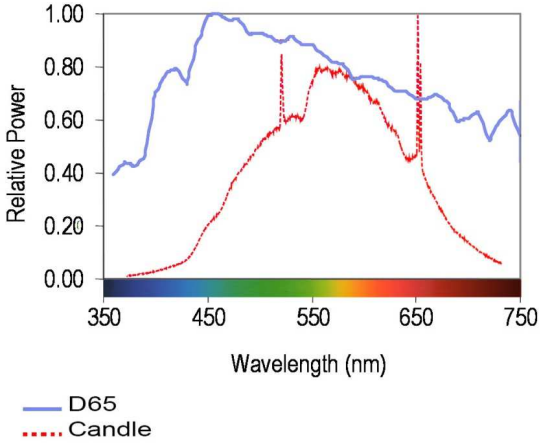


Figure 12. Spectra of the standardized day light D65 and a stearin candle.

ownloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

4. MULTI-SCALE NATURE OF THE INTERACTIONS

In the previous sections we showed that the appearance of composite materials is linked to the scales of the interactions between the electromagnetic fields and the matter. In this section we clarify further these scales.

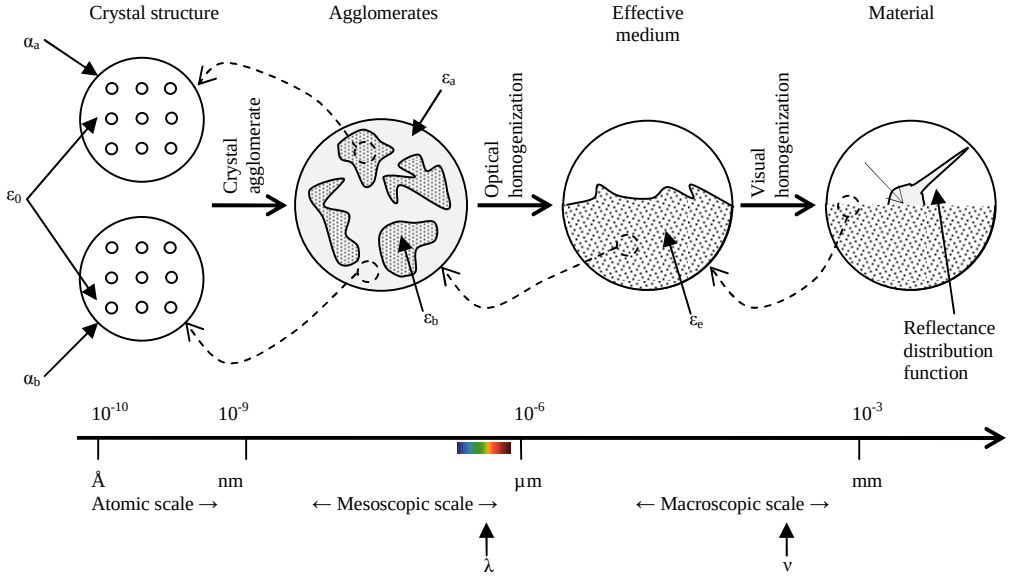


Figure 13. Illustration of the multi-scale morphology of a composite material. λ indicate the light's wavelength boundary [380nm ,780nm] ; ν denotes the limit of the spatial resolution of the optical system of the observer. *a* and *b* denote 2 different media. *e* refer to the effective medium. α is the polarizability of a given medium and ε the permittivity.

4.1 The wavelength of light boundary

Far below the considered wavelength (<<380 nm in the case of visible light), at the atomic and molecular scale, the interaction of the light with small particles can be modeled by harmonic oscillators [7]. When considering a single particle, we can refer to the general Mie theory which accurately gives the distribution of light intensity and polarization for the scattered field. At mesoscopic scale, if considering a set of particles smaller than the wavelength but close enough to each other so that the electromagnetic-fields from their interactions becomes significant, then a composite medium composed of two media (*a* and *b*) can be optically substituted by an equivalent effective medium. The optical properties of this effective medium result from the homogenization process. In simple cases this is done using the Maxwell Garnett [8] formulas or similar dipole approximation. In section 5 we rely on a new iterative method [14] to compute the effective complex index of refraction for the general case.

Over this boundary the Mie theory remains valid for some order of wavelength but is rapidly overcome by the multiple scattering of light (volume or surface) produced at macroscopic scale, at which point phenomenological models such as Melamed must be applied.

4.2 The observer boundary

On a rough surface we have to account for the spatial resolution and spectral sensitivity of the observing optical system (human eye, camera, etc.). Small scale interactions between light and matter can be then integrated into a reflectance/transmittance distribution function (BRDF, BSSRDF, BTF, etc.). From the wavelength scale to the spatial resolution of the observer the material is perceived as *visual continuum*. Therefore the observer system performs a visual homogenization. The result of this homogenization is usually stored in the said BRDF (or BRDF like function). The observer boundary is directly linked by the observer angular resolution and his physical distance to the observed point (for which the lower limit is the *punctum proximum*, i.e. least distance of distinct vision). Under the observer boundary the reflectance of a material is defined by either a measurement or a model (e.g. Cook-Torrance [3]).

ownloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

5. PRACTICAL USE-CASE OF THE HEMATITE-EPOXY COATING

In this section we describe a practical method to predict the aspect of composite materials applied to hematite-epoxy coating. Our approach is built on recent work by Couka & al. in modeling the multi-scale dispersion of nanoparticles in a hematite coating [15] and its optical response computed by a Fourier-based method [16]. The first step consists of characterizing the 3D structure of the material. The morphology of the coating is obtained on the bases of the scan of a sample by electronic microscopy (see figure 14). Correlation functions and granulometry distributions are used to quantify the dispersion of nanoparticles in the resin. A microstructure model is introduced that reproduces efficiently the coating structure by defining spherical exclusion zone and a random distribution of the hematite particles following Poisson's law [15]. This model assumes that all the nanoparticles are perfectly cubic. The sample of hematite-epoxy coating that served as a reference for the measurement is made with hematite cubic crystals at nanoscale specially produced for these experiments.

The sample material consists of a hematite coating made of hematite nanocubes embedded in an epoxy phase, with 10% volume fraction for the hematite. The particles are smaller than the wavelength of the visible light (typical sizes are about 250-300nm) and the inclusions are spaced from each other (not percolated composite material). So this composite material can be considered an optical continuum (see section 2.4) and therefore it can be optically described by its effective permittivity.

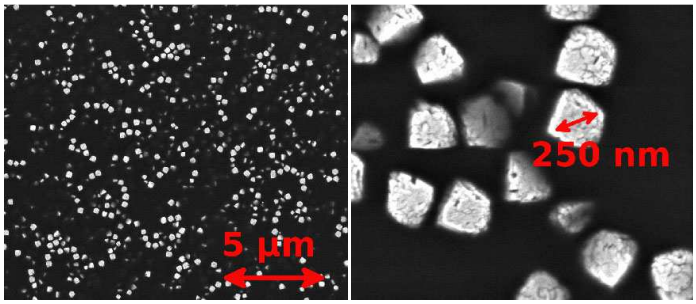


Figure 14. Nanocubes of hematite in epoxy resin (left). Same material magnified 10 times (right). The cubic approximation of the crystal shape is well justified.

Figure 15. Samples of hematite crystal (left) and the hematite-epoxy composite material (right) with 10% of volume fraction of hematite nanocubes in the resin.

To compute the effective permittivity of the hematite-epoxy coating, a numerical solution of the Mie's general problem must be found. The phase function associated to the scattered radiance depends on the geometrical state of pigments and on their nature. In the specific case of the hematite-epoxy coating, the solution is particularly complex to approach because extrinsic parameters such as the pigments' shape and size also modify the optical appearance of the resulting composite material. Nature (n,k) and structure (diameter, kind of shapes: spherical, acicular, flakes, platelets, etc.) are always linked at any scale. The classical homogenization methods as Maxwell Garnett [8], Yee-cell [17], etc. do not take into account the role of the multiscale distribution of the nanoparticles in the material. Nevertheless, in recent works [14] [18], a spectral Fourier-based approach has been proposed for the quasi static approximation. These methods have been compared to optical measurements [16] of the same hematite-epoxy sample. Spectroscopic ellipsometric measurements have been made separately for the epoxy and for the hematite and used with the Fourier-based method to compute the effective permittivity of the hematite-epoxy coating. On the other hand, the permittivity of the sample has been physically measured by ellipsometry. Therefore the results of the measurement and of the numerical computation were compared with a reasonably good fitting (see figure 16).

ownloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

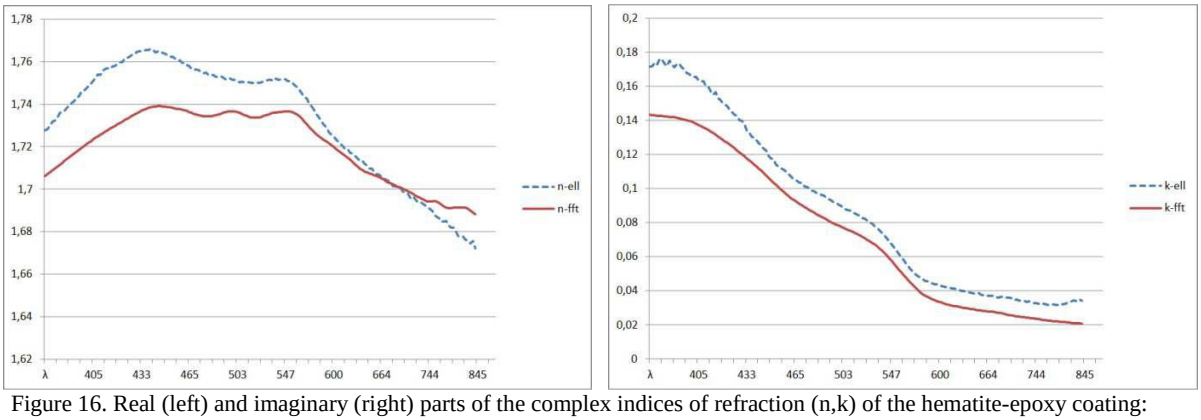


Figure 16. Real (left) and imaginary (right) parts of the complex indices of refraction (n,k) of the hematite-epoxy coating: ellipsometry measurements (blue dots) and numerical FFT predictions (red).

We have done some simulations in a spectral renderer to visually compare the simulated and the measured samples. The following Fresnel equations are used to evaluate the intensity of the transmitted and reflected electric fields. The complex indices of refraction are calculated as explained in section 2.4. Resulting images are shown in figure 17.

$$\vec{E}_{r//} = \frac{n_2 \cos\theta_i - n_1 \cos\theta_t}{n_2 \cos\theta_i + n_1 \cos\theta_t} \vec{E}_{i//} \quad \vec{E}_{r\perp} = \frac{n_1 \cos\theta_i - n_2 \cos\theta_t}{n_1 \cos\theta_i + n_2 \cos\theta_t} \vec{E}_{i\perp} \tag{6}$$

$$\vec{E}_{t//} = \frac{2n_1 \cos\theta_i}{n_2 \cos\theta_i + n_1 \cos\theta_t} \vec{E}_{i//} \quad \vec{E}_{t//} = \frac{2n_1 \cos\theta_i}{n_1 \cos\theta_i + n_2 \cos\theta_t} \vec{E}_{i//} \tag{7}$$

Our first results are achieved at the macroscopic scale under the conditions of the Snell-Descartes law, i.e. we compute the illumination only at the boundaries of perfectly smooth surfaces. In this way, we can focus on the reflected and transmitted fields and we do not *dilute* the local reflectance effect within the subsurface multiple scattering of light. In these conditions a solid object (about 10cm long in our example) remains opaque; this allows us to assess the intensity only of the reflected field. We can observe that the reflected field does not produce notable color effects (figure 17, top line). In this condition, the images of the hematite-epoxy coating from measurements and Fourier homogenization are very close. To perceive the transmittance, we simulate a thin film of the material on an empty object (figure 17, bottom line). Seeing through the material allows us to clearly perceive the produced colored effect. We observe a similar behavior in transmittance in both the case of measurement and Fourier homogenization but with a small color shift when raising the limit of very thin film (1µm). The same scene was rendered with the diffuse component of the reflectance of the sample material following a *believable* Lambert law. The diffuse reflectance measurement is done at normal surface direction.

6. CONCLUSION

These studies have convinced us that to predict the appearance of materials we must accurately compute all scales of interactions between electromagnetic fields and matter. This means to not only define accurate macroscopic reflectance models, but also to deeply understand and simulate the response to these fields at macroscopic and atomic scale. To this end, we recalled the fundamental theories and models of the optics of composite media. Indeed, we have shown that in our environment, common objects (natural as well as manufactured) are mostly made of composite materials, thus the homogenization process turns, in our opinion, into a key concept for the predictive rendering. Based on recent work by Couka & al we were able to predict the appearance of a composite material made of hematite nanocubes embedded in an epoxy phase. The results are promising; no notable differences with measurements are visible for a dense object (no multiple scattering) and similar appearance behaviors are achieved when the model is pushed to its limits (thin film). Future works will repeat the experiment with different volume fraction of nanocube to determine when and where the model diverges. Our hematite-epoxy simulation relies on the effective optical constant to render an object under the conditions of the Snell-Descartes law, but our real sample has a relatively high proportion of inclusions (10%); therefore

ownloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

a multiple scattering phenomenon occurs. Thus, it would be interesting to use these optical constants with a multiple scattering model, e.g. Melamed, to accurately render the multiple scattering effect.

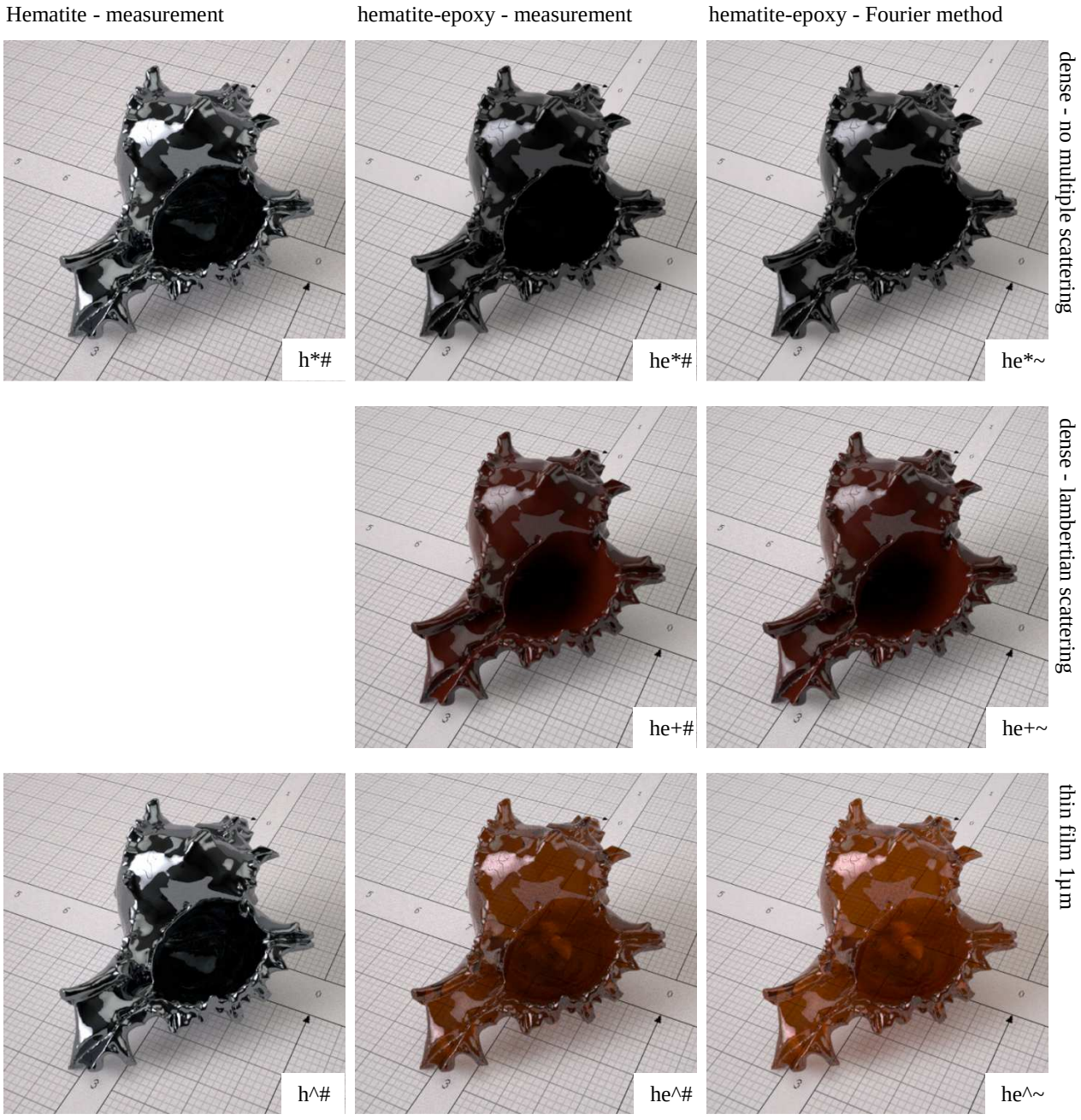


Figure 17. Spectral simulation (Bidirectional path tracing[9]) of an object presented under a D65 scaled envmap. The object is made of: hematite (*h*) and hematite-epoxy (*he*). Top: dense material without multiple scattering (*), Middle: dense material with lambertian scattering (+), bottom: thin films of 1 µm of the material (^). Left and middle column are rendered from measurements (#), the right column use the effective permittivity computed by the Fourier-based method (~).

[9] Ocean renderer - eclat-digital.com -

ownloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

7. ACKNOWLEDGMENTS

This study was made with the support of A.N.R. (Agence Nationale de la Recherche) under grant 20284 (LIMA project). The authors are grateful to E. Couka, F. Willot, D. Jeulin, M. Ben Achour, A. Chesnaud, A. Thorel and E. Sandré-Chardonnal for sharing images, homogenization data, measurements of materials and knowledge.

REFERENCES

[1] P. Callet, "Physically Based Rendering of Metallic Paints and Coated Pigments," *Proceedings of Visualization and Modelling*, Leeds UK, (1995).

[2] P. Callet, "Interférences, couches minces et peintures métallisées," *International Journal of CADCAM and Computer Graphics*, vol. 9, 251-264 (1994).

[3] R. Cook, K. Torrance, "A reflectance model for computer graphics," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 1, n° %11, 7-24 (1982).

[4] P. Callet, Couleur-Lumière Couleur-Matière, Diderot Editeur, Arts et Sciences, (1998).

[5] A. Wilkie, A. Weidlich, M. Magnor et A. and Chalmers, "Predictive rendering," *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Courses*, New York, NY, USA, (2009).

[6] E. Panofsky, Early Netherlandish Painting, Chapter 6, 152-153, Harvard University Press, (1953).

[7] S. Bertier, Optique des Milieux Composites, Ed. Polytechnica, (1993).

[8] J. Maxwell Garnett, "Effective medium models for the optical properties of inhomogeneous media," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 203, 385, (1904).

[9] P. Callet, T. Muller et Y. Tabouret, "Les peintures à effet," *Ecole de printemps 2001 sur la couleur des matériaux okhra/CNRS*, Roussillon, (2001).

[10] M. Rump, R. Sarlette et R. Klein, "Efficient Resampling, Compression and Rendering of Metallic and Pearlescent Paint," *Vision, Modeling, and Visualization*, (2009).

[11] M. Rump, G. Müller, R. Sarlette, D. Koch et R. Klein, "Photo-realistic rendering of metallic car paint from image-based measurements," *Computer Graphics Forum*, vol. 27, n°12, 527–536, (2008).

[12] S. Dumazet, P. Callet, "Simulation of pearls, physically based rendering, the virtuelium approach," *AIC Congress*, Sydney, (2009).

[13] S. Dumazet, P. Callet et A. Genty, "Spectral Modeling and Virtual Restoration of a Polychrome Medieval Sculpture," *WSCG*, Plzen, (2008).

[14] F. Willot, B. Abdallah et Y. Pellegrini, "Fourier-based schemes with modified Green operator for computing the electrical response of heterogeneous media with accurate local fields," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 7, n°198, 518-533, (2014).

[15] E. Couka, F. Willot, D. Jeulin, M. Ben Achour, A. Chesnaud and A. Thorel, "Modeling of the multiscale dispersion of nanoparticles in a hematite coating," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*,*(*2014).

[16] E. Couka, F. Willot, P. Callet et D. Jeulin, "Optical response of a hematite coating: ellipsometry data vs. Fourier-based computations," *Submited to the Journal of Modern Optics, (*2015).

[17] Y. Chen, R. Mittra et P. Harms, "Finite-difference time-domain algorithm for solving Maxwell's equations," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions*, vol. 44, n°16, 832–839, (1996).

[18] D. Azzimonti, F. Willot et D. Jeulin, "Optical properties of deposit models for paints: full-fields FFT," *Journal of Modern Optics*, vol. 7, n°160, 1-10, (2013).

ownloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 03/24/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

2.3 Discussion

Le projet ANR L.I.M.A. est un projet qui a permis à des communautés scientifiques très diverses (mathématiciens, physiciens, informaticiens) de se réunir autour de la problématique de la simulation de l'apparence. Disposer de matériaux dont on connaît exactement la composition et la morphologie, et avoir les moyens de les caractériser optiquement, est exceptionnel pour un chercheur en informatique de l'image. C'est une grande chance de pouvoir réaliser des simulations d'apparence en ayant accès à la caractérisation complète de la vérité terrain.

Au cours de cette étude, nous avons pu montrer la pertinence de la démarche et donc valider le principe de l'utilisation de l'indice optique homogène pour la synthèse d'image sur un cas d'usage (mélange hématite époxy). Par contre, il s'est avéré très complexe de répéter ces validations sur plusieurs échantillons. Il est extrêmement difficile de faire croître des nano-cubes (ou d'autres formes) à grande échelle. Sachant que quelques grammes représentent déjà une grande échelle. La répétabilité n'est donc pas encore démontrée, de plus la prédiction de l'apparence passe par le calcul de l'indice homogène qui lui-même dépend de la précision des mesures à l'échelle micro. Ces mesures sont complexes à obtenir et nécessitent des équipements spécifiques (Ellipsomètre, Microscope électronique, etc.). Il n'est donc pas encore simple de transférer les technologies développées vers des applications industrielles. Ces travaux nécessitent d'être poursuivis pour mieux comprendre les éléments à caractériser mais aussi pour prendre en compte la diffusion multiple qui n'est jamais totalement nulle même lorsque la concentration en particules est faible.

Chapitre 3

Contribution : « Validation objective iso-photograp en environnement contrôlé »

3.1 Présentation de la contribution

L'objet de l'étude de cette deuxième contribution est la validation colorimétrique objective d'un rendu réaliste. Comme pour la première contribution, elle a été réalisée au cours du projet ANR L.I.M.A. en 2016. Nous abordons ici la validation du rendu basé mesures par la comparaison entre une photographie et une simulation. Ce sont les premières expérimentations que nous avons pu réaliser mettant en œuvre la chaîne de comparaison sur la base de rendus basés mesure à l'échelle macroscopique. Pour ce travail, Victor Medina a produit l'analyse colorimétrique comparative et j'ai produit les simulations prédictives.

3.2 Publication

Journal of Electronic Imaging

JElectronicImaging.org

Objective colorimetric validation of perceptually realistic rendering: a study of paint coating materials

Victor Medina
Thomas Muller
Dominique Lafon-Pham
Alexis Paljic
Philippe Porral

SPIE. IS&T imaging.org

Victor Medina, Thomas Muller, Dominique Lafon-Pham, Alexis Paljic, Philippe Porral, "Objective colorimetric validation of perceptually realistic rendering: a study of paint coating materials," *J. Electron. Imaging* **25**(6), 061609 (2016), doi: 10.1117/1.JEI.25.6.061609.

Journal of Electronic Imaging 25(6), 061609 (Nov/Dec 2016)

Objective colorimetric validation of perceptually realistic rendering: a study of paint coating materials

Victor Medina,[a,b,*] Thomas Muller,[a,*] Dominique Lafon-Pham,[c] Alexis Paljic,[a] and Philippe Porral[b]
[a]PSL-Research University, MINES ParisTech, Centre for Robotics, 60 Boulevard Saint Michel, 75006 Paris, France
[b]PSA Peugeot-Citroën, Route de Gisy, 78943 Vélizy-Villacoublay Cedex, France
[c]Centre des Matériaux des Mines d'Alès, Ecole des Mines d'Alès, Institut Mines Telecom, 30319 Alès Cedex, France

Abstract. This work was conducted in the context of perceptually realistic image simulations of paint materials. These simulations aim at producing the same visual response in an observer as real objects given certain illumination and observation conditions. The colorimetric validation ensures that the colors in the simulated images differ from the real scene below a given threshold and human observers cannot discern between them. Most existing validations use the direct approach of comparing renderings with real scenes and are usually briefly described. We propose a colorimetric validation using radiometrically calibrated photographs as valid perceptual references of the real scene, which avoids taking spectral measurements of the scene. This paper details important methodological aspects, providing objective validation results for a Macbeth color chart and a sample paint coating. Our results show that we can achieve xy chromaticity differences under 3%, relative luminance differences under 5%, and CIEDE2000 differences under 10% for the Macbeth chart. In the case of a sample paint coating, achieved chromaticity differences are under 11% and average luminance and CIEDE2000 differences are under 1%. Validation by visual inspection is not addressed here. *© 2016 SPIE and IS&T* [DOI: 10.1117/1.JEI.25.6.061609]

Keywords: image rendering; perceptual realism; objective validations; color difference; car paint coatings.

Paper 16377SS received May 3, 2016; accepted for publication Aug. 24, 2016; published online Sep. 22, 2016.

1 Introduction

Ensuring the visual aspect of paint material simulations for industrial design applications is very important, especially with the proliferation of paint materials with complex finishes, such as pearlescent, sparkling, glossy, or goniochromatic. Replacing the physical samples (Fig. 1) currently used for visual evaluations by virtual representations of the product—a technique known as computer-aided color appearance design[1]—introduces important cost and time reductions, in addition to offering greater control and flexibility to designers in the creative process. However, this also adds important challenges: the high importance of product aspect means that it is paramount to validate the accuracy of the simulations with respect to the physical products.

This work takes place in the context of computer simulation of paint materials for industrial product design applications, with a special focus on the automobile industry. Physically based rendering is used to produce simulations that are not only visually true to the real material but are also radiometrically correct predictions of the real scene, under a predefined set of illumination conditions. By defining the observation conditions as well, these simulations can be mapped into two-dimensional images adapted for a human observer. This rendering process introduces additional constraints that cannot be ignored if we want to produce correct results. In effect, as explained by authors Balcetis and Dunning,[2] the material aspect perceived by an observer in predefined illumination conditions is the result of a combination of bottom-up and top-down processes. In the bottom-up process, sensory organs and perceptual systems work automatically to produce a visual representation of the stimulus created by the light in the environment that arrives in the eyes of the observer after interacting with the material. The result depends on many factors, such as contrast, frequency, shape, or illuminant.[3–7] At the same time, this perception is also biased by top-down influences, such as the cognitive and psychological state of the observer or the observation environment. Perceptually realistic rendering takes advantage of these processes in order to account for the properties of human visual perception.

Ulbricht et al.[8] distinguish three steps in the validation process of a perceptually realistic rendering system: the light reflection model, the light transport simulation, and the perceptually based display of the images. This paper focuses on the validation of the light transport simulation (i.e., the rendering model).

The next section reviews the current state in the field of computer-generated image validation. Section 3 describes each step of the methodology: Sec. 3.1 describes the setup of our test scene and how to characterize each aspect of the scene; Sec. 3.2 describes the acquisition of photographs from the test scene using a calibrated DSLR camera; Sec. 3.3 describes how to create a computer model of the real scene and produce a simulation in the chosen rendering engine. In Sec. 4, we propose an initial colorimetric analysis applied to the case of a sample uniform paint material. The main goal of this section is not to provide an exhaustive colorimetric analysis, but rather to validate the results obtained with the methodology described in Sec. 3 and establish

*Address all correspondence to: Victor Medina, E-mail: victor.medina@mines-paristech.fr; Thomas Muller, E-mail: thomas.muller@mines-paristech.fr

1017-9909/2016/$25.00 © 2016 SPIE and IS&T

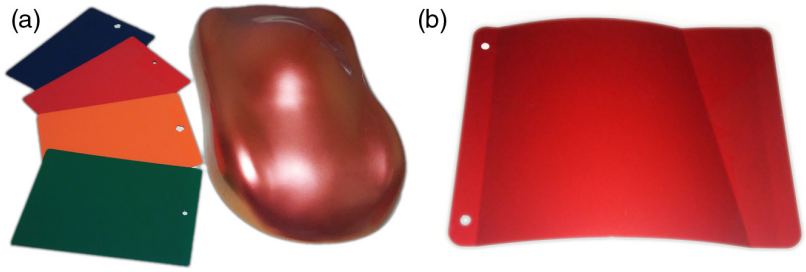


Fig. 1 Several types of physical samples for automobile paints: (a) flat samples, (b) speed shape samples, and (c) curved samples.

a level of equivalence between the photograph and computer-generated image as a starting point before performing more extensive subjective tests. Section 5 discusses the results of this paper.

2 Related Work

A first approach to image rendering validation was presented in 1984 by Goral et al.,[9] to perform visual comparisons of a radiosity rendering and a photograph of a colored cube — known as the "Cornell Box." In 1986, Meyer et al.[10] then compared simulations of the Cornell box with the real scene, providing radiometric measurements and quantitative results, and showing that observers could mistake both views of the scene. Later, in 2000, Mcnamara et al.[11] performed comparisons of a real environment consisting of various gray objects with renderings of varying quality to study the perception of lightness. In their 2006 paper, Ulbricht et al.[8] provided a very complete compilation of the most common methods for image rendering validation. Another example is the work of Bärz et al.[12] in 2010, which provide a very well-detailed methodology to compare renderings and real scenes. More recently, Meyer et al.[13] have applied a similar methodology for the visualization of car paint simulations.

Direct comparison of renderings and real scenes is typically preferred because it is a very intuitive method. However, we believe that the use of photographs as ground-truth—also a common approach for colorimetric validation—can simplify this task. Performing a direct comparison of a simulation with a real scene is a difficult task: on one hand, as explained earlier, complex physiological processes are involved in human visual perception, which requires to measure the radiometric information present in the real scene; on the other hand, current display technology cannot represent the full color gamut and dynamic luminance range found in a physical scene. The use of calibrated photographs as an intermediate step produces a map which is a physiological approximation of the visual sensory response to the radiometric information present in the real scene. This avoids the need to take spectral sample measurements of the scene, thus reducing the complexity of the methodology. Results from previous work[14,15] describe the perceptual effects of using different parameters to acquire these photographs; these findings enable us to use the photographs as the "ground truth" without any loss of perceptual accuracy.

Although, as shown earlier, several methodologies to compare simulations with real scenes have been well-described in the past, most notably by Bärz et al.,[12] we have not been able to find any paper describing the comparison between simulations and real scene photographs. It seems therefore, necessary to provide a complete methodology that ensures the colorimetric equivalence in this context. The goal of this paper is to describe some important aspects of the process to compare simulations and real scene photographs, serving as a starting point that might eventually be

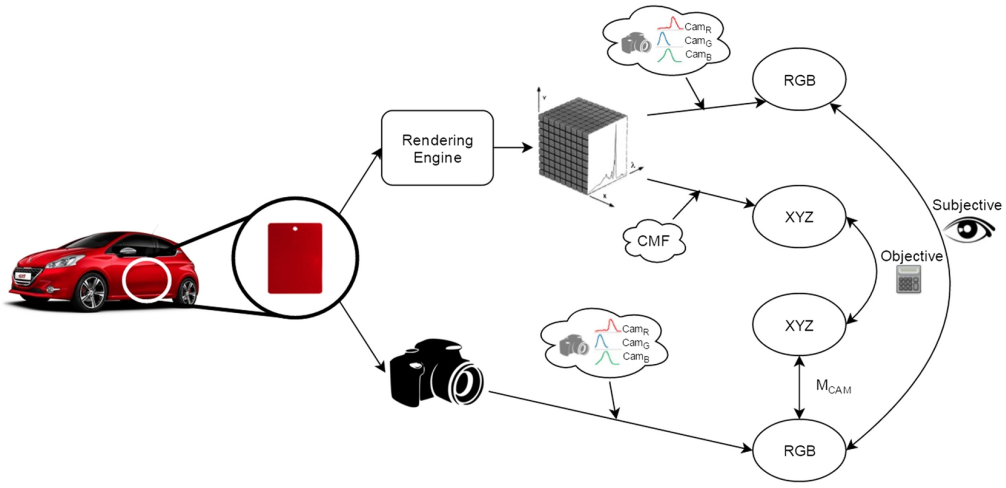


Fig. 2 Visuoperceptual validation methodology comparing photographs with simulations.

further completed—hopefully even leading to a full standard methodology. This way, we hope to present some reference guidelines for researchers that need to perform such types of comparisons.

We propose a validation workflow (Fig. 2) that can produce both device-dependent and device-independent colorimetric information. This information can be in turn used to perform objective and subjective validations. We use this methodology to perform the objective validation of the simulation of uniform paint plates, describing some important metrics—based on both objective chromaticity and perceptually aware chrominance—to evaluate the similarity between the images. The images produced by this methodology can also be used to perform subjective visuoperceptual validation experiments; our previous work[14,15] provides some guidelines for performing these validations.

3 Methodology

Ensuring the visual equivalence between photographs and computer-simulated images is not an easy task. Given the complexity of the light–matter interaction processes that take place in a given scene, small discrepancies between the real scene, where the photographs are taken—and the virtual scene—used for the simulation—can lead to noticeable differences between the two images. This section proposes a step-by-step methodology (summarized in Fig. 3), focusing

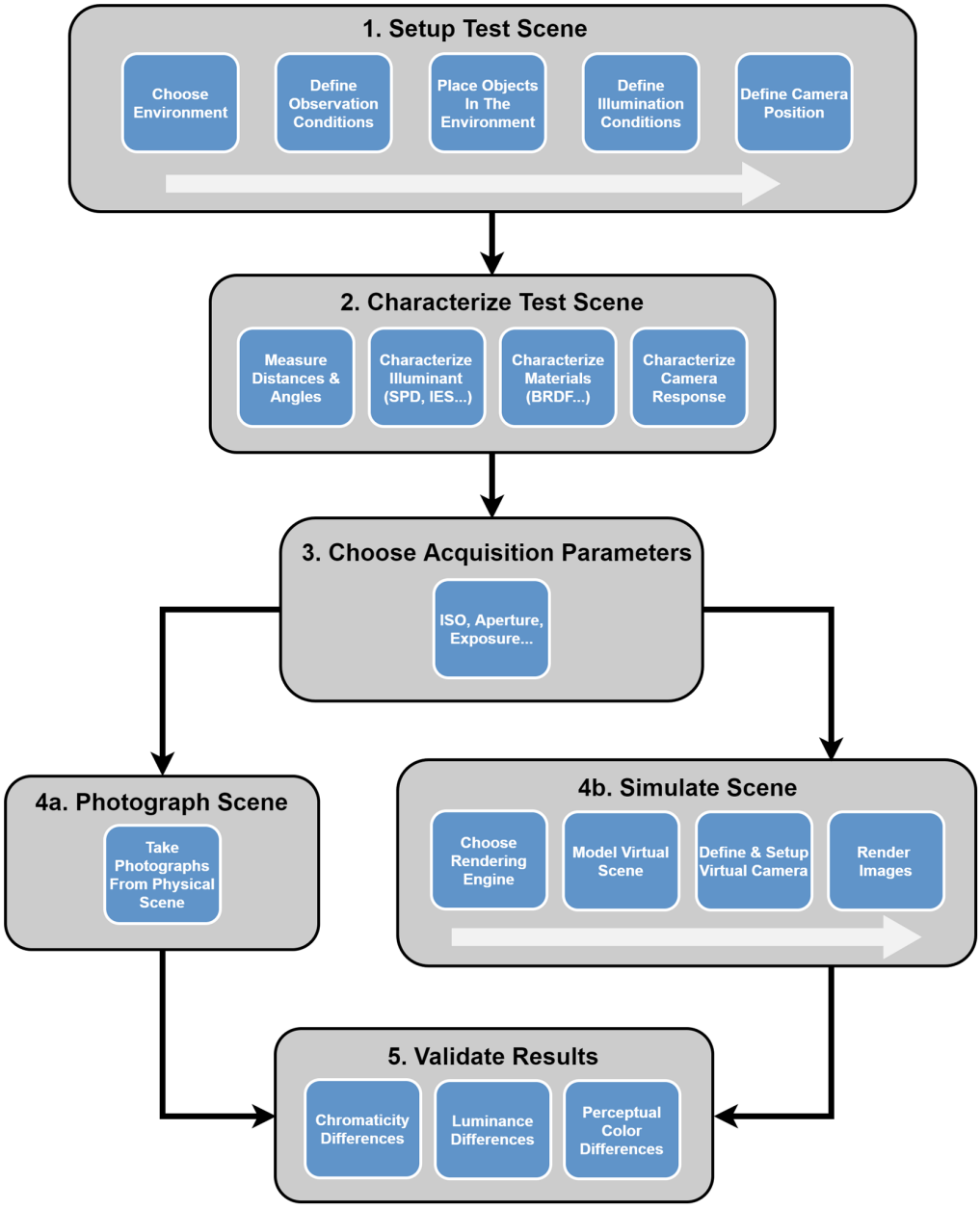


Fig. 3 Relevant steps to ensure image equivalency in the comparison between simulations and real scene photographs.

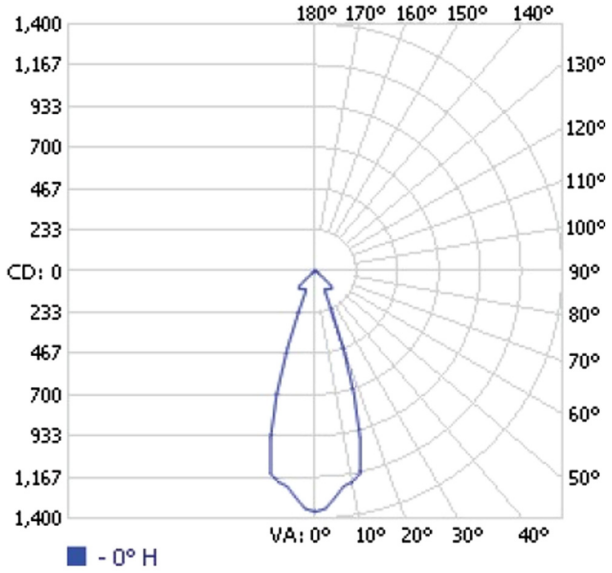


Fig. 4 Polar luminous intensity graph of a Solux lamp obtained from the IES photometric report provided by the vendor. This graph illustrates the emitted luminous intensity distribution (in candelas) that can be expected from the lamp. The light source is located at the center of the diagram, facing down toward the sample.

on the most important factors that must be kept in mind to ensure image similarity between the photographs and the simulations.

3.1 *Setup and Characterization of a Controlled Test Scene*

The response produced by our visual system when we observe an object in a given scene depends on the characteristics of the object itself, but also on its environment (surrounding objects, lighting, and so on) and our position with respect to the scene (observation conditions). What we see is the response of our visual system to the light arriving to our eyes after complex physical interactions with these elements in the 3-D scene. These contributions must be taken into account to produce a correct simulation. Generally, a scene is a collection of objects, with a certain number of light sources, in a given environment. The light emitted by the direct light sources will be reflected by the objects in the scene and their surroundings, resulting in an additional lighting. Any surface in the scene is subject to act as a light-scattering surface, so we must ensure that all potential light sources and materials are known and characterized (e.g., their photometric distribution, such as the IES measurements, their spectral power distribution, and so on) (see Fig. 4). One must remember that our aim is to produce a controlled scene to check if the rendering engine produces valid simulations with respect to the reality. It is, therefore, advisable to reduce the complexity of the scene to a minimum in order to simplify the comparison and reduce the number of potential error sources.

To produce a minimal scene, we chose to build our own light cabin where a large box acts as the environment (Fig. 5). If one opts for this choice, the containing box dimensions should be large enough to contain all the required elements (i.e., samples, lamps, camera, and so on) and to allow for the desired observation distances, but preferably not much larger to keep it simple. The box materials must be of a matte neutral color to balance out the amount of reflected and absorbed light in order to reduce the surround effect, a known property of human vision whereby our perception of colors is affected by the color of the surrounding environment.[16] Typically, a neutral gray color is recommended (e.g., Munsell N7), although a darker or brighter shade can be chosen to evaluate darker or brighter samples, respectively.

Our test cabin was 100 cm wide × 70 cm high × 105 cm deep. We closed all sides of the box except for one aperture in the front to place the camera and the illumination facing the sample.

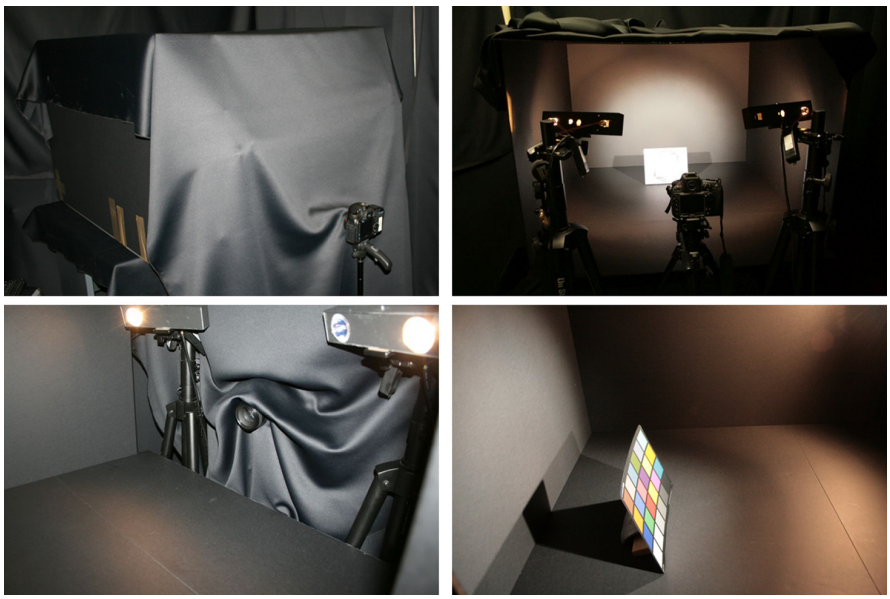


Fig. 5 Photographs of the acquisition light cabin.

We chose a standard flat industrial paint sample, 10 cm × 15 cm in size. This sample was located in the middle of the light box at a distance of 80 cm from the camera focal plane—measuring from the bottom of the sample—which we considered a comfortable distance for our 15 to 30-cm sample sizes. It was inclined backward at an angle of 15 deg with respect to the vertical, which was chosen empirically so that the angle remains small, reducing the amount of reflections on the samples while enhancing the perception of angle-dependent effects. This is useful in the case of more complex anisotropic paint materials, such as sparkling or goniometric effect coatings, which vary with the observation angle. The scene was illuminated by two direct Solux halogen lamps (incandescent lamps at 4700 K, running at 12 V and 50 W each, with a 36-deg illumination cone) one to each side of the box, oriented toward the sample. Figure 5 shows different views of this setup and Fig. 6 shows the SPD of the Solux lamp.

Let us remember that in order to provide accurate comparisons, the real scene has to be reproduced as close as possible in the simulation. Any difference between the two scenes may affect the light transport simulation, resulting in different images and, possibly, wrong validation results. The dimensions and positions of the objects in the scene need to be thoroughly measured and left untouched throughout the entire validation process. It is also necessary to properly characterize the optical behavior of the materials used in the scene in order to reproduce them in the simulation. In our case, we measured the bidirectional reflectance distribution functions (BRDF) of all surfaces from small samples of each material, using a "Murakami GCMS-2B" goniospectrophotometric colorimeter, with a measuring beam diameter of 2.1 deg on the incident plane and 4.2 deg on the vertical plane. The beam diameter is important because it determines the surface area for which the BRDF is computed. If the area is very narrow, the measurements might not contain enough variability, which will translate into a partial texture measurement. Using a wider beam produces an effect similar to that of an averaging filter. This is the case in Fig. 15, where the background has a different texture in the photograph than the simulation. In this case, a bidirectional texture function measurement would have been a better solution, though it would not have affected the final result of the global illumination because the material is close to purely diffuse.

3.2 *Data Acquisition from Test Scene Photographs*

Once the scene has been fully characterized, we can proceed to take photographs of the scene. Since the position of the camera also needs to be reproduced in the simulation, this step must be performed prior to creating the virtual scene, especially in experiments where the position of the camera might change. Each new camera position used in the experiment needs to be registered so that it can be simulated later on.

We chose to take all the photographs with the same camera, a Nikon D800, chosen for being the most precise in terms of image resolution (7360 × 4912 pixels) and color rendering, among other factors, from the cameras available at our lab. The camera properties, settings, and lens must be chosen carefully to ensure a good image quality. A high enough image resolution ensures that we can have access to small details without losing information due to pixelation or noise. The aperture value and shutter speed have a direct effect on the image brightness but also on the sharpness and depth of field: scenes with several interest planes may require a large depth of field to capture the full depth of the scene and avoid blurriness —in the specific context of paint sample analysis, this is true for effect paints, which are often composed of several layers located at different levels of depth. The ISO determines the sensitivity of the sensor to light: a high sensitivity might introduce excessive noise in the image, whereas a low sensitivity might produce dark images and not capture all the details in the samples.

We used a standard 50 mm FX lens, which we considered an appropriate value for the required observation distance of 80 cm, without introducing deformations. Using a fixed focal-length lens eliminates the risk of accidentally taking photographs with the wrong length, but limits the distance range between the camera and the samples. Similarly, we fixed the aperture at a value of $f/8$ and the ISO at 800 in order to minimize the amount of noise while maximizing

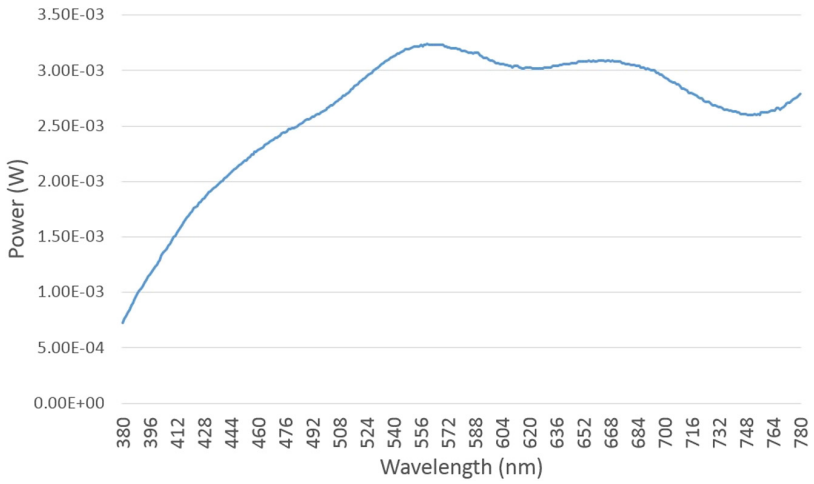


Fig. 6 Spectral power distribution of the Solux lights at 4700 K, 12 V, 50 W, 36 deg. Measured with a CS-2000 spectroradiometer with a 0.2-deg angle and an integration time of 0.401 s.

Table 1 Fixed Nikon D800 parameters for the comparison of photographs and simulations.

Focal length	50 mm
Aperture	$f/8$
ISO	800

the depth of field to avoid blurring due to the tilted position of the paint plate (Table 1). Only the exposure time was varied throughout the experiment. In order to have a wide enough dynamic range, we took photographs with varying shutter speeds in double increments of 1/8, 1/15, 1/30, 1/60, 1/125, and 1/250 s. Since the samples are tilted, it is important to choose the right focus point, because otherwise the depth of field may produce blurry images. For this purpose, we used a focus chart to focus on the center of the sample so that we can have enough depth of field to cover the depth of all the layers in the paint plate. Each series consisted of photographs of a Macbeth color chart and several paint samples.

3.3 *Simulation of the Scene in the Target Rendering Engine*

The only task left before proceeding to the simulations is the creation of a virtual model of the real scene in the rendering engine of choice. This model must reproduce as closely as possible the real scene's measurements taken in previous stages in order to minimize the number of discrepancies between the photographs and the simulations. Similarly, each object's material must behave according to their corresponding BRDF function.

Figure 7 shows a set of wireframe views of the virtual scene. Figure 8 shows a low-quality rendered preview of the same scene.

The rendering engine produces hyperspectral simulations in which each pixel contains an array of spectral radiances for the specified wavelength range. By integrating these values with the averaged sensitivity curves of the CIE standard colorimetric observer (the color matching functions, or CMF), the XYZ tristimulus response can be computed for the visible light spectrum according to Eq. (1), where P_λ is the spectral radiance distribution function for the pixel, $\bar{x}_{10}$, $\bar{y}_{10}$, and $\bar{z}_{10}$, are the color matching functions for the CIE 1964 10 deg standard observer, and $\Delta\lambda$ is the wavelength discretization interval. We choose the CIE 1964 10 deg standard observer because the horizontal field of view (FOV) sustained by an observer at the selected distance of 80 cm from a 10 to 30-cm-wide sample is between 7 and 11 deg [as shown in Eq. (2)], which is larger than the maximum 4 deg FOV recommended by the CIE for the standard 2 deg observer.

$$\begin{aligned} X &= \sum_{\lambda=\text{visible}} P_\lambda(\lambda)\bar{x}_{10}(\lambda)\Delta\lambda, \\ Y &= \sum_{\lambda=\text{visible}} P_\lambda(\lambda)\bar{y}_{10}(\lambda)\Delta\lambda, \\ Z &= \sum_{\lambda=\text{visible}} P_\lambda(\lambda)\bar{z}_{10}(\lambda)\Delta\lambda, \end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{FOV} = 2 \times \arctan\left(\frac{\text{Sample size}}{2 \times \text{Observation distance}}\right)_{\text{deg}} (\text{deg}). \tag{2}$$

In order to perform subjective visual inspections tests, a displayable color image must also be computed. Two options are possible to obtain device-dependent RGB tristimuli: one method is to use the camera's characterization matrix convert from the XYZ response to RGB pixel colors; another method is to use the spectral response of the camera sensor's color filters to directly compute the RGB response to the

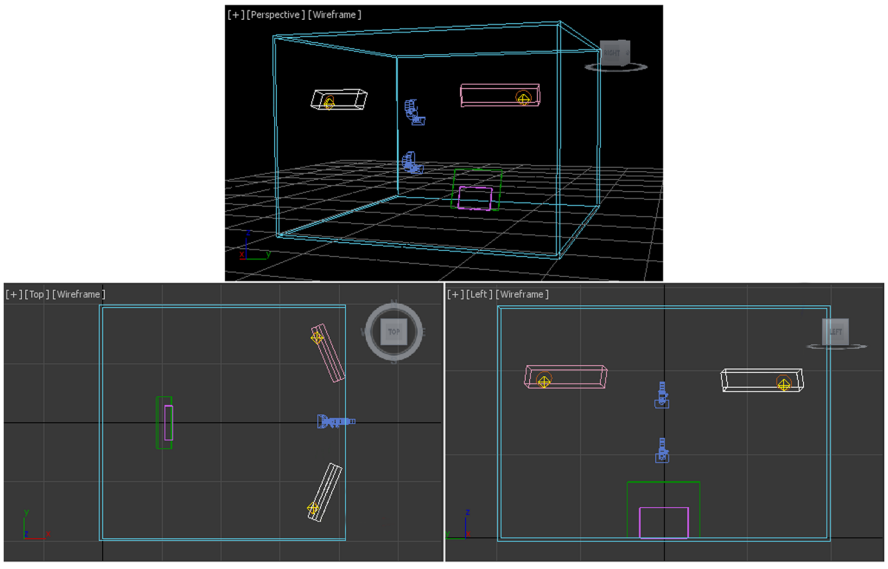


Fig. 7 Clockwise from the top: perspective, front, and top wireframe views of the virtual scene used for the validation of the rendering engine. Screenshots from Autodesk 3ds Max.

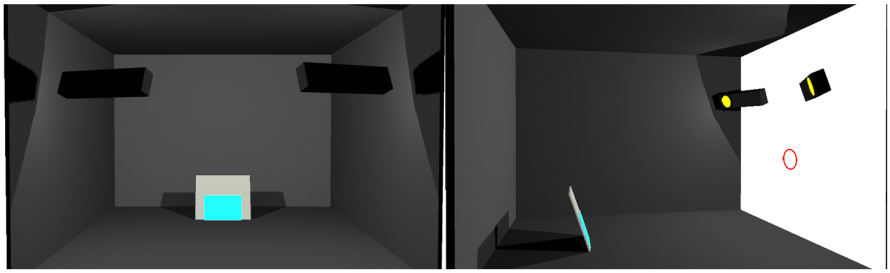


Fig. 8 Render preview of the virtual scene used for the validation of the rendering engine. The red circle on the right image marks the position of the camera as a reference. Note that the brightness has been increased for visualization purposes.

original spectral signal. The first method has the advantage of not requiring the camera's spectral response, however, it may neglect spectrally related phenomena, most notably metamerisms. For this reason, we opted for the second method.

The virtual camera implemented in the rendering engine mimics the spectral response of our real camera, the Nikon D800 (Fig. 9) so if there are no measurement errors in the scene simulation, and all the camera parameters are set to the same value, a photograph and a simulation should both contain the same information. We used versions 2014 and 2015 of Eclat Digital's Ocean (Ref. 18), a commercial simulation software, to generate a validated ground-truth simulation of the scene. Ocean uses bidirectional path tracing to produce hyperspectral, predictive, physically based images, and allows to define custom cameras as well as BRDF-based materials, so it provides a good foundation to analyze our results.

4 Results

The methodology described in the previous section allows us to produce a photograph of a sample object in a real scene, and a simulation of that same object in a virtual reproduction of the same scene. Before we can perform subjective comparison analyses between those two images, we must study the similarity between the images in order to establish the level of reliability of the simulations and understand which aspects can and cannot be compared. This section proposes a simple colorimetric analysis to perform this study.

The simulation process computes the radiance information in the images as a function of the totality of light rays arriving on each pixel, given in the partially specified range $[0, +\infty)$. Similarly, the sensor responses estimated by the camera's characterization matrix are also given within a $[0, +\infty)$ range, which does not necessarily have to match that of the rendering engine. Therefore, we do not have absolute radiance values, so it is not possible to perform a direct value comparison in the XYZ space between the simulations and the photographs.

We assume that in order for a photograph and a rendered image to produce the same visual response on a human observer, their tristimulus sensory quantities must be proportional by a certain factor, depending on the amount of light entering the sensor. This may be seen as a visual stimulus formed by two independent components: chromaticity and luminance. We can relate the chromaticity of a stimulus to its color, which is given by the SPD of the incident light, and the luminance to its intensity. Varying the amount of light only affects the resulting luminance, but not the chromaticity; the chromaticity will be conserved. We can transform the XYZ tristimulus values into the derived CIE xyY color space according to Eqs. (3)–(5), which expresses color stimuli in terms of their chromaticity and luminance, the two first components of this space (xy) represent the chromaticity coordinates (color) of the stimulus, whereas the third component (Y) represents its luminance (brightness). This allows us to compare visual responses by separating chromaticity and luminance.

$$x = \frac{X}{(X + Y + Z)}, \tag{3}$$

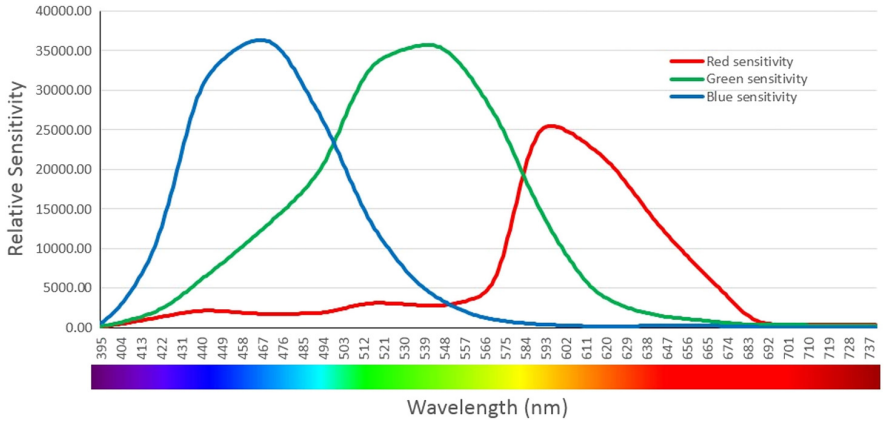


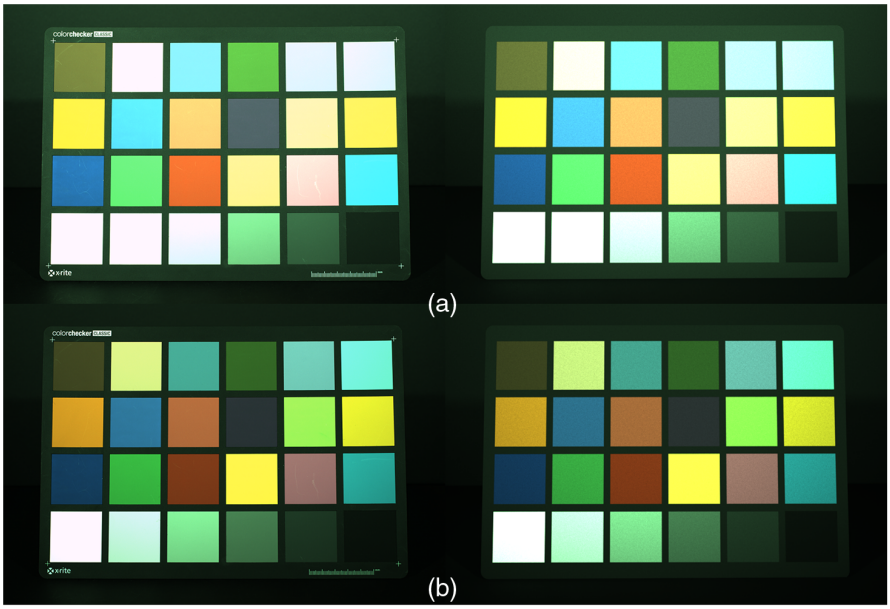
Fig. 9 Measured spectral sensitivity of the Nikon D800.[17]

$$y = \frac{Y}{(X + Y + Z)}, \tag{4}$$

$$Y = Y. \tag{5}$$

Figure 10 shows two photographs (left) of a Macbeth color chart taken with shutter speeds of 1/8 and 1/15 s, and their corresponding simulations (right). Note that both the photographs and the simulations are represented in the camera's own RGB color space and have not been either calibrated nor white balanced. We can do this because we are comparing two images presented in the same color space, and under identical illumination conditions;[19] however, a calibration and white balance would be required if we were to perform visual comparisons on different media (e.g., a photograph with a physical reference). We can transform our data into the xyY color space [using Eqs. (3)–(5)] to represent luminance and chromaticity information separately. Typically, the xy space is not appropriate for representing chromaticity distances, because it is not perceptually uniform.[20] This has two implications: the same x-y distances in different parts of the chromaticity space do not correspond to the same perceptual differences to a human observer. A given difference is not perceived the same way in the x and y coordinates. However, at this point, we are only interested in independently comparing chromaticity and luminance in order to validate the similarity between the simulation and the photographs. Thus, we can represent this relationship using distances in the xyY color space.

Before proceeding any further, a few additional things must be taken into consideration. First, it may occur that some test scenes have a higher dynamic range (i.e., difference between the highest and lowest luminance value) than the characterization scene, resulting in some oversaturation or undersaturation; in this case, it is advisable to remove these colors from the test set if possible or, at least, to keep in mind that they may produce unexpected results. Furthermore, since the camera's XYZ response was characterized under illumination conditions that may at times—and in fact usually do—differ from those of the actual scene used for taking the test photographs, we may obtain a certain number of colors which fall out of the characterized range. In such cases, using the camera's characterization matrix to estimate sensor responses may produce unexpected results. For this reason, it is recommendable to characterize the devices by using a set of samples with properties similar to those to be used in the tests. In our case, however, we must take this phenomenon into account by omitting from the test set those samples which produce values outside the characterized range. Figure 11 shows the luminance values measured with a spectroradiometer during the camera characterization process, where oversaturated samples have already been removed for simplification. The red rectangle indicates the "safe zone" where luminance stimuli, estimated from a photograph, can be trusted according to the camera's characterization. This means that sample photographs with an estimated Y luminance under 9.41 and over 120.8 should be excluded from the comparisons to avoid using wrong data in the calculations.



1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24

Fig. 10 Photograph (left) and simulation (right) of a Macbeth color chart with total exposures corresponding to a shutter speed of: (a and b) 1/8 s (top row) and (c and d) 1/15 s (bottom row). The images are in the camera's own RGB color space. They have been neither calibrated nor white balanced. The table below indicates the reference number of each color square in the chart.

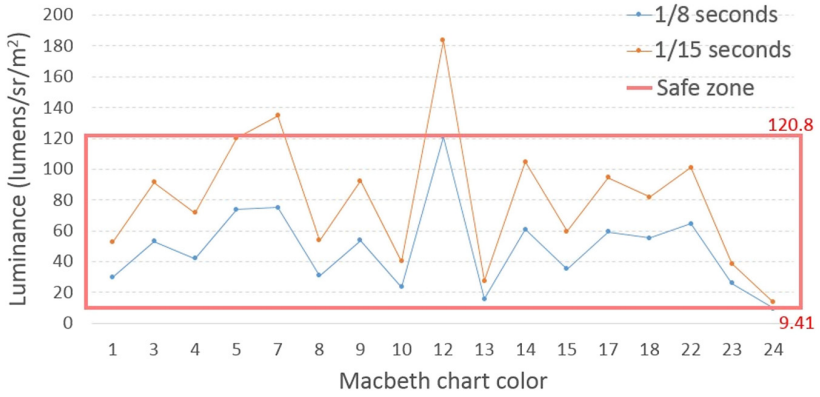


Fig. 11 Luminance of the Macbeth color chart measured with a spectroradiometer for the camera characterization process. Luminance values outside the red rectangle may produce unexpected results.

Table 2 represents the same colors from the Macbeth color chart images in Fig. 10, using the xyY space, as well as the differences in the x (Δx) and y (Δy) chromaticity coordinates, and the total Euclidean distance between the points (Δxy). Oversaturated samples, as well as those outside the characterized range zone, have been excluded from this list to avoid confusion.

Looking at these values, we can see that the chromaticity coordinates differ very little between the photographs and the simulations for both cases. We find much higher differences

Table 2 xyY tristimulus values of the Macbeth color samples and nonperceptual chromaticity distances in the CIE xy color space.

	1/8 s								
	Photograph			Simulation			Difference (Δ)		
Color	X	y	Y	x	y	Y	Δx	Δy	Δxy
1	0.44	0.38	59.81	0.44	0.39	0.07	0.00	0.01	0.01
3	0.31	0.27	78.39	0.29	0.32	0.13	0.02	0.05	0.05
4	0.39	0.46	77.61	0.38	0.46	0.09	0.01	0.00	0.01
8	0.26	0.26	67.12	0.25	0.23	0.08	0.02	0.03	0.04
9	0.46	0.35	102.17	0.51	0.34	0.14	0.05	0.01	0.05
10	0.35	0.27	34.87	0.35	0.27	0.04	0.00	0.00	0.00
13	0.21	0.18	25.84	0.21	0.19	0.03	0.01	0.00	0.01
14	0.35	0.42	87.70	0.34	0.51	0.15	0.01	0.09	0.10
15	0.55	0.34	73.11	0.58	0.34	0.08	0.03	0.00	0.03
17	0.41	0.28	95.43	0.44	0.28	0.13	0.03	0.00	0.03
18	0.25	0.27	67.94	0.23	0.32	0.11	0.02	0.05	0.05
22	0.36	0.37	82.77	0.36	0.37	0.11	0.00	0.01	0.01
23	0.35	0.37	34.72	0.36	0.37	0.05	0.01	0.01	0.01
24	0.34	0.37	9.87	0.36	0.37	0.01	0.02	0.00	0.02
Average							0.02	0.02	0.03

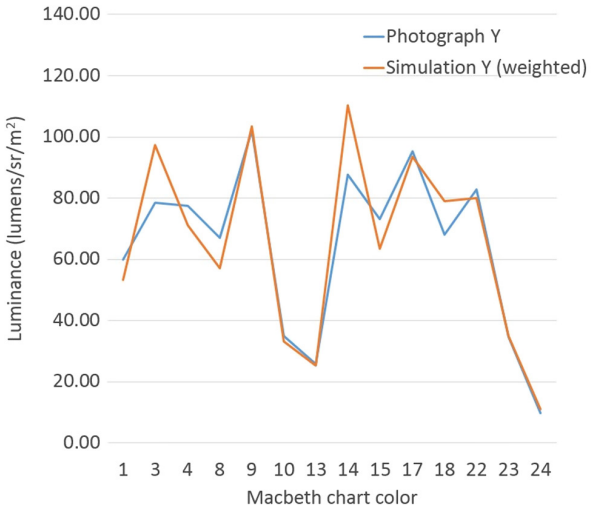
Table 2 (*Continued*).

	1/15 s								
	Photograph			Simulation			Difference (Δ)		
Color	x	y	Y	x	y	Y	Δx	Δy	Δxy
1	0.44	0.38	59.31	0.44	0.39	0.04	0.00	0.01	0.01
3	0.29	0.31	101.17	0.29	0.32	0.07	0.00	0.01	0.01
4	0.39	0.46	75.87	0.38	0.46	0.05	0.01	0.00	0.01
8	0.24	0.22	57.97	0.25	0.23	0.04	0.01	0.01	0.02
9	0.51	0.33	114.97	0.51	0.34	0.07	0.01	0.01	0.01
10	0.35	0.27	35.23	0.35	0.27	0.02	0.00	0.00	0.00
13	0.21	0.18	25.73	0.21	0.19	0.02	0.01	0.00	0.01
14	0.34	0.51	120.68	0.34	0.51	0.08	0.00	0.00	0.00
15	0.55	0.34	72.42	0.58	0.34	0.05	0.03	0.00	0.03
17	0.43	0.28	99.79	0.44	0.28	0.07	0.00	0.00	0.00
18	0.23	0.31	85.94	0.23	0.32	0.06	0.00	0.02	0.02
22	0.36	0.37	80.07	0.36	0.37	0.06	0.00	0.01	0.01
23	0.35	0.36	35.23	0.36	0.37	0.02	0.01	0.01	0.01
24	0.35	0.36	12.31	0.36	0.37	0.01	0.01	0.02	0.02
Average							0.01	0.01	0.01

in luminance, which can be caused by many reasons. Since this methodology is focused on the colorimetric aspect of the images, we have not measured the absolute power emitted by the light sources, which is required to validate the absolute luminance of the simulations—this measurement can typically be performed using either a lux meter or a goniospectroradiometer, depending on the purpose. However, it is possible to validate the images in terms of their relative luminance. Figures 12 and 13 compare the luminance values in the photographs with the luminance values taken from the same colors in the simulation, after scaling them by a multiplicative factor—obtained as the average of the ratio between each pair of luminance values. As we can see, the relative luminance values in both images differ very little, which is supported by their high correlation. We attribute larger differences, like those in some colors in Fig. 12, to the different color sensitivities of the filters inside the camera sensor (Fig. 9).

In general, the above results suggest that we can achieve simulations which are very accurate in terms of chromaticity and relative luminance. However, these results are only numerical differences. Since we are concerned with visual perception, we must determine the correlations between these numerical quantities and actual perceptual differences. Therefore, color differences between the images must also be analyzed using a more perceptually uniform metric. We chose to use the industry standard CIEDE2000 metric (ΔE00), because it provides improved perceptual uniformity with respect to its predecessor, the CIE DeltaE 1994 metric, which in turn is based on RIT-DuPont results from automotive paint experiments.[21–23] CIEDE2000 operates on the CIE 1976 Lab (CIELAB) color model, which represents colors in terms of lightness and chrominance (chrominance-based color space) with respect to a given white point. Since the choice of the white point can be arbitrary, because both images have been obtained under the same illumination environment, we chose the standard ICC white point, a 16-bit fractional approximation of D50,[24] which is Matlab's default. The color differences in Fig. 10 were calculated using an averaged area around the center of each color square. They are shown numerically in Table 3 as percentages, and graphically in Fig. 14, with the color scale range adapted to a 0 to 10 range to facilitate visual inspection.

The results in Table 3 show that the CIEDE2000 color difference usually increases as the shutter speed decreases



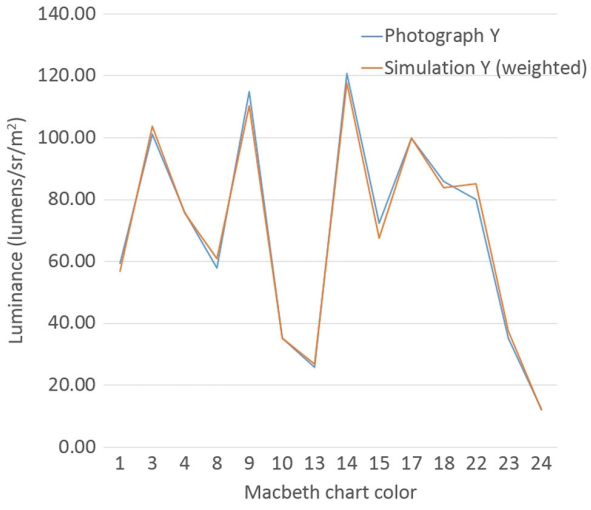
Color	ΔY
1	6.40
3	18.90
4	6.58
8	9.92
9	1.34
10	1.79
13	0.66
14	22.62
15	9.73
17	1.80
18	11.15
22	2.78
23	0.23
24	1.26
Correlation	0.95

Fig. 12 Luminance comparison between a photograph (at a 1/8-s shutter speed) and its simulation, after scaling the latter by a multiplicative factor obtained as an average ratio.

(total exposure increases) when the luminance response approaches the oversaturation limit, which is why we recommend removing them from the test set. That occurs because CIELAB is represented in a chrominance-based color space, therefore (unlike in chromaticity-based color spaces), chromaticity and luminance are closely linked. The CIEDE2000 color difference equation introduces corrections via a series of weighting functions, S_L, S_C, and S_H,[25] to compensate for the luminance influence; that is why, in the case of the 1/8-s shutter speed photograph, the highest values for the S_L function occur in the samples which were removed in previous tests (2, 5, 6, 7, 11, 12, 16, 19, 20, and 21).

So far, we have only obtained color differences for the Macbeth color chart. In our case, we are more interested in analyzing these color differences for our paint materials. To do so, we have chosen a sample 10×15 cm^2 green paint plate [commercial name: Green Vaillant, grain code: A001, color code: KRM (7M); see Fig. 15] and computed the same differences as before (Table 4). It is worth noting that since the plate was positioned with a certain inclination with respect to the camera and the light sources, there is some amount of vertical color gradient due to nonuniform lighting. For this reason, we have taken three sample colors at the top, middle, and bottom of the plate, and compared the images at these three positions. In our case, nonuniform illumination was desired to study the anisotropic effects linked to the observation and illumination angles. Nonuniform lighting can be accounted for in the validation by measuring the illuminance on the surface of the sample at multiple points with a lux meter.

The tolerance of the human visual system to color differences has been the subject of multiple studies, notably



Color	ΔY
1	2.41
3	2.53
4	0.15
8	3.03
9	4.53
10	0.09
13	1.06
14	3.03
15	4.77
17	0.19
18	1.99
22	5.15
23	2.15
24	0.38
Correlation:	1.00

Fig. 13 Luminance comparison between a photograph (at a 1/15-s shutter speed) and its simulation, after scaling the latter by a multiplicative factor obtained as an average ratio.

Table 3 CIEDE2000 color differences between the photographs and the simulated images in Fig. 10, using the standard ICC white point for the color space conversions to CIELAB. S_L, S_C, and S_H indicate the value of the weighting functions for lightness, hue, and chroma, respectively.

	1/8 s				1/15 s			
Color	ΔE00	S_L	S_C	S_H	ΔE00	S_L	S_C	S_H
1	5.38	1.21	2.72	1.53	1.40	1.37	2.04	1.35
2	3.00	1.75	1.28	1.06	1.66	1.66	3.50	1.83
3	2.34	1.65	2.63	1.57	2.23	1.26	2.59	1.54
4	4.90	1.36	4.12	2.37	1.37	1.25	2.84	1.81
5	9.35	1.71	1.78	1.31	2.49	1.41	2.50	1.50
6	9.62	1.72	1.68	1.29	2.96	1.62	3.09	1.74
7	1.61	1.72	4.67	1.86	1.08	1.32	3.94	1.57
8	5.44	1.53	2.88	1.88	2.82	1.21	2.30	1.68
9	2.13	1.58	3.41	1.47	1.77	1.21	3.00	1.41
10	2.37	1.22	1.53	1.17	0.59	1.47	1.31	1.10
11	3.95	1.73	2.75	1.42	1.86	1.62	4.67	2.49
12	1.67	1.72	4.33	1.79	2.13	1.61	4.67	1.95
13	5.77	1.21	2.78	1.65	1.80	1.43	2.06	1.43
14	2.13	1.60	4.42	2.58	3.69	1.26	4.05	2.39
15	1.43	1.26	4.42	1.74	1.23	1.30	3.00	1.43
16	1.55	1.73	3.22	1.53	1.38	1.72	4.57	1.84
17	4.33	1.64	1.83	1.18	0.87	1.22	1.96	1.24
18	1.78	1.62	3.11	1.72	2.62	1.22	2.63	1.51
19	6.31	1.75	1.16	1.08	6.31	1.75	1.16	1.08
20	6.31	1.75	1.16	1.08	3.96	1.68	2.22	1.48
21	6.13	1.73	1.40	1.20	0.65	1.50	3.43	2.13
22	3.14	1.51	3.44	2.13	0.37	1.21	2.47	1.68
23	2.22	1.25	2.33	1.61	0.25	1.49	1.94	1.41
24	2.02	1.61	1.66	1.29	0.51	1.71	1.23	1.10

those by Alman, Snyder, Berns, and Melgosa,[21,26–29] which provide a method for interpreting color difference magnitudes in different fields of application. Most recently, Berns and Hou[22] provided some CIEDE2000 statistics for the RIT-DuPont dataset, indicating a mean CIEDE2000 difference of around 1, and a standard deviation of around 0.4. Since these results are based on automotive paint datasets, we can use them to judge the validity of our color difference results. We can then consider that, in the context of our paint colors, any color pair which differ by a CIEDE2000 of 1.4 or less, will be considered as equivalent by a human observer.

As we can see in Table 4, the differences in the xyY color space are much greater than they were in the Macbeth chart. The XYZ tristimulus values are estimated from the photograph using the camera's characterization matrix, which in turn was obtained using samples from the Macbeth color chart. Therefore, we can expect estimations for colors

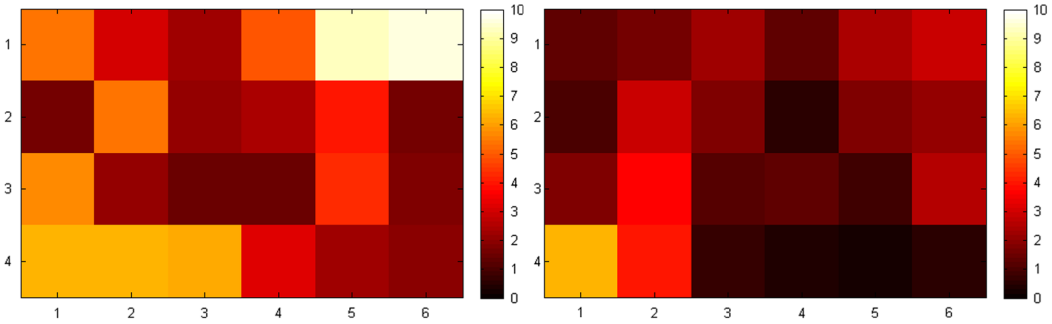


Fig. 14 Graphical representation of the CIEDE2000 color differences between the photograph and the simulated image in Figs. 10(a) (1/8 s, left), and 10(b) (1/15 s, right), using the standard ICC white point for the color space conversions to CIELAB. The images show a color representation of the differences, with the color scale range adapted to a 0 to 10 range to facilitate visual inspection.

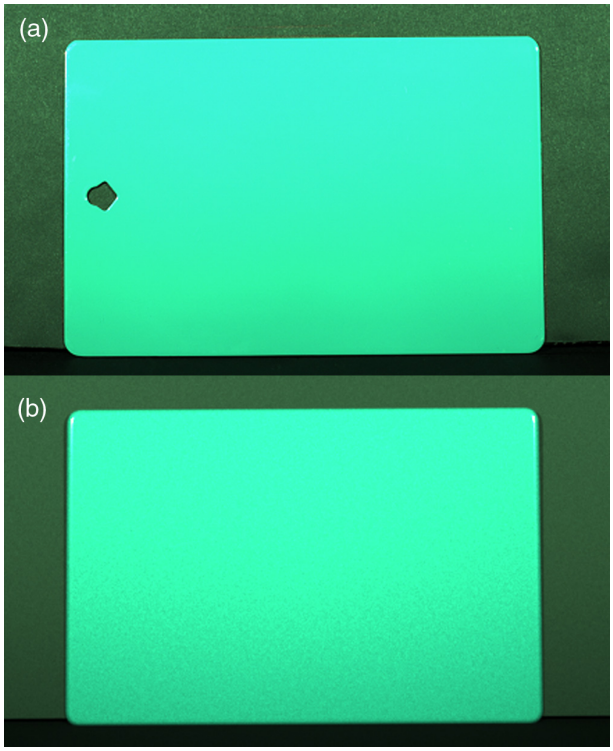


Fig. 15 (a) Photograph and (b) simulation of a sample green paint plate, with a total exposure corresponding to a shutter speed of 1/8 s. The images are in the camera's own RGB color space and have not been calibrated nor white balanced.

outside the characterized gamut to be of lower quality. This is why the characterization should be performed with color samples with optical properties similar to those used in the tests. Nonetheless, the perceptual behavior is different. As shown in Table 5, when we consider selected areas individually, the CIEDE2000 color differences are very high; however, this difference is drastically reduced when we compare a larger averaged area. If we look again at Table 2, we can see that, for an exposure of 1/8 s, a much larger luminance difference is obtained for the green square (number 14) of the Macbeth chart. Regardless of the fact that the images have not been calibrated, which means that they have twice the number of green pixels from the camera's CFA, the camera's green filters are more sensitive to luminance. Looking at Table 5, we can see that the luminance differences (ΔL) are indeed very large in each individual area, but with a negative sign. This means that, despite the colors being very different locally, the contribution of each one to the globally perceived color compensates for local differences. This phenomenon shows that although numerical results are often useful, it is crucial to perform visual tests as well to support or refute the numerical quantities. In fact, although the color differences under xyY were quite large, we have obtained a perceptual color difference of 0.85 for the averaged area, which is smaller than the mean value of 1.00 provided by Berns and Hou.[22] Therefore, we can consider that in the case of this paint plate, when observed globally under the defined observation conditions, a human observer would not discern the difference between the photograph and the simulation.

Table 4 xyY tristimulus values, and nonperceptual chromaticity distances in the CIE xy color space, of the photograph and the simulated images in Fig. 15.

	Photograph			Simulation			Difference (Δ)		
Area	x	Y	Y	x	y	Y	Δx	Δy	Δxy
Top	0.3457	0.3689	9.7939	0.2353	0.4105	0.1085	0.11	0.04	0.12
Middle	0.3453	0.3688	9.6353	0.2350	0.4109	0.0985	0.11	0.04	0.12
Bottom	0.3444	0.3691	9.5153	0.2347	0.4112	0.0868	0.11	0.04	0.12
Average	0.3451	0.3689	9.6347	0.2350	0.4109	0.0989	0.11	0.04	0.12

Table 5 CIEDE2000 color differences between the photographs and the simulated images in Fig. 15, using the standard ICC white point for the color space conversions to CIELAB. S_L, S_C, and S_H indicate the value of the weighting functions for lightness, hue, and chroma, respectively.

	Photograph			Simulation			CIEDE2000					
Area	L	A	b	L	a	b	ΔL	ΔH_{ab}	ΔE00	S_L	S_C	S_H
Top	87.53	−52.90	2.71	89.91	−58.70	13.25	2.38	−9.63	2.52	1.60	3.55	1.91
Middle	87.08	−56.92	11.84	89.30	−61.23	19.49	2.22	−6.29	2.14	1.60	3.76	2.09
Bottom	84.69	−60.39	22.81	80.00	−56.68	20.02	−4.69	1.34	3.32	1.51	3.81	2.18
Average	86.40	−57.04	12.93	86.53	−59.01	17.71	0.13	−4.11	0.85	1.57	3.70	2.07

5 Conclusion

In order to perform the objective colorimetric validation of a rendering engine, we need ground-truth information about the scene being rendered. We propose using radiometrically calibrated photographs of the scene, taken according to a set of well-met conditions, as ground-truth information to measure the amount of realism of the results. Although similar methodologies have been proposed in the past,[12,30] only the results and a brief description of the process are usually provided.

We have presented a methodology that allows rendering a computer simulation of a real scene with a minimal number of perceptual differences. Our methodology is divided into several blocks, from the setup of the physical scene to the generation of the rendered images and the validation results, each one consisting of a series of important steps. This article describes the most important factors to keep in mind at each step in order to minimize the amount of discrepancies between the real scene, the photographs, and the simulations.

Since the photographs are taken with a radiometrically calibrated camera, we can use them as the ground-truth for colorimetric reference. In turn, from this radiometric data we can obtain colorimetric and relative luminance information. Our results show that we can obtain highly accurate simulations with only slight differences from the ground-truth photographs. Additionally, they have highlighted the importance of the camera characterization model that predicts radiometric signals from colorimetric sensor responses. Our study focuses on nontextured uniform paint samples, but additional issues may arise in the case of more complex paint textures, such as sparkling or gonichromatic textures, where the perceived aspect of the samples changes with the observation and illumination angles. In these cases, factors like the camera setup, the size of the environment, the sample position and inclination, or the observation and illumination angles may have a more significant impact on the results. We have discussed in previous papers[14] some of the effects associated with different camera parameters on the perceived aspect of sparkling paint samples. We leave as a future work a more thorough analysis of the effects of additional factors on the perception of specific types of textures, which may in turn contribute to completing the methodology presented in this paper.

Though much remains to be done in the area, being able to simulate a real scene with such a high level of perceptual fidelity, and more importantly, to describe the procedure for obtaining such results is an important step for the validation of a rendering model.

References

1. G. W. Meyer, "Computer aided color appearance design," in *Proc. of the First Int. Conf. on Color in Graphics and Image Processing* (2000).
2. E. Balcetis and D. Dunning, "See what you want to see: motivational influences on visual perception," *J. Pers. Soc. Psychol.* **91**(4), 612–625 (2006).
3. E. Peli, L. Arend, and A. T. Labianca, "Contrast perception across changes in luminance and spatial frequency," *J. Opt. Soc. Am. A* **13**(10), 1953–1959 (1996).
4. K.-H. Bäuml et al., "Simultaneous color constancy: how surface color perception varies with the illuminant," *Vision Res.* **39**(8), 1531–1550 (1999).
5. T. N. Pappas, R. J. Safranek, and J. Chen, "Perceptual criteria for image quality evaluation," in *Handbook of Image and Video Processing*, pp. 669–684, Academic Press, Cambridge, Massachusetts (2000).
6. L. T. Maloney and D. H. Brainard, "Color and material perception: achievements and challenges," *J. Vision* **10**(9), 19 (2010).
7. R. W. Fleming, "Visual perception of materials and their properties," *Vision Res.* **94**, 62–75 (2014).
8. C. Ulbricht, A. Wilkie, and W. Purgathofer, "Verification of physically based rendering algorithms," *Comput. Graphics Forum* **25**(2), 237–255 (2006).
9. C. M. Goral et al., "Modeling the interaction of light between diffuse surfaces," *SIGGRAPH Comput. Graph.* **18**(3), 213–222 (1984).
10. G. W. Meyer et al., "An experimental evaluation of computer graphics imagery," *ACM Trans. Graph.* **5**(1), 30–50 (1986).
11. A. McNamara et al., "Comparing real & synthetic scenes using human judgements of lightness," in *Proc. of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques*, pp. 207–218 (2000).
12. J. Bärz, N. Henrich, and S. Müller, "Validating photometric and colorimetric consistency of physically-based image synthesis," in *Conf. on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*, Vol. **2010**, pp. 148–154, Society for Imaging Science and Technology (2010).
13. G. Meyer et al., "Visual comparison testing of automotive paint simulation," *Proc. SPIE* **9398**, 93980M (2015).
14. V. Medina, A. Paljic, and D. Lafon-Pham, "A study of image exposure for the stereoscopic visualization of sparkling materials," *Proc. SPIE* **9396**, 93960N (2015).
15. V. Medina et al., "Physically based image synthesis of materials: a methodology towards the visual comparison of physical vs. virtual samples," in *Colour and Visual Computing Symp.*, pp. 1–6 (2015).
16. B. Trinklein, "Visual color evaluations: problems and solutions," in *Proc. Special Areas SPE/ANTEC 2001 Conf.*, Vol. 3, pp. 2370–2372, CRC Press (2001).
17. M. Melis, M. Miccoli, and D. Quarta, "Variante full range su fotocamere nikon: hardware e software fanno sistema e misurano la riflettanza spettrale," Nikon eXperience, 2013, https://www.nikonschool.it/experience/full-range2.php (September 2015).
18. Eclat Digital Recherche, "Ocean Technical Details," 2013, http://www.eclat-digital.com/ocean-tech/ (15 June 2016).
19. S. Upton, "Delta-e: the color difference," CHROMiX Color News, 2005, http://www.colorwiki.com/wiki/Delta_E:_The_Color_Difference, (4 February 2016).
20. D. A. Kerr, "A metric for chromaticity difference," 2008, dougkerr.net (April 2016).
21. M. Melgosa et al., "Suprathreshold color-difference ellipsoids for surface colors," *Color Res. Appl.* **22**(3), 148–155 (1997).

22. R. S. Berns and B. Hou, "Rit-dupont supra-threshold color-tolerance individual color-difference pair dataset," *Color Res. Appl.* **35**(4), 274–283 (2010).
23. P. J. Baldevbhai and R. Anand, "Color image segmentation for medical images using l* a* b* color space," *IOSR J. Electron. Commun. Eng.* **1**(2), 24–45 (2012).
24. The Mathworks, Inc., MATLAB version 8.0 (R2012b) Documentation, The Mathworks, Inc., Natick, Massachusetts, 2012, www.mathworks.com/help/matlab/ (January 2016).
25. M. R. Luo, G. Cui, and B. Rigg, "The development of the cie 2000 colour-difference formula: Ciede2000," *Color Res. Appl.* **26**(5), 340–350 (2001).
26. D. H. Alman et al., "Performance testing of color-difference metrics using a color tolerance dataset," *Color Res. Appl.* **14**(3), 139–151 (1989).
27. R. S. Berns et al., "Visual determination of suprathreshold color-difference tolerances using probit analysis," *Color Res. Appl.* **16**(5), 297–316 (1991).
28. G. Snyder, "Visual determination of industrial color-difference tolerances using probit analysis," PhD Thesis, Rochester Institute of Technology (1991).
29. S. Shen and R. S. Berns, "Evaluating color difference equation performance incorporating visual uncertainty," *Color Res. Appl.* **34**(5), 375–390 (2009).
30. K. F. Karner and M. Prantl, "A concept for evaluating the accuracy of computer generated images," in *Proc. of the Twelfth Spring Conf. on Computer Graphics (SCCG'96)*, Citeseer (1996).

Victor Medina received his PhD from Mines ParisTech (France) in 2016. He obtained his BS degree in computer engineering from the University of Granada (Spain) in 2005, and a European Erasmus Mundus master's degree in color in informatics and media technology in 2012. His main research focus is in the fields of color science and computer vision, with special interest in the areas of computational neuroscience, visual perception, and image and video processing.

Thomas Muller is an expert in simulation and virtual reality. He is a research associate at Mines ParisTech, PSL-Research University, Center for Robotics (France). He earned a master's degree in software engineering science (MSES) at the University Toulouse Paul Sabatier (France, 1999). He cofounded the company on-situ and pioneered techniques for simulating the appearance of car paint at Peugeot SA, Creativity and Innovation Lab.

Dominique Lafon-Pham is currently working as an associate professor in the Center of Materials Research at Mines Alès (France). Through collaborations with industrial and institutional partners, she looks for a new metrological approach and a better understanding of the visual behavior of natural and manufactured materials, searching for the relations and interaction between the human visual system and the optical properties of colored and textured tangible surfaces.

Alexis Paljic is an associate professor at Mines ParisTech (France). His research interests are immersion and interaction in virtual reality (VR), validity of VR simulations and human perception in virtual environments.

Philippe Porral is an engineer and expert in physically realistic digital imaging within the research branch of the PSA Peugeot Citroën Group.

3.3 Discussion

Au cours de cette étude nous avons exposé une chaîne de validation basée sur une vérité terrain photométrique. L'appareil photographique calibré est utilisé comme un vidéo-photomètre afin de produire une image de référence. Le point de rencontre de la photographie et de la simulation pour la validation objective est l'image photométrique en valeurs XYZ. Cela représente une avancée importante puisque l'on pose les bases de la validation photographique. Toutefois le passage à l'espace photométrique peut créer de l'incertitude. En effet la conversion de l'imagerie spectrale à l'espace XYZ n'est pas nécessairement équivalente à la conversion de l'espace RAW de la caméra vers le même espace XYZ. La dynamique, le gamut de la caméra ainsi que les problèmes de métamérisme peuvent induire un biais dans la conversion.

En 2018, suite à cette constatation, j'ai mis en place une chaîne sensiblement différente au sein de la société United Visual Researchers nouvellement créée. Je place dorénavant l'image RAW au point de rencontre entre la simulation et la photographie. Cela permet, comme décrit au chapitre 1 , d'être à iso-paramètres (gamut, dynamique, etc.). L'image RAW prédite étant identique en valeurs à l'image RAW photographiée, le résultat du développement numérique RGB est lui aussi identique pour les deux images. Dans la section suivante, je présente quelques résultats récents.

3.4 Résultats récents

3.4.1 Description du setup

Pour valider la nouvelle approche iso-photographique j'ai mis en place un environnement stable et contrôlé permettant la reproductibilité de l'expérience. Ce montage est constitué de :

— Une cabine lumière
— Un système imageur : ici un Canon 5D Mark II équipé d'un objectif Canon EF 20mm
— Un système de positionnement de l'appareil
— Un objet : ici un écran automotive
— Des éléments de contrôle : échantillon de verre, colorchecker, chessboard

L'écran est positionné au centre de la scène. Un échantillon de verre est placé au sol de la cabine. Le système imageur est devant la cabine, orienté vers le reflet de l'écran à un angle proche de l'angle de polarisation maximale (angle de Brewster). L'ensemble du setup est installé dans une salle noire de telle sorte qu'aucune interférence lumineuse significative ne vient influer sur la luminance de la scène photographiée. La photographie du montage est présentée en figure 3.1 et le schéma d'alignement en figure 3.2 .

Lorsque l'on regarde l'image du point de vue de la caméra on observe un phénomène de dispersion chromatique lié à l'aspect spectral et polarisé de la lumière et aux propriétés optiques de l'écran.

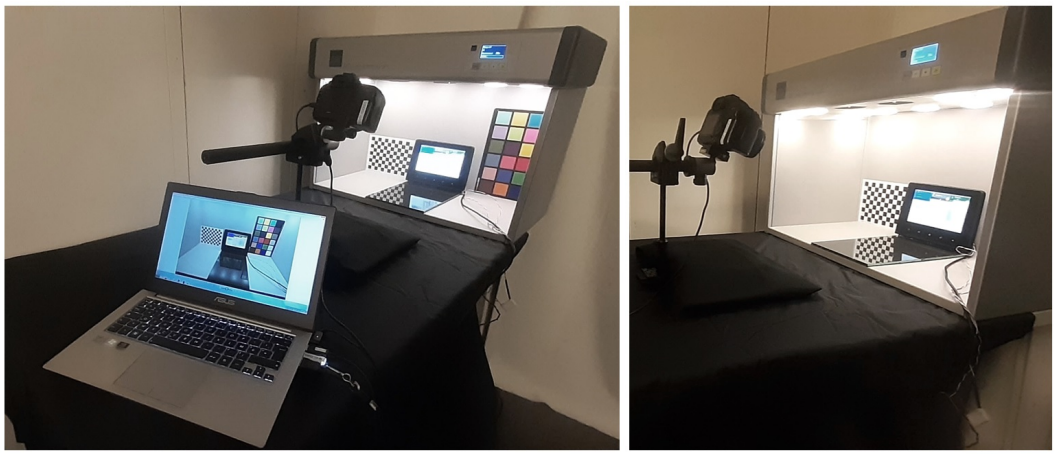


FIGURE 3.1 – Vues du setup de validation iso-photographique.

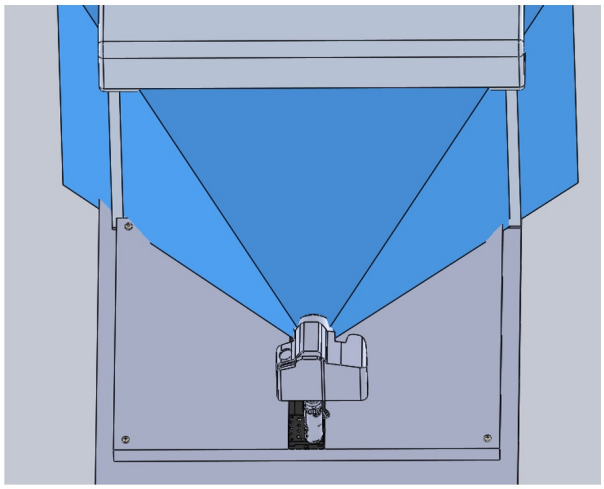


FIGURE 3.2 – Alignement du système imageur.

3.4.2 Caractérisation

L'ensemble des éléments du montage ont été caractérisés en application de la chaîne décrite au chapitre 1 .

Cabine lumière : Sources LED

Les sources de la cabine lumière ont été caractérisées par une mesure de distribution angulaire de la luminance spectrale. Ces mesures ont été réalisées grâce au système EZContrast MS 88 de la société ELDIM (figure 3.4). Il est conçu autour d'une optique de Fourier permettant la formation de l'image d'un point objet unique sur un plan image où chaque pixel correspond à une direction d'observation.

FIGURE 3.3 – Photographie de la scène du point de vue défini proche de l'angle de Brewster.

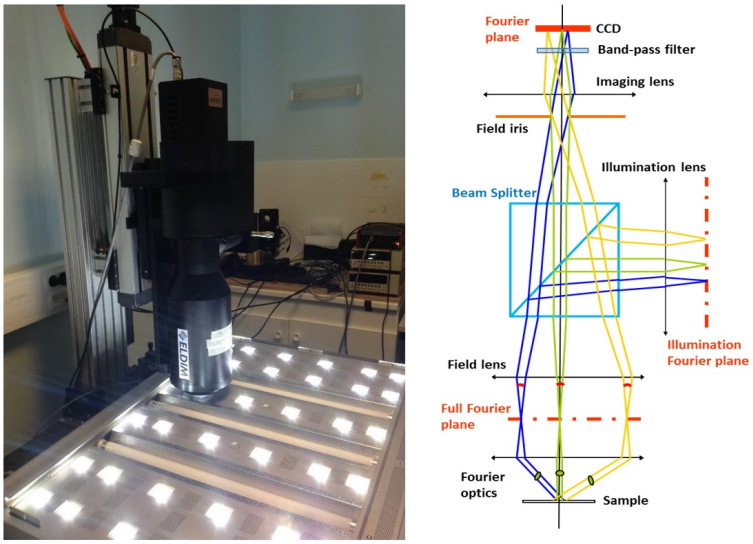


FIGURE 3.4 – Mesure de sources de la cabine lumière (à gauche). Schéma de principe de l'équipement ELDIM EZContrast MS 88 (à droite).

Malgré deux diffuseurs, nous pouvons observer sur les mesures (figure 3.5) que l'émission des sources n'est pas parfaitement lambertienne. L'intensité est plus élevée en direction normale que pour les directions rasantes. Nous observons également une légère variation chromatique en fonction de la direction d'observation. Ceci est dû au fait que la chromaticité des sources (A, D50, D65, etc.) est

sélectionnée en combinant plusieurs sources LEDs de couleur et de position différentes. Les sources génèrent un spectre dont les coordonnées chromatiques xy sont conformes aux normes CIE (Table 3.1) mais le spectre en lui-même est sensiblement différent du spectre normalisé (figure 3.5).

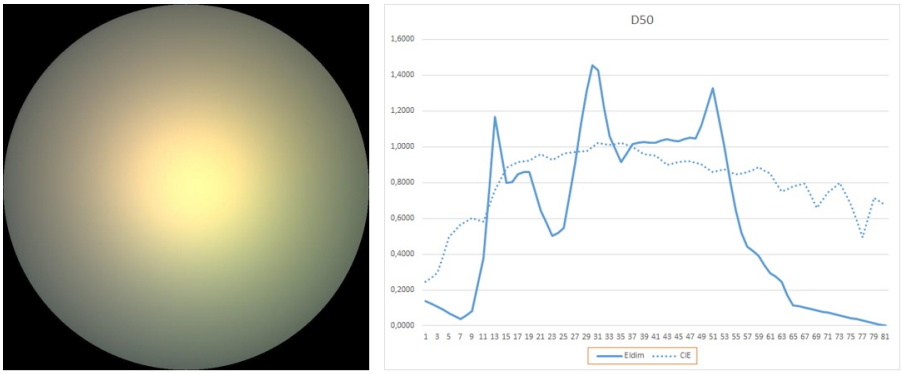


FIGURE 3.5 – Sources LED de la cabine lumière preset D50. Image RGB générée à partir de la mesure de la luminance goniométrique spectrale au plan de Fourier (à gauche). Spectre en direction normale (à droite).

	D50	
	x	y
CIE	0.34	0.36
ELDIM	0.36	0.38

TABLE 3.1 – Chromaticité des sources déduites des mesures au preset D50.

Cabine lumière : Matériaux

Nous nous intéressons uniquement aux matériaux des éléments constituant l'intérieur de la cabine. Dans la salle noire, les matériaux extérieurs ne sont pas éclairés. La cabine lumière est constituée du bloc lumière, sur le dessus et de parois métalliques peintes avec une peinture grise donnée comme étant un neutre N7. Le bloc lumière se décompose en une structure métallique recouverte d'une peinture grise métallisée (différente du gris N7). Nous avons mesuré les BRDF de deux matériaux : le gris N7 et le gris métallisé du bloc lumière. Ces mesures ont été réalisées au Spectro-goniomètre Seelab (figure 3.6).

Cet appareil mesure la fonction de réflectance sur le plan d'incidence pour deux directions : 0° et 45° . L'échantillonnage est programmable avec une résolution maximale de 1° . Le temps de mesure par échantillon (hors calibration) est de l'ordre de 10 minutes pour un échantillonnage tous les 5° .

La mesure réalisée pour le gris N7 avec l'appareil Seelab sont présentées en figure 3.8. On notera que le matériau est relativement éloigné d'un diffuseur idéal.

FIGURE 3.6 – Spectro-goniomètre Seelab GP150.

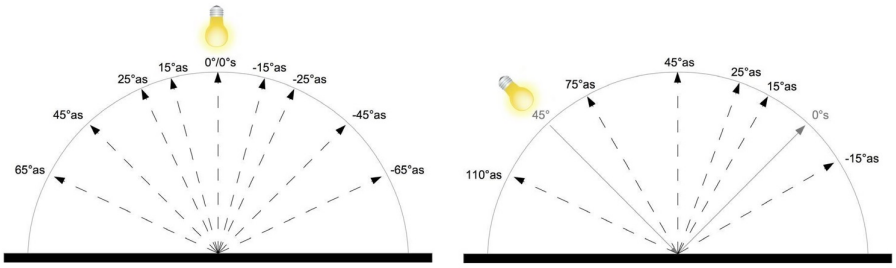


FIGURE 3.7 – Échantillonnage des mesures Seelab.

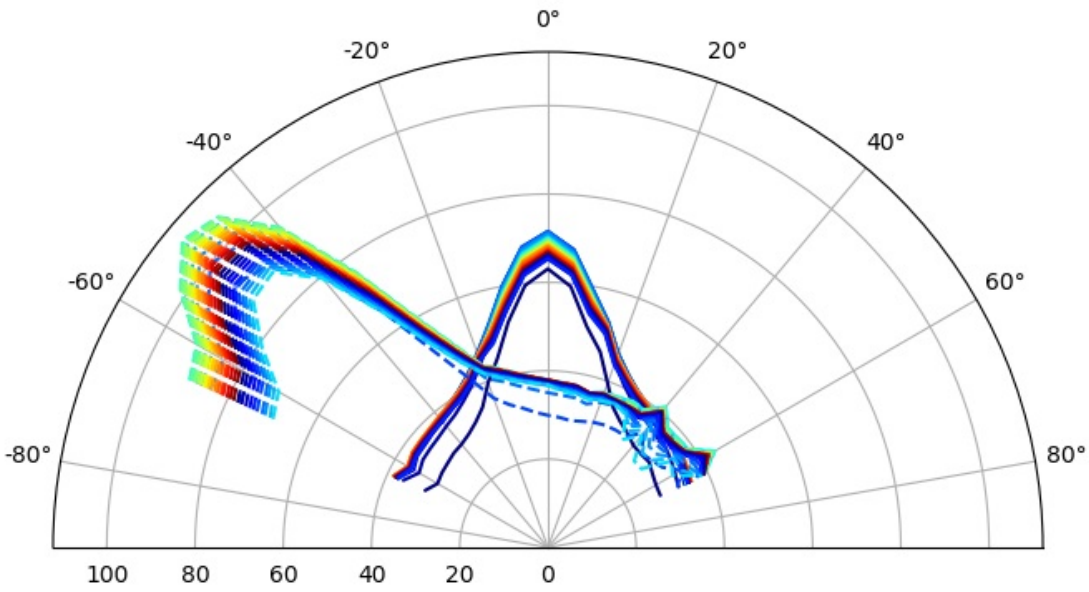


FIGURE 3.8 – Gris N7 de la cabine lumière : Diagramme goniométrique de réflectance à 0° et 45° d'incidence.

Système imageur : Capteur CCD

La caractérisation du capteur de l'appareil photo consiste à déterminer son efficacité quantique, c'est-à-dire la quantité de photons dans chaque domaine de longueur d'onde nécessaire pour produire un électron. Celle-ci est donnée par canal : RGB. En effet le capteur est doté d'un filtre de Bayer, cf. figure 3.9.

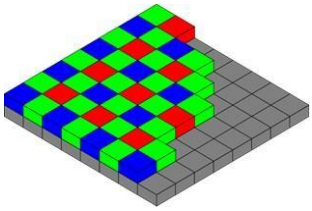


FIGURE 3.9 – Illustration de la matrice de bayer montrant la disposition des filtres RVB sur les pixels.

Le capteur de la caméra est doté d'un filtre de Bayer de type RGGB. Les courbes de réponses spectrales sont données par le fabricant (figure 3.10).

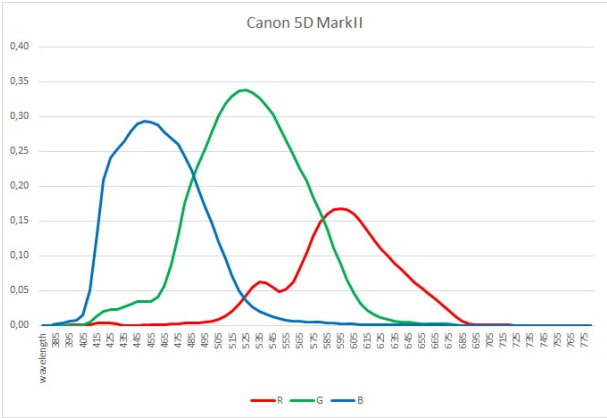


FIGURE 3.10 – Canon 5D Mark II. Courbes de réponse spectrale (données astrosurf.com)

Objet : Écran automobile

L'objet servant d'exemple pour l'étude iso-photographique est un écran dédié à l'industrie automobile conçu par la société Valéo. Il présente la particularité d'incorporer un assemblage de filtres provoquant une polarisation fortement dépendante à la longueur d'onde. Nous avons publié (UVR en Collaboration avec ELDIM) en 2019 la caractérisation et la simulation en image de synthèse de cet écran [Boh+19]. Pour la caractérisation nous avons utilisé le même appareil de mesure que pour les sources lumière, l'EZContrast MS 88. Cet équipement dispose de filtres polarisants qui permettent de

caractériser l'émission spectrale et polarisé de l'écran en angle. Le résultat des mesures d'émission et de polarisation est présenté en figure 3.12.

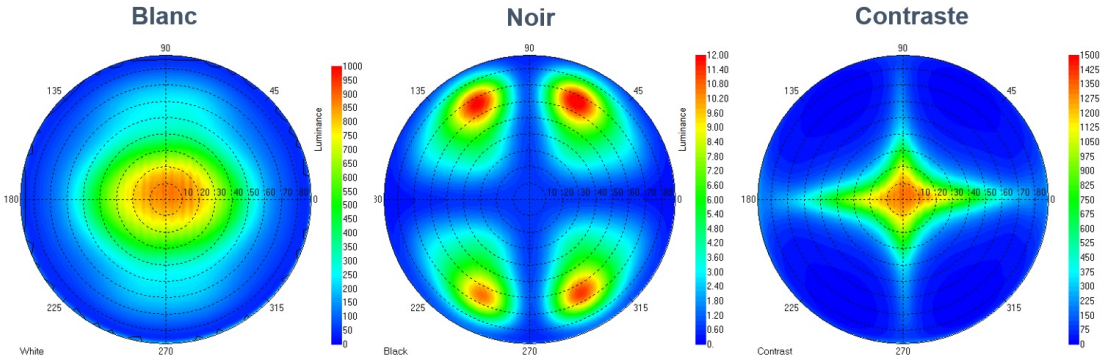


FIGURE 3.11 – Ecran IPS Valéo. Mesures en emission.

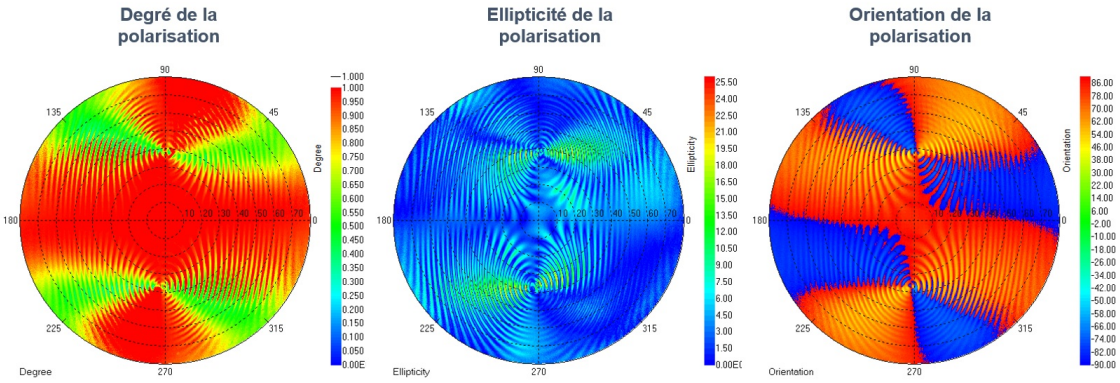


FIGURE 3.12 – Ecran IPS Valéo. Etats de polarisation.

l'EZContrast incorpore également un Miroir semi-réfléchissant (Beam Splitter) pour la mesure de BRDF. Le faisceau de lumière incidente est acheminé vers la surface de l'objet à mesurer via l'optique de Fourier. La lumière réfléchie, parcourant le chemin inverse, traverse le miroir semi-réfléchissant pour atteindre le capteur (voir figure 3.4). Les mesures de la BRDF de l'écran sont présentées en figure 3.13.

mesurée à 540nm pour un angle d'incidence de 40° (à gauche). BRDF mesurée dans le plan d'incidence à 540nm pour 6 angles d'incidence.

3.4.3 Simulation iso-photographique

La photographie et la simulation RAW ont été réalisées pour le montage décrit précédemment en l'illuminant D50. Les images couleur ont été obtenues en développant les images RAW à l'aide d'un

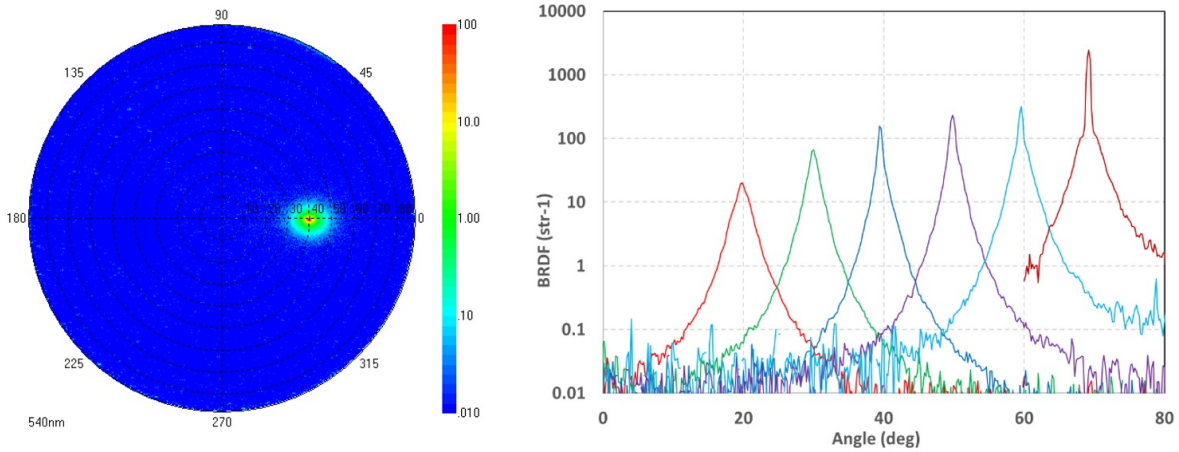


FIGURE 3.13 – Ecran ISP Valeo. BRDF mesurée à 540nm pour un angle d'incidence de 40° (à gauche). BRDF mesurée dans le plan d'incidence à 540nm pour 6 angles d'incidence.

script en 2 étapes : Dématriçage et balance des blancs. Les résultats sont montrés en figure 3.14.

3.5 Conclusion du chapitre

Suite aux travaux menés avec Victor Medina dans le cadre du projet ANR L.I.M.A. j'ai eu la chance de pouvoir développer plus avant notre démarche et proposer au sein de United Visual Researchers une approche de la validation centrée sur le principe de l'iso-photographie. Je montre ici qu'il est possible d'obtenir des simulations visuellement équivalentes à des photographies sans intervention humaine y compris pour des situations à dépendance spectrale et polarisée. L'image simulée n'est pas retouchée différemment de l'image photographiée. Le processus peut donc être totalement automatisé. Paraphrasant Roland Barthes, nous pouvons maintenant dire que « La **simulation** est ici gage d'objectivité. » [Bar64] .

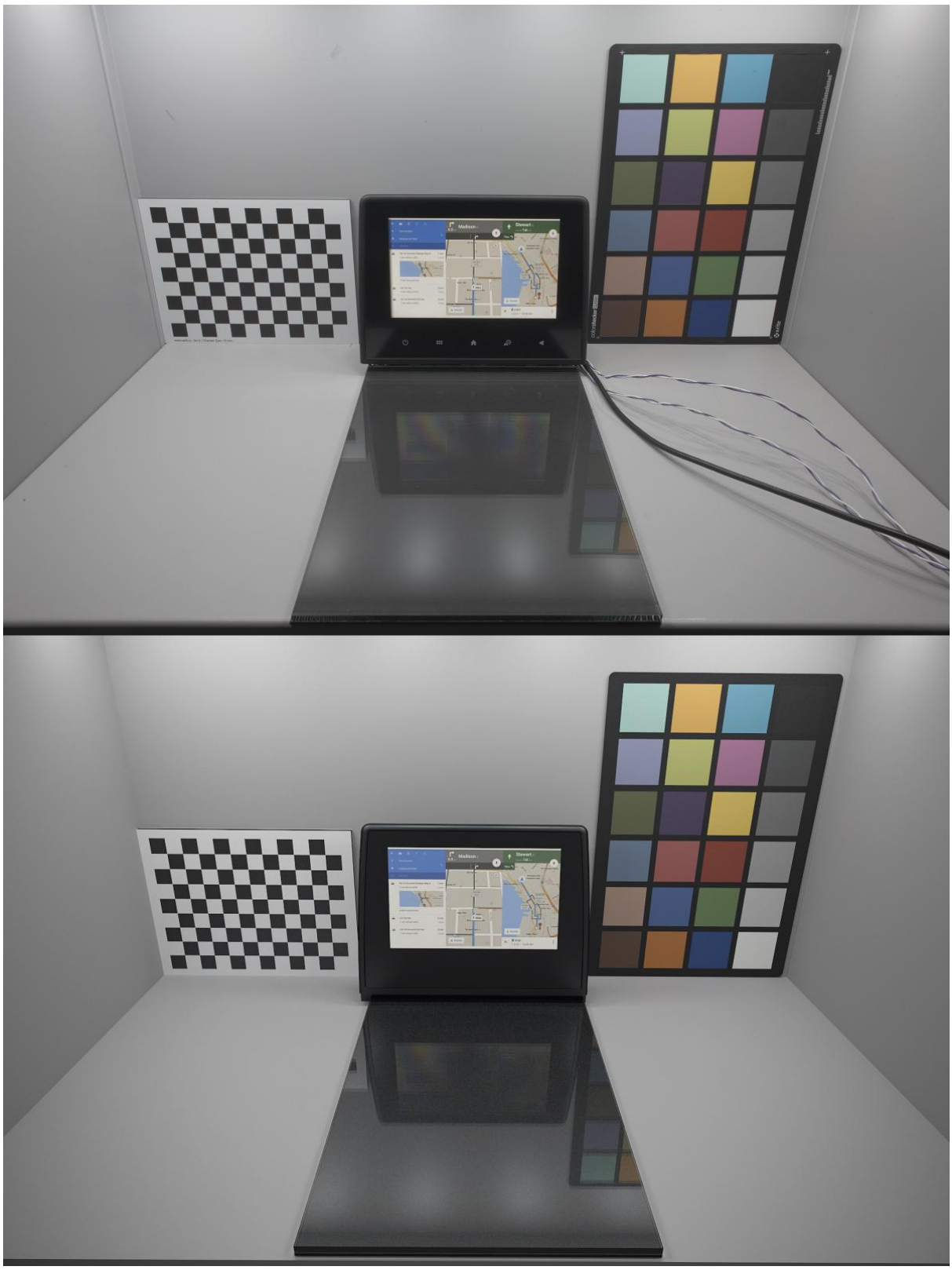


FIGURE 3.14 – Photographie (en haut) vs simulation iso-photographique (en bas). Les effets de dispersion chromatiques sont visibles sur les deux images

Chapitre 4

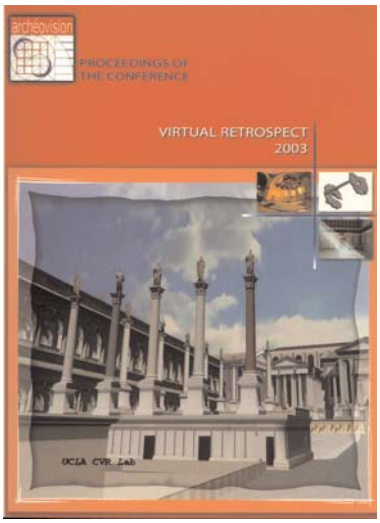
Contribution : « Illumination photo-réaliste interactive en environnement distant ».

4.1 Présentation de la contribution

Cette dernière contribution est plus ancienne, elle date de 2003. Je faisais alors partie de l'équipe de transfert de technologie qui formerait plus tard la société on-situ, essaimage de l'Institut Image (ENSAM). Je travaillais alors à développer des algorithmes pour la composition d'images réel-virtuel photoréalistes en temps interactif. Il n'était pas encore question d'iso-photographie mais seulement d'images confondantes. Nous souhaitions produire des images composées de photographies réelles et d'images de synthèse composées automatiquement de telle sorte que la portion d'image simulée s'intègre complètement à l'image photographiée au point que l'on ne puisse les distinguer. Le virtuel était alors confondu au réel.

4.2 Publication

Version en ligne



Vergnieux R. et Delevoie C., éd. (2004), Actes du Colloque Virtual Retrospect 2003, *Archéovision 1*, Editions Ausonius, Bordeaux

Tiré-à-part des Actes du colloque

Virtual Retrospect 2003

Biarritz (France) 6 et 7 novembre 2003

T. Muller, J.-M. Sanchez, J. Roger, O. Prat

Interactive Photorealistic Illumination for Distant Environments

. . . . . .pp.97-99

Conditions d'utilisation :
l'utilisation du contenu de ces pages est limitée à un usage personnel et non commercial.
Tout autre utilisation est soumise à une autorisation préalable.
Contact : virtual.retrospect@archeovision.cnrs.fr

http://archeovision.cnrs.fr

ILLUMINATION PHOTO-RÉALISTE INTERACTIVE EN ENVIRONNEMENT DISTANT

T. Muller, O. Prat, J. Roger, J.-M. Sanchez

Institut Image-ENSAM
2, rue Thomas DUMOREY
71100 Chalon sur Saône
thomas.muller@cluny.ensam.fr
roger@cluny.ensam.fr
sanchez@cluny.ensam.fr

Abstract : In the frame of an augmented reality project we propose to realize realistically confusing images of once or supposedly existing buildings. To have a perfect correlation between virtual and real, we develop methods enabling the constant capture of high dynamic lighting. We show how, from pre-computed reflectance fields, we interactively light a virtual scene to finally replace it in its original context.

Keywords : Augmented reality - global illumination - interactive lighting.

Résumé : Dans le cadre d'un projet de réalité augmentée nous nous proposons de réaliser des images confondantes d'édifices disparus ou probables. Afin d'avoir une corrélation parfaite entre le monde réel et le monde virtuel, des méthodes permettant de capturer en permanence un éclairage à haute dynamique sont développées. Une méthode d'illumination originale est proposée afin d'illuminer une scène virtuelle de façon interactive à partir de champs de réflectances pré-calculés.

Mots clés : Réalité augmentée - illumination globale - lumière interactive.

1. Introduction

Les avancées récentes de la recherche en simulation d'éclairage [1] [2] permettent de produire des images de très haute qualité. Les algorithmes rendent de façon satisfaisante des illuminations locales ou globales pour une grande variété de matériaux. Bien que les calculs ne soient pas encore physico-réalistes, il est dorénavant possible de confronter une simulation à une photographie du réel. Aujourd'hui, si certains acteurs virtuels sont confondants de réalisme c'est en grande partie grâce à la correspondance de l'éclairage entre réel et virtuel.

Fig. 1: La lumière modélise l'espace.

Sur ce constat, il semble logique d'adapter ces résultats au domaine de la réalité augmentée. En effet, on constate dans ce domaine que l'intégration lumineuse est primordiale si l'on veut juger de l'apparence d'un élément virtuel positionné dans le réel. Quelque soit le domaine d'application – Urbanisme, architecture, reconstitution, automobile, artistique ... si l'on souhaite juger de l'apparence d'un élément ajouté au réel on doit prendre en compte son intégration lumineuse. La lumière modélise l'espace. Dans le cas particulier de l'architecture – qu'il s'agisse de patrimoine ou de projets – la lumière du jour, la lumière changeante, est un élément essentiel à la perception du lieu.

Bien que les puissances de calcul augmentent toujours en suivant la loi de Moore il n'est pas encore possible de rendre de telles images inter-activement. Dans certains cas, il est possible de changer le point de vue sans effectuer de nouvelle simulation [3]. Par contre, une modification de l'éclairage ou de la géométrie oblige à une réévaluation, au moins partielle, de la solution d'illumination globale. Les cartes graphiques actuelles permettent une réévaluation d'une solution globale de façon dynamique mais uniquement sur des scènes simples [4].

2. Capture de l'éclairage.

Les travaux présentés ont pour cadre le domaine du patrimoine pour lequel nous souhaitons développer une méthode permettant d'augmenter la réalité. La capture de l'illumination en temps réel sera tout d'abord traitée. Puis une première approche de lumière interactive sera exposée. La production d'images confondantes éclairées en temps réel est ici recherchée.

Nous nous plaçons ici dans le cas d'un objet virtuel à intégrer dans un environnement réel distant. C'est à dire que la distance géométrique entre l'objet virtuel et son environnement est suffisamment grande pour être considérée infinie. C'est le cas d'un petit objet dans une pièce sur une grande table ou d'un bâtiment indépendant éclairé uniquement par le ciel.

La luminance réelle incidente à l'élément virtuel doit être simulée ou mesurée en continu à l'emplacement souhaité. La luminance en un point est le résultat d'interactions complexes entre la lumière provenant de sources (lampes, soleil...) et l'environnement. Il n'est pas envisageable actuellement de simuler ces interactions en temps interactif qui nécessiteraient de connaître et de modéliser l'environnement. Des appareils de mesures – Spectro-goniophotomètre – plus ou moins complexes permettent de mesurer la distribution de la luminance incidente. Mais, l'information visuelle la plus significative contenue dans ces mesures est la dynamique de l'éclairage. Paul Debevec [5], propose une méthode permettant de retrouver cette dynamique à partir d'une série d'images photographiques échantillonnées en exposition. Cette méthode permet de construire des images HDRI (Images à Hautes Plages de Dynamique) au format de G.J Ward, qui serviront de source d'éclairage pour la simulation.

Dans un premier temps nous avons utilisé pour les expérimentations un appareil photo numérique. Mais dans un souci d'efficacité, nous avons opté pour une capture vidéo.

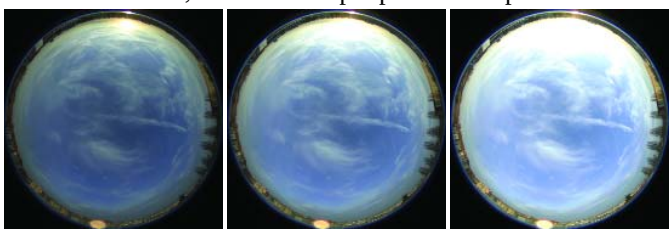


Fig. 2 : Dynamique d'un ciel de printemps.

3. Lumière interactive

Le calcul de l'équilibre lumineux dans une scène implique la résolution de l'équation du rendu [6].

$$L_r(x,\vec{\omega}_r) = L_e(x,\vec{\omega}_r) + \int \rho_{bd}(x,\vec{\omega}_l,\vec{\omega}_r).L_r(x',\vec{\omega}'_r).G(x,x')dxdx'$$

$L_e(x,\vec{\omega}_r)$ est la radiance propre émise au point x dans la direction $\vec{\omega}_r$.

G(x,x') est appelé facteur de forme différentiel.

$\rho_{bd}(x,\vec{\omega}_l,\vec{\omega}_r)$ est la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle

Cette équation ne peut être qu'approchée par un calcul numérique. Plus la résolution est réaliste (physique) plus les temps de calcul sont importants. Actuellement, pour obtenir une image physico-réaliste d'une scène quelconque, plusieurs heures de calcul peuvent être nécessaires, sans que ce temps de calcul soit prévisible. Dans le cadre de la réalité augmentée il est nécessaire de réévaluer la solution de façon interactive (de l'ordre du dixième de seconde).

Afin de résoudre ce système dans le temps imparti et sans faire de compromis sur la qualité de la simulation nous utilisons une observation de Paul Haeberli [7]. Il montre comment l'on peut évaluer la contribution d'une source lumineuse à l'éclairage d'une scène réelle et comment, en pondérant ces contributions, il est possible de produire une image ré-éclairée de la scène. Paul Debevec [8] reprend cette étude afin de capturer des champs de réflectance d'un visage humain. Ces champs rendent compte de la proportion d'énergie réfléchie vers l'observateur pour une direction d'illumination donnée. Concrètement les champs sont des images produites à partir d'une source normalisée et pondérées par la valeur de l'angle solide d'influence.

Notre approche propose de capturer les champs de réflectance d'une scène virtuelle. Nous utilisons un moteur de rendu en illumination globale, qui pour un point de vue fixe va produire une série d'images correspondant à une direction discrète d'illumination. L'ensemble de ces directions discrètes forme une base échantillonnée dans l'espace. A partir de la carte de luminance (HDRI) produite en temps réel, il devient alors possible de ré-éclairer la scène virtuelle. Pour cela nous échantillonnons la carte de luminance suivant les mêmes directions que pour les champs de réflectance. À chaque direction de la carte de luminance correspond un poids: la luminance émise depuis la direction donnée incidente au point de capture. Si l'on applique ce poids au champ de radiance correspondant, on obtient une image de la scène virtuelle

éclairée depuis cette direction. En sommant ces contributions on obtient une image réaliste de la scène virtuelle dans l'environnement lumineux capturé :

$$\hat{L}(x,y) = \sum_{\theta,\phi} R_{x,y}(\theta,\phi) L_i(\theta,\phi)$$

$\hat{L}(x,y)$ est la luminance du pixel x,y.
$R_{x,y}(\theta,\phi)$ est la réflectance en x,y pour en angle d'incidence en coordonnées polaires θ,ϕ.
$L_i(\theta,\phi)$ est la luminance incidente à la scène.

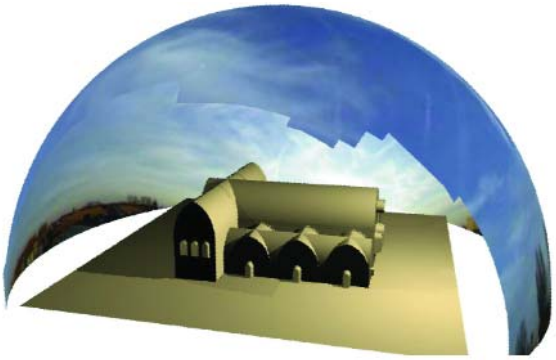


Fig. 3 : Éclairage d'une scène virtuelle par un environnement réel.

Le nombre de directions d'échantillonnage est fonction de la dynamique de l'éclairage et de sa répartition fréquentielle. De manière générale avec un échantillonnage uniforme en environnement extérieur, 200 échantillons donnent un résultat satisfaisant visuellement.

Les temps de calcul de la somme pondérée telle qu'elle est présentée ci-dessus ont l'avantage de pouvoir être prédits et d'être indépendants de la complexité de la scène. Toutefois à ce stade l'efficacité reste insuffisante. Plusieurs secondes de calcul pour une image de 512x512 sont nécessaires avec un calculateur de type PC Pentium IV.

Deux améliorations sont envisageables pour parvenir à un temps de calcul inférieur à la seconde.

- Optimisations Hardware : En utilisant les nouvelles capacités de calculs en virgule flottante des dernières cartes graphiques.
- Réduire le nombre de directions d'échantillonnage : Il est possible de réaliser un échantillonnage non uniforme et adaptatif de la carte de luminance. On obtient ici un nombre limité de directions privilégiées fonction de l'environnement.

4. Conclusion

Grâce à ces travaux, nous espérons rapidement pouvoir situer dans un espace réel – en réalité augmentée – des éléments virtuels tels des bâtiments disparus ou futurs. La lumière interactive permet d'obtenir des images confondantes où réel et virtuel sont indissociables.

Nous travaillons actuellement sur l'optimisation des méthodes de calcul. Nous envisageons dans un avenir proche d'appliquer ces travaux à l'espace texture au lieu de l'espace image. Cela permettrait une interactivité en position comme en lumière.

Notes :

[1] Wann Jensen, H. (1996) : "Global Illumination using Photon Maps", *Rendering Techniques*, 96 , 21-30.
[2] Wann Jensen, H. (2001) : "Realistic Image Synthesis using Photon Mapping"
[3] Goral C. M., K. E. Torrance, D. P. Greenberg and B. Battaile (1984) : "Modelling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces, in : *SIGGRAPH Proceedings*, July 6, 18, 212-222.
[4] Nijasure, M. and S. Pattanaik : "Real Time Global Illumination on GPU"., - U. Central Florida, Orlando, FL-V. Goel ATI Research.
[5] Debevec, P., Jitendra Malik (1997) : "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs", in : *SIGGRAPH Proceedings*.
[6]Kajiya, J.T. (1986) : "The Rendering Equation. ACM Computer Graphics", in : *SIGGRAPH Proceedings*, 20(4).
[7] Haeberli, P.(1992) : "Synthetic Lighting for Photography." http://www.sgi.com/grafica/synth/index.html.
[8] Debevec, P.(2000) : "Acquiring the Reflectance Field of a Human Face" in : *SIGGRAPH Proceedings.*

Fig. 4 : Réalité augmentée.

4.3 Résultats faisant suite à ces travaux

Cette publication montre que l'interactivité, introduite au chapitre 1, ne concerne pas uniquement le mouvement des objets ou du point de vue, mais peut également concerner l'éclairage de la scène. Obtenir une image confondante combinant réel et virtuel implique d'assurer une cohérence réel-virtuel supérieure à ce qui est habituellement réalisé en réalité augmentée :

— Cohérence géométrique, bien sûr : Les objets simulés doivent être colocalisés la scène réelle.
— Cohérence de matière : Les objets virtuels doivent avoir un aspect en cohérence avec les objets du réel.
— Cohérence lumineuse : L'éclairage doit être le même pour tous les objets réels et virtuels.

Obtenir la cohérence réel-virtuel en éclairage naturel, donc variable par définition, impose de simuler l'éclairage en temps interactif. En 2003, calculer l'image photoréaliste d'une scène, même relativement simple, en moins de quelques dizaines de minutes voire de quelques heures se révélait impossible sans disposer de la puissance d'un supercalculateur. J'ai introduit l'algorithme *fast-light* pour permettre l'interactivité de l'éclairage dans ce contexte au prix d'une contrainte sur le point de vue qui devient fixe-panoramique. Cet algorithme consiste à pré-calculer une base de données d'images panoramiques pour un point de vue donné et pour l'ensemble des directions discrètes d'illumination distantes (donc des sources directionnelles). Il est inspiré de l'observation de Haeberli en 1992 [Hae92] et des travaux autour du light-stage de Paul Debevec [Deb+00]. Le poster *d'époque* en figure 4.1 explique l'algorithme de façon imagée.

La caméra utilisée pour capturer en temps réel l'éclairage du ciel est montrée en figure 4.2. Elle est restée en fonctionnement près de 10 ans sur les toits de l'ENSAM à Cluny. Le temps d'exposition est piloté en continu pour capturer l'éclairage environnant sous la forme d'une image haute dynamique (HDRI).

Le calcul du rendu, en illumination globale, d'une scène éclairée par un environnement distant consiste donc simplement en une somme d'images, constituant le *camp de luminance,* pondérées par la carte d'environnement capturée. La résolution du calcul de l'éclairage et des ombres est directement liée à l'échantillonnage de l'espace de directions d'illumination. Une base de 4096 directions semble être un minimum. Cela correspond à un échantillon tous les trois degrés. La somme pondérée de cette base en image HD reste coûteuse en temps de calcul. J'ai donc développé une méthode d'accélération exploitant les propriétés d'un transformée en ondelette sphérique ([SS95]) et de la transformée moyenne adjointe. La base d'image est échantillonnée en direction d'illumination au niveau le plus fin de la base choisie : l'octaèdre subdivisé et projeté récursivement tel que présenté en figure 4.3. La transformée moyenne associée aux directions de niveau supérieur n l'image moyenne des niveaux $n-1$. L'image HDR de l'environnement lumineux est transformée en ondelette de Haar en appliquant le schéma de lissage décrit dans la publication de Schroder et Sweldens précédemment citée. L'intérêt de cette transformée est qu'elle permet de faire apparaître un grand nombre de coefficients à zéro. La

somme de la base des champs de luminance pondérée par la carte d'environnement, transformée en ondelette, ne considère alors plus qu'un nombre très limité de coefficients, typiquement une trentaine.

Finalement le gain en temps de calcul peut être de l'ordre de x100. Le nombre de coefficients et donc les performances sont totalement indépendantes de la complexité de la scène. Il existe par contre une forte corrélation avec la complexité de l'environnement.
L'intégration du rendu photoréaliste à une scène réelle, en plus de la corrélation lumineuse, nécessite une corrélation photométrique (si ce n'est radiométrique). Emmanuel durand, que j'ai eu la chance de co-diriger lors de sa thèse CIFRE ([Dur13]) intitulée « Etudes de méthodes et outils pour la cohérence visuelle en réalité mixte appliquée au patrimoine » à l'*institut Image ENSAM* et à *on-situ,* a initié ce travail de corrélation en théorisant la chaîne de réalité virtuelle.

La société *on-situ*, dont je suis l'un des cofondateurs, exploite ces travaux dans le dispositif *ray-on*. En voici une description [1] : « Installés sur site, face à l'objet représenté, ray-on livre un point de vue inédit d'un édifice en lui restituant son décor d'origine. *ray-on* superpose les éléments disparus aux fragments existants dans une confrontation immédiate entre passé / passé « recomposé » et présent. [...] Grâce à la technologie *fastlight*, le point de vue évolue en accord avec la lumière du site. L'expérience reconduit le regard et dessine des architectures passées ou à venir dans un environnement capté en temps réel. Le point de vue en réalité augmentée évolue avec le site. Les conditions lumineuses sont restituées de façon continue sur le modèle virtuel, créant des tableaux vivants où réalité et virtualité sont intimement mêlées dans une vision confondante. »

4.4 Conclusion du chapitre

En 2003, nous avions déjà l'intuition que la simulation de l'apparence *vraie* était un prérequis à la réalisation automatique d'images confondantes. Les bases étaient déjà posées : la capture vidéo faisait office de comparable fiable, l'environnement était mesuré en haute dynamique, l'interactivité était centrale dans la perception de l'aspect. Mais certains outils et concepts nous faisaient encore défaut : les algorithmes de rendu non biaisés étaient sous-performants, l'aspect spectral et polarisé de la lumière étaient considérés négligeables et l'indice de réfraction trop complexe pour être utilisé dans la simulation. Nous pouvons mesurer le chemin parcouru.

1. https ://www.on-situ.com/fr/recherche-et-developpement/39/ray-on/ (consulté le 14 avril 2021)

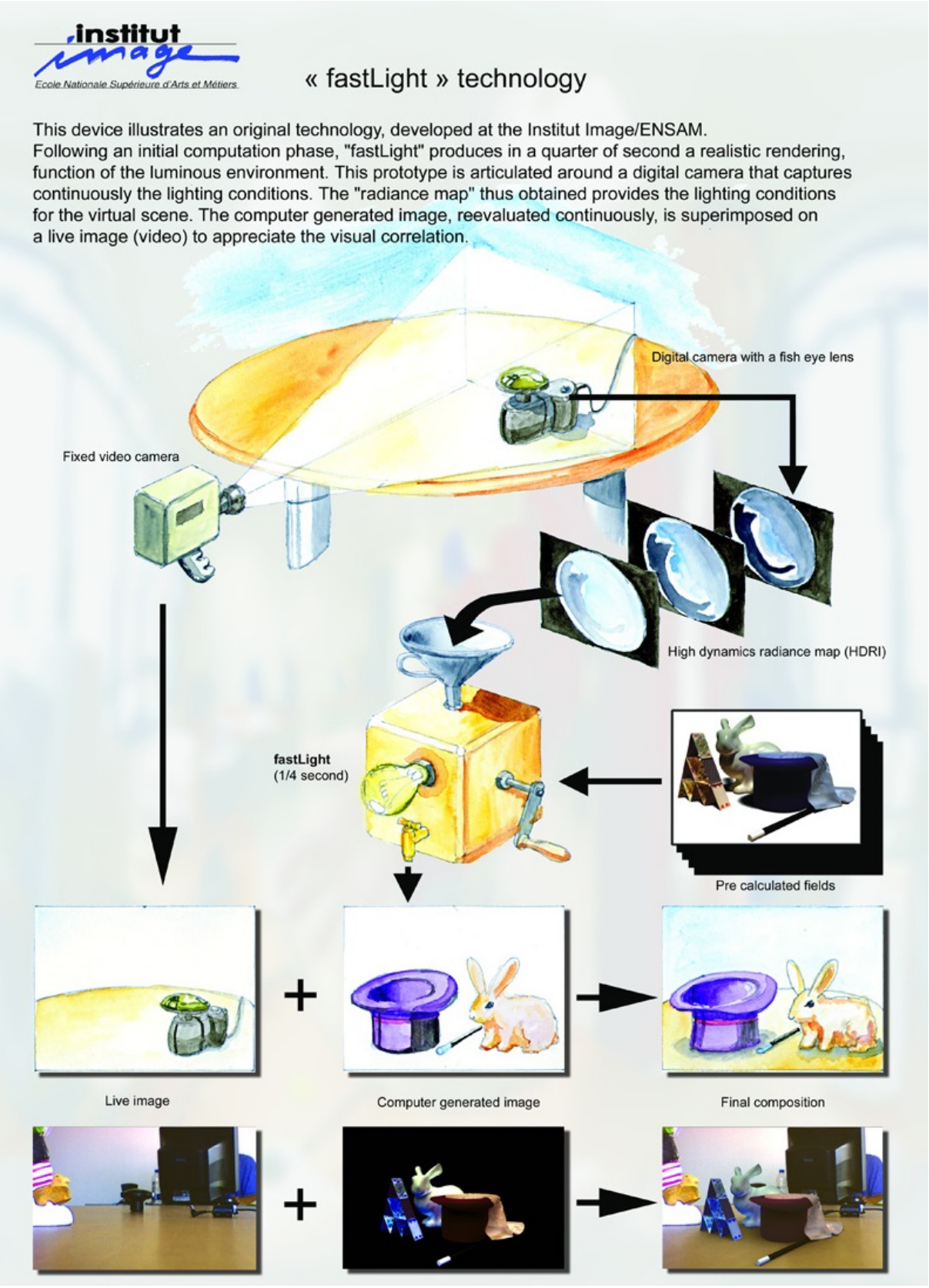


FIGURE 4.1 – Poster expliquant le fonctionnement de l'algorithme fastlight (2003).

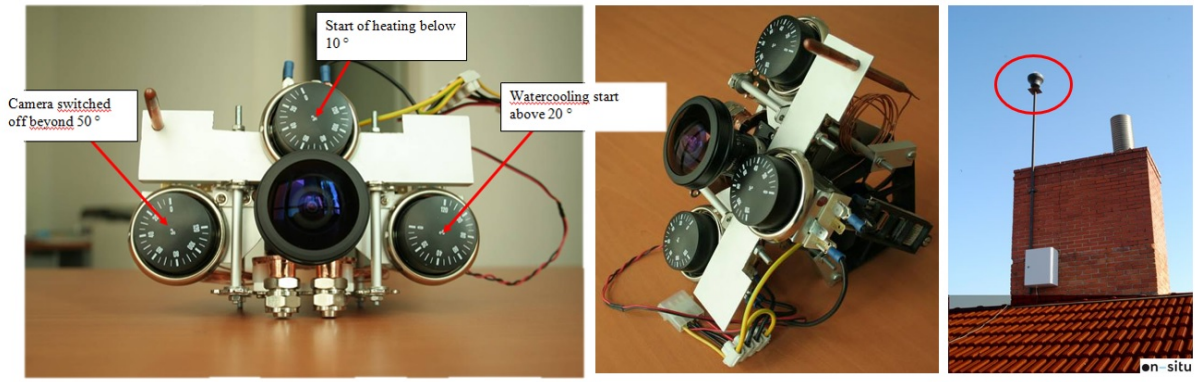


FIGURE 4.2 – Caméra HDRI à capture continue : système de contrôle de température (à gauche), vue du système (au milieu), installation de la caméra sur un mât (à droite).

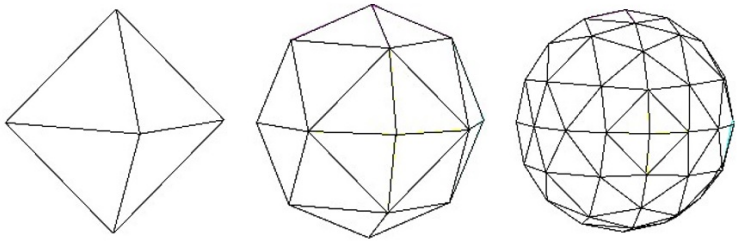


FIGURE 4.3 – Subdivision-projection récursive d'un octaèdre formant une base d'ondelette sphérique.

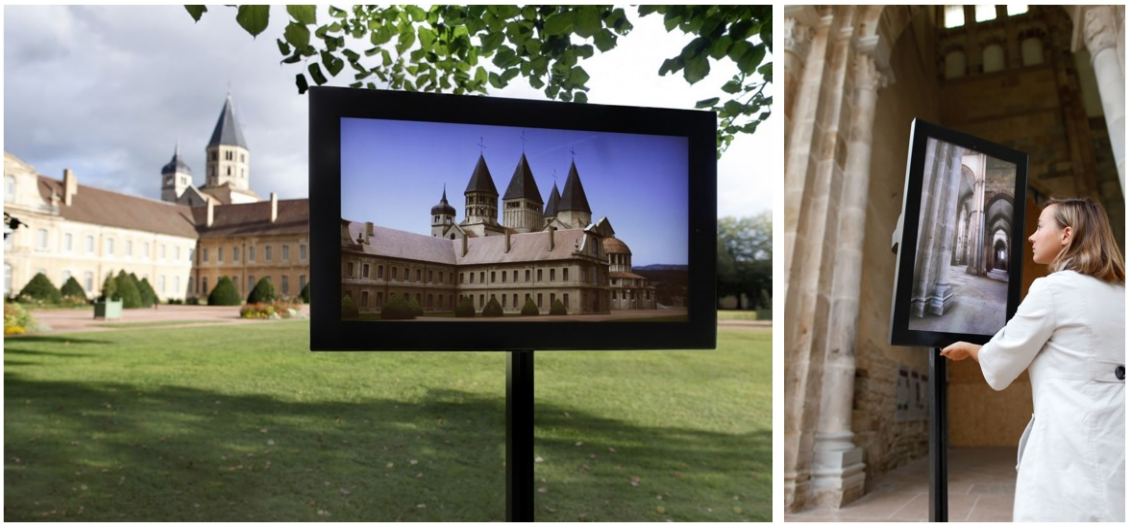


FIGURE 4.4 – Dispositif ray-on. (c) on-situ

Conclusion et perspectives

Conclusion

Les travaux présentés dans ce mémoire de doctorat s'intéressent à la problématique de la conception de l'apparence assistée par ordinateur, la CA²O. Au début des années 2000, alors que je commençais à étudier ce sujet sans l'avoir formellement nommé, le rendu basé physique n'était pas encore la norme. C'est pourtant, comme nous le montrons au chapitre 1, le premier verrou à lever pour réaliser des simulations prédictives. De toute évidence la simulation prédictive est une étape indispensable pour intégrer un domaine de CAO quel qu'il soit. Toutefois nous montrons également que cela ne suffisait pas pour faire un rendu « vrai ». En effet il faut pouvoir *prédire* mais aussi *faire*, en d'autres termes, la prévision doit être réalisable. Pour s'assurer de la faisabilité nous proposons de réaliser des simulations basées mesures. Ce sont des simulations dont les données d'entrée sont des mesures d'échantillons réels (sources, matériaux et capteurs). À ce sujet nous présentons deux contributions l'une à l'échelle micro (chapitre 2) et l'autre à l'échelle macro (chapitre 3) . A l'échelle micro nous montrons qu'il est possible de formuler un matériau composite à partir des indices optiques mesurés des composants et de la morphologie du système. Un exemple est donné pour un composite hématite-époxy. Cette approche reste pourtant relativement complexe à réaliser puisqu'il faut maîtriser la fabrication de matière à l'échelle du nanomètre et être en mesure de la caractériser parfaitement. Par contre l'étude à l'échelle macroscopique a montré qu'il était possible de réaliser des images prédictives à partir de mesures de BRDF, de luminance goniométrique d'écran, de sources et des courbes de réponses spectrales de capteurs .

En plus de nécessiter des simulations prédictives de situations réalisables, la CA²O doit permettre la production de données visuelles appréciables par l'œil humain. En effet nous avons montré que l'apparence esthétique autant que fonctionnelle ne peut pas être évaluée uniquement sur des données numériques ou des descriptions verbales. Juger de l'apparence fait appel au jugement sensible de chacun. Il faut donc permettre la réalisation de l'image mentale au plus proche de ce qui aurait été perçu en situation réelle. Pour cela nous proposons un comparable fiable, répétable et disponible partout : la photographie. Simuler la photographie d'un objet avant qu'il n'existe. J'ai nommé cette approche l'*iso-photographie* (la racine iso voulant dire « égale à »). Simuler une photographie c'est s'en attribuer le caractère d'objectivité. De la même façon qu'une photographie témoigne avec certitude de ce qui a été, une iso-photographie témoigne avec certitude de ce qui pourrait être. L'approche iso-photographique est l'objet de travaux récents présentés au chapitre 3 sur un exemple concret.

L'interaction est un élément essentiel pour la perception de l'apparence intrinsèque. En effet changer l'éclairage, prendre un objet dans ses mains et le faire bouger, tourner autour, sont autant de manières pour le cerveau d'enregistrer des informations sur l'objet et d'être ensuite capable de le projeter mentalement dans un autre contexte. La chaîne de CA²O ne serait donc pas complète sans la prise en compte de l'interactivité. Au chapitre 4 nous avons développé une méthode de composition réel-virtuel en images confondantes éclairées interactivement par le ciel du moment. Cette méthode est intégrée au

dispositif ray-on depuis 2006. Par la suite, comme c'était prévisible, les capacités de calcul ont augmenté et l'interactivité de mouvement est devenue possible en simulation prédictive sur supercalculateur. Nous montrons sur un cas d'étude récent qu'un affichage en rendu prédictif est maintenant possible en moins de deux secondes pour un modèle comportant plusieurs millions de polygones.

Les méthodes décrites dans ce mémoire ont contribué aux ressources technologiques de deux sociétés : *on-situ* fondée en 2006 et *United Visual Researchers* fondée en 2017. Elles sont utilisées chaque jour dans des installations muséographiques (Musée de l'architecture et du patrimoine à Paris, Abbatiale de Cluny en Bourgogne, etc.), et chez des industriels pour la conception de nouveaux produits.

Perspectives

Passer de l'image de synthèse illustrative à l'image de synthèse iso-photographique c'est passer de la peinture du XIXe siècle) à la photographie de Nicéphore Niepce. Bien sûr le peintre peut utiliser la *camara obscura* connue depuis l'antiquité afin de produire une image *photoréaliste* mais seule la photographie est gage de vérité, car il n'y a pas d'autre intervention humaine que le choix de l'instant. L'iso-photographie ouvre des perspectives de recherche liées à la *vérité* : L'iso-photographie induit la confiance.

Nous avons abordé au chapitre 1 les applications industrielles de l'iso-photographie pour la CA^{2}O. Jusqu'à présent nous avons montré uniquement des cas d'usage en environnement contrôlé (en cabine lumière). Il serait inédit de réaliser cela dans un environnement naturel. Prédire l'apparence exacte d'un objet dans un environnement extérieur nécessite la capture de cet environnement en mode spectral et polarisé. Nous l'avons réalisé en *images confondantes* chez *on-situ*, nous voulons maintenant le réaliser en *image vraies* chez *UVR*. Des expérimentations sont en cours à partir de captures réalisées par le dispositif D-SP conçu lors de la thèse de Philippe Porral [Por16] (figure 4.5).

FIGURE 4.5 – Dispositif de capture d'environnements lumineux en mode spectral (à gauche). Vue équirectangulaire RGB d'une capture et reproduction du spectre d'un pixel (à droite).

Mais l'*image vraie* a des applications dans d'autres domaines que celui de la conception de l'apparence. Le premier d'entre eux est l'intelligence artificielle. En effet, le *talon d'achille* de l'IA réside dans les données d'entrée pour l'apprentissage. Suivant le cas d'étude il peut être très difficile d'obtenir ou de créer une base de données complète d'images enregistrées par un capteur donné. Simuler des iso-photographies c'est être capable de produire une base de données complète d'images représentant une vérité terrain. Cette base de données simulée peut servir de base d'apprentissage avec la même fiabilité que des captures réelles. Le gain de temps est indiscutable puisqu'une seule journée de calcul sur un supercalculateur permet de générer des dizaines de milliers d'images sans avoir à réaliser la prise de vue réelle avec une caméra, présenter les échantillons, etc. Plusieurs configurations peuvent même être évaluées afin de trouver la meilleure solution de capture possible. Par exemple, pour une application de reconnaissance de forme sur une chaîne de fabrication, le modèle de caméra, sa position, l'éclairage,

etc. pourraient être choisis très en amont de la mise en place de la chaîne sur la base des performances du système prédites par simulations iso-photographiques. La question de recherche serait de savoir quelle est la performance d'un système entraîné sur une base simulée par rapport à un entraînement sur une base réelle ? Quels sont les critères pour la constitution d'une base iso-photographique ?

Dans le domaine du véhicule autonome, la simulation de capteurs et d'environnements réels permettrait d'éviter une grande partie des roulages effectués actuellement pour validation des algorithmes. En effet, afin de s'assurer que ces algorithmes réagissent au mieux dans toutes les situations possibles les constructeurs sont amenés à faire circuler sur des milliers de kilomètres les prototypes dans des environnements réels. Cela a un coût très important et comporte des risques. Une solution serait de faire rouler virtuellement ces véhicules, mais pour cela il faut simuler un environnement réel et simuler le comportement du capteur. Celui-ci peut être sensible à la polarisation , aux infrarouges, à la saturation, etc.La chaine iso-photographique (il faudrait dire iso-capteur dans ce cas) peut jouer un rôle important dans cette approche. Parfois des modules « intelligents » de fournisseurs sont intégrés sans en connaître le fonctionnement interne (module de détection de piétons par exemple). Dans ce cas, il serait très utile de pouvoir les valider en fonctionnement en mode intégré dans la chaîne de simulation. On parle de « hardware in the loop ». L'iso-photographie viendrait en entrée du module afin de donner l'illusion du réel et permettre la validation en toute sécurité. La question est ici de savoir quelle information simuler ? comment la présenter au module ? Quels sont les critères de validation ?

Dans certains domaines l'interaction est primordiale pour l'appréciation de l'apparence. Comme nous l'avons vu dans l'exemple de la joaillerie. Il serait intéressant d'étudier l'apport de dispositifs d'interaction fine en réalité augmentée et en visualisation iso-photographique sur les décisions de designers et de créatifs. Substituer l'objet par un objet factice et, par un jeu de miroir, visualiser son image prédictive permettrait une interaction colocalisée à échelle 1. Dans cette étude la distance perceptuelle entre l'expérience réelle et l'expérience virtuelle pourrait être réduite au maximum. Quelle serait alors la performance des choix de l'utilisateur ? De façon générale peut on déterminer une métrique et des conditions pour lesquelles la simulation iso-photographique interactive peut remplacer définitivement le prototypage ? Comment éduquer l'œil du spécialiste à juger de l'apparence sur la base d'une l'iso-photographie ?

Certains sujets doivent également être approfondis concernant la chaîne iso-photographique. Cela concerne :

— Une recherche permanente pour améliorer les dispositifs de capture de BSDF. Le projet BiRD [2] en cours vise à harmoniser et standardiser les représentations, les modèles et les mesures des propriétés optiques des matériaux.
— La fluorescence et la phosphorescence doivent pouvoir être prises en compte dans les moteurs de rendu. Alexander Wilkie a initié des travaux dans ce sens.
— La caractérisation des capteurs et en général des systèmes imageurs est encore rudimentaire. La

2. https ://www.birdproject.eu/

société DXOMark [3] propose des solutions complètes mais uniquement dans le domaine trichrome (RGB). Pour produire des iso-photographies il est indispensable de passer en mode spectral-polarisé.

— Bien sûr la vitesse de convergence des algorithmes peut et doit être améliorée afin d'atteindre le temps réel ($\sim$ 60 images par secondes). Les meilleures performances que nous ayons atteint à ce jour en simulation iso-photographique sont de l'ordre de une frame HD convergée (sans bruit) par seconde sur supercalculateur.

— Le bruit chromatique dans l'image est un sujet de recherche particulièrement sensible. En effet, par nature les algorithmes que nous utilisons sont stochastiques. Ils convergent vers la solution juste à l'infini mais produisent du bruit dans un temps de convergence limité. Des algorithmes de débruitage sont utilisés pour améliorer la lisibilité de l'image mais au dépend de sa justesse. Il est indispensable de pouvoir donner à l'utilisateur une idée de l'erreur possiblement induite par le débruitage. De plus, le rendu spectral permet de simuler la dispersion chromatique. Cela a également une influence sur le bruit.

Sous une approche plus fondamentale, en continuité du projet ANR L.I.M.A, je trouverais enfin passionnant de travailler sur la prédiction de l'apparence à partir de la structure même des molécules et des atomes, de leur agencement cristallographique, de la réalisation de matériaux composite, de la rugosité et de la texturation macroscopique. En d'autre termes : la simulation optique *ab-initio*.

3. https ://www.dxomark.com/

Bibliographie

[Bar64] Roland Barthes. “Rhétorique de l’image”. In : *Communications* 4.1 (1964), p. 40-51.

[Ben07] A Benoit. “Le système visuel humain au secours de la vision par ordinateur”. Thèse de doct. INP Grenoble, 2007, p. 202.

[Boh+19] P Boher, T Leroux, T Muller et P Porral. “Accurate physico-realistic ray tracing simulation of displays”. In : *IS and T International Symposium on Electronic Imaging Science and Technology*. T. 2019. 6. 2019.

[BW99] Max Born et Emil Wolf. *Principles of Optics*. University of Cambridge, 1999, p. 952.

[Cal17] Patrick Callet. “nmmm ” nano-micro-meso-macro ” Colour and appearance – a multiscale approach”. In : *Colour Imaging Conference* September (2017).

[CMP16] Patrick Callet, Thomas Muller et Philippe Porral. “Metallic Reflections in the City”. In : *AIC2016 Interim Meeting*. Santiago (Chile) : AIC, 2016, p. 1-5.

[CTM01] Patrick Callet, Yann Tabouret et Thomas Muller. “Les Peintures à Effet”. In : *Ecole de printemps sur la couleur des matériaux*. Roussillon (France) : okhra/CNRS, 2001.

[Cal98] Patrick. Callet. *Couleur-lumière ; Couleur matière : interaction lumière-matière et synthèse d’images*. Diderot Editeur, 1998.

[Col09] Edward Collett. *Field Guide to Polarization*. SPIE, 2009.

[CT82] Robert L. Cook et Kenneth E. Torrance. “A Reflectance Model for Computer Graphics”. In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 1.1 (1982), p. 7-24.

[Dal+16] Alessandro Dal Corso, Jeppe Revall Frisvad, Thomas Kim Kjeldsen et Jakob Andreas Bærentzen. “Interactive Appearance Prediction for Cloudy Beverages”. In : *Workshop on Material Appearance Modeling (MAM 2016)*. 2016, p. 1-4.

[Dav01] Laurent David. “La photo- simulation La place de l’image L’origine de la synthèse d’image L’image comme outil de conception Les composantes du réalisme Vers de nouvelles méthodes de travail”. In : *Lux la revue de l’éclairage* 214 (2001), p. 59-66.

[De 09] Livio De Luca. *La photomodélisation architecturale*. Eyrolles, 2009, p. 264.

[Deb+00] Paul Debevec, Tim Hawkins, Chris Tchou, H. P. Duiker, Westley Sarokin et Mark Sagar. “Acquiring the reflectance field of a human face”. In : *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics*. 2000, p. 145-156.

[Des41] René Descartes. *Méditations Métaphysiques*. 1641.

[Dur13] Emmanuel Durand. “Etudes de méthodes et outils pour la cohérence visuelle en réalité mixte appliquée au patrimoine”. Thèse de doct. ENSAM, 2013, p. 122.

[ESM13] Ulrich Engelke, Mariska G. M. Stokkermans et Michael J. Murdoch. “Visualizing lighting with images : converging between the predictive value of renderings and photographs”. In : *Human Vision and Electronic Imaging XVIII*. T. 8651. 2013, p. 86510L.

[FMP01] Philippe Fuchs, Guillaume Moreau et Jean-Paul Papin. *Le Traité de la Réalité Virtuelle*. Presses des mines, 2001.

[Gor+84] Cindy M Goral, Kenneth E Torrance, Donald P Greenberg et Bennett Battaile. “Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces”. In : *Computer Graphics* 18.3 (1984).

[Hae92] P Haeberli. *Synthetic Lighting for Photography*. 1992.

[Hec16] Eugene Hecht. *Optics*. Pearson, 2016.

[JF03] Garrett M Johnson et Mark D Fairchild. "Rendering HDR Images". In : *Final Program and Proceedings - IS and T/SID Color Imaging Conference*. 2003, p. 36-41.

[Kaj86] James T Kajiya. "The rendering equation". In : *Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1986*. T. 20. 4. 1986, p. 143-150.

[KP96] Konrad F Karner et Manfred Prantl. "A Concept for Evaluating the Accuracy of Computer Generated Images". In : *12th Spring Conference on Computer Graphics*. 1996, p. 145-154.

[Kar25] M V Kartschaguin. "Polarisation de la lumière diffuse du ciel". In : *J. Phys. Radium* 6.1 (1925), p. 10-19.

[KL11] Duck Bong Kim et Kwan H Lee. "Computer-aided appearance design based on BRDF measurements". In : *CAD Computer Aided Design* 43.9 (2011), p. 1181-1193.

[KM31] P. Kubelka et F. Munk. "Ein Beitrag Zur Optik Der Farbanstriche". In : *Zeitschrift für Technische Physik* 12 (1931), p. 593-601.

[Led+05] Patrick Ledda, Alan Chalmers, Tom Troscianko et Helge Seetzen. "Evaluation of tone mapping operators using a high dynamic range display". In : *ACM Transactions on Graphics*. T. 24. 3. ACM PUB27 New York, NY, USA, 2005, p. 640-648.

[LSC04] Patrick Ledda, Luis Paulo Santos et Alan Chalmers. "A local model of eye adaptation for high dynamic range images". In : *ACM International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality and Visualisation in Africa*. May 2014. 2004, p. 151-160.

[Ler+04] G Lerosey, J De Rosny, A Tourin, A Derode, G Montaldo et M Fink. "Time reversal of electromagnetic waves". In : *Physical Review Letters* 92.19 (2004), p. 193904-1.

[Lév+99] Pierre-Oscar Lévy, Gabriel Turkieh, Jean-Michel Sanchez et Julien Roger. *Relief de l'invisible - Papillon*. 1999.

[Lur17] Guillaume Lurçon. *RÉFLEXION ET CONVERSION*. 2017.

[McN01] A. McNamara. "Visual perception in realistic image synthesis". In : *Computer Graphics Forum* 20.4 (2001), p. 211-224.

[Med+16] Victor Medina, Thomas Muller, Dominique Lafon-Pham, Alexis Paljic et Philippe Porral. "Objective colorimetric validation of perceptually realistic rendering : a study of paint coating materials". In : *Journal of Electronic Imaging* 25.6 (2016), p. 61609.

[Mey00] Gary W Meyer. "Computer Aided Color Appearance Design". In : *CGIP' 2000 : Proceedings of the first international conference on color in graphics and image processing*. 2000, p. 195-200.

[Mey+86] Gary W Meyer, Holly E Rushmeier, Michael F Cohen, Donald P Greenberg et Kenneth E Torrance. "An experimental evaluation of computer graphics imagery". In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 5.1 (1986), p. 30-50.

[MFW18] M. Mojzík, A. Fichet et A. Wilkie. "Handling Fluorescence in a Uni-directional Spectral Path Tracer". In : *Computer Graphics Forum* 37.4 (2018), p. 77-94.

[Mul+15] T. Muller, P. Callet, F. da Graça, A. Paljic, P. Porral et R. Hoarau. "Predictive rendering of composite materials : a multi-scale approach". In : *SPIE-IS&T*. Sous la dir. de Maria V. Ortiz Segovia. T. 9398. SPIE, 2015, p. 939804.

[Mul+03a] Thomas Muller, Jean Michel Sanchez, Julien Roger et Thomas Dumorey. "Espace et lumière, vers une simulation interactive de l'éclairage". In : *Maquette Virtuelle et Patrimoine*. Cluny (France), 2003, p. 13-14.

[Mul+03b] Thomas Muller, Jean-Michel Sanchez, Julien Roger et Olivier Prat. "Interactive Photorealistic Illumination for Distant Environments". In : *Virtual Retrospect*. 2003, p. 97-99.

[Nic+77] Fe Nicodemus, JC Richmond, JJ Hsia, Iw Ginsberg et T Limperis. *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*. Rapp. tech. Institute for Basic Standards, 1977.

[Nic65] Fred E. Nicodemus. "Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface". In : *Applied Optics* 4.4 (1965), p. 775.

[Nim+19] Merlin Nimier-David, Delio Vicini, Tizian Zeltner et Wenzel Jakob. "Mitsuba 2 : A retargetable forward and inverse renderer". In : *ACM Transactions on Graphics* 38.6 (2019), p. 17.

[OMF04] Ofelia Ortega, Thomas Muller et Louis-François Fléri. "New technologies and iconography language in thecreativity process". In : *CST International Conference, J.* Barcelona, 2004.

[Pat+97] Sumanta N Pattanaik, James A Ferwerda, Kenneth E Torrance et Donald Greenberg. "Validation of global illumination simulations through CCD camera measurements". In : *Final Program and Proceedings - IS and T/SID Color Imaging Conference*. 1997, p. 250-253.

[PDM98] Jitendra Malik Paul Debevec, Paul E Debevec et Jitendra Malik. "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs Paul E . Debevec". In : *ACM Transactions on Graphics* (1998), p. 369-378.

[PJH16] Matt Pharr, Wenzel Jakob et Greg Humphreys. *Physically based rendering : From theory to implementation : Third edition*. Morgan Kaufmann, 2016, p. 1-1233.

[Pho75] Bui Tuong Phong. "Illumination for computer generated pictures". In : *Communications of the ACM* 18.6 (1975), p. 311-317.

[Por+18] P Porral, Laurent Lucas, T Muller, J Randrianandrasana et L Lucas. "Iso Photographic Rendering". In : *Workshop on Material Appearance Modeling*. 2018.

[Por16] Philippe Porral. "Environnements lumineux naturels en mode : Spectral et Polarisé. Modélisation, Acquisition, Simulation". Thèse de doct. Paris : PSL, 2016.

[Por+15] Philippe Porral, Patrick Callet, Philippe Fuchs, Thomas Muller et Etienne Sandré-Chardonnal. "High dynamic, spectral, and polarized natural light environment acquisition". In : *SPIE-IS&T*. Sous la dir. de Ralf Widenhorn et Antoine Dupret. T. 9403. 0. SPIE, 2015, 94030B.

[PMC16] Philippe Porral, Thomas Muller et Patrick Callet. "Spectral and Polarized Environment Imaging". In : *AIC2016 Interim Meeting*. T. Poster. 2016.

[Ran20] Joël Randrianandrasana. "Rendu réaliste de matériaux multicouches à l'aide de matrices de transfert". Thèse de doct. Université de Reims Champagne-Ardenne École, 2020, p. 125.

[RCL21] Joël Randrianandrasana, Patrick Callet et Laurent Lucas. "Transfer matrix based layered materials rendering". In : *ACM Transactions on Graphics* 40.4 (2021).

[Ran+18] Joël Randrianandrasana, Arnaud Chanonier, Hervé Deleau, Thomas Muller, Philippe Porral, Michael Krajecki et Laurent Lucas. "Multi-user predictive rendering on remote multi-GPU clusters". In : *2018 IEEE 4th VR International Workshop on 3D Collaborative Virtual Environments, 3DCVE 2018*. 3DCVE. 2018, p. 1-4.

[Ran+17] Joël Randrianandrasana, Arnaud Chanonier, Alexis Paljic, Laurent Lucas, Thomas Muller, Philippe Porral et Michael Krajecki. "Rendu prédictif interactif sur clusters hybrides multi-GPU". In : *AFIG*. 2017.

[SS95] Peter Schroder et Wim Sweldens. "Spherical wavelets : efficiently representing functions on the sphere". In : *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics*. T. 29. Annual Conference Series. 1995, p. 161-172.

[Ser00] Serge Berthier. *La couleur des papillons ou l'impérative beauté : propriétés optiques des ailes de Papillons*. Springer, 2000, p. 128.

[Sèv97] Robert Sève. *Physique de la couleur*. Dunod, 1997, p. 334.

[Shi+96] Steve Shiang-Feng Chen, Jerry Wei-Chieh Li, Kenneth E. Torrance et S. N. Pattanaik. *Preliminary Calibration of the Photometrics PXL1300L CCD Camera*. Rapp. tech. Cornell University, 1996, p. 101.

[Shi09] Clement Shimizu. "Computer Aided Design for Color Appearance". Thèse de doct. University Of Minnesota, 2009, p. 162.

[SBV19] Lionel Simonot, Pierre Boulenguez et Françoise Viénot. *Quand la matière diffuse la lumière*. 2019, p. 456.

[SM92] Brian E. Smits et Gary W. Meyer. "Newton's Colors : Simulating Interference Phenomena in Realistic Image Synthesis". In : *Photorealism in Computer Graphics*. Springer Berlin Heidelberg, 1992, p. 185-194.

[Tak+90] Atsushi Takagi, Hitoshi Takaoka, Tetsuya Oshima et Yoshinori Ogata. "Accurate rendering technique based on colorimetric conception". In : *Computer Graphics (ACM)* 24.4 (1990), p. 263-272.

[UWP05] Christiane Ulbricht, Alexander Wilkie et Werner Purgathofer. "Verication of Physically Based Rendering Algorithms". In : *Eurographics Symposium on Rendering*. T. 25. 2. 2005, p. 237-255.

[Wal+07] Bruce Walter, Sr Stephen R Marschner, Hongsong Li et Kenneth E Torrance. "Microfacet models for refraction through rough surfaces". In : *Eurographics* (2007), p. 195-206.

[Wal54] Grey Walter. *Le cerveau vivant*. Sous la dir. de Neuchatel - Paris Delachaux et Niestlé. Delachaux et Niestlé, 1954.

[Wil+09] Alexander Wilkie, Andrea Weidlich, Marcus Magnor et Alan Chalmers. "Predictive rendering". In : *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Courses on - SIGGRAPH ASIA '09* (2009), p. 1-428.

[Zha00] Zhengyou Zhang. "A flexible new technique for camera calibration". In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22.11 (2000), p. 1330-1334.

Annexes

Définitions

Angle solide

Extension tridimensionnelle de l'angle 2D. L'angle solide est utilisé pour mesurer la portion d'espace occupée par un objet vu depuis un point de l'espace.

Définition : L'angle solide sustenté par un objet depuis un point P, est l'aire de la projection de cet objet sur une sphère unitaire centrée au point P. Son unité est le stéradian (sr).

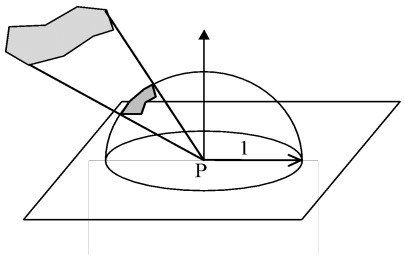


FIGURE 6 – Angle solide

Caustique

Définition : Concentration de lumière produite par réflexion ou réfraction sur une surface courbe. Exemple : la tache lumineuse produite, sur une table, par la lumière du soleil passant au travers d'un verre d'eau.

Corps Noir

Définition : Corps hypothétiquement parfait qui absorbe l'ensemble du rayonnement qu'il reçoit et dont l'émissivité est maximale.

Diagramme Goniométrique

Définition : Représentation graphique d'une fonction de distribution sphérique.

Gamut

Définition : Le gamut est une cartographie de l'espace des couleurs disponibles pour un périphérique donné. On utilise habituellement les espaces CIE xyY ou L∗ a∗ b∗ pour le représenter.

gonioreflectomètre

Définition : Appareil de mesure de la BRDF. Mécaniquement ou optiquement, cet appareil vient relever la réflectance pour toutes les directions d'observation et toutes les directions d'illumination.

Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

Fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle. La BRDF décrit, la à l'échelle macroscopique, le comportement de la lumière en réflexion sur un matériau donné. Elle caractérise donc optiquement le dit matériaux.

Définition : BRDF est le rapport entre la luminance réfléchie dans la direction ω_r, $L_r(\omega_r)$, et l'éclairement depuis la direction ω_i qui le produit, $L_i(\omega_i)\cos\theta_i \, \mathrm{d}\,\omega_i$. Cette fonction est positive, car elle représente une distribution et appartient à l'intervalle $[0, \infty]$. Elle a pour unité le sr^{-1} (concentration de flux par stéradian).

$$\rho_r(\omega_i, \omega_r) = \frac{\mathrm{d}\, L_r(\omega_r)}{\mathrm{d}\, E_i(\omega_i)} = \frac{\mathrm{d}\, L_r(\omega_r)}{L_i(\omega_i)\cos\theta_i \, \mathrm{d}\,\omega_i} \tag{1}$$

Flux

Définition : Énergie quittant ou arrivant sur une surface donnée par unité de temps. Unité le Watt (W)

Intensité de rayonnement

Définition : Flux ϕ émis ou reçu en un point par unité d'angle solide. Unité $\mathrm{W\,sr}^{-1}$.

$$I(x, \omega) = \frac{\mathrm{d}\,\phi(x)}{\mathrm{d}\,\omega} \tag{2}$$

Eclairement

Définition : L'éclairement E d'une surface est la puissance énergétique arrivant en un point d'une surface, par unité d'aire. Son unité est le $\mathrm{W\,m}^{-2}$.

$$E(x,\omega) = \frac{\mathrm{d}\,\phi(x)}{\mathrm{d}\,A} \tag{3}$$

Isotropie

Définition : On dit qu'une surface est isotrope si sa réponse à une onde lumineuse incidente dépend uniquement de l'angle polaire d'incidence et non de son azimut.

Luminance

Définition : la luminance L est la quantité d'énergie voyageant en un point selon une direction donnée, par unité de temps, par unité d'aire perpendiculaire à la direction de déplacement, par unité d'angle solide. Son unité est le $\mathrm{W\,m^{-2}\,sr^{-1}}$.

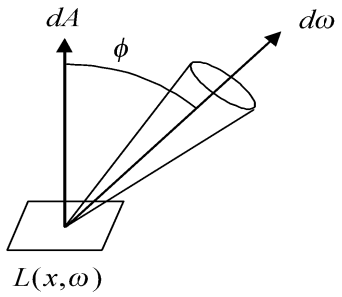


FIGURE 7 – Géométrie pour la luminance

$$L(x,\omega) = \frac{\mathrm{d}^2\,\phi(\omega)}{\mathrm{dA}\cos(\theta)\,\mathrm{d}\omega} \tag{4}$$

θ : Angle entre $\vec{\omega}$ et la normale à la surface dA.

Photométrie

Définition : Science de la mesure de la sensation visuelle produite par un spectre électromagnétique.

Flux lumineux

Définition : Énergie lumineuse totale émise par une source ou reçue par une surface, telle que perçue par l'œil humain, selon le facteur de visibilité relatif établi par la CIE. Unité : le Lumen (lm).

$$\begin{aligned} \phi(\lambda_0) &= 680 V(\lambda_0)\phi_e(\lambda_0) \\ \Phi &= 680 \int_0^\infty V(\lambda)\phi_e(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda \end{aligned} \tag{5}$$

$\phi(\lambda_0)$ Le flux lumineux. Φ Le flux lumineux pour un spectre complet $\phi_e(\lambda)$ Le flux énergétique du spectre pour une longueur d'onde donné $V(\lambda)$ La courbe de sensibilité relative de l'œil humain moyen.

Intensité lumineuse

Définition : Flux lumineux traversant un point de l'espace par unité d'angle solide. Unité : le Candela (cd = lm.sr^{-1})

Eclairement lumineux

Définition : Flux lumineux parvenant en une surface par unité d'aire. Unité : le lux (lm.m^{-2})

Luminance lumineuse

Définition : Intensité lumineuse par unité d'aire. Unit : cd.m^{-2} = lux.sr^{-1} = lm.m^{-2}.sr^{-1}

Tableau des unités radiométriques et photométriques

Concept Physique	**Terme radiométrique**	**Unités radiométriques**	**Terme photométrique**	**Unités photométriques**	**Symbole**
Energie	Energie radiante	Joule [J = kg m^2 s^{-2}]	Energie lumineuse	Talbot	W
Flux	Flux	Watt [W = J s^{-1}]	Flux lumineux	Lumens [Talbot/s]	Φ
Densité Angulaire de Flux	Luminance	[W m^{-2} sr^{-1}]	Luminance lumineuse	Candela/m^2 ou Lux/sr ou lumens/sr.m^2	L
Densité de Flux	Éclairement	[W m^{-2}]	Eclairement lumineux	Lux [lumens/m^2]	E
Densité de Flux	Radiosité	[W m^{-2}]	Luminosité	Lux [lumens/m^2]	B
Intensité	Intensité	[W sr^{-1}]	Intensité lumineuse	Candela [lumens/sr]	I

Table 1 – Unités radiométriques et photométriques

Formules générales d'optique

Equations de Maxwell-Lorenz

De grands noms de la physique se sont intéressés à l'électricité et au magnétisme, tel Franklin (1706-1790), Coulomb (1736-1806), Ampère (1775-1836), Gauss (1777-1855), Faraday (1791-1867), mais c'est James Clerk Maxwell (1831-1879) et Hendrik Antoon Lorenz (1853-1928) qui les unifièrent sous une formulation les liant entre elles. Les équations de Maxwell-Lorenz expriment que les champs électrique et magnétique sont fondamentalement intriqués et que la variation de l'un entraîne instantanément la variation de l'autre en même temps et au même point de l'espace. Les équations sont au nombre de quatre. Elles sont fonction du du temps t et de la position dans l'espace :

$$\begin{aligned}
\operatorname{div} \mathbf{D} &= \rho && \text{Équation de } \textit{Maxwell-Gauss} \\
\operatorname{rot} \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} &= \mathbf{J} && \text{Équation de } \textit{Maxwell-Ampère} \\
\operatorname{rot} \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0 && \text{Équation de } \textit{Maxwell-Faraday} \\
\operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 && \text{Absence de monopôle magnétique}
\end{aligned}$$

Avec :

— $\mathbf{E}$: Le champ électrique en $\mathrm{V\,m^{-1}}$

— $\mathbf{B}$: Le champ d'induction magnétique T

— $\mathbf{H}$: L'excitation ou champ magnétique en $\mathrm{A\,m^{-1}}$

— $\mathbf{D}$: L'induction ou déplacement électrique $\mathrm{C\,m^{-2}}$

— ρ : Densité de charges électriques libres dans le milieu en $\mathrm{C\,m^{-3}}$, à valeurs dans $\mathbb{R}$)

— $\mathbf{J}$: Densité de courant, non nulle dès qu'il y a un courant électrique, en $\mathrm{A\,m^{-2}}$, à valeurs dans $\mathbb{R}^3$)

Loi de Lambert

La loi en cosinus de Lambert exprime l'intensité d'une source orthotrope en fonction de l'intensité dans l'axe normal à la surface et de l'angle d'incidence par rapport à cette normale. Elle porte le nom de Johann Heinrich Lambert (1728-1777)

$$I(\theta) = I(0)cos(\theta) \tag{6}$$

Loi de Planck

La loi de Planck permet de déterminer la distribution de luminance énergétique spectrale d'un corp noir chaufé à une température T (figure 8). Elle s'exprime de la façon suivante :

$$L(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \tag{7}$$

Avec :

— L : luminance énergétique spectrale en $(\mathrm{W\,m^{-2}\,nm^{-1}\,sr^{-1}}$
— λ : la longueur d'onde
— c : la vitesse de la lumière dans le vide
— T : la température de surface du corps noir en degré *Kelvin* K
— $\hbar$: la constante universelle de *Planck* : $\hbar \simeq 6.626\,075\,5 \times 10^{-34}$ J s
— k : la constante de *Boltzmann* : $k \simeq 1.380\,648\,8 \times 10^{-23}$ J/K

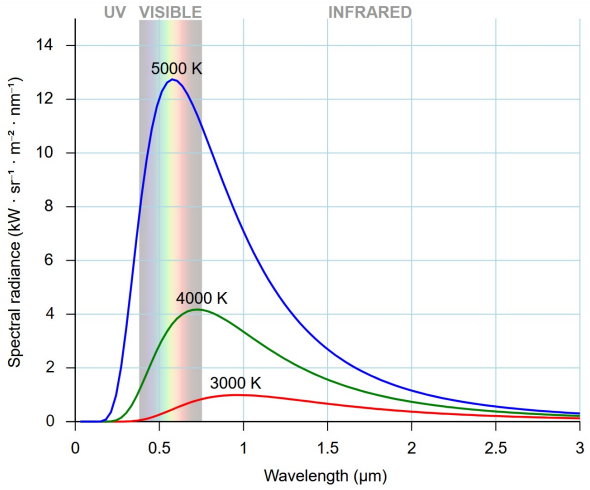


FIGURE 8 – Emission énergétique du corps noir aux différentes températures thermodynamiques.

Lois de Snell-Descartes

Lorsqu'un faisceau de lumière collimaté intersecte un dioptre plan homogène et isotrope, le phénomène de diffusion de la lumière par la matière provoque exactement deux faisceaux l'un réfléchi et l'autre transmi. Les directions de ces faisceaux est déterminé par les lois de Snell-Descartes :

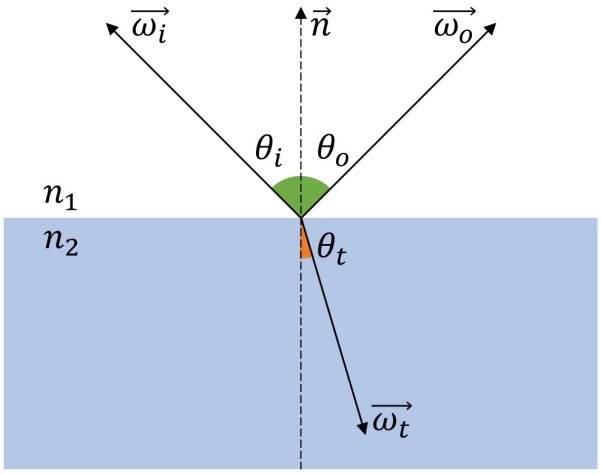


FIGURE 9 – Géométrie de la réflexion et de la transmission

— Le faisceau réfléchi, le faisceau transmis, la normale et le rayon incident sont contenus dans un même plan nommé « plan d'incidence ».

— L'angle θ_r entre la direction du faisceau réfléchi et la normale $\vec{n}$ est égale à l'angle θ_i entre la direction du faisceau incident et la normale. Dans ce cas, la réflexion est dite spéculaire pure.

— L'angle du faisceau transmis, par rapport à la normale du dioptre, obéit à la relation suivante : $\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{n_t}{n_i}$

On remarque que la densité du flux au passage du dioptre est affecté par la lois de Snell-Descartes avec dans la figure suivante $w_i \neq w_o$:

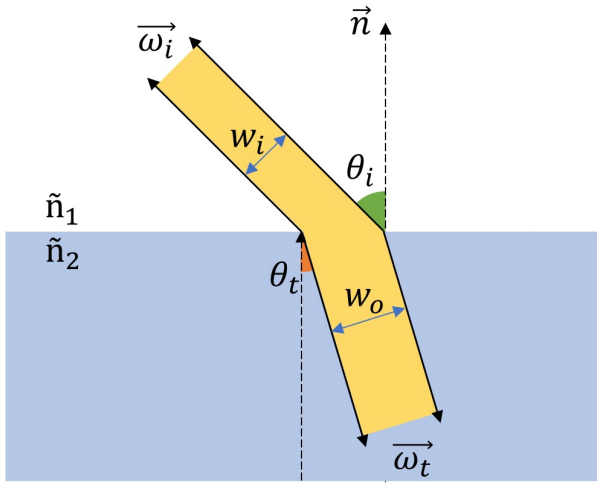


FIGURE 10 – Variation de la densité de flux au passage d'un dioptre

Coefficients de Fresnel

En interaction avec un dioptre idéalement plan constitué de deux milieux homogènes et isotropes, la lumière est diffusée en suivant les lois de snell-descartes (4.4). Dans ce cas la proportion des énergies réfléchies et transmises est déterminée par les coefficients de Fresnel faisant intervenir les indices optiques $\tilde{n}_1$ et $\tilde{n}_1$ des milieux formant le dioptre.

Les équations de Maxwell-Lorenz, qui lient les champs électriques $\overrightarrow{E}$ et magnétiques $\overrightarrow{H}$, permettent d'aboutir aux expressions $r_\perp$, $t_\perp$, $r_\parallel$, $t_\parallel$, appelées *relations de Fresnel*,(Equ. 8) exprimant les rapports d'amplitude des composantes *transverses électriques* $\overrightarrow{E}_\perp$ et et *transverses magnétiques* $\overrightarrow{E}_\parallel$ du champ électrique en réflexion et en transmission tel qu'illustré par la figure 11 :

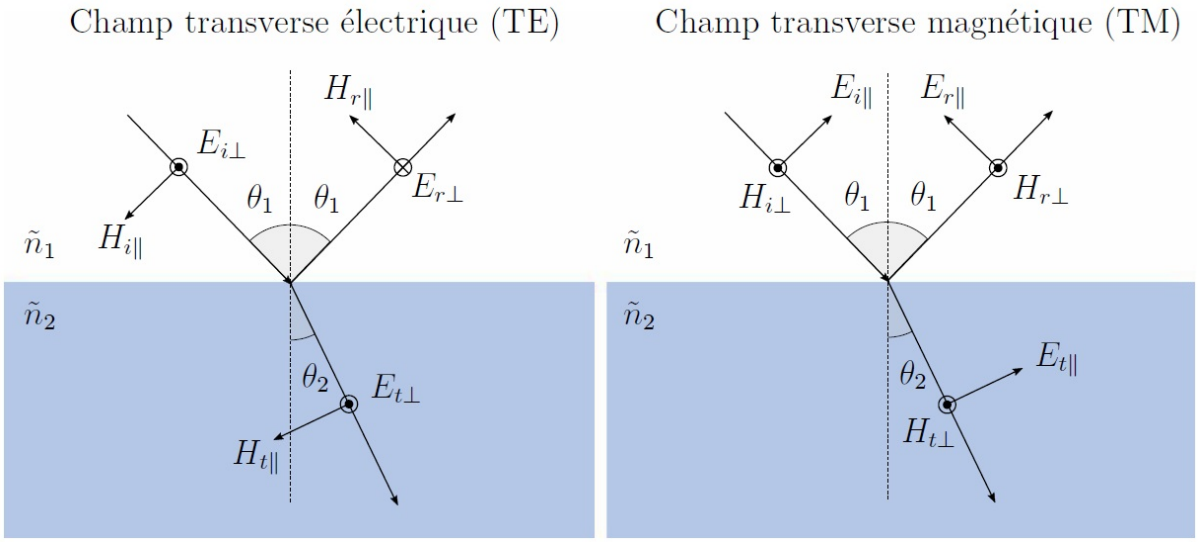


FIGURE 11 – Champ transverse électrique polarisé perpendiculairement au plan d'incidence (à gauche) et champ transverse magnétique polarisé perpendiculairement au plan d'incidence (à droite)

$$
\begin{aligned}
r_\perp &= \frac{\eta_1 \cos\theta_1 - \eta_2 \cos\theta_2}{\eta_1 \cos\theta_1 + \eta_2 \cos\theta_2} \\
t_\perp &= \frac{2\eta_1 \cos\theta_1}{\eta_1 \cos\theta_1 + \eta_2 \cos\theta_2} \\
r_\parallel &= \frac{\eta_1 \cos\theta_2 - \eta_2 \cos\theta_1}{\eta_1 \cos\theta_2 + \eta_2 \cos\theta_1} \\
t_\parallel &= \frac{2\eta_1 \cos\theta_1}{\eta_1 \cos\theta_2 + \eta_2 \cos\theta_1}
\end{aligned}
\tag{8}
$$

Crédits des figures

Figure 1.1, Tulip Chair, Kana, CC-BY-SA 2.5,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tulip_chair.jpg
Figure 1.2, Powdered Sugar,MJ ,CC-BY-SA 4.0,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PowderedSugar.png
Figure 1.7, Prisme , Zátonyi Sándor, CC-BY-SA-3.0,
https://fr.wikipedia.org/wiki/Prisme_(optique)
Figure 1.10, Onde électromagnétique, SuperManu, CC-BY-SA-3.0,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Onde_electromagnetique.svg
Figure 1.11, Polarisation, Briho, CC-BY-SA-3.0,
https://fr.wikipedia.org/wiki/Polarisation_(optique)
Figure 1.14, Gamut, Hankwang, CC-0,
https://fr.wikipedia.org/wiki/Gamut
Figure 1.22, Diner , John Baeder, CC-BY-SA 3.0,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:John%27s_Diner_by_John_Baeder.jpg
Figure 1.26, Daniele Pugliesi, CC-BY-SA 3.0
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chlorophyll_ab_spectra-fr.svg
Figure 1.27, CIE F10-12, Adoniscik, CC-BY-SA 3.0,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE_illuminants_F_10-12.svg
Figure 1.34 Chemins lumineux dans une scène virtuelle, Phrood, CC-BY-SA-2.0-DE,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_transport_paths.svg
Figure 3.9, Filtre de Bayer, Cburnett, CC-BY-SA 3.0
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bayer_pattern_on_sensor.svg
Figure 8 Loi de Planck, Darth Kule,CC BY-SA 4.0
https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=89547467

le cnam

Thomas MULLER

Synthèse d'image iso-photographique pour la Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur

le cnam

Résumé :La notion de « Conception de l'Apparence Assistée par Ordinateur » (CA^2O), apparue à la fin des années 90, est une branche de la CAO traitant plus spécifiquement de l'aspect des matériaux. La CA^2O pourrait être un outil déterminant pour la prise de décision lors des phases de conception des produits manufacturés. Pourtant, alors que de nos jours la maquette numérique a presque totalement supplanté la maquette physique en ce qui concerne le choix de la forme, la détermination des couleurs et des matières passe encore essentiellement par la réalisation d'un ou plusieurs prototypes réels. Ce travail de recherche pose la problématique de la prise de décision liée à l'apparence sur la base d'une simulation en images de synthèse. Cette approche pragmatique permettant le lien entre réel et virtuel constitue dans ce domaine un nouveau paradigme qu'on appellera le rendu *iso-photographique*.

Mots clés : synthèse d'image, iso-photographie, rendu prédictif, BRDF, conception de l'apparence

Abstract : The so-called "Computer Aided Appearance Design" (CA^2D), which emerged in the late 1990s, is a branch of CAD dealing specifically with the appearance of materials. CA^2D could be a key tool for decision-making in the design phases of manufactured products. However, while nowadays the digital model has almost completely superseded the physical model as far as the choice of shape is concerned, the determination of colours and materials still essentially requires the production of one or more real prototypes. This research work raises the issues of decision-making related to appearance on the basis of a computer-generated image simulation. This pragmatic approach allowing a link between real and virtual provides in this field a new concept that we shall call *iso-photographic* rendering.

Keywords : computer generated images, iso-photography, predictive rendering, BRDF, appearance design