



HAL
open science

Étude radiométrique d'un système de projection immersive grand-public pour des applications de réalité mixte

Julien Dehos

► **To cite this version:**

Julien Dehos. Étude radiométrique d'un système de projection immersive grand-public pour des applications de réalité mixte. Informatique [cs]. Université du Littoral Côte d'Opale, 2010. Français. NNT : LITTORA 4727382 . tel-00598616

HAL Id: tel-00598616

<https://theses.hal.science/tel-00598616v1>

Submitted on 7 Jun 2011

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.

Université du Littoral Côte d'Opale

École Doctorale régionale Sciences Pour l'Ingénieur Lille Nord-de-France

Étude radiométrique d'un système de projection immersive grand-public
pour des applications de réalité mixte

Julien DEHOS

Thèse de Doctorat en Informatique

Soutenue le 2 décembre 2010 à Clermont-Ferrand
devant la commission d'examen composée de :

Directeur : Christophe RENAUD, PR, Université du Littoral Côte d'Opale
Co-Directeur : Eric ZÉGHERS, MCF, Université d'Auvergne
Rapporteur : Bernard PÉROCHE, PR, Université Claude Bernard Lyon 1
Rapporteur : Guillaume MOREAU, MCF HDR, École Centrale Nantes
Examineur : Stéphane MERILLOU, MCF HDR, Université de Limoges
Examineur : Laurent SARRY, PR, Université d'Auvergne

Catopsys est une marque déposée par l'Université d'Auvergne.

Remerciements

Je remercie Christophe Renaud et Éric Zéghers d'avoir respectivement dirigé et co-dirigé cette thèse.

Je remercie également Bernard Péroche et Guillaume Moreau d'avoir accepté d'en être les rapporteurs.

Merci à l'ANR (Agence Nationale pour la Recherche) d'avoir soutenu financièrement cette thèse à travers le projet Catopsys (référence ANR-06-RIAM-001).

Enfin, merci pour leur aide à Laurent Sarry, François Rousselle, Benjamin Astre, Rodolphe Crespin, Pierre Pontier, Valentin Mathé, Pawel Lubniewski, René Duguez, Christophe Lohou, Marie-Laure Rivet et tous ceux que j'oublie peut-être ici.

Étude radiométrique d'un système de projection immersive grand-public pour des applications de réalité mixte

Résumé

Le système Catopsys est un système projecteur-miroir-caméra à placer dans une pièce d'habitation quelconque. Il constitue un moyen abordable (coût, installation, utilisation) de réaliser toutes sortes d'applications de réalité mixte immersives. L'objectif de cette thèse est d'étudier et d'optimiser la chaîne de traitement radiométrique mise en oeuvre à travers ce système.

Tout d'abord, les perturbations radiométriques de la caméra sont étudiées puis une méthode de correction, applicable au système Catopsys, est mise au point. Ceci permet, de façon relativement fidèle, d'acquérir l'environnement réel et d'estimer les perturbations issues du projecteur et de la pièce.

L'influence du projecteur et de la pièce, utilisée comme écran de projection, sur l'image visible par l'utilisateur, est ensuite étudiée. Une méthode de compensation de la projection, permettant de rendre l'image visible plus proche de l'image voulue, est proposée.

Après une étude de la géométrie du système Catopsys, des méthodes de simulation d'éclairage spécifiques, dérivées de la méthode de lancer de rayons, sont proposées.

Enfin, les possibilités fournies par le système pour des applications de réalité mixte ainsi que leur intégration dans la chaîne de traitement sont étudiées.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont permis de participer à la mise au point du système Catopsys, d'étudier la faisabilité de différentes fonctionnalités et d'en réaliser certaines. Ils ont également donné lieu à la publication de plusieurs papiers (une conférence internationale, une revue nationale, une conférence nationale).

Mots clés

Réalité mixte, projection immersive, vision par ordinateur, compensation radiométrique, simulation d'éclairage.

Radiometric study of a low-cost immersive projection system for mixed reality applications

Abstract

The Catopsys system is a projector-mirror-camera system which can be set in any room. It is an affordable way (not expensive, easy to install and easy to use) to perform various kinds of immersive mixed reality applications. The aim of this thesis is to study and optimize the radiometric process established through such system.

First of all, radiometric perturbations of the camera are studied, then a correction method, which can be implemented in the Catopsys system, is described. This enables the system to capture, quite faithfully, the real environment and to estimate the perturbations caused by the projector or the room.

The behaviour of the projector and the repercussion of using the room as a projection screen are then studied. A radiometric compensation method of the projection is proposed. This method makes the displayed image be more similar to the desired one.

After a geometric study of the Catopsys system, specific rendering methods, based on ray tracing, are proposed.

Finally, the features provided by the system to perform mixed reality applications, as well as their integration in the system workflow are detailed.

Works done during this thesis permitted us to collaborate to the conception of the Catopsys system, to evaluate the feasibility of some features, to implement some of them and to publish several papers (1 international conference, 1 national journal, 1 national conference).

Keywords

Mixed reality, immersive projection, computer vision, radiometric compensation, rendering.

Table des matières

Liste des Abréviations	10
1 Introduction générale	11
1.1 Motivation de la thèse	11
1.1.1 Réalité virtuelle, réalité mixte	11
1.1.2 Catopsys	11
1.1.3 Objectifs de la thèse	12
1.2 Sommaire	12
1.3 Contributions	13
2 Présentation du système Catopsys	15
2.1 Problématique	15
2.1.1 Affichage immersif	15
2.1.2 Réalité mixte	15
2.1.3 Accessibilité	15
2.2 Solutions existantes	15
2.3 Solution proposée	16
2.3.1 Description	16
2.3.2 Justification	16
2.3.3 Applications	17
2.4 Mise en oeuvre	18
2.4.1 Chaîne de traitement	18
2.4.2 Gestion de la radiométrie	19
3 Étude radiométrique de la caméra	21
3.1 Introduction	21
3.2 Bruit	22
3.2.1 Présentation	22
3.2.2 Étude expérimentale	23
3.2.3 Correction	30
3.3 Variation de sensibilité des photodétecteurs	33
3.3.1 Présentation	33
3.3.2 Étude expérimentale	34
3.3.3 Correction	34
3.4 Vignelage	35
3.4.1 Présentation	35
3.4.2 Étude expérimentale	36
3.4.3 Modélisation	37
3.4.4 Correction	39
3.5 Exposition et réponse du capteur	42
3.5.1 Présentation	42
3.5.2 Étude expérimentale	42
3.5.3 Modélisation de la réponse	43
3.5.4 Correction	44
3.6 Gestion de la couleur	48
3.6.1 Présentation	48
3.6.2 Étude expérimentale	49
3.6.3 Correction	50
3.7 Conclusion	51

4	Correction radiométrique de la caméra	52
4.1	Introduction	52
4.2	Travaux précédents	52
4.3	Modèle radiométrique	53
4.4	Calibrage	53
4.4.1	Acquisition des images	54
4.4.2	Gestion du bruit	55
4.4.3	Estimation de la réponse du capteur	55
4.4.4	Étalonnage des canaux de couleurs	55
4.4.5	Estimation de la variation de sensibilité des photorécepteurs	56
4.4.6	Estimation du vignetage	57
4.5	Correction	57
4.6	Manuel d'utilisation	58
4.7	Résultats et analyse	59
4.7.1	Uniformité	59
4.7.2	Luminance	60
4.7.3	Gestion du bruit	61
4.8	Conclusion	61
5	Étude radiométrique des sources de lumière	62
5.1	Introduction	62
5.1.1	Problématique	62
5.1.2	Caractéristiques des sources de lumière	62
5.1.3	Appareils de mesure	64
5.2	Travaux précédents	64
5.3	Méthode d'analyse	66
5.3.1	Mesure à pleine puissance	66
5.3.2	Caractérisation de la fonction de transfert d'intensité	66
5.3.3	Caractérisation du gamut	66
5.3.4	Caractérisation du contraste	66
5.3.5	Espaces de couleur utilisés	67
5.3.6	Appareils de mesure utilisés	67
5.4	Résultats et analyse	68
5.4.1	Sources testées	68
5.4.2	Étude expérimentale	71
5.5	Conclusion	78
6	Étude radiométrique de l'écran de projection	83
6.1	Introduction	83
6.2	Travaux précédents	83
6.3	Étude des matériaux	84
6.3.1	Étude théorique	84
6.3.2	Étude expérimentale de la BRDF	86
6.4	Étude des réflexions multiples	89
6.4.1	Mesure de l'éclairage réfléchi indirectement vers la caméra	90
6.4.2	Simulation des réflexions multiples	92
6.5	Conclusion	103
7	Compensation radiométrique de la projection	105
7.1	Introduction	105
7.2	Travaux précédents	106
7.3	Processus radiométrique	106
7.4	Modèle radiométrique	108
7.5	Méthode de calibrage	109
7.5.1	Calibrage géométrique	109
7.5.2	Calibrage de la caméra	109
7.5.3	Calibrage de la projection	111
7.6	Méthode de compensation radiométrique	112
7.6.1	Tone mapping inverse	113
7.6.2	Compensation des réflexions multiples	113
7.6.3	Compensation intra-pixel	114

7.7	Résultats et analyse	114
7.8	Conclusion	115
8	Étude géométrique de la projection	117
8.1	Introduction	117
8.2	Travaux précédents	117
8.3	Projection	118
8.3.1	Notations	118
8.3.2	Génération des rayons de projection	118
8.3.3	Réflexion des rayons sur le miroir	120
8.3.4	Intersection des rayons avec la pièce	120
8.3.5	Implémentation	120
8.4	Projection inverse	120
8.4.1	Approche analytique	121
8.4.2	Approche algorithmique	124
8.5	Conclusion	126
9	Simulation d'éclairage	127
9.1	Introduction	127
9.2	Méthode de simulation d'éclairage	128
9.2.1	Lancer de rayons classique	128
9.2.2	Précalculs de rayons pour Catopsys	130
9.2.3	Modèle d'éclairage	131
9.2.4	Propagation de rayons	133
9.3	Propagation de rayons dans la scène 3D	134
9.3.1	Calcul d'intersection avec la scène	134
9.3.2	Parcours de triangles voisins	135
9.4	Propagation de rayons dans la carte projecteur	138
9.4.1	Parcours de rayon selon un pas 3D	138
9.4.2	Parcours de rayon selon la connexité 2D	141
9.4.3	Parcours de rayons par estimation de trajectoire	142
9.5	Résultats	148
9.5.1	Scène de test	148
9.5.2	Rendu de la scène de test	149
9.5.3	Rendu d'un pixel	152
9.5.4	Performances	153
9.5.5	Bilan	154
9.6	Conclusion	156
10	Réalité mixte pour Catopsys	157
10.1	Introduction	157
10.2	Acquisition des données réelles	157
10.2.1	Objets	157
10.2.2	Matériaux	157
10.2.3	Lumières	160
10.3	Modification des données réelles	160
10.3.1	Objets	161
10.3.2	Matériaux	161
10.3.3	Lumières	162
10.4	Conclusion	162
11	Conclusion générale	163
11.1	Travaux réalisés	163
11.2	Perspectives	164
A	Notions de base de radiométrie	166
A.1	Considérations physiques et biologiques de la lumière	166
A.1.1	Nature de la lumière	166
A.1.2	Transport de la lumière	166
A.1.3	Perception de la lumière	168
A.2	Grandeurs radiométriques et photométriques	172

A.2.1	Généralités	172
A.2.2	Énergie	173
A.2.3	Puissance et flux	174
A.2.4	Éclairement	174
A.2.5	Exitance	174
A.2.6	Intensité	175
A.2.7	Luminance	175
A.3	Réflectance	176
A.3.1	Modèles de réflectance	176
A.3.2	Modèles de BRDF	178
A.4	Équation de rendu	180
A.4.1	Définition	180
A.4.2	Résolution	181
B	Géométrie appliquée aux rayons	182
B.1	Notations	182
B.2	Définition d'un rayon	182
B.3	Intersection rayon/plan	182
B.4	Intersection rayon/sphère	182
B.5	Intersection rayon/triangle	183
B.6	Distance rayon/point	184
B.7	Distance rayon/rayon	184
B.8	Perpendiculaire commune à deux rayons	186
B.9	Réflexion d'un rayon	187
B.10	Réfraction d'un rayon	187
C	Espaces de couleurs	190
C.1	Généralités	190
C.2	Espace CIE 1931 XYZ	190
C.3	Espace sRGB	190
C.3.1	Conversion de CIE-XYZ vers sRGB	190
C.3.2	Conversion de sRGB vers CIE-XYZ	191
C.4	Espace CIE 1976 L*u*v*	191
C.4.1	Conversion de CIE-XYZ vers CIE-LUV	191
C.4.2	Conversion de CIE-LUV vers CIE-XYZ	191
	Bibliographie	191

Liste des Abréviations

ANR	Agence Nationale pour la Recherche
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
CAN	Convertisseur Analogique-Numérique
Catopsys	CATadiOptric Projection SYStem
CAVE	CAVE Automatic Virtual Environment
CCD	Charge-Coupled Device
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
CRT	Cathod Ray Tube
DLP	Digital Light Processing
GPU	Graphic Processing Unit
HDRI	High Dynamic Range Imaging
HDTV	High-Definition TeleVision
ITF	Intensity Transfer Function
ITU	International Telecommunication Union
LCD	Liquid Crystal Display
LUT	Look-Up Table
SPD	Spectral Power Distribution

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Motivation de la thèse

1.1.1 Réalité virtuelle, réalité mixte

Stéréotypée par le casque immersif et le gant de contrôle, la réalité virtuelle (resp. réalité mixte) consiste à plonger l'utilisateur dans un environnement complètement (resp. partiellement) synthétisé (images, sons, toucher...). Elle permet ainsi de provoquer différentes sensations et événements. Les applications sont très variées, du prototypage industriel au traitement de phobies en passant par l'art, le divertissement et l'apprentissage. Les technologies mises en oeuvre sont également très variées : systèmes d'affichage portables ou fixes, capteurs de mouvement ou de position éventuellement à retour d'effort, logiciels de traitement ou de synthèse d'images temps-réels...

L'élément de base d'une application de réalité virtuelle ou mixte est généralement le système d'affichage. C'est principalement grâce à lui que l'immersion (visuelle) est réalisée. Il existe deux catégories de systèmes d'affichage immersif : les casques portables et les systèmes fixes de type CAVE où l'utilisateur est placé dans une pièce dont les murs, le sol et le plafond servent d'écran de projection. Les casques sont assez simples à mettre en oeuvre mais leur rendu est généralement moins bons et l'immersion moins convainquante (poids important, perception de son propre corps réduite). Les CAVE ont un meilleur rendu mais sont peu abordables car onéreux, difficiles à construire, à maintenir et à utiliser.

1.1.2 Catopsys

Le système Catopsys (décrit au Chapitre 2) a pour ambition d'apporter une solution aux problèmes évoqués précédemment, par le truchement d'un système de projection immersif abordable (faible coût, facilité d'installation et d'utilisation). Ce système a principalement été développé dans le cadre d'un projet de recherche ANR (référence ANR-06-RIAM-001) et a donné lieu à une création d'entreprise. Le marché visé est relativement nouveau car la concurrence déjà en place se situe sur un segment beaucoup plus haut de gamme.

Initialement, les objectifs du projet Catopsys étaient définis de la façon suivante [Cat] :

«Le projet Catopsys (CATadiOtric Projection SYStems for virtual and augmented panoramic reality) a pour objectif de donner un accès à la réalité virtuelle panoramique au plus grand nombre grâce à une gamme de systèmes de vidéo-projection catadioptrique, de simplifier la mise en scène panoramique et d'obtenir des rendus optimisés pour un environnement de projection quelconque.

De façon plus détaillée, les objectifs scientifiques et technologiques de ce projet sont triples :

1. la mise en oeuvre de systèmes catadioptriques de projection pour des applications panoramiques en réalité virtuelle et/ou augmentée. Ces systèmes, qui associent un ou plusieurs canaux de vidéo-projection à des miroirs de formes convexes spécifiques, sont dotés de moyens de perception omnidirectionnelle qui leur permet de s'adapter automatiquement à un environnement quelconque : la projection se fait alors sans distorsions géométriques et avec une fidélité radiométrique optimale.
2. la valorisation de ces systèmes grâce à un environnement d'édition de contenu panoramique qui permet de prototyper simplement des applications 3D temps-réel (jeu, simulation) ou scénographique (expos, vidéos ou films 360°, simulation d'intérieur ou d'ambiance lumineuse). Contrairement aux logiciels de synthèse pour les systèmes de restitution plane, la modélisation des scènes pourra avoir lieu en temps-réel dans l'espace de projection grâce à un pointeur tridimensionnel. La mise en adéquation entre le contenu virtuel et l'environnement réel sera grandement simplifiée pour les applications en réalité mixte.

3. la conception de nouveaux modes de rendu réaliste qui prennent en compte le comportement radiométrique des matériaux de l’environnement. La mesure automatique des caractéristiques de réflectance (fonctions BRDF) peut permettre, d’une part de gérer la fidélité de projection de façon rigoureuse du point de vue des échanges énergétiques, et d’autre part de pouvoir générer des sources lumineuses virtuelles. Des algorithmes de lancer de rayon et de radiosité spécifiques à la géométrie des projecteurs catadioptriques seront implémentés. La faisabilité de modes de rendu stéréoscopique sera aussi étudiée.»

La thèse présentée ici s’est déroulée dans le cadre du sous-projet 3 du projet Catopsys. Elle a permis d’orienter certains choix de conception du système, d’étudier la faisabilité de différentes fonctionnalités et d’en réaliser certaines.

1.1.3 Objectifs de la thèse

L’objectif principal de cette thèse est d’étudier, au niveau radiométrique, le comportement du système Catopsys et le potentiel qu’apportent les spécificités de ce système pour des applications de réalité mixte.

Plus précisément, un premier objectif est d’évaluer l’influence du système sur la qualité visuelle finale pour ensuite pouvoir réduire cette influence et ainsi améliorer la qualité. Concrètement, il s’agit d’étudier comment l’environnement que nous voulons simuler est finalement perçu par l’utilisateur (après projection dans une salle non adaptée comme une pièce d’habitation), et comment, en modifiant l’image projetée, rendre cet environnement perçu plus proche de l’environnement voulu.

Un deuxième objectif, est d’utiliser les spécificités du système pour réaliser des algorithmes optimisés de rendu de scènes de réalité mixte.

Enfin, un dernier objectif est d’étudier ce que le système peut apporter à des applications de réalité mixte, par exemple, comment ajouter des lumières virtuelles, modifier des matériaux réels ou supprimer virtuellement (i.e. cacher à l’utilisateur) des objets réels.

Ainsi, nous couvrons toute la chaîne de traitement du système Catopsys nécessaire pour des applications de réalité mixte : acquisition de l’environnement radiométrique réel, rendu réaliste de l’environnement modifié puis visualisation de cet environnement modifié.

1.2 Sommaire

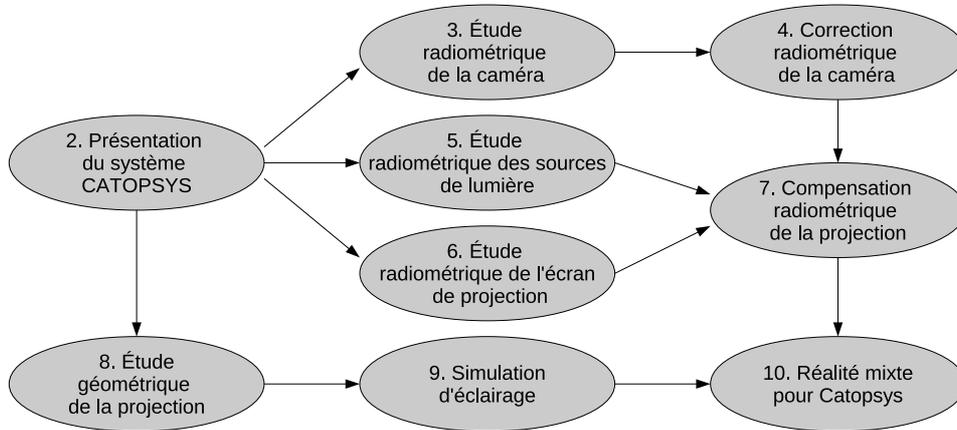


FIG. 1.1 – Organisation du rapport de thèse.

Tout d’abord, dans le Chapitre 2, nous présentons le système Catopsys d’un point de vue technique. Nous décrivons notamment la problématique posée puis le système proposé pour y répondre. Nous introduisons également les conséquences de ce système sur la chaîne de traitement à réaliser pour l’exploiter, notamment du point de vue radiométrique qui motive cette thèse.

Nous abordons ensuite l’étude radiométrique du système Catopsys. Cette étude porte sur les différents éléments (caméra, projecteur, salle de projection) et a pour objectif de caractériser le comportement radiométrique de tout le système et d’en déduire des méthodes de correction ou de compensation permettant d’améliorer la fidélité d’acquisition et la qualité de projection du système.

L'étude radiométrique de la caméra, réalisée dans le Chapitre 3, aborde les principales perturbations radiométriques intervenant lors de l'acquisition caméra. À chaque fois, nous présentons les causes, évaluons les effets et proposons une méthode de correction.

En utilisant l'étude précédente, nous proposons, dans le Chapitre 4, une méthode complète de correction de caméra facilement applicable au système Catopsys et permettant d'acquérir de façon relativement fidèle la radiométrie réelle. Cette fonctionnalité est un pré-requis indispensable non seulement aux applications de réalité mixte mais également pour permettre au système d'évaluer puis de corriger les perturbations radiométriques introduites par les divers éléments et nuisibles à la qualité de la projection.

Nous étudions ensuite les sources de lumières, dans le Chapitre 5. L'objectif est ici de caractériser le comportement radiométrique de différentes technologies de projecteur ainsi que l'influence d'éventuelles sources externes (éclairage intérieur, lumière du jour) pouvant perturber la projection.

L'utilisation d'une pièce d'habitation comme support de projection est étudiée dans le Chapitre 6. Dans un premier temps, nous montrons que, sous certaines conditions, l'influence d'un matériau sur la projection peut être compensée. Nous présentons ensuite une étude expérimentale de quelques matériaux types. Dans un second temps, nous étudions l'influence des réflexions multiples, expérimentalement puis en simulation.

À partir des chapitres précédents, nous proposons, dans le Chapitre 7, une méthode complète et automatisée de compensation radiométrique de la projection par un système Catopsys. L'objectif est de pouvoir contrôler la radiométrie visible malgré les perturbations radiométriques se produisant lors de la projection.

Ainsi, cette étude radiométrique du système se consacre à la projection. Les chapitres restant abordent la question de la création des images à projeter, notamment comment optimiser les algorithmes de rendu et comment réaliser des applications de réalité mixte adaptées au système.

Une étude géométrique de la projection est présentée dans le Chapitre 8. Cette étude a pour but de déterminer les spécificités géométriques du système Catopsys pouvant être exploitées.

À partir de l'étude géométrique, nous proposons, dans le Chapitre 9, des algorithmes de simulation d'éclairage spécifiques au système Catopsys. Ces algorithmes sont des variantes, assez originales, de l'algorithme de lancer de rayons.

Enfin, la réalisation d'applications de réalité mixte est étudiée dans le Chapitre 10. Il s'agit à la fois de caractériser ce qu'apporte le système concernant les matériaux, les objets et les lumières, et de déterminer comment les manipuler pour réaliser de la réalité mixte.

Quelques informations importantes ou utiles sont données en annexe.

Des notions de base de radiométrie sont rappelées Annexe A. Nous y présentons des généralités sur la lumière, les grandeurs physiques associées et les notions de réflectance et de rendu.

Annexe B, nous donnons quelques calculs géométriques utilisés dans nos algorithmes de simulation d'éclairage. Il s'agit notamment de calculs d'intersections entre un rayon et un objet, de distances par rapport à un rayon et de réflexion ou réfraction d'un rayon.

Enfin, nous présentons, Annexe C, les espaces de couleurs utilisés dans cette thèse, notamment l'espace CIE-XYZ qui permet de faire le lien entre la radiométrie et le codage informatique des couleurs, l'espace sRGB, adapté au matériel d'imagerie et l'espace CIE-LUV, adapté à la perception humaine.

1.3 Contributions

Les principales contributions de cette thèse sont l'étude radiométrique de la chaîne de traitement et les différentes méthodes proposées. Ces contributions sont proposées dans le cadre de Catopsys mais sont parfois applicables dans un cadre plus général.

L'étude de la caméra a permis d'évaluer les principales perturbations radiométriques du système et de proposer une méthode de correction caméra simple à mettre en oeuvre et prenant en compte la réponse et la non-uniformité du capteur, le vignetage et la balance de couleurs. Cette méthode est utilisable pour des applications de vision par ordinateur et a donné lieu à la soumission d'un papier.

L'étude des sources de lumière a permis de caractériser certaines sources courantes, notamment en chromaticité. Elle a également permis de caractériser le comportement de différentes technologies d'afficheurs (écrans CRT ou LCD, projecteurs DLP ou LCD) et de déterminer les propriétés intéressantes dans le choix du projecteur pour le système Catopsys.

L'étude de l'écran de projection a montré que l'influence d'un matériau peut généralement être compensée. Elle a également mis en évidence l'importance des réflexions multiples et les limitations que celles-ci impliquent au niveau de la compensation.

Nous avons proposé une méthode de compensation radiométrique de projection sur une surface non dédiée applicable au système Catopsys et, plus généralement, à tout système caméra-projecteur subissant des réflexions multiples importantes. Cette méthode prend en compte la non-linéarité, le mélange des canaux de couleur, les matériaux et les réflexions multiples. Ces travaux ont donné lieu à une publication dans une conférence internationale, une dans une revue nationale et une dans une conférence nationale.

L'étude géométrique a formalisé la projection et la projection inverse, et a permis de mettre au point des méthodes de calcul numérique de la projection inverse.

Les travaux sur la simulation d'éclairage ont permis de réaliser un partitionnement de la scène 3D spécifique à Catopsys, permettant d'accélérer le calcul du rendu. Ils ont également permis de développer une méthode originale de parcours de rayons dans l'espace image, indépendamment du nombre d'objets.

Enfin, la dernière étude a permis de déterminer le potentiel du système au niveau de la réalité mixte, notamment dans quelle mesure la scène réelle (objets, lumière, matériaux) peut être acquise et modifiée, et comment ceci peut être intégré dans les algorithmes précédents.

Chapitre 2

Présentation du système Catopsys

2.1 Problématique

Le système Catopsys a pour but de pouvoir réaliser des applications de réalité mixte immersives de façon abordable. Ceci implique les problèmes suivants :

- fournir un système d’affichage immersif,
- pouvoir acquérir et modifier l’environnement réel (réalité mixte),
- proposer un système accessible c’est-à-dire peu coûteux et simple d’installation et d’utilisation.

2.1.1 Affichage immersif

Le principe de l’affichage immersif est d’afficher un environnement autour de l’utilisateur de telle sorte que celui-ci se sente véritablement immergé dans cet environnement. En plus du problème purement technique de l’affichage immersif, peut également se poser le problème de la localisation de l’utilisateur, soit pour déterminer l’angle de vue à afficher (cas d’un système d’affichage partiel), soit pour déterminer l’image à afficher (cas d’un utilisateur mobile devant un écran fixe).

2.1.2 Réalité mixte

La réalité virtuelle consiste à créer un environnement entièrement synthétisé c’est-à-dire sans lien avec l’environnement réel. La réalité augmentée (resp. diminuée) consiste à ajouter (resp. enlever) des éléments à l’environnement réel, perçu par l’utilisateur. Ceci nécessite donc d’acquérir l’environnement réel, de le modifier puis de visualiser l’environnement modifié. La réalité mixte est une notion plus générique incluant les notions précédentes.

2.1.3 Accessibilité

Afin de viser une utilisation grand-public, un dernier problème à résoudre est celui de l’accessibilité, ceci à plusieurs niveaux. Le système doit être relativement peu coûteux et facile à utiliser ainsi que d’installation simple et peu contraignante.

2.2 Solutions existantes

Il n’y a actuellement pas de solution répondant de façon satisfaisante à la problématique énoncée. En effet, il existe principalement deux types de systèmes d’affichage immersif : les systèmes portables comme les casques de réalité virtuelle [Sut68] et les systèmes grand écran comme les CAVE [CNSD93, DDS⁺09].

Les casques sont des systèmes relativement simples à mettre en place (un appareil à connecter à un ordinateur) mais le port de l’appareil est généralement assez contraignant pour l’utilisateur. De plus, pour pouvoir réaliser des applications de réalité mixte, il faut ajouter un système d’acquisition du réel ainsi qu’un système de localisation, pour pouvoir mélanger le réel et le virtuel.

Les CAVE sont des systèmes où l’utilisateur est placé dans une pièce cubique aux murs semi-transparentes. À l’extérieur de la pièce, un vidéo-projecteur est placé en face de chaque mur et affiche à l’utilisateur, par transparence, une partie de l’environnement à simuler. Couplé à un système de stéréovision, l’affichage ainsi réalisé peut être de bonne qualité. Cependant, ces systèmes ne permettent que des applications de réalité virtuelle et sont difficiles à mettre en place (coût, encombrement, installation, maintenance).

Parallèlement aux travaux réalisés dans le cadre de Catopsys, [YT08] présente un système grand écran, utilisant à peu près les mêmes appareils que le système Catopsys. Cependant, il utilise un écran spécifique, de type dôme hémisphérique, et impose un point de vue particulier à l'utilisateur. Ce système apporte donc des fonctionnalités différentes (réalité virtuelle uniquement, mouvements de l'utilisateur plus limités), ce qui le destine à des applications différentes.

2.3 Solution proposée

2.3.1 Description

Le système Catopsys est un système de projection-acquisition à placer au centre d'une pièce d'habitation. Plus précisément (voir Fig. 2.1), un miroir convexe (M) est fixé au plafond. Un vidéo-projecteur (P) est placé sous le miroir et pointe vers celui-ci, si bien qu'un rayon de lumière (B) émis par P est réfléchi par M vers une surface de la pièce puis vers l'utilisateur. Ainsi, l'image du projecteur est réfléchi par le miroir dans toute la pièce, ce qui permet de réaliser l'immersion. Enfin, une caméra grand-angle (C) est placée au-dessus du projecteur, en direction des murs de la pièce. Cette caméra peut tourner autour de l'axe optique du projecteur grâce à un moteur pas-à-pas, ce qui permet au système de voir une bonne partie de l'environnement réel. Le projecteur, la caméra et le moteur sont contrôlés par un ordinateur.

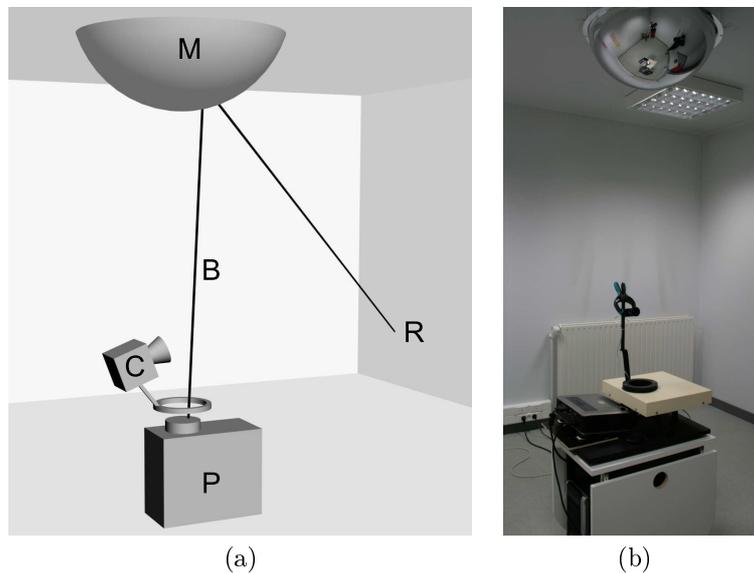


FIG. 2.1 – Le système Catopsys : principe de fonctionnement (a) et prototype (b).

2.3.2 Justification

Le système Catopsys permet de répondre aux trois points de la problématique énoncée précédemment. Tout d'abord, la projection immersive est obtenue grâce à l'association du projecteur et du miroir convexe. En effet, l'image projetée est réfléchi par le miroir dans toutes les directions, permettant ainsi, via les surfaces de la pièce utilisées comme écran de projection, d'afficher un environnement immersif à l'utilisateur. Selon la configuration du système et de la pièce, la projection peut théoriquement être réalisée sur pratiquement toutes les directions (4π sr).

Le système permet également d'acquérir partiellement l'environnement réel et donc supporte des applications de réalité mixte. En pratique, le système fournit une source de lumière omnidirectionnelle fixe mais contrôlable (projecteur) et un point de vue omnidirectionnel (caméra). Ceci n'est bien sûr pas suffisant pour acquérir toute la géométrie et radiométrie réelles mais offre déjà des possibilités intéressantes.

Enfin, le système est accessible par sa facilité d'installation et par son coût. En effet, il est capable de s'autocalibrer grâce à l'association projecteur-caméra qui permet de projeter une image et de capturer le résultat dans la pièce. Plus précisément, le système doit être calibré géométriquement (positions et orientations relatives des appareils, géométrie de la pièce) et optiquement (déformations par les optiques) [ASLZ08] ainsi que radiométriquement (propagation de la lumière dans la pièce, réponse des appareils). Quant au coût, le système est composé uniquement d'appareils relativement peu coûteux (l'ensemble du matériel peut être obtenu pour moins de 4 000 €). Depuis quelques années, les vidéo-projecteurs sont de moins en moins chers et peuvent désormais être envisagés pour des applications grand-public. De même, il

existe des modèles de caméra contrôlée par ordinateur abordables. Enfin, les autres composants de notre système ont un coût négligeable (notre implémentation utilise un miroir de surveillance et un moteur pas-à-pas contrôlé via une carte IEEE 1284). À terme, un système produit industriellement serait encore moins coûteux.

Le système Catopsys n'a bien sûr pas la prétention d'atteindre la qualité d'un CAVE moderne mais offre déjà des performances honorables et permet, de plus, des applications de réalité mixte, ceci pour un investissement (finances et installation) très restreint. Ce système a fait l'objet d'un brevet et a donné lieu à la création d'une entreprise.

2.3.3 Applications

De façon générale, les systèmes d'affichage immersifs ont de nombreuses applications : simulateurs (de vol, de conduite...) [LIWL03], prototypage [DAK⁺04], bureaux virtuels [RWC⁺98], environnements d'ambiance, jeux vidéo [Bou08], thérapies, psychologie [LBB99]...

Le système Catopsys permet les applications des systèmes d'affichage immersifs classiques. Par exemple, une application de réalité virtuelle est présentée Fig. 2.2. Cette application consiste à afficher un environnement d'ambiance immersif. Il s'agit bien de réalité virtuelle car la pièce réelle n'est utilisée que comme support de projection et n'est pas perçue par l'utilisateur qui a l'impression d'être immergé dans l'environnement affiché.



FIG. 2.2 – Utilisation du système Catopsys pour une application de réalité virtuelle (affichage d'un environnement d'ambiance). Image fournie par Catopsys.

Le système Catopsys permet, de plus, des applications de réalité mixte. Par exemple, l'application présentée Fig. 2.3 consiste à changer les matériaux des murs réels, blancs, par des damiers colorés. À partir de la scène modifiée à simuler (Fig. 2.3 (a)), le calibrage géométrique permet de calculer l'image Fig. 2.3 (b) qui, une fois projetée, simule cette scène dans la pièce réelle (Fig. 2.3 (c)). Nous sommes ici en présence de réalité mixte, mélange de réel et de virtuel car l'utilisateur perçoit les murs, réels, et les matériaux, virtuels.

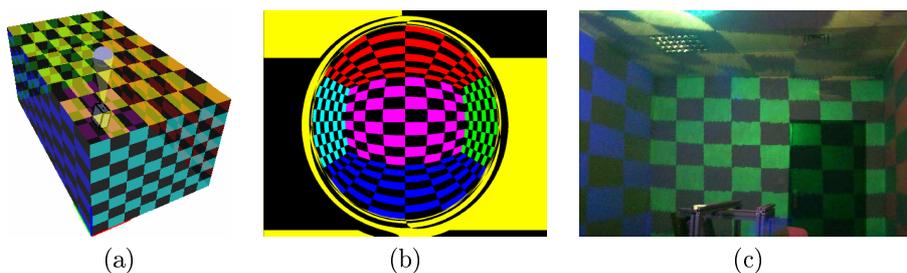


FIG. 2.3 – Utilisation du système Catopsys pour une application de réalité mixte : scène de réalité mixte à simuler (a), image à projeter pour simuler cette scène (b) et résultat de la projection (c). Image fournie par Catopsys.

Une autre application de réalité mixte est présentée Fig. 2.4. Ici, les murs réels sont préservés mais les matériaux sont modifiés et un objet virtuel et une source de lumière virtuelle sont ajoutés.

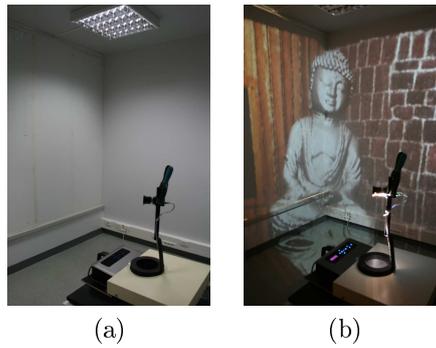


FIG. 2.4 – Utilisation du système Catopsys pour une application de réalité mixte : scène réelle (a), scène de réalité mixte (b).

2.4 Mise en oeuvre

2.4.1 Chaîne de traitement

Pour que le système soit utilisable, il est nécessaire d'effectuer les traitements suivants :

1. traitements matériels : installation et réglage du système ;
2. traitements hors-ligne : calibrage géométrique et radiométrique ;
3. traitements en-ligne : création, correction et projection des images.

Dans cette thèse, nous n'abordons pas l'étape d'installation et de réglage matériel du système (ceci fait partie d'un autre sous-projet du projet Catopsys). Les étapes logicielles de la chaîne de traitement sont présentées Fig. 2.5.

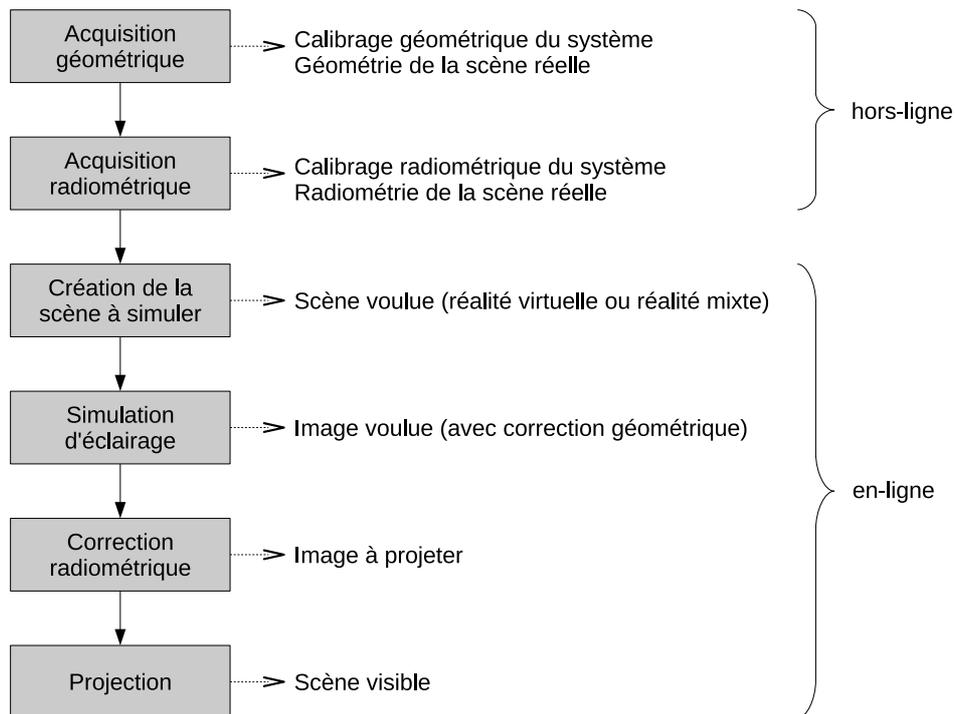


FIG. 2.5 – Chaîne de traitement du système Catopsys.

Une fois installé et réglé, le système nécessite une série de traitements hors-ligne, réalisée une seule fois ou à chaque fois que le système ou l'environnement réel est modifié. Ces traitements consistent à calibrer le système et à acquérir l'environnement réel, d'abord au niveau géométrique, enfin au niveau radiométrique. L'étape de calibrage permet de caractériser les perturbations à corriger lors de la projection pour obtenir le résultat voulu. Il s'agit, par exemple, de la déformation du miroir ou de la réponse d'intensité du projecteur. L'étape d'acquisition de l'environnement réel permet de fournir une partie des

données nécessaires aux applications de réalité mixte, par exemple, la géométrie de la pièce ou la couleur de ses surfaces.

Une fois calibré, le système peut être utilisé, en suivant la série de traitements en-ligne, réalisée pour chaque image projetée. La première étape est de générer la scène à simuler. Ceci est réalisé par l'application de réalité mixte, en utilisant les données réelles acquises précédemment. Une image de cette scène est ensuite calculée. Cette image corrige la déformation géométrique du miroir, déterminée lors du calibrage, de telle sorte qu'une correspondance s'établit entre la scène à simuler et la scène réellement visible après projection. Puis, en utilisant le calibrage radiométrique, l'image est modifiée de telle sorte qu'après projection, les perturbations radiométriques sont corrigés. Ainsi, la scène visible par l'utilisateur se rapproche de la scène voulue, malgré les perturbations géométriques et radiométriques qui se sont produites lors de la projection.

Pour des raisons de simplicité d'utilisation, tous ces traitements doivent être automatisés au maximum. Ainsi, les traitements hors-ligne peuvent être implémentés dans un logiciel sortant les données de calibrage et d'acquisition. L'application de réalité mixte peut alors être réalisée grâce aux données d'acquisition ainsi qu'à des outils de post-traitement implémentant les traitements en-ligne grâce aux données de calibrage.

Le calibrage et l'acquisition géométriques sortent du cadre de cette thèse ; ils font partie d'un autre sous-projet du projet Catopsys [ASLZ08]. Nous considérons donc que nous possédons un maillage de la pièce ainsi qu'une carte 2D donnant, pour chaque pixel du projecteur, la position 3D atteinte dans la pièce après projection et réflexion sur le miroir (voir Fig. 2.6).

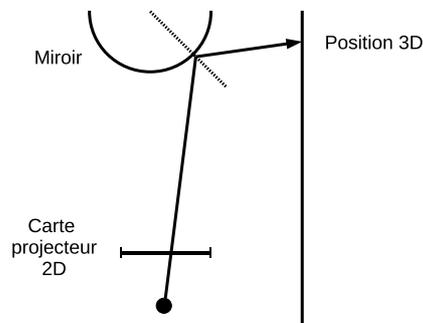


FIG. 2.6 – La carte projecteur donne la position, dans la pièce, atteinte par le pixel projecteur correspondant.

De même, nous considérons que le système permet d'obtenir une image panoramique de la scène réelle. En effet, la caméra utilisée est une caméra vidéo matricielle classique. Elle est équipée d'un grand-angle et est en rotation autour de l'axe optique du projecteur. Elle peut ainsi acquérir une grande partie de la scène (sur notre système 6 pas permettent d'effectuer une rotation complète). Nous appelons *image caméra* une image retournée par la caméra (à un pas de rotation donné) et *image projecteur* une image envoyée au projecteur. L'acquisition panoramique consiste à acquérir des *images projecteur mesurées*, définies ainsi : un pixel dans l'image projecteur se projette en un point particulier de la pièce ; la lumière vue par la caméra en ce point donne la valeur du pixel (également appelée *niveau*) dans l'image projecteur mesurée (voir Fig. 2.7).

Nous passons volontairement sous silence toutes les difficultés liées à l'acquisition géométrique comme la reconstruction 3D de la pièce ou l'absence de bijection entre la caméra et le projecteur.

2.4.2 Gestion de la radiométrie

La problématique de cette thèse est de caractériser et de contrôler la radiométrie tout au long de la chaîne de traitement du système Catopsys, c'est-à-dire au cours des étapes suivantes : calibrage, acquisition des données réelles, mélange des données réelles et virtuelles, rendu de l'image à afficher, projection adaptée de cette image. Les problèmes sous-jacents ne sont pas tous nouveaux mais le système Catopsys apporte des difficultés ou des fonctionnalités particulières.

Tout d'abord, les particularités de notre système caméra-projecteur permettent de mettre en place des méthodes d'autocalibrage peu supervisées. Par exemple, le problème de vignettage de la caméra, du fait de sa rotation contrôlée par ordinateur, peut être résolu de façon automatique sans avoir recours à des méthodes de détection de points, peu adaptées ici.

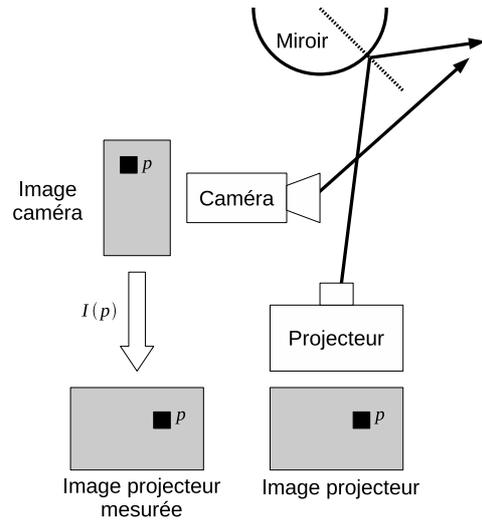


FIG. 2.7 – Une image projecteur mesurée donne, pour chaque pixel de l’image projecteur, la couleur vue par la caméra à la position correspondante dans la pièce.

Le système caméra-projecteur est également capable d’acquérir des informations caractérisant l’environnement réel. Ceci permet d’obtenir les données indispensables à la création de scènes de réalité mixte, mais aussi de déterminer les déformations se produisant à l’utilisation du système.

Une fois la scène de réalité mixte définie, il faut en calculer l’image à projeter pour que le système de projection puisse la simuler dans la pièce réelle. Il s’agit du classique problème de simulation d’éclairage mais avec ici des problèmes nouveaux. En effet, le mélange de données réelles et virtuelles permet de spécialiser certains traitements. De plus, l’acquisition de l’environnement réel depuis un point de vue omnidirectionnel permet de se placer dans un cadre particulier autorisant des méthodes de rendu optimisées (partitionnement de l’espace spécifique).

Enfin, dernière étape de la chaîne de traitement, les images rendues sont projetées sur des surfaces non dédiées à la projection, ce qui implique des déformations radiométriques. En effet, en plus de l’influence du projecteur et des matériaux, les réflexions multiples entre surfaces sont importantes, de par la configuration de l’écran de projection (i.e. une pièce d’habitation). Il est donc nécessaire d’en tenir compte et de mettre en place une méthode de compensation des images avant leur projection.

Chapitre 3

Étude radiométrique de la caméra

3.1 Introduction

En vue d'une utilisation grand-public, le système Catopsys doit pouvoir être installé et utilisé facilement. Cela signifie notamment qu'une fois mis en place, il ne doit pas nécessiter que l'utilisateur réalise une étape de réglage complexe. Or, cette étape est bien nécessaire pour que le système soit utilisable. La solution retenue est de fournir un système de calibrage géométrique et radiométrique automatique ou quasi-automatique, nécessitant le moins de supervision possible. Ceci implique que le système dispose d'un moyen d'acquisition géométrique et radiométrique, ici une caméra.

Le système Catopsys utilise une caméra numérique contrôlée par ordinateur. Pour permettre le calibrage du système, cette caméra doit être :

- matricielle, c'est-à-dire que son capteur est composé d'une matrice 2D de photodétecteurs, correspondant aux pixels de l'image produite;
- couleur, c'est-à-dire que le capteur comporte différents types de photodétecteurs correspondant aux différents canaux de couleur de l'image;
- équipée d'un objectif grand-angle, pour avoir une vision la plus complète possible de la scène réelle.

Notons que, sur le système Catopsys, la caméra est en rotation autour de l'axe de projection. Cette rotation est réalisée grâce à un moteur pas-à-pas contrôlé par l'ordinateur et permet de prendre des images de la scène dans différentes directions de vue.

Il existe principalement deux technologies de capteur : CCD, à base de photodiodes, et CMOS, à base de photopertes. Pour obtenir des images couleurs, une caméra peut soit combiner plusieurs capteurs monochromes, sensibles à des couleurs différentes, soit utiliser un capteur couleur, composé de différents types de photodétecteurs.

Le processus d'acquisition d'une image par un appareil numérique (caméra, appareil photo, scanner...) est illustré Fig. 3.1. La lumière provenant de la scène est d'abord captée par les optiques de l'appareil et dirigée vers le capteur. Le capteur convertit la lumière reçue en un signal électrique analogique grâce à ses photodétecteurs. Ce signal est ensuite traité analogiquement, puis converti en un signal numérique et enfin traité numériquement. Le signal résultant donne l'image finale de la scène. Notons que ce processus discrétise la scène à plusieurs niveaux :

- échantillonnage spatial (répartition des photodétecteurs) ;
- échantillonnage temporel (durée d'exposition) ;
- discrétisation spectrale (réponse spectrale des photodétecteurs) ;
- quantification (conversion des valeurs analogiques en valeurs numériques).

Pour plus de détails sur le processus d'acquisition des images numériques, se reporter à [Mar97].

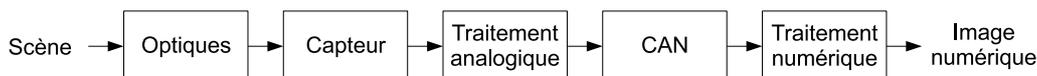


FIG. 3.1 – Processus d'acquisition d'images numériques.

L'acquisition d'une image numérique est sujette à de nombreuses perturbations radiométriques :

- les photodétecteurs peuvent avoir une réponse d'intensité non-linéaire ;

- une exposition inadaptée produit une saturation ou une non-activation d'un photodétecteur ;
- les photodétecteurs ne réagissent pas de façon uniforme sur l'ensemble de la matrice ;
- la réaction à la lumière est différentes selon le type de photodétecteurs (CCD, CMOS...);
- les différents canaux de couleur ne réagissent pas de la même façon ;
- les optiques influencent le flux reçu par les différents photodétecteurs ;
- des phénomènes aléatoires (bruits) perturbent le processus d'acquisition. . .

L'intérêt de la caméra, pour le système Catopsys, est de fournir une image fidèle de la scène visible. Les perturbations radiométriques de la caméra doivent donc être corrigées. Pour cela, il est possible de mesurer précisément ces perturbations ou d'étalonner la caméra mais ceci nécessite d'utiliser du matériel spécifique selon un protocole précis pas forcément facile à réaliser. Pour le système Catopsys, nous préférons mettre en place une méthode de calibrage et de correction quasi-automatique, nécessitant peu de supervision.

Pour visualiser toute la pièce, la caméra du système Catopsys est en rotation. Ceci permet d'acquérir des images selon différentes directions de vue (voir Fig. 3.2) puis, grâce à un calibrage géométrique préalable, de reconstruire une image panoramique de la pièce (voir Fig. 3.3). Cette image panoramique correspond à l'*image projecteur mesurée*, définie au Chapitre 2. Elle donne, pour chaque pixel de l'image projecteur, la couleur vue par la caméra au point de la pièce atteint par la projection.



FIG. 3.2 – Acquisition d'images à différents pas de rotation caméra.

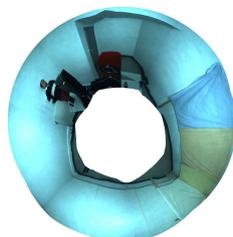


FIG. 3.3 – Image panoramique reconstruite.

Dans la suite de ce chapitre, les différents problèmes radiométriques concernant la caméra sont étudiés : bruit, variation de sensibilité des photodétecteurs, vignetage, réponse du capteur, gestion de la couleur. Pour chaque problème, sont présentés ses causes et effets, une étude expérimentale puis une méthode de correction.

3.2 Bruit

3.2.1 Présentation

Le bruit est une variation aléatoire lors du processus d'acquisition. Ainsi, deux acquisitions réalisées dans des conditions identiques ne produisent pas rigoureusement le même résultat. C'est un problème inhérent à tout dispositif d'acquisition, qui doit donc être pris en compte en identifiant les différents bruits, leur origine, leur influence, et en les modélisant (bruit additif, multiplicatif... distribution uniforme, gaussienne...). Comme la notion de bruit est fortement liée à la notion d'aléatoire, la théorie des probabilités fournit des outils particulièrement adaptés à son étude. Une étude détaillée du bruit dans les dispositifs d'acquisition d'images est disponible dans [Mar97].

Une caméra subit des bruits de différentes origines :

- les bruits externes, dus à la nature corpusculaire et aléatoire de la lumière;
- les bruits internes au photodétecteur, générés par le photodétecteur lui-même;
- les bruits des éléments associés, liés à l’association des photodétecteurs composant le capteur;
- les bruits de numérisation, générés par les amplificateurs et les CAN.

Nous pouvons différencier plusieurs types de bruits. Au niveau des photodétecteurs, nous avons :

- les bruits thermiques, dus à l’agitation thermique;
- les bruits de grenaille, inhérents à la collecte de particule;
- les bruits de génération-recombinaison, dus à la nature aléatoire des générations et recombinaisons des porteurs de charges;
- les bruits de gain, de modulation. . .

Au niveau du capteur, nous avons :

- les bruits temporels, correspondant aux fluctuations du signal de sortie dans le temps;
- les bruits spatiaux, correspondant à la non-uniformité et aux débordements des photodétecteurs.

Pour le système Catopsys, nous ne cherchons pas à réaliser une étude exhaustive et détaillée de tous les bruits de la caméra mais plutôt de caractériser le bruit d’un point de vue global afin de le corriger sur les acquisitions caméra.

3.2.2 Étude expérimentale

L’objectif de cette étude est de caractériser le bruit de la caméra au sein du système Catopsys. Pour cela, nous proposons de distinguer deux composantes : un bruit d’obscurité et un bruit de mesure. Le bruit d’obscurité traduit le bruit présent continuellement dans le signal tandis que le bruit de mesure représente le bruit dépendant du flux de lumière. Cette modélisation permet de représenter à haut niveau ce qui se passe physiquement, à savoir un bruit additif, toujours présent, dû aux photodétecteurs, et un bruit multiplicatif, lié au signal de sortie, dû à l’amplification et à la conversion du signal.

Bruit d’obscurité

Objectif : déterminer si la caméra subit un bruit important en l’absence de lumière. Ce bruit est caractéristique du capteur, notamment de l’agitation thermique. Il est additif et d’espérance non nulle.

Expérience : nous plaçons la caméra dans l’obscurité et acquérons une série d’images avec une durée d’exposition donnée (voir Fig. 3.4). Nous réalisons ces opérations avec différentes durées d’exposition. Pour chaque durée d’exposition, nous calculons ensuite le niveau (valeur du pixel) moyen, l’écart-type et le niveau maximal parmi tous les pixels de toutes les images. L’obscurité est obtenue en plaçant la caméra dans notre salle de test non éclairée avec un objectif et un cache-objectif en plastique noir épais, ce qui permet d’assurer l’absence de lumière parasite.

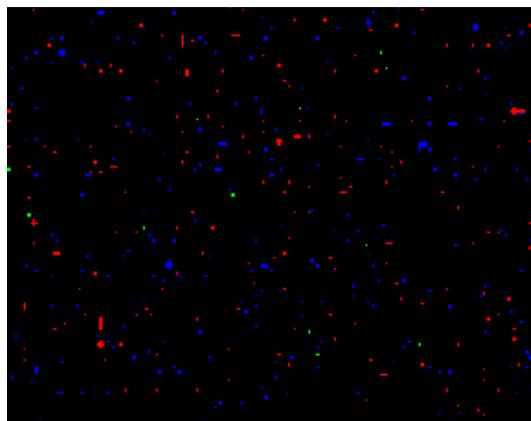


FIG. 3.4 – Bruit d’obscurité : zoom sur une image caméra amplifiée d’une scène noire.

Résultats : l'expérience a été réalisée pour plusieurs durées d'exposition par séries de 10 images. La caméra utilisée est une mvBlueFox-121C (CCD couleur 1024x768) et la température ambiante était d'environ 20°C. Comme la caméra est placée dans l'obscurité, l'activité des photodétecteurs n'est pas due à la détection de lumière mais bien à l'agitation thermique.

Les niveaux moyens, écart-types et niveaux maximaux parmi tous les pixels de toutes les images sont donnés Fig. 3.5, Fig. 3.6 et Fig. 3.7, respectivement. Les niveaux donnés par la caméra sont compris entre 0 et 255 (3 canaux 8 bits).

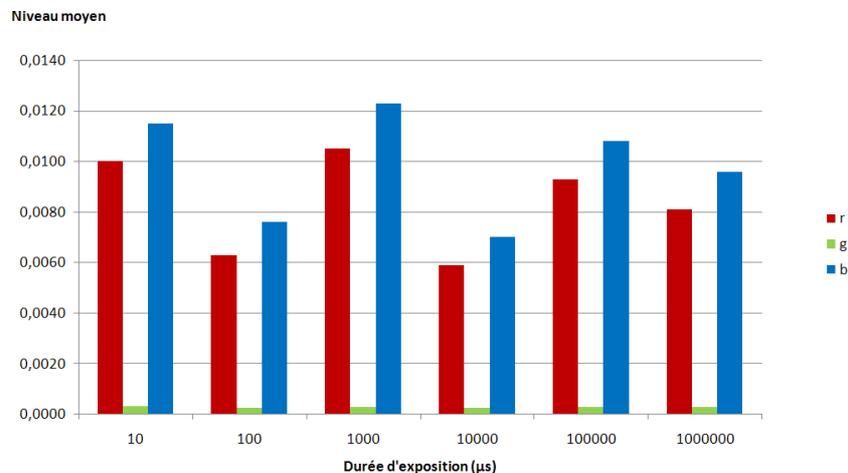


FIG. 3.5 – Bruit d'obscurité de la caméra : niveau moyen (en niveau caméra, dans [0, 255]).

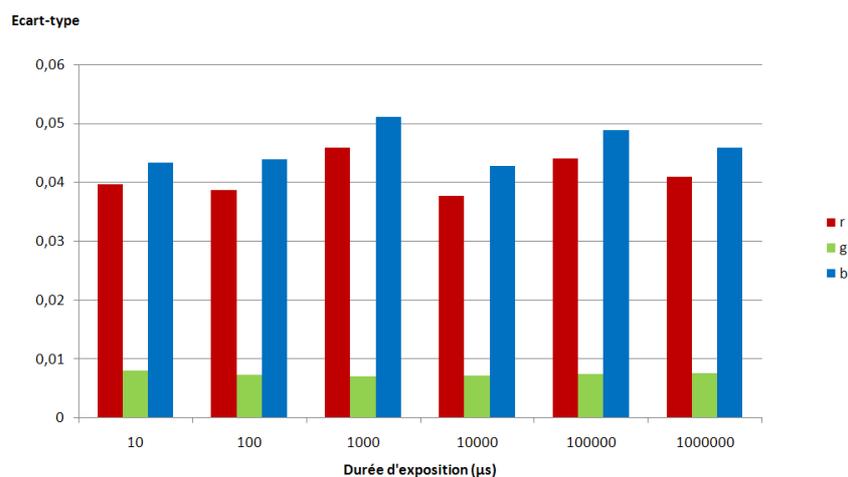


FIG. 3.6 – Bruit d'obscurité de la caméra : écart-type (en niveau caméra, dans [0, 255]).

Nous constatons que le niveau moyen, tout comme l'écart-type, n'est pas nul mais reste très faible. Le niveau maximal est également peu élevé sauf pour le canal bleu exposé pendant une seconde. Notons cependant, que relativement au niveau moyen, le bruit est très variable (voir Fig. 3.8).

Les résultats sont légèrement différents selon les canaux de couleur. Ceci peut s'expliquer par le fait que chaque canal a ses propres photodétecteurs et donc une réponse et un post-traitement différents.

Enfin, la durée d'exposition ne semble pas influencer les résultats (hormis dans le cas du canal bleu exposé pendant une seconde). Nous aurions pu penser qu'une durée d'exposition courte augmenterait l'écart-type mais les durées d'exposition utilisées semblent déjà trop élevées, relativement à la vitesse de déplacement des électrons, pour avoir une influence significative.

Conclusion : la caméra subit un bruit d'obscurité. Ce bruit introduit un biais négligeable. Relativement au niveau du signal, la variabilité de ce bruit est importante.

Bruit de mesure

Objectif : caractériser le bruit en présence de lumière. Plus précisément, il s'agit de déterminer si le bruit est important, s'il suit une distribution particulière et comment il varie en fonction de la quantité

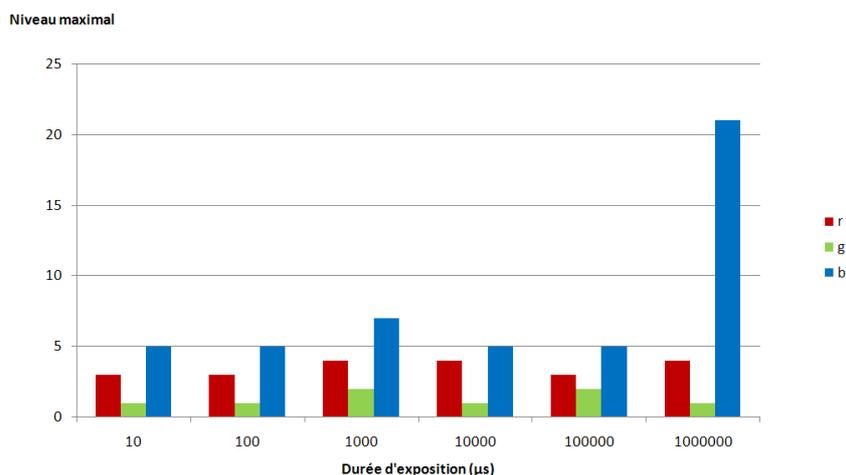


FIG. 3.7 – Bruit d'obscurité de la caméra : niveau maximal (en niveau caméra, dans $[0, 255]$).

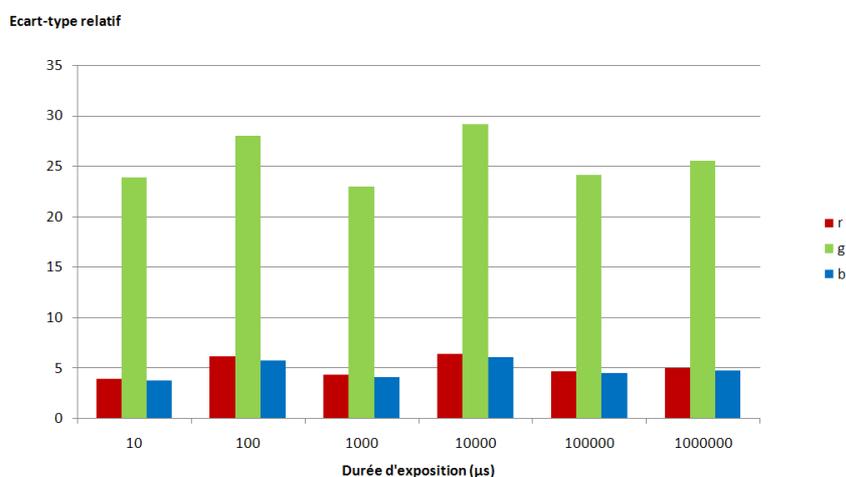


FIG. 3.8 – Bruit d'obscurité de la caméra : écart-type relatif au niveau moyen (en %).

de lumière reçue.

Notons, que pour estimer le bruit de façon rigoureuse, il faudrait utiliser un étalon ou comparer avec un appareil de mesure parfait. Nous nous contentons ici d'une analyse statistique de la variabilité des mesures réalisées dans des conditions pourtant stables. Il s'agit d'une méthode très classique, utilisée par exemple pour évaluer la qualité d'un processus industriel.

Expérience 1 : nous plaçons la caméra devant une scène fixe et acquérons une série d'images avec une durée d'exposition donnée. Pour chaque pixel, nous calculons ensuite le niveau moyen, l'écart-type et l'amplitude dans la série d'images (en fait, la valeur du pixel dans la série d'images constitue une variable aléatoire, d'où l'analyse probabiliste).

Résultats de l'expérience 1 : l'expérience a été réalisée avec des séries de 10 images de la même scène, pour plusieurs durées d'exposition (voir Fig. 3.9). Un pixel test a été choisi au niveau du drap bleu ciel. En fait, plusieurs pixels ont été testés et les résultats obtenus sont, à chaque fois, similaires.

Le niveau moyen du pixel test est représenté Fig. 3.10. Conformément aux attentes, lorsque la durée d'exposition augmente (et donc que la quantité de lumière captée augmente), le niveau moyen du pixel test augmente. Notons que le pixel test sature lorsqu'il est exposé pendant une seconde.

Au niveau de l'écart-type absolu (voir Fig. 3.11 (a)), nous observons globalement une augmentation en fonction de la durée d'exposition. Dans le détail, la variation est plus complexe puisque nous observons une discontinuité, présente pour tous les canaux mais à des durées d'exposition différentes. À la saturation (une seconde d'exposition), le niveau du pixel test est toujours maximal et par conséquent l'écart-type est nul. Les écart-types absolus de tous les pixels de l'image sont représentés Fig. 3.11 (b) (une couleur claire indique un écart-type élevé). Cette image confirme que l'écart-type est plus élevé dans les régions claires et qu'il s'annule après saturation.

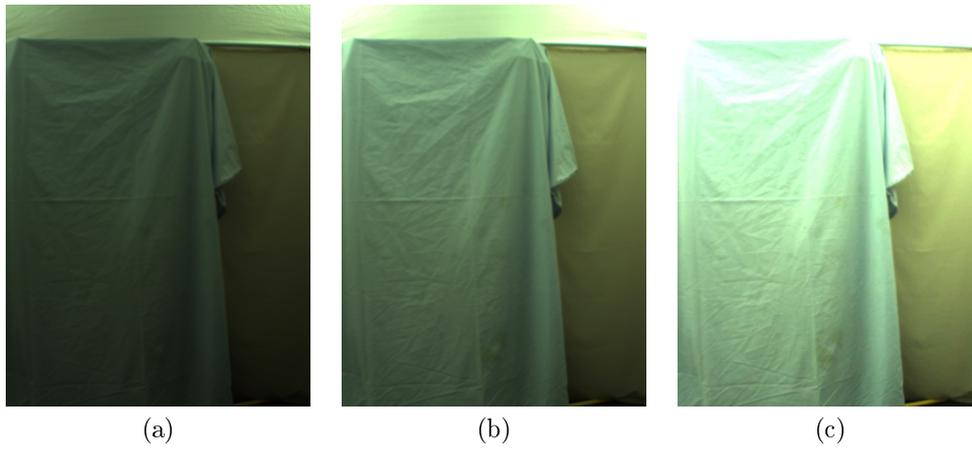


FIG. 3.9 – Bruit de mesure de la caméra : image caméra à 20 000 μs (a), 40 000 μs (b) et 80 000 μs (c).

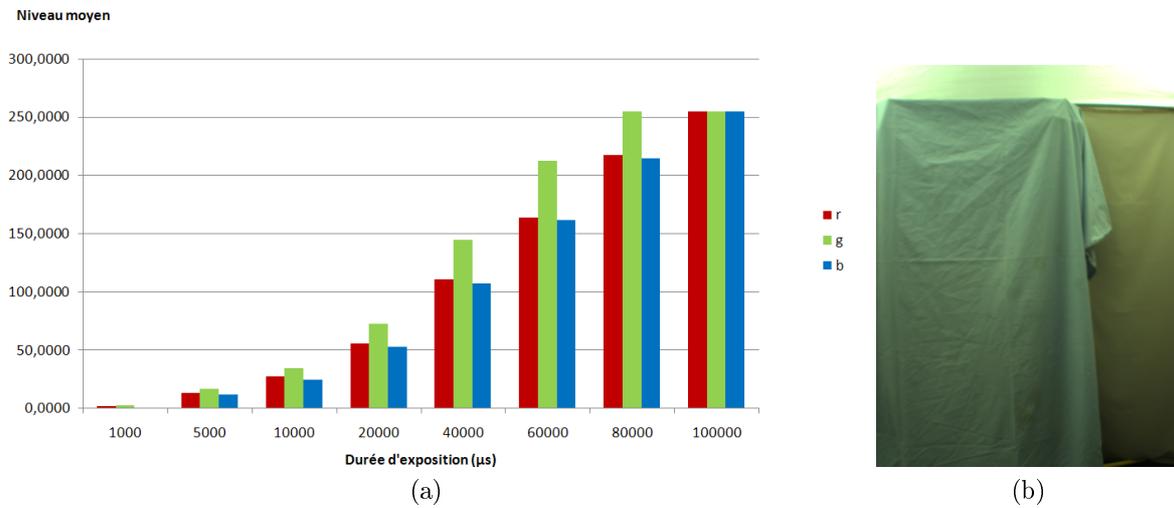


FIG. 3.10 – Bruit de mesure de la caméra : niveau moyen du pixel test (a) et niveau moyen de tous les pixels à 40 000 μs (b).

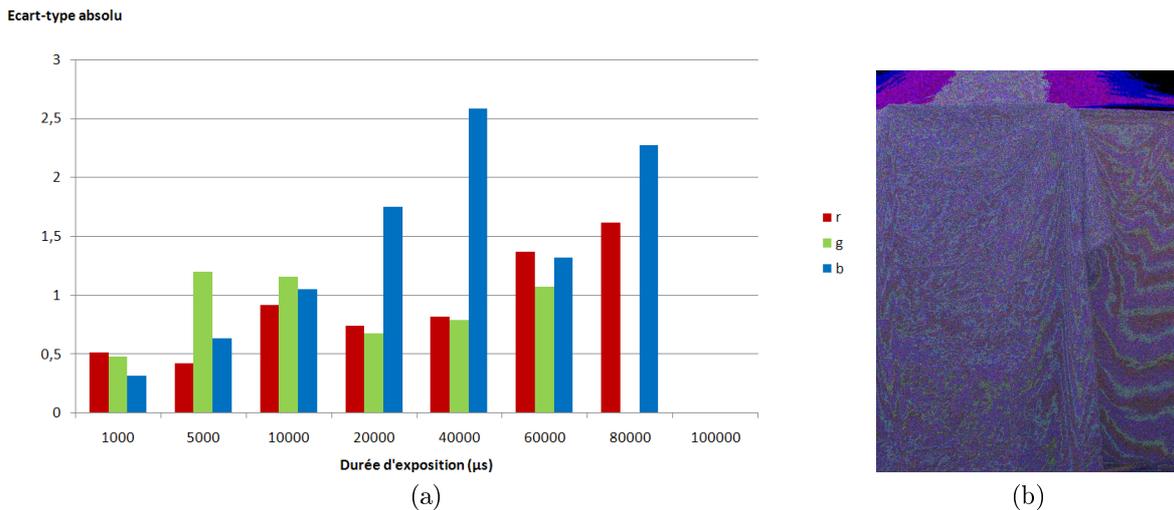


FIG. 3.11 – Bruit de mesure de la caméra : écart-type absolu du pixel test (a) et écart-type absolu (amplifié) de tous les pixels à 40 000 μs (la valeur pour un canal est représentée dans la couleur du canal) (b).

Pour estimer l'influence du bruit sur le signal, considérons l'écart-type relativement au niveau moyen (voir Fig. 3.12 (a)). Nous constatons alors que pour des expositions longues, l'écart-type est important en valeur absolue, mais perturbe peu le signal (écart-type inférieur à 2% du signal). En revanche, pour

des expositions courtes, l'écart-type peut dépasser 20% du signal et donc le perturber fortement. Nous retrouvons ces résultats en considérant tous les pixels de l'image (voir Fig. 3.12 (b)) : l'écart-type est plus important dans les régions sombres. Nous arrivons ainsi à une conclusion classique : nous obtenons peu d'information d'un signal trop faible (car nous le distinguons difficilement du bruit) ou trop fort (à cause de la saturation).

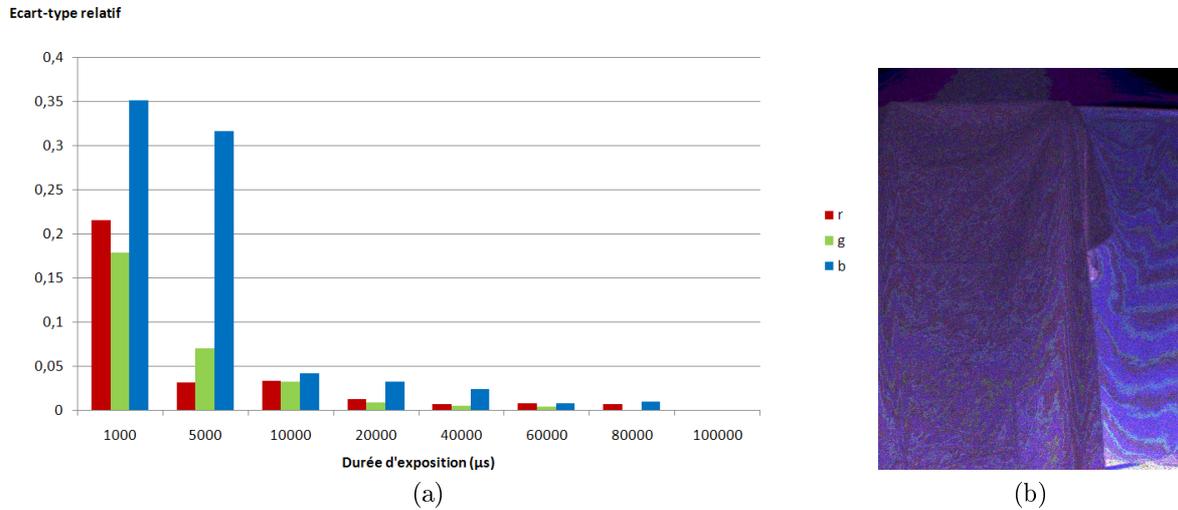


FIG. 3.12 – Bruit de mesure de la caméra : écart-type relatif du pixel test (a) et écart-type relatif (amplifié) de tous les pixels à 40 000 μs (la valeur pour un canal est représentée dans la couleur du canal) (b).

L'écart-type donne une indication sur la variabilité moyenne du bruit. Il est également important d'avoir une idée de l'amplitude du bruit c'est-à-dire la différence entre les valeurs maximales et minimales qu'il peut prendre couramment. Comme il y a une corrélation entre l'amplitude et l'écart-type, nous retrouvons les résultats précédents (voir Fig. 3.13 pour l'amplitude absolue et Fig. 3.14 pour l'amplitude relative).

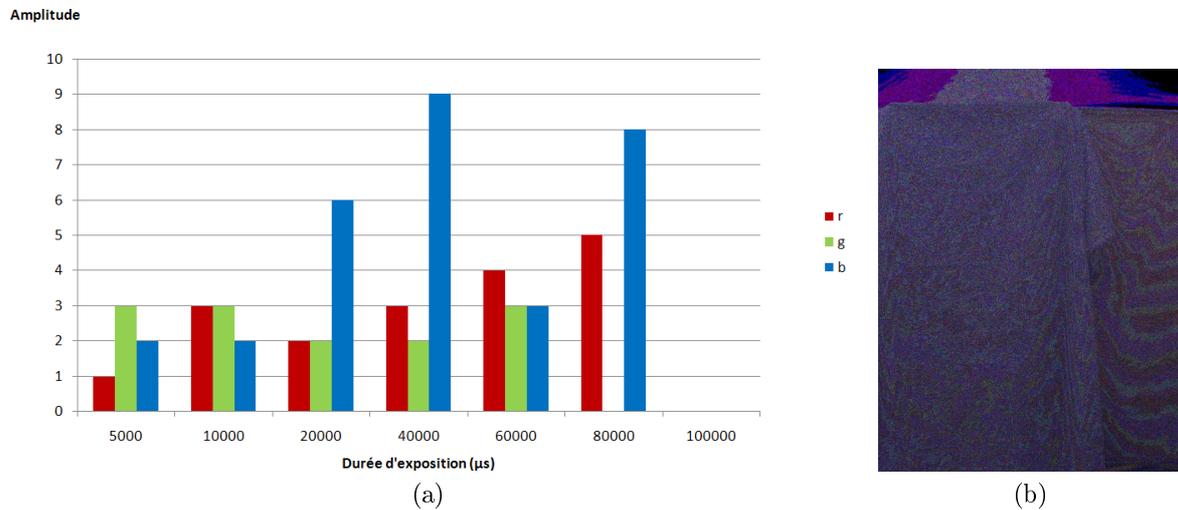


FIG. 3.13 – Bruit de mesure de la caméra : amplitude absolue du pixel test (a) et amplitude absolue (amplifiée) de tous les pixels à 40 000 μs (la valeur pour un canal est représentée dans la couleur du canal) (b).

L'amplitude relative moyenne sur tous les pixels, en fonction du niveau moyen sur la série d'images et des canaux de couleur, est représentée Fig. 3.15. Nous constatons sur ces graphiques que même avec une durée d'exposition adaptée (niveau entre 100 et 200), nous ne pouvons pas garantir la valeur d'un pixel à moins de 3% près environ.

Expérience 2 : nous plaçons la caméra devant une scène fixe et acquérons une série d'images avec une durée d'exposition donnée. Pour chaque pixel et chaque canal, nous calculons ensuite le niveau moyen dans la série d'images. Puis, pour tous les pixels d'un niveau moyen donné, nous dénombrons les niveaux

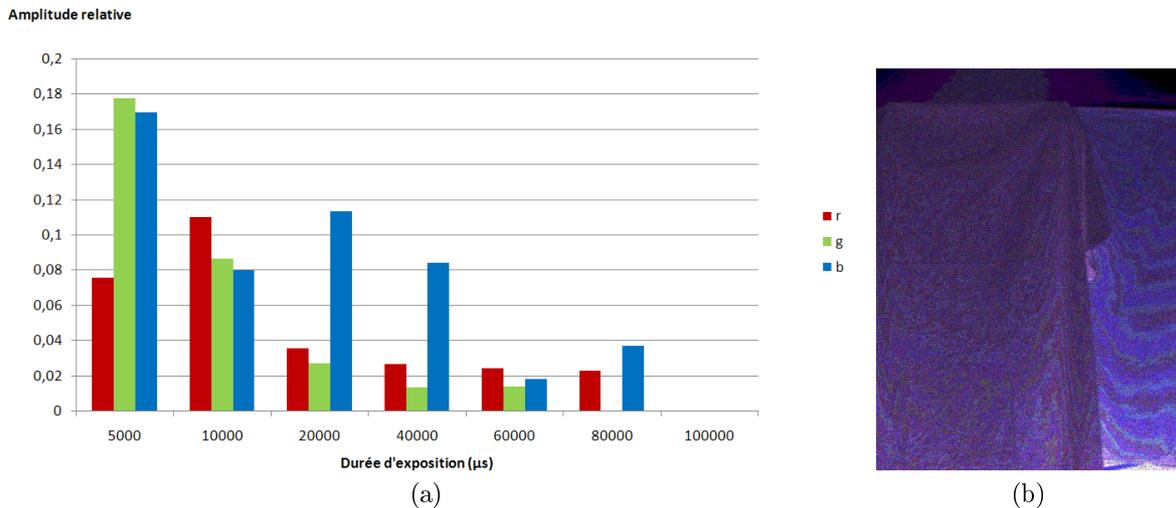


FIG. 3.14 – Bruit de mesure de la caméra : amplitude relative du pixel test (a) et amplitude relative (amplifiée) de tous les pixels à 40 000 μs (la valeur pour un canal est représentée dans la couleur du canal) (b).

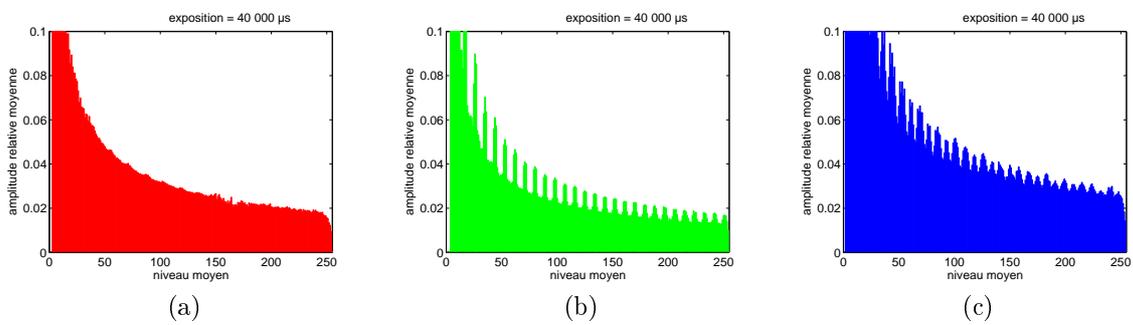


FIG. 3.15 – Bruit de mesure de la caméra : amplitude relative moyenne en fonction du niveau moyen, pour le canal rouge (a), vert (b) et bleu (c).

mesurés dans la série d’images. Nous obtenons ainsi une distribution des niveaux de la série d’images par rapport au niveau moyen.

Résultats de l’expérience 2 : l’expérience 2 a été réalisée avec des séries de 10 images. Les distributions ont été calculées pour les trois canaux de couleur, pour des durées d’exposition de 20 000 μs , 40 000 μs et 80 000 μs et par rapport à des niveaux moyens de 100, 150 et 200. Elles sont présentées Fig. 3.16, Fig. 3.17 et Fig. 3.18.

Nous constatons tout d’abord que la distribution ne dépend pas de la durée d’exposition. Ceci implique que la distribution ne dépend pas de la position des pixels dans l’image. En effet, puisque la scène est fixe, les pixels de niveau moyen 100 à 20 000 μs sont différents des pixels de niveau moyen 100 à 40 000 μs .

Nous constatons ensuite que la distribution dépend légèrement du niveau moyen. En effet, pour les niveaux moyens élevés, la distribution est un peu plus étalée. Notons que si nous avons considéré l’étalement de la distribution relativement au niveau moyen, nous observerions le phénomène inverse.

Pour terminer, nous constatons que la distribution dépend principalement du canal de couleur considéré. Pour le canal rouge, les distributions ont une forme de gaussienne, sont bien centrées et quasi-symétriques. Pour le canal vert, les distributions ont plutôt une forme triangulaire, sont moins étalées et moins symétriques. Enfin, pour le canal bleu, les distributions ont une forme de parabole, sont plus étalées et ont des niveaux quasi-inutilisés. Ainsi, les pixels de niveau moyen 200 ont de fortes chances d’avoir les valeurs 199 ou 201 mais, paradoxalement, presque aucune chance d’avoir le niveau 200, qui est pourtant celui espéré. Pour le canal bleu, parmi toutes les images acquises pour l’expérience 2, seuls 19 pixels ont la valeur 200 alors que 69 604 pixels ont la valeur 199 et 72 445 la valeur 201. En fait, cette particularité se retrouve pour plusieurs niveaux des canaux vert et bleu comme l’illustrent les histogrammes des images acquises pour l’expérience 2, présentés Fig. 3.19, Fig. 3.20 et Fig. 3.21. Nous pourrions penser que ce phénomène est la conséquence des traitements effectués par le système d’acquisition après numérisation du signal mais les niveaux concernés devraient alors être tout à fait inutilisés, ce qui n’est pas le cas.

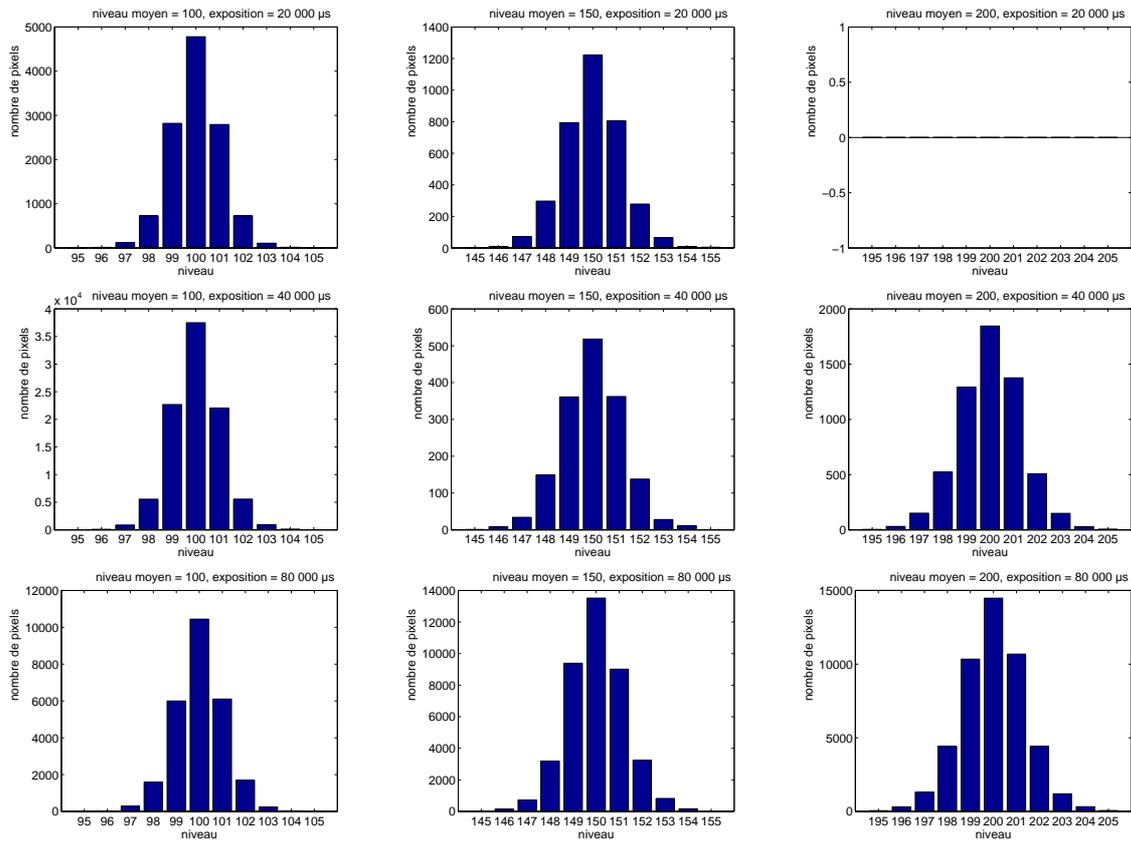


FIG. 3.16 – Bruit de mesure de la caméra : distribution des niveaux pour le canal rouge.

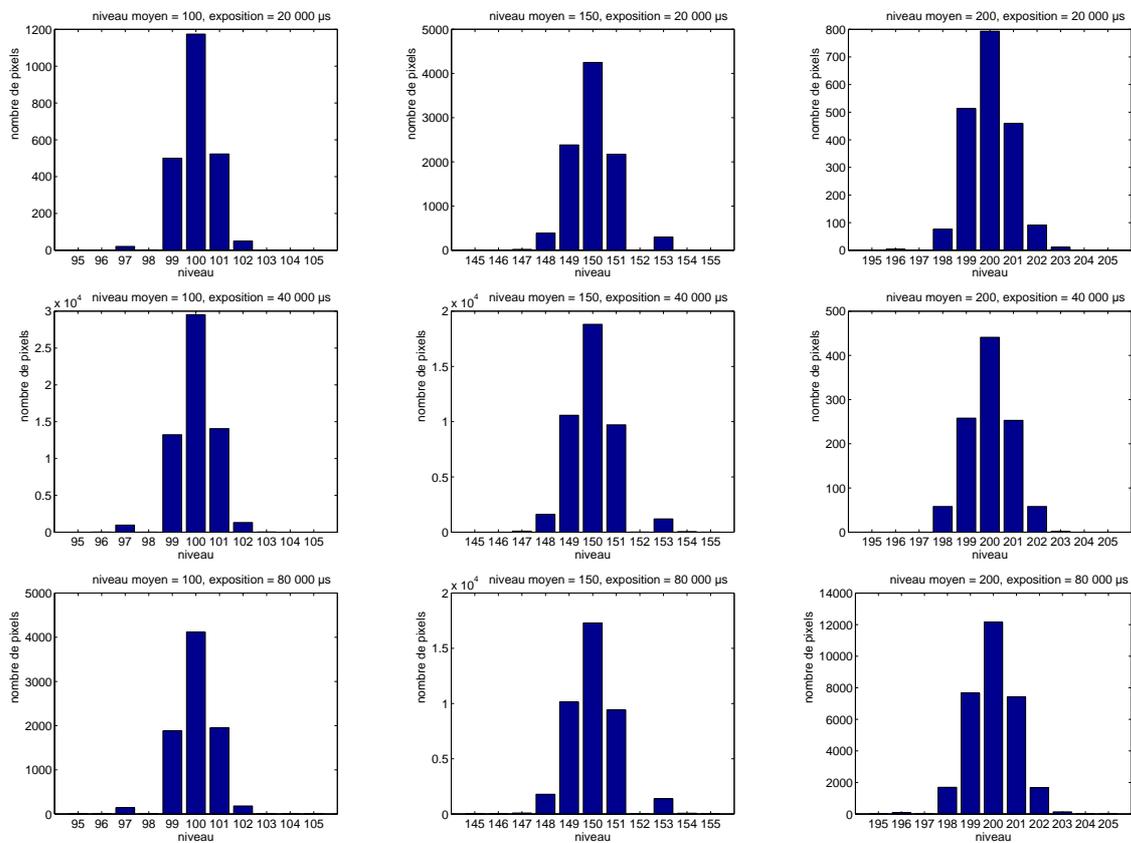


FIG. 3.17 – Bruit de mesure de la caméra : distribution des niveaux pour le canal vert.

Conclusion : la caméra subit un bruit de mesure, qui dépend de la quantité de lumière mesurée. L'influence du bruit est moindre pour un signal fort. Bien sûr, à la saturation, le bruit est nul mais

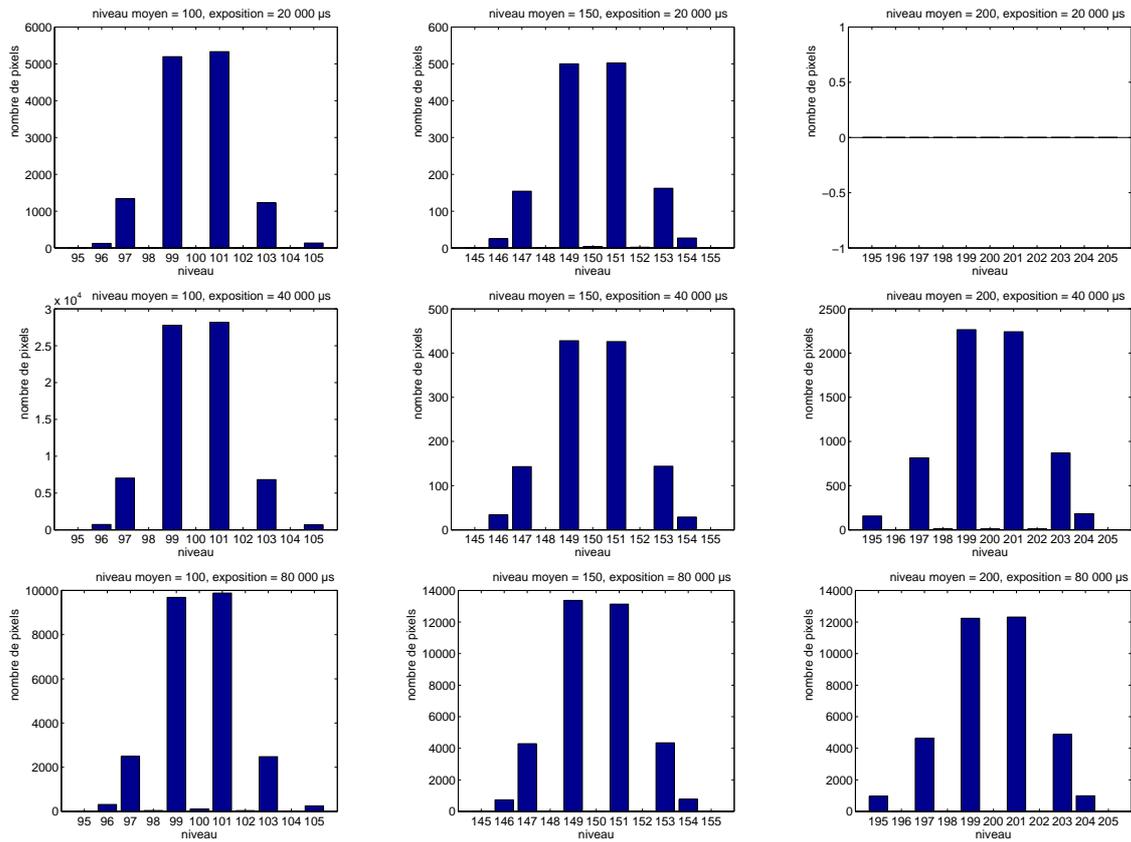


FIG. 3.18 – Bruit de mesure de la caméra : distribution des niveaux pour le canal bleu.

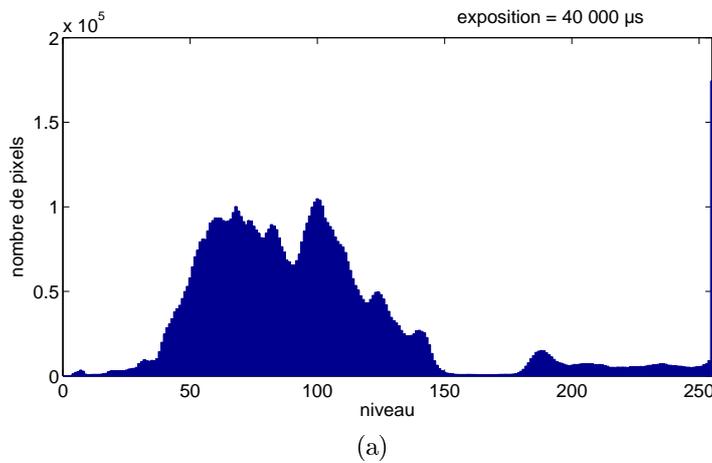


FIG. 3.19 – Canal rouge des images caméra à 40 000 μs : histogramme (a) et image moyenne (b).

l'information apportée est faible (i.e. la quantité de lumière dépasse le seuil admissible). Avec notre caméra, même si le signal est élevé mais non saturé, nous ne pouvons pas assurer la valeur d'un pixel avec une marge d'erreur inférieure à 3%. Pour un signal faible (inférieur à 50), la marge d'erreur dépasse rapidement les 10%. D'après nos analyses, le bruit de mesure est approximativement distribué selon une gaussienne. Nous en déduisons que son espérance est nulle et que nous pouvons donc annuler le bruit en moyennant plusieurs acquisitions de la scène. Enfin, notons une particularité de la caméra : certaines valeurs, notamment du canal bleu, sont quasiment inutilisées. Ceci implique que, si pour ces valeurs, la caméra donne en moyenne le bon résultat, il est très peu probable qu'une acquisition donne effectivement le résultat espéré.

3.2.3 Correction

Le débruitage d'images constitue une part importante du domaine du traitement d'images et a fait l'objet de nombreuses recherches. Il existe désormais de nombreuses méthodes de débruitage, parfois

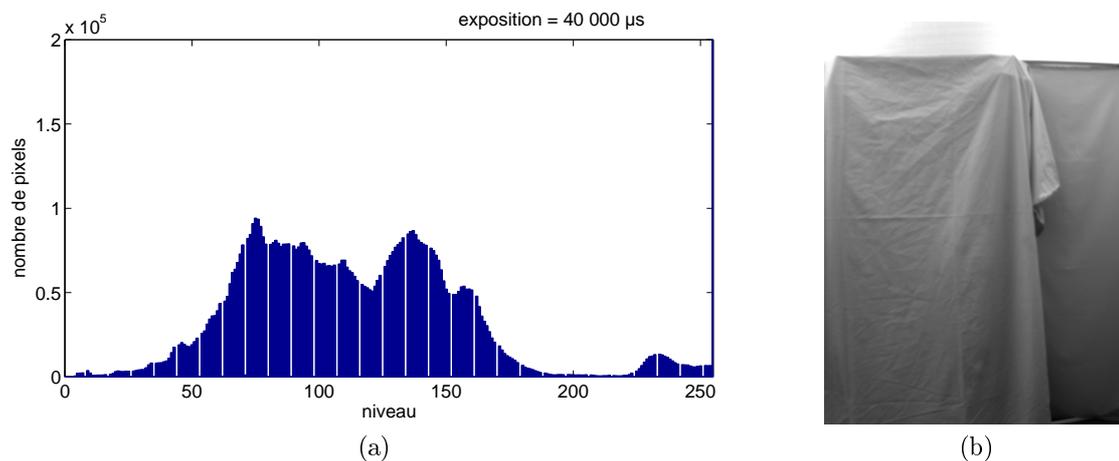


FIG. 3.20 – Canal vert des images caméra à 40 000 μs : histogramme (a) et image moyenne (b).

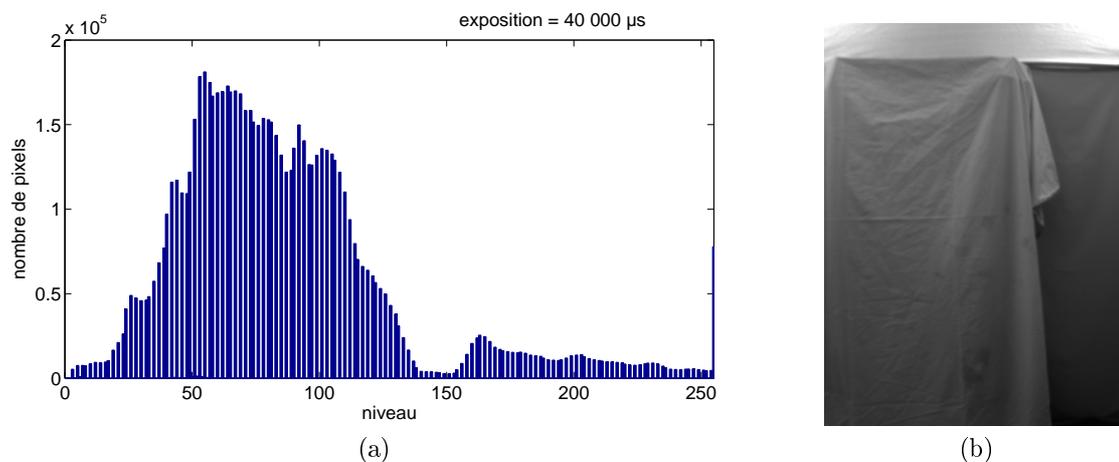


FIG. 3.21 – Canal bleu des images caméra à 40 000 μs : histogramme (a) et image moyenne (b).

complexes [BCM05, MGMH04]. Par rapport aux autres perturbations radiométriques de notre caméra, l'influence du bruit est assez faible. Par exemple, Fig. 3.22 donne, pour les pixels d'une acquisition caméra, l'erreur, relativement au niveau réel, due au bruit : l'erreur relative est globalement inférieure à 3% et atteint 10% quand le signal est très faible (car un signal faible amplifie l'erreur relative). Dans cette section, seules quelques méthodes simples de réduction de bruit sont abordées.

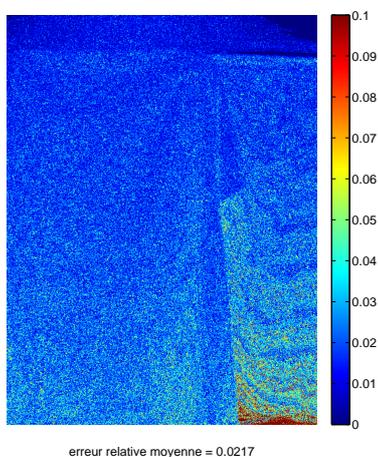


FIG. 3.22 – Erreur relative d'une acquisition caméra à 40 000 μs sans correction de bruit (fausses couleurs).

Méthode temporelle

D'après l'analyse réalisée précédemment, le bruit n'introduit quasiment aucun biais. En effet, le bruit d'obscurité est en moyenne très faible et le bruit de mesure est distribué à peu près symétriquement donc d'espérance nulle. Par conséquent, pour un pixel et une durée d'exposition donnés, nous pouvons modéliser le niveau de ce pixel sur différentes acquisitions caméra comme une variable aléatoire non biaisée. L'espérance de cette variable aléatoire est le niveau réel cherché et s'obtient en calculant la valeur moyenne sur les acquisitions caméra.

Ainsi, une méthode simple pour corriger le bruit consiste à prendre plusieurs acquisitions de la scène et à calculer la moyenne pour chaque pixel. Notons que cette méthode permet également de corriger le bruit d'obscurité si celui-ci n'est pas négligeable (il suffit d'estimer puis de soustraire son espérance).

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle converge lentement (voir Fig. 3.23), ce qui nécessite de réaliser un certain nombre d'acquisitions et, au final, augmente le temps d'exécution.

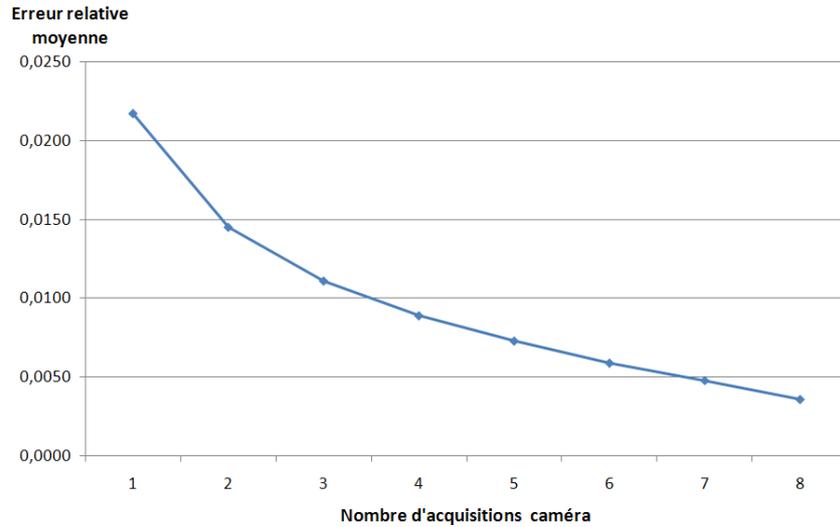


FIG. 3.23 – Erreur relative moyenne après correction temporelle du bruit en fonction du nombre d'acquisitions caméra à 40 000 μs .

De façon rigoureuse, soient C_n la couleur du pixel pour une acquisition n , t la durée d'exposition, l la quantité de lumière par unité de temps atteignant réellement le pixel (i.e. la valeur cherchée) et B_n le bruit, nous avons :

$$C_n = t \times (l + B_n)$$

Nous avons ainsi bien un bruit multiplicatif au sens où il est amplifié par la durée d'exposition. Cette équation équivaut à :

$$X_n = \frac{C_n}{t} = l + B_n$$

La méthode de correction revient à calculer la moyenne \bar{X} des variables aléatoires indépendantes X_n :

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (l + B_n)$$

D'après la linéarité de l'espérance, nous avons :

$$\mathbb{E}(\bar{X}) = \mathbb{E}\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (l + B_n)\right) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbb{E}(l) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbb{E}(B_n) = l$$

car l est constant et l'espérance du bruit est nulle. Ceci prouve que la méthode converge bien vers la valeur cherchée.

Enfin, si nous calculons la variance de \bar{X} :

$$\text{Var}(\bar{X}) = \text{Var}\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n\right) = \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \text{Var}(X_n) = \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sigma_B^2 = \frac{\sigma_B^2}{N}$$

car la variance des variables aléatoires X_n correspond à la variance du bruit, σ_B^2 . L'écart-type de \bar{X} est donc :

$$\sqrt{\text{Var}(\bar{X})} = \frac{\sigma_B}{\sqrt{N}}$$

Nous retrouvons ainsi la classique convergence en $1/\sqrt{N}$ (c'est-à-dire lente) du débruitage par moyennage.

Méthode spatiale

La correction de bruit repose sur le fait que l'information est constante alors que le bruit est aléatoire. Pour des questions de rapidité d'acquisition, il serait intéressant de pouvoir corriger le bruit à partir d'une seule image. La seule possibilité est alors de considérer que l'information est spatialement constante localement. Les images naturelles présentent souvent des régions à l'intérieur desquelles le niveau des pixels varie progressivement. Une méthode pour corriger le bruit consiste donc à considérer les pixels par voisinage.

Par exemple, le filtrage médian consiste à centrer une fenêtre sur un pixel et à retenir, pour ce pixel, la valeur médiane parmi les pixels de la fenêtre (voir Fig. 3.24 (a)). Cette méthode est classiquement utilisée pour réduire le bruit «poivre et sel» (pixels noirs et blancs répartis au hasard). Cependant, comme expliqué précédemment, notre caméra utilise très peu certains niveaux, ce qui rend cette méthode peu adaptée.

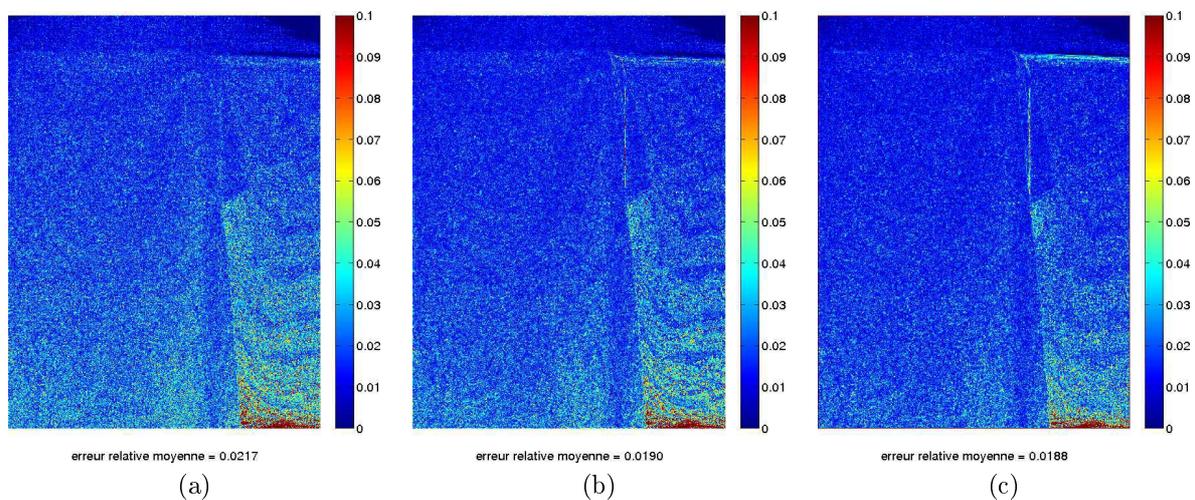


FIG. 3.24 – Erreur relative d'une acquisition caméra à $40\,000\ \mu\text{s}$ après correction spatiale du bruit (fausses couleurs) : sans correction (a) filtrage médian (b) et filtrage gaussien (c).

Une méthode plus adaptée à notre caméra consiste à réaliser un filtrage gaussien de l'image (convolution 2D dont les coefficients du noyau sont donnés par une gaussienne) (voir Fig. 3.24 (b)). En effet, d'après le théorème central limite, de manière très générale, la combinaison de facteurs indépendants tend à suivre une loi normale. Ceci se vérifie d'après la distribution des niveaux des pixels détaillée précédemment.

Ainsi, une méthode spatiale permet de réduire le bruit à partir d'une seule image. Cependant, la correction est moins bonne qu'avec la méthode temporelle, en particulier au niveau des hautes fréquences (contours, textures) où la distinction entre bruit et signal est moins évidente.

Il existe de nombreuses autres méthodes de correction de bruit mais celles-ci ne sont pas forcément applicables ou adaptées à Catopsys (par exemple, parce qu'elles sont spécifiques à un type de bruit particulier ou qu'elles nécessitent un modèle précis). Les deux méthodes présentées ici sont générales, applicables à Catopsys et permettent d'établir différents compromis qualité/rapidité.

3.3 Variation de sensibilité des photodétecteurs

3.3.1 Présentation

Un capteur ne réagit pas de façon rigoureusement uniforme à la lumière [Tar95]. En effet, de par le processus de fabrication, l'épaisseur de la couche photosensible ne peut pas être parfaitement contrôlée d'où les variations entre photodétecteurs. Ce phénomène est souvent appelé effet de champ plat («flat field»).

Ce phénomène peut être réduit en améliorant le processus de fabrication. Une autre solution consiste à implémenter, dans la caméra, une correction électronique automatique paramétrée par calibrage au cours de la fabrication.

La suite de cette section explique comment évaluer la variation de sensibilité d'un capteur d'images et comment corriger cette variation pour uniformiser la sensibilité du capteur.

3.3.2 Étude expérimentale

Expérience 1 : nous plaçons le capteur (concrètement, la caméra sans objectif) devant une source de lumière surfacique uniforme calibrée. Nous acquérons une série d'images et calculons la valeur moyenne de chaque pixel dans la série d'images pour réduire le bruit (correction temporelle).

Résultat de l'expérience 1 : l'expérience 1 a été réalisée en utilisant une surface éclairante Fostec alimentée par une source de lumière Polytec (de type halogène) équipée d'un filtre anti-infrarouge. Les conditions de l'expérience permettent de considérer l'éclairage du capteur à peu près uniforme, c'est-à-dire que tous les photodétecteurs reçoivent la même lumière.

L'image obtenue est donnée Fig. 3.25. Nous constatons que la sensibilité du capteur présente effectivement des variations. L'amplitude des niveaux de l'image, relativement à la moyenne, est d'environ 10%, pour chaque canal de couleur. L'expérience a été réalisée pour différentes quantités de lumière reçue : les résultats obtenus sont analogues.

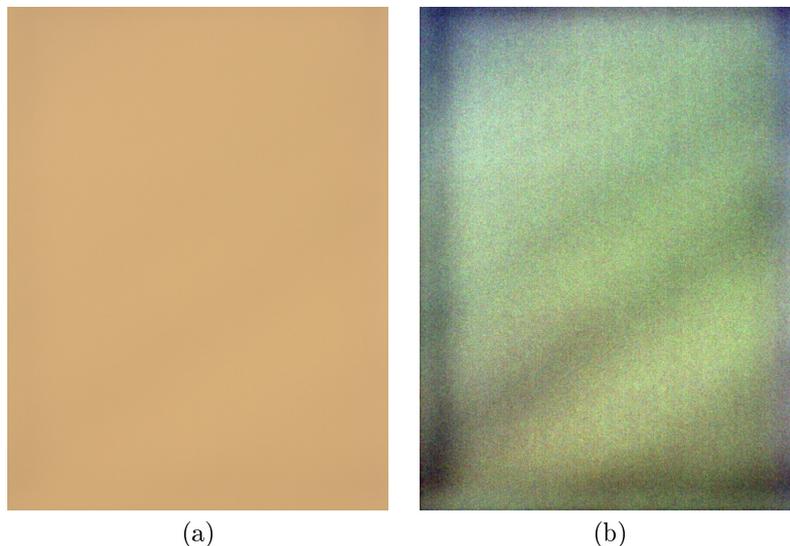


FIG. 3.25 – Variation de sensibilité des photodétecteurs : image obtenue par l'expérience 1 (a) et image amplifiée (b).

Expérience 2 : nous plaçons la caméra sans objectif devant une scène fixe distante, éclairée et qui ne présente pas une dominante chromatique trop prononcée. Comme pour l'expérience 1, nous acquérons une série d'images pour obtenir une image débruitée.

Résultat de l'expérience 2 : l'expérience 2 a été réalisée avec une scène située à plus d'un mètre du capteur et éclairée par des lampes de type néon et de type halogène.

L'image obtenue est donnée Fig. 3.26. Nous retrouvons des résultats proches de ceux de l'expérience 1. L'amplitude relative est ici de 15%, ce qui semble indiquer que les mesures sont tout de même moins précises qu'avec l'expérience 1. L'expérience 2 a également été réalisée pour différentes quantités de lumière reçue, avec, ici aussi, des résultats analogues. À la différence de l'expérience 1, l'expérience 2 ne nécessite pas de matériel de calibrage spécifique.

3.3.3 Correction

Comme évoquées précédemment, la variation de sensibilité des photodétecteurs peut être en partie corrigée, a posteriori, très simplement. Pour cela, il suffit de réaliser l'une des expériences précédentes pour obtenir une image de calibrage du capteur. La correction s'effectue ensuite en pondérant les acquisitions par l'inverse de l'image de calibrage (voir Fig. 3.27).

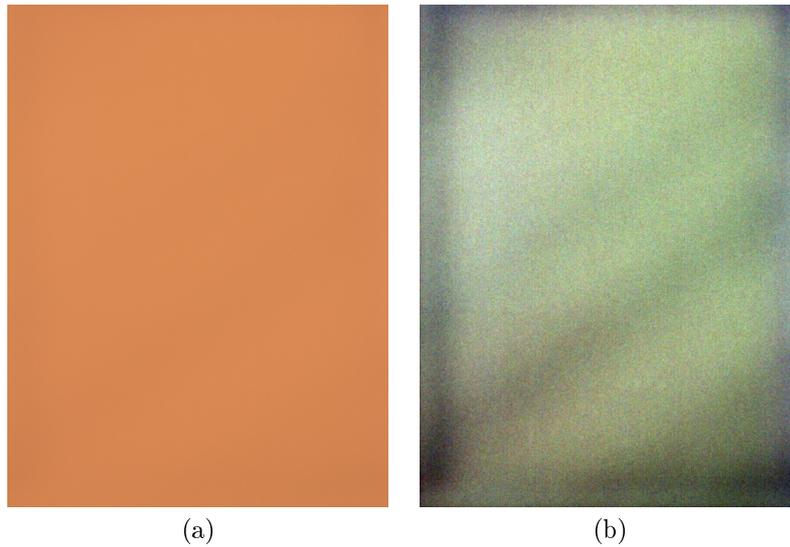


FIG. 3.26 – Variation de sensibilité des photodétecteurs : image obtenue par l'expérience 2 (a) et image amplifiée (b).

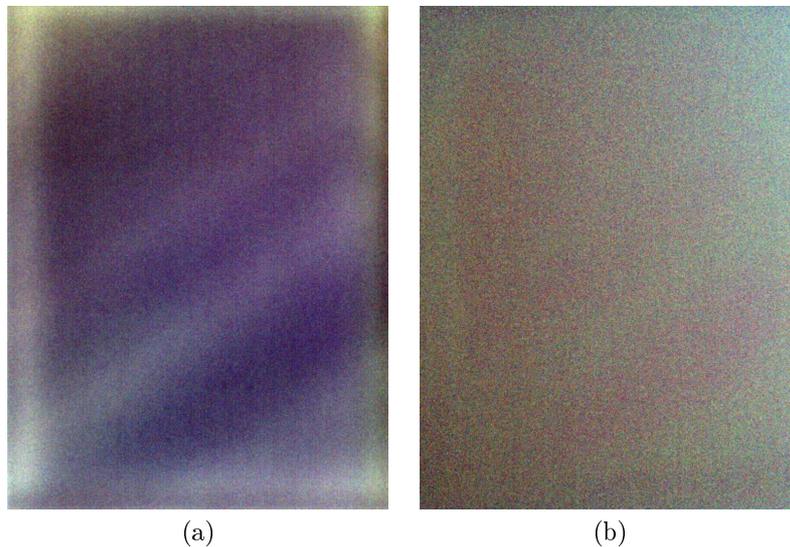


FIG. 3.27 – Variation de sensibilité des photodétecteurs : image de pondération amplifiée (a) et image corrigée amplifiée (b).

Ainsi, lors de nos tests, la correction fait passer l'amplitude relative de 10% à 5% avec le calibrage de l'expérience 1 et de 15% à 7% avec le calibrage de l'expérience 2.

3.4 Vignetage

3.4.1 Présentation

Le vignetage désigne l'effet, classique en photographie, d'assombrissement d'une image lorsqu'on s'éloigne du centre. Plus précisément, le vignetage correspond à une non-uniformité spatiale d'origine optique ou géométrique. Ainsi, au niveau du capteur, la lumière incidente en un point dépend de la position de ce point.

Il existe plusieurs sources de vignetage [GC05, AA01, CLE00] : l'utilisation d'une lentille mince, d'un diaphragme ou d'un pare-soleil, la combinaison de plusieurs lentilles, la géométrie des photodétecteurs CMOS (en forme de tunnels)...

Par exemple, l'illustration Fig. 3.28 présente un objectif à deux lentilles. Considérons deux points dans le plan focal de l'objectif : P_1 , sur l'axe de l'objectif, et P_2 , hors de l'axe. P'_1 et P'_2 sont les points images correspondant, sur le capteur. Nous constatons que la géométrie de ce système optique implique que l'ouverture est plus grande pour P'_1 que pour P'_2 . Par conséquent, si on place une source de lumière

étendue uniforme dans le plan focal, P'_1 reçoit plus de lumière que P'_2 . D'où l'effet d'assombrissement des bords de l'image.

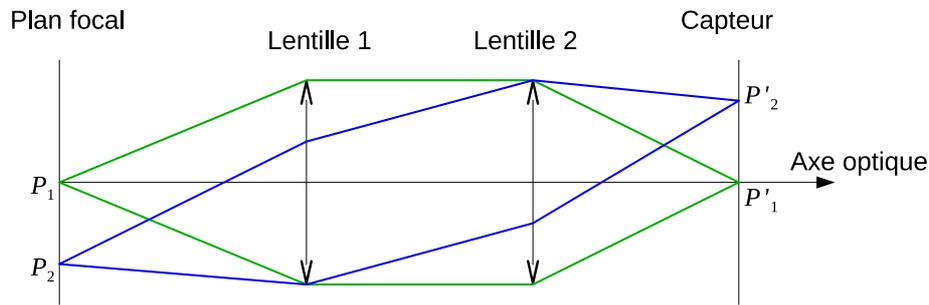


FIG. 3.28 – Principe du vignetage résultant de l'association de deux lentilles.

3.4.2 Étude expérimentale

Objectifs : comme le vignetage est une variation spatiale, le premier objectif est de déterminer l'amplitude de cette variation. Enfin, comme l'origine du vignetage est géométrique, le second objectif de l'étude est de caractériser la variation, notamment de déterminer si elle suit une symétrie radiale (due à la forme circulaire de l'objectif et des optiques) et un profil d'atténuation particulier.

Expérience : théoriquement, le vignetage est simple à mettre en évidence : il suffit de placer la caméra avec son objectif devant une scène blanche uniforme et de prendre une image. En pratique, il peut être important de corriger le bruit.

Résultats : l'expérience a été réalisée avec le matériel déjà évoqué (surface éclairante Fostec alimentée par une source de lumière Polytec, de type halogène et équipée d'un filtre anti-infrarouge, et caméra mvBlueFox-121C équipée d'un objectif grand-angle). Le bruit a été corrigé par la méthode temporelle; la variation de sensibilité du capteur n'a pas été corrigée. Plusieurs durées d'exposition ont été utilisées. Les acquisitions obtenues sont données Fig. 3.29. Nous observons effectivement l'assombrissement des bords de l'image ainsi qu'une certaine symétrie.

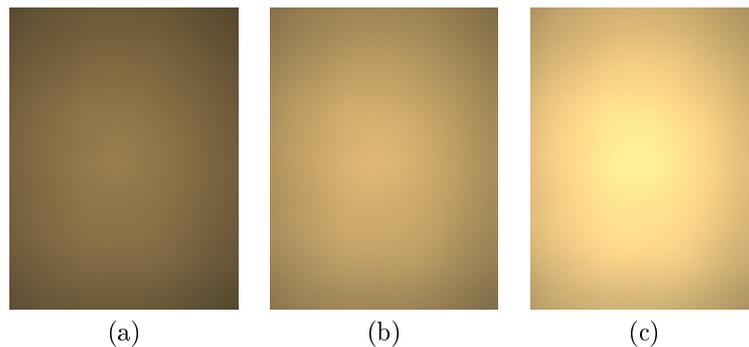


FIG. 3.29 – Vignetage caméra : acquisitions non bruitées d'une source de lumière uniforme à $1000 \mu s$ (a), $1500 \mu s$ (b) et $2000 \mu s$ (c).

L'amplitude de la variation, relativement au niveau moyen de l'image, est donnée Fig. 3.30. Nous constatons qu'elle est importante et quasi-constante selon les canaux de couleur et les durées d'exposition (environ 50%).

Plusieurs seuillage de l'acquisition caméra à $1500 \mu s$ sont présentés Fig. 3.31. Comme attendu, nous observons une symétrie des effets du vignetage. Notons cependant que la forme ne semble pas rigoureusement circulaire mais plutôt elliptique.

Le profil d'atténuation par ligne ou par colonne est donné Fig. 3.32. Dans les deux cas, il s'agit d'un profil en cloche, légèrement décentré.

Enfin, le profil complet, donné Fig. 3.33, illustre également cette forme en cloche avec la symétrie, à peu près radiale.

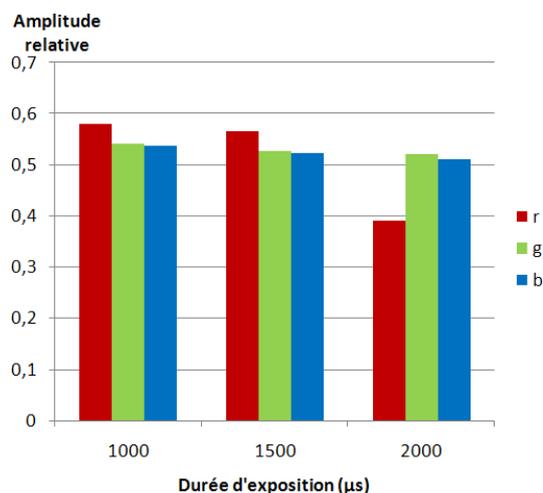


FIG. 3.30 – Vignelage caméra : amplitude relative.

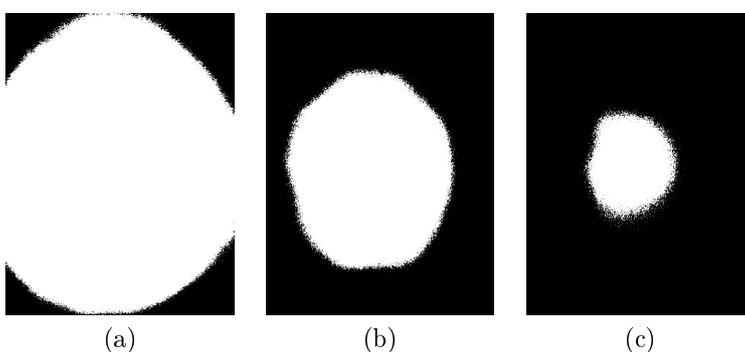


FIG. 3.31 – Vignelage caméra : acquisition caméra (bruitée) à 1500 μs , seuillée au niveau 160 (a), 190 (b) et 210 (c).

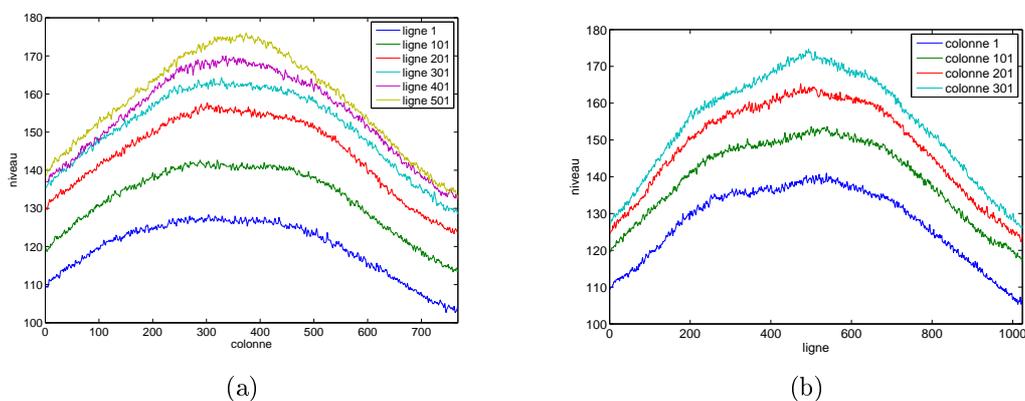


FIG. 3.32 – Vignelage caméra : profil des niveaux de l'acquisition caméra (bruitée) à 1500 μs pour quelques lignes (a) et quelques colonnes (b).

3.4.3 Modélisation

Le vignelage est principalement causé par la géométrie du système optique. Par conséquent, le profil d'atténuation est relativement « lisse » et peut être décrit par un modèle simple. De plus, la modélisation permet de caractériser le vignelage de façon relativement robuste face au bruit.

Plusieurs modèles de vignelage sont proposés dans la littérature. Un modèle classique permet de décrire le vignelage d'une lentille mince. Il suppose que le vignelage suit une symétrie radiale dont le profil est un cosinus à la puissance 4. Ce modèle est assez simple mais ne permet pas de décrire très précisément le phénomène [AA01]. [YCS04] propose de modéliser le vignelage, pour chaque ligne de pixel, par un cosinus hyperbolique. Enfin, Goldman et Chen [GC05] proposent d'utiliser une fonction polynômiale, avec une symétrie radiale.

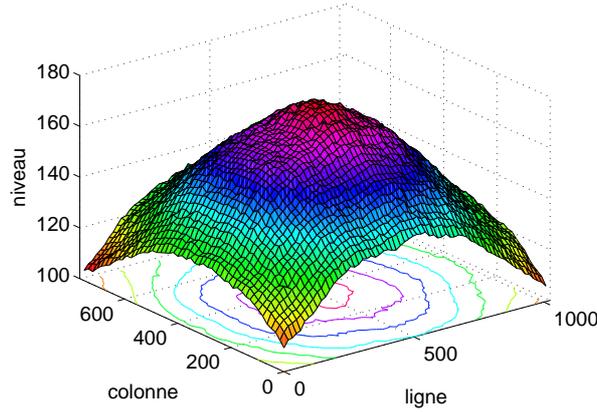


FIG. 3.33 – Vignetage caméra : profil des niveaux de l’acquisition caméra à 1500 μ s.

Nous avons caractérisé le vignetage de notre caméra selon deux modèles. L’expérience précédente nous fournit les données à modéliser. Le problème se résume donc à trouver les paramètres du modèle utilisé permettant de décrire le plus fidèlement possible le phénomène. Il s’agit donc d’un classique problème d’optimisation, que nous avons traité ici avec la méthode classique de Levenberg-Marquardt [Mar63].

Le premier modèle utilisé est une version légèrement modifiée du modèle de Goldman-Chen [GC05]. Il est décrit par la fonction polynômiale suivante :

$$V(x, y) = 1 + p_1 R(x, y) + p_2 R(x, y)^2 + p_3 R(x, y)^3$$

avec :

$$R(x, y) = p_4(x - p_5)^2 + (y - p_6)^2$$

$V(x, y)$ est le coefficient de vignetage du pixel (x, y) (i.e. le facteur d’atténuation due au vignetage pour ce pixel). Les paramètres p_1 , p_2 et p_3 correspondent aux coefficients du polynôme. Les paramètres p_5 et p_6 correspondent au centre de symétrie du modèle. Enfin, le paramètre p_4 (qui a été ajouté par rapport au modèle de Goldman-Chen) est un coefficient de proportionnalité entre les deux axes de l’image permettant de définir une symétrie selon une ellipse alignée par rapport aux axes (et non uniquement selon un cercle). En utilisant ce modèle, l’optimisation donne les résultats présentés Fig. 3.34. Le résidu final de l’optimisation est de 0,4 (écart moyen entre les données initialement fournies et le modèle finalement trouvé) et l’erreur relative maximale entre la modélisation et les données réelles de 9%.

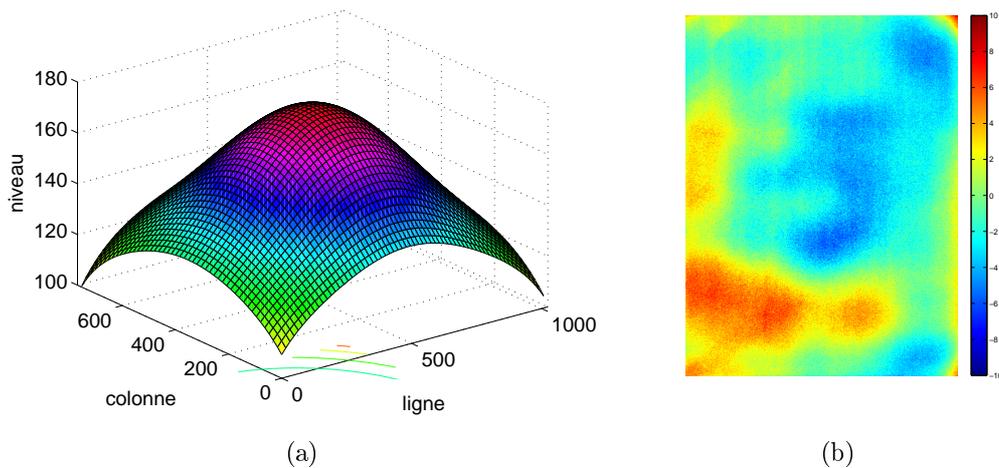


FIG. 3.34 – Vignetage caméra : modèle de Goldman-Chen pour une acquisition caméra à 1500 μ s (a) et erreur absolue de la modélisation (b).

Le second modèle utilisé est basé sur une gaussienne :

$$V(x, y) = \frac{1}{p_1} \exp\left(-\frac{(r(x, y) - p_2)^2}{p_3}\right)$$

avec :

$$r(x, y) = \sqrt{p_4(x - p_5)^2 + (y - p_6)^2}$$

Les paramètres p_1 , p_2 et p_3 définissent la gaussienne. Les paramètres p_4 , p_5 et p_6 permettent, comme pour le modèle précédent, de définir une symétrie selon une ellipse ainsi que son centre. Les résultats sont donnés Fig. 3.35. Le résidu final est ici de 0,2 et l'erreur relative maximale de 6%.

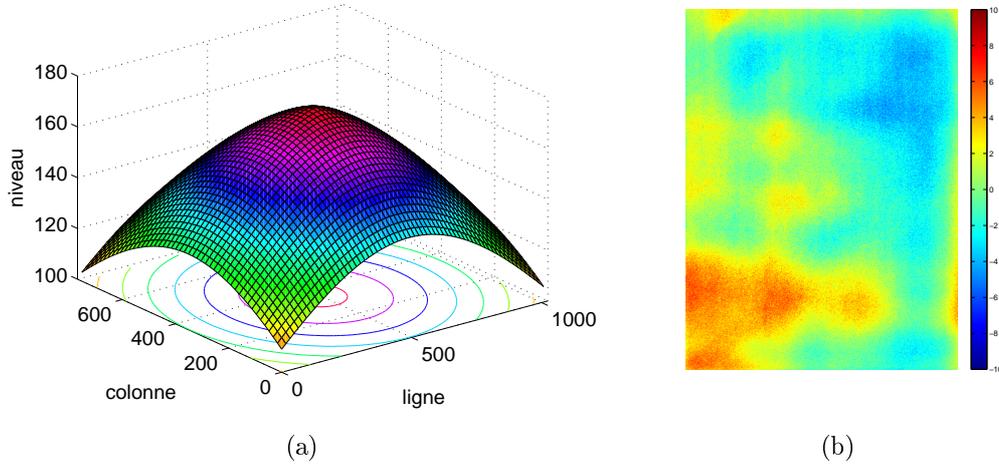


FIG. 3.35 – Vignetage caméra : modèle Gaussien pour une acquisition caméra à $1500 \mu\text{s}$ (a) et erreur absolue de la modélisation (b).

Nous constatons que ces modèles permettent de décrire assez fidèlement le vignetage de notre caméra. En effet, ils possèdent tous les deux les caractéristiques recherchées : une forme en cloche et une symétrie selon une ellipse. Nous constatons également une dissymétrie sur les images d'erreurs de la modélisation. Ceci est peut-être dû à la source de lumière utilisée qui ne doit pas être parfaitement uniforme ou à l'influence non corrigée de la variation de sensibilité du capteur.

3.4.4 Correction

Nous cherchons ici à concevoir une méthode de correction de vignetage adaptée au système Catopsys. Cette méthode doit être simple, automatique et robuste.

L'expérience décrite précédemment permet de caractériser le vignetage de la caméra grâce à du matériel et des manipulations spécifiques. Une expérience similaire est utilisée dans [KW00]. Clairement, cette démarche n'est pas envisageable pour Catopsys car le niveau de supervision requis est beaucoup trop élevé.

D'autres méthodes de correction de vignetage n'utilisent qu'une seule image [ZLK06, ZLK+08, LGYS04]. Elles n'ont pas été retenues car leur efficacité dépend beaucoup du contenu de l'image, ce qui peut compromettre leur robustesse. De plus, elles ne permettent pas de profiter des particularités du système Catopsys.

La méthode de correction de vignetage utilisée pour le système Catopsys est inspirée de [GC05]. Elle comporte deux étapes :

- calibrer le système en utilisant un modèle c'est-à-dire trouver, hors-ligne les paramètres du modèle qui caractérise le système réel ;
- corriger, en-ligne, les acquisitions en appliquant le modèle inverse avec les paramètres déterminés par le calibrage ;

Méthode de calibrage

De par son principe de fonctionnement, le système Catopsys est capable d'estimer le vignetage de façon automatique. En effet, la caméra est en rotation autour de l'axe du projecteur, ce qui lui permet de prendre plusieurs images d'un même point de la pièce avec des rotations différentes (voir Fig. 3.36). Ainsi, ce point est visible sur les différentes images mais à des positions différentes. La lumière émise par le point de la pièce en direction de la caméra est constante mais le vignetage dépend de la position dans l'image. Par conséquent, sur les différentes images, les pixels correspondant au point considéré ont des niveaux différents à cause du vignetage.



FIG. 3.36 – Acquisition d’images avec recouvrement pour la correction de vignetage.

Supposons la caméra calibrée géométriquement, c’est à dire que nous avons une fonction M telle que $M_i(s)$ est la position sur l’image caméra à la rotation i du point s de la pièce. Nous avons :

$$V_i(s) = V(M_i(s))$$

où V correspond à l’un des modèles de vignetage présentés précédemment. Soit $L(s)$ la lumière émise par s vers la caméra. Soit $C_i(s)$ la lumière provenant de s mesurée par la caméra à la rotation i . Si la caméra ne subit que le vignetage, nous avons :

$$C_i(s) = V_i(s)L(s)$$

Le problème de la correction de vignetage revient donc à trouver :

$$L(s) = \frac{C_i(s)}{V_i(s)}$$

ce qui nécessite au préalable de caractériser V . Si nous considérons s depuis une image caméra prise à une autre rotation j , nous avons également :

$$L(s) = \frac{C_j(s)}{V_j(s)}$$

nous cherchons donc V tel que :

$$\frac{C_i(s)}{V_j(s)} - \frac{C_j(s)}{V_i(s)} = 0$$

Comme les modèles de vignetages présentés possèdent six paramètres, cette équation n’est pas suffisante pour caractériser le vignetage de façon unique. En considérant plusieurs points dans la pièce et plusieurs rotations, nous nous ramenons au problème de minimisation :

$$\operatorname{argmin}_{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6} \left(\sum_{\substack{i < j \\ s \in S_i \cap S_j}} \|V_i(s)C_j(s) - V_j(s)C_i(s)\| \right)$$

où les p_k sont les paramètres cherchés du modèle de vignetage et S_k l’ensemble des points de la pièce visible par la caméra à la rotation k .

Notons que, dans le système Catopsys, la mise en correspondance des points aux différentes rotations est réalisée lors du calibrage géométrique. De par les caractéristiques du modèle de vignetage, les points à utiliser doivent être répartis sur toute l’image ainsi qu’aux bords, où l’effet du vignetage est important.

Méthode de correction

Soit (x, y) un point d’une image caméra. Soit $C(x, y)$ le niveau de ce point donné directement par la caméra. Soit $L(x, y)$ le niveau cherché c’est-à-dire qui n’a pas été modifié par le vignetage. Soit $V(x, y)$ le facteur de vignetage en (x, y) donné par le modèle déterminé par le calibrage. Corriger le vignetage revient donc tout simplement à calculer :

$$L(x, y) = \frac{C(x, y)}{V(x, y)}$$

Comme la correction doit être réalisée sur chaque point de chaque acquisition caméra, ce calcul doit être effectué rapidement. Nous pouvons donc précalculer V dans une image de pondération qu’il suffit

d'appliquer à chaque image acquise. Enfin, notons que cette correction suppose que l'espace des niveaux de l'image est linéaire.

Cette méthode de correction a été testée sur une acquisition blanche (cas de référence), une acquisition réelle et une acquisition panoramique. Les résultats obtenus sont donnés respectivement Fig. 3.37, Fig. 3.38 et Fig. 3.39. Sur l'image panoramique, les rectangles oranges illustrent les effets de la correction au niveau de la reconstruction panoramique.

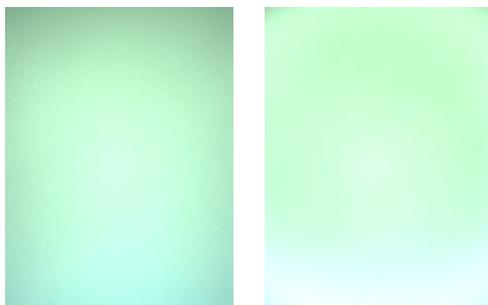


FIG. 3.37 – Correction du vignetage d'une acquisition «blanche».

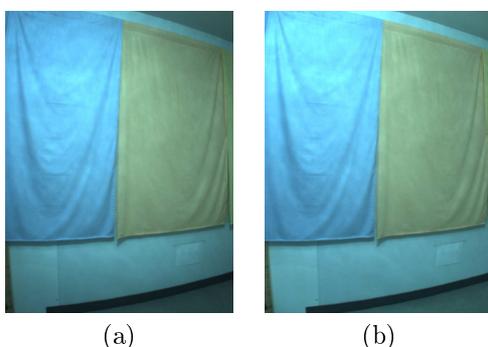


FIG. 3.38 – Correction de vignetage d'une acquisition réelle : image non corrigée (a) et image corrigée (b).

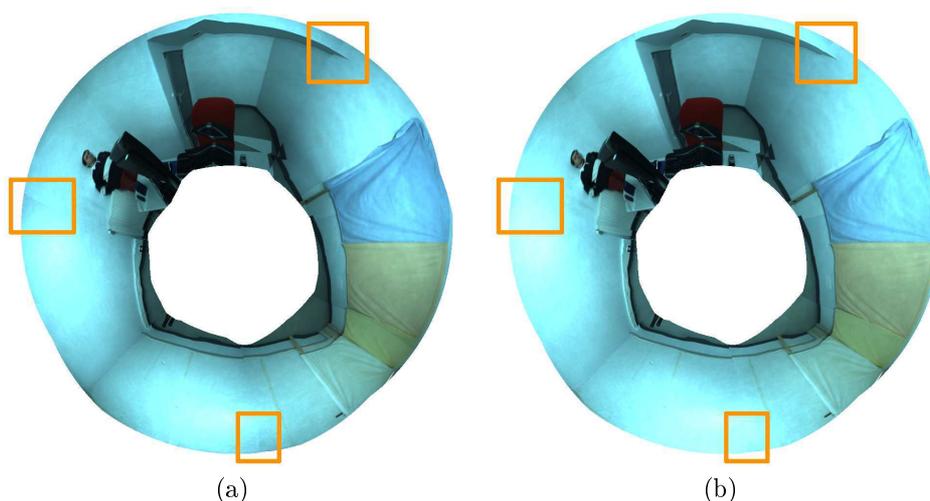


FIG. 3.39 – Correction de vignetage d'une acquisition panoramique : image non corrigée (a) et image corrigée (b).

Nous constatons que la correction réduit les effets du vignetage. La correction de l'acquisition blanche n'est pas parfaite car la scène acquise en pratique n'est pas parfaitement blanche. De plus, sur cette image, la variation de sensibilité du capteur n'a pas été corrigée.

3.5 Exposition et réponse du capteur

3.5.1 Présentation

Cette section étudie le comportement du capteur en fonction de la quantité de lumière qu'il reçoit. Idéalement, nous voudrions que le capteur nous donne, pour chaque photodétecteur, la luminance de la scène correspondante. Dans la réalité, l'oeil humain est confronté à des luminances variant de 10^{-6} à 10^6 cd m^{-2} . Le problème est qu'aucun capteur ne peut fournir à la fois une résolution et une dynamique suffisantes. Généralement, un capteur numérique a une dynamique inférieure à 1 : 500. Pour mesurer avec une bonne précision les différentes conditions d'éclairage possibles, nous contrôlons la quantité de lumière reçue par un diaphragme et une durée d'exposition. Ceci ne résout cependant pas le problème que le capteur ne réagit pas forcément linéairement à la quantité de lumière reçue.

Pour résumer, le comportement de la caméra en fonction de la quantité de lumière reçue est caractérisée par :

- l'exposition, qui correspond à la quantité de lumière atteignant le capteur et qui dépend de l'ouverture du système optique et de la durée d'exposition ;
- la réponse d'intensité du capteur (également appelée ITF, voir Section 5.1.2), qui correspond à la mesure donnée par le capteur en fonction de la quantité de lumière reçue.

De plus, certains capteurs numériques effectuent un contrôle de gain automatique, c'est-à-dire qu'avant la quantification, le signal analogique (ainsi que le bruit qu'il contient) est redimensionné dans la plage utile, par pondération. Les capteurs modernes permettent généralement de contrôler le gain manuellement. Comme le gain n'apporte aucune information supplémentaire au signal, nous considérons ici qu'il est fixe.

Pour résumer, notre problème est de déterminer la luminance de la scène vers la caméra, à partir des images données par la caméra, ce qui nécessite de connaître l'exposition et la réponse du capteur. Pour cela, nous utilisons la technique classique de calcul d'images HDR à partir de séries d'images LDR. Notons que [NB03] décrit une solution intéressante pour obtenir des images HDR : les auteurs proposent de placer une matrice LCD devant le capteur pour contrôler dynamiquement son exposition (en atténuant les zones trop lumineuses). Ainsi, sur une même image, chaque pixel est exposé différemment et dans la plage utile. La lumière peut alors être mesurée précisément, après une pondération donnée par la matrice LCD d'atténuation.

3.5.2 Étude expérimentale

Modélisation de l'exposition et de la réponse du capteur : Soient l la luminance de la scène et t l'exposition du capteur. La quantité de lumière reçue par le capteur est lt . Soit f la réponse du capteur. Le niveau mesuré par la caméra est :

$$c = f(lt) \quad (3.1)$$

Expérience : Pour cette expérience, nous utilisons une caméra Sony HDR-FX7E, équipée d'un capteur couleur CMOS (la technologie CMOS induit une réponse non-linéaire). Nous acquérons plusieurs images d'une même scène en faisant varier uniquement la durée d'exposition (voir Fig. 3.40).

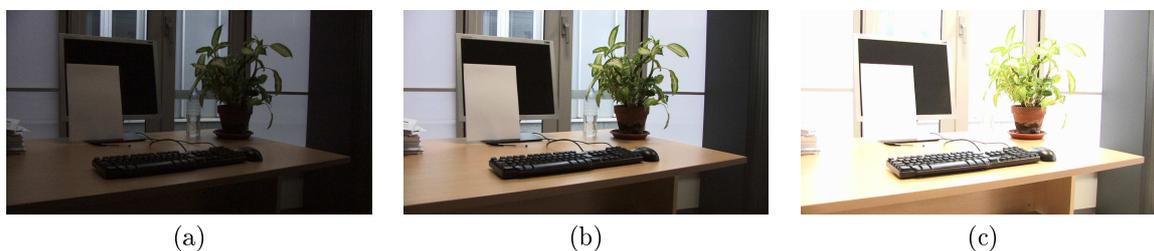
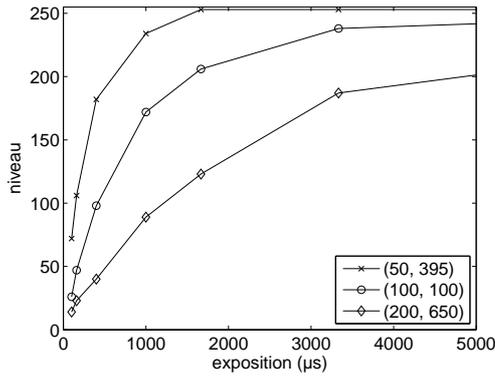


FIG. 3.40 – Acquisition d'une scène fixe avec une caméra Sony HDR-FX7E à $400 \mu\text{s}$ (a), $1\ 667 \mu\text{s}$ (b) et $10\ 000 \mu\text{s}$ (c).

Pour quelques pixels de l'image, nous traçons l'évolution du niveau donné par la caméra en fonction de la durée d'exposition (voir Fig. 3.41).

Nous constatons que le niveau augmente avec la durée d'exposition. À partir d'une certaine durée, le capteur sature et donne un niveau constant proche du niveau maximal.

En fait, chaque courbe Fig. 3.41 donne la réponse du capteur à la quantité de lumière reçue par le photodétecteur considéré. Nous pouvons donc déterminer la réponse du capteur, relativement à un point de référence quelconque. Soient deux points r et s du capteur recevant respectivement les luminances l_r et l_s . Pour ces deux points, le niveau mesuré par le capteur en fonction de la durée d'exposition vérifie



(a)



(b)

FIG. 3.41 – Niveaux mesurés par une caméra Sony HDR-FX7E en fonction du temps d'exposition (a), pour les trois pixels du capteur représentés en rouge (b).

l'équation 3.1. En supposant la réponse f monotone, pour un point et un niveau donné, il existe une seule durée d'exposition telle que l'équation est vérifiée. Soit donc un niveau c_i . En r (resp. s), il existe un seul t_r (resp. t_s) tel que $c_i = f(l_r t_r)$ (resp. $c_i = f(l_s t_s)$). Nous avons alors $l_r t_r = l_s t_s$, c'est-à-dire $l_s = l_r t_r / t_s$. Si nous prenons r comme référence et posons $l_r = 1$, nous obtenons $l_s = t_r / t_s$. Finalement, nous pouvons donc tracer la réponse du capteur relativement à r , soit à partir des mesures pour r , en traçant $c = f(l_r t) = f(t)$ soit à partir des mesures pour s , en traçant $c = f(l_s t) = f(t_r t / t_s)$. C'est ce qui a été fait à partir des mesures données Fig. 3.41. Nous obtenons les résultats donnés Fig. 3.42 et constatons que nous obtenons à chaque fois à peu près la même réponse d'intensité.

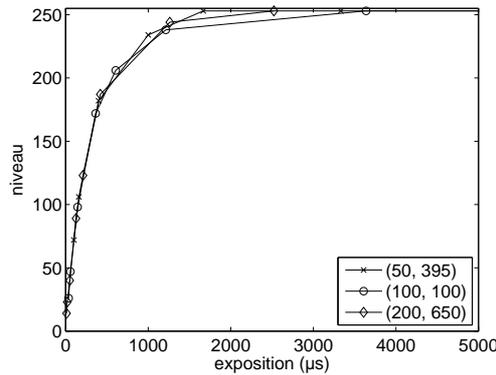


FIG. 3.42 – Réponse de la caméra Sony HDR-FX7E obtenue en considérant différents points, relativement au point de référence (50, 395).

3.5.3 Modélisation de la réponse

Nous cherchons ici à caractériser la réponse d'un capteur numérique, c'est-à-dire une fonction f telle qu'un photodétecteur exposé à une quantité de lumière $q \in [0, 1]$ donne le niveau $f(q)$. La littérature propose différentes approches à ce problème. [MP95] propose de modéliser la réponse par une fonction gamma, c'est-à-dire de décrire le capteur par les paramètres α , β et γ tels que :

$$f(q) = \alpha + \beta q^\gamma$$

Dans [MN99], un modèle polynômial est proposé. La réponse est définie par les paramètres c_n tels que :

$$f(q) = \sum_{n=0}^N c_n q^n$$

Les auteurs de [HS04] reprennent ces modèles et proposent également le modèle de Laguerre de paramètre a :

$$f(q) = q + \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{a \sin(\pi q)}{1 - a \cos(\pi q)} \right)$$

3.5.4 Correction

- L'objectif est ici de déterminer la luminance reçue par le capteur. Deux problèmes se posent :
- les photodétecteurs sous-exposés ou sur-exposés n'apportent pas suffisamment d'information ;
 - les photodétecteurs ont une réponse particulière à la quantité de lumière reçue.



FIG. 3.43 – Acquisition d'une scène fixe avec une caméra mvBlueFox121-C à $50\,000\mu s$, $200\,000\mu s$ et $400\,000\mu s$.

Pour résoudre ces problèmes, nous disposons de plusieurs acquisitions de la scène à différentes expositions (voir Fig. 3.40 et Fig. 3.43). Soit s l'un des S points de l'image. Soit k l'une des K acquisitions. Alors, c_{sk} représente le niveau au point s de l'acquisition k , l_s la luminance correspondant au point s et t_k l'exposition de l'acquisition k . Enfin, soit f la réponse du capteur. Si nous considérons le bruit d'acquisition, le vignetage et la variation de sensibilité du capteur nulles, nous avons $c_{sk} = f(l_s t_k)$. Si nous fixons l'ouverture du système optique, t_k correspond à la durée d'exposition. Finalement, le problème revient à trouver l_s pour tous les points s de l'image, connaissant c_{sk} et t_k mais pas f .

À partir des données disponibles, nous pouvons tout simplement déterminer, par optimisation, les paramètres d'un modèle tel que ceux présentés précédemment. Ceci permet de trouver f et donc, si f est inversible, de calculer

$$l_s = \frac{f^{-1}(c_{sk})}{t_k}$$

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne peut caractériser que les réponses représentables par le modèle. C'est pourquoi, les méthodes décrites ci-dessous ne restreignent pas la réponse à un modèle mais consistent à déterminer explicitement et exhaustivement f pour toutes les valeurs de son domaine de définition.

Méthode de Debevec-Malik

Cette méthode a été proposée dans [DM97]. Elle consiste à déterminer la réponse f et les luminances l_s vérifiant :

$$c_{sk} = f(l_s t_k)$$

La méthode suppose uniquement que f est monotone, ce qui permet d'écrire :

$$f^{-1}(c_{sk}) = l_s t_k$$

$$\ln f^{-1}(c_{sk}) = \ln l_s + \ln t_k$$

et, en posant $g(c) = \ln f^{-1}(c)$:

$$g(c_{sk}) = \ln l_s + \ln t_k$$

Les auteurs proposent alors de minimiser la fonction objectif :

$$\mathcal{O} = \sum_{\substack{s \in S^- \\ k \in K}} (w(c_{sk})[g(c_{sk}) - \ln l_s - \ln t_k])^2 + \beta \sum_{c=c_{\min}+1}^{c_{\max}-1} [w(c)g''(c)]^2$$

où S^- est un sous-ensemble de S , w est une fonction de pondération, limitant l'importance des niveaux sous-exposés ou sur-exposés, définie par :

$$w(c) = \begin{cases} c - c_{\min} & \text{si } c \leq \frac{1}{2}(c_{\min} + c_{\max}) \\ c_{\max} - c & \text{sinon} \end{cases}$$

c_{\min} et c_{\max} sont les niveaux minimal et maximal que peut donner le capteur et g'' la dérivée seconde de la fonction g calculée par :

$$g''(c) = g(c - 1) - 2g(c) + g(c + 1)$$

La fonction objectif \mathcal{O} se ramène à un système d'équations quadratiques sur-déterminé que les auteurs proposent de résoudre par décomposition en valeurs singulières. Notons que le premier terme de \mathcal{O} impose que f et l_s (les inconnues cherchées) vérifient le plus précisément possible l'équation initiale pour c_{sk} et t_k (les données mesurées). Le second terme de \mathcal{O} permet de lisser la réponse. Enfin, β est un paramètre de la méthode définissant l'importance désirée du lissage.

Après avoir ainsi caractérisé la fonction g et donc la réponse du capteur, il est ensuite possible de trouver, de façon robuste, la luminance de n'importe quelle scène, à partir de nouvelles acquisitions, en calculant :

$$\ln l_s = \frac{\sum_{k \in K} w(c_{sk}) [g(c_{sk}) - \ln t_k]}{\sum_{k \in K} w(c_{sk})}$$

La méthode de Debevec-Malik a été testée avec la scène présentée Fig. 3.43 (acquise par une caméra mvBlueFox-121C) et avec la scène présentée Fig. 3.40 (acquise par une caméra Sony HDR-FX7E). Les réponses et luminances obtenues sont données Fig. 3.44 et Fig. 3.45.

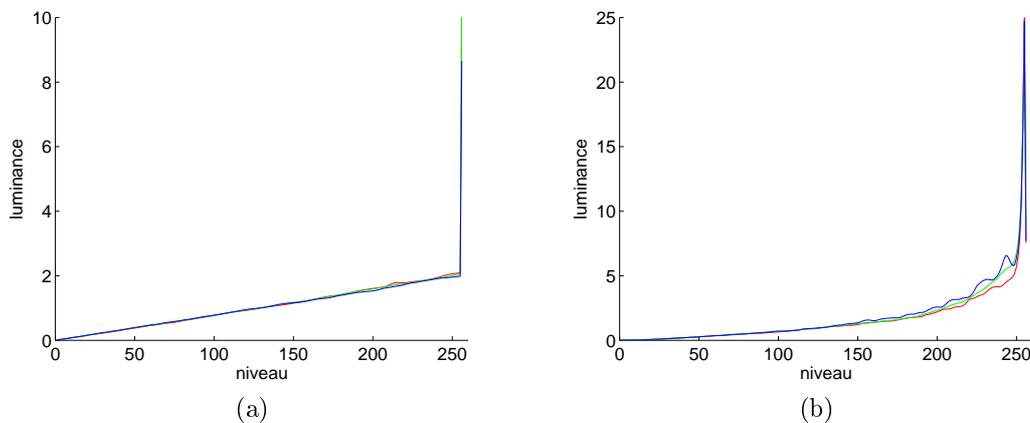


FIG. 3.44 – Réponse des caméras mvBlueFox-121C (a) et Sony HDR-FX7E (b) calculée par la méthode de Debevec-Malik.

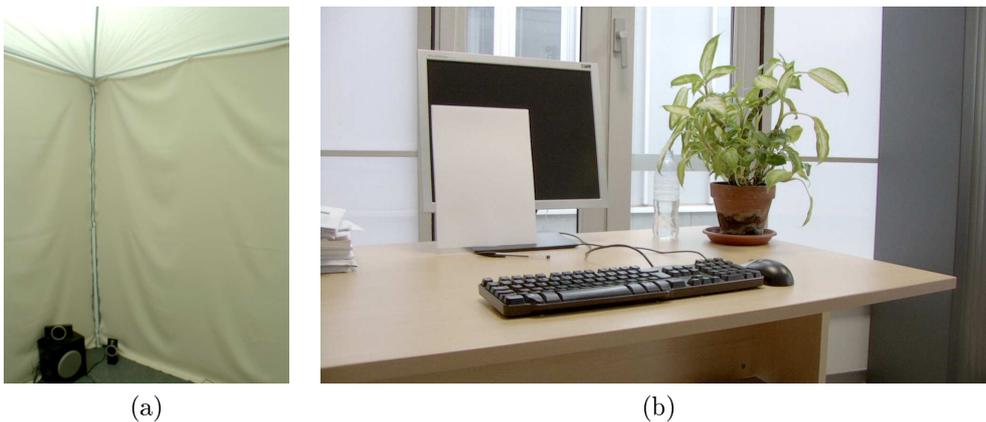


FIG. 3.45 – Log-luminance des scènes acquises par les caméras mvBlueFox-121C (a) et Sony HDR-FX7E (b), calculée par la méthode de Debevec-Malik.

Les réponses ont été calculées à partir de 100 points choisis aléatoirement et avec $\beta = 5$ (compromis précision/lissage déterminé par essais successifs). Nous constatons que la caméra mvBlueFox-121C équipée d'un capteur CCD a une réponse quasi linéaire, contrairement à la caméra Sony HDR-FX7E équipée d'un capteur CMOS. Notons également que la réponse caméra n'est pas toujours inversible (courbe de réponse non monotone) mais que ceci n'est pas vraiment un problème étant donné la méthode de calcul de la luminance.

Les auteurs de [GN03a, GN02] proposent de déterminer la réponse de la caméra d'après les histogrammes des différentes acquisitions. Cette méthode apporte une certaine robustesse au bruit dans le

calcul de la réponse. En effet, le calcul de l'histogramme prend en compte chaque niveau, représenté par de nombreux pixels sur toute l'image, ce qui réduit la variance du bruit. En revanche, pour le calcul de luminance, chaque pixel doit être considéré indépendamment, ce qui rend le calcul plus sensible au bruit. En fait, quelque soit la méthode pour déterminer la réponse et la luminance, la correction temporelle présentée Section 3.2.3 permet de réduire fortement l'influence du bruit mais nécessite de multiplier les acquisitions caméra.

Méthode de Robertson-Borman-Stevenson

Les auteurs de [RBS99, RBS03] proposent une autre méthode pour déterminer la réponse de la caméra et la luminance d'une scène. Le principe est très proche de la méthode de Debevec-Malik mais la méthode de Robertson-Borman-Stevenson diffère en plusieurs points : le problème est formalisée par une analyse probabiliste, la fonction objectif ne contient pas de terme de lissage enfin la luminance et la réponse sont calculées par séparation, de façon itérative.

La couleur c_{sk} mesurée par la caméra au point s et à l'acquisition k dépend de la réponse de la caméra f , de l'éclairement $l_s t_k$ et d'un bruit b_{sk} additif :

$$c_{sk} = f(l_s t_k + b_{sk})$$

En considérant que f est inversible, nous pouvons écrire :

$$f^{-1}(c_{sk}) = l_s t_k + b_{sk}$$

c'est-à-dire :

$$b_{sk} = f^{-1}(c_{sk}) - l_s t_k$$

En supposant le bruit gaussien, nous pouvons considérer les b_{sk} comme des variables aléatoires gaussiennes indépendantes d'espérances nulles et de variances σ_{sk}^2 . Posons :

$$x_{sk} = \frac{b_{sk}}{\sigma_{sk}}$$

Donc les x_{sk} suivent la loi normale centrée réduite et :

$$X = \sum_{\substack{s \in S \\ k \in K}} x_{sk}^2$$

suit une loi du χ^2 . Nous avons alors :

$$\mathbb{P}(X) \propto \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{\substack{s \in S \\ k \in K}} x_{sk}^2 \right)$$

et, en posant :

$$w_{sk} = \frac{1}{\sigma_{sk}^2}$$

nous obtenons :

$$\mathbb{P}(X) \propto \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{\substack{s \in S \\ k \in K}} w_{sk} [f^{-1}(c_{sk}) - l_s t_k]^2 \right)$$

Les w_{sk} peuvent être vus comme des facteurs de pondération qui traduisent la confiance envers les données mesurées. Cette confiance dépend uniquement du niveau : aux niveaux faibles, le bruit de mesure est important et aux niveaux élevés le capteur sature. La fonction suivante a été proposée pour modéliser le facteur de confiance :

$$w_{sk} = w(c_{sk}) = \exp \left(-4 \frac{(c_{sk} - 127,5)^2}{127,5^2} \right)$$

Cette fonction dépend du niveau, est centrée sur le niveau moyen et est de type gaussienne.

L'estimation de la luminance se ramène maintenant à déterminer l_s maximisant $\mathbb{P}(X)$, ce qui revient à minimiser la fonction objectif :

$$\mathcal{O} = \sum_{\substack{s \in S \\ k \in K}} w_{sk} [f^{-1}(c_{sk}) - l_s t_k]^2$$

Pour cela, nous considérons le gradient de \mathcal{O} selon l_s :

$$\begin{aligned} \nabla \mathcal{O} &= 2 \sum_{k \in K} w_{sk} [f^{-1}(c_{sk}) - l_s t_k] (-t_k) \\ \nabla \mathcal{O} &= 2l_s \sum_{k \in K} w_{sk} t_k^2 - 2 \sum_{k \in K} w_{sk} t_k f^{-1}(c_{sk}) \end{aligned}$$

Le minimum de \mathcal{O} selon l_s est obtenu quand $\nabla \mathcal{O} = 0$, c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} l_s \sum_{k \in K} w_{sk} t_k^2 &= \sum_{k \in K} w_{sk} t_k f^{-1}(c_{sk}) \\ l_s &= \frac{\sum_{k \in K} w_{sk} t_k f^{-1}(c_{sk})}{\sum_{k \in K} w_{sk} t_k^2} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Nous obtenons ainsi la luminance de la scène. Cependant ce calcul nécessite de connaître f^{-1} . Pour estimer cette fonction, considérons la dérivée partielle de \mathcal{O} selon $f^{-1}(c)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{O}}{\partial f^{-1}(c)} &= 2 \sum_{\substack{s \in S \\ k \in K \\ c_{sk} = c}} w_{sk} [f^{-1}(c_{sk}) - l_s t_k] \\ \frac{\partial \mathcal{O}}{\partial f^{-1}(c)} &= 2 \sum_{\substack{s \in S \\ k \in K \\ c_{sk} = c}} w_{sk} f^{-1}(c_{sk}) - 2 \sum_{\substack{s \in S \\ k \in K \\ c_{sk} = c}} w_{sk} l_s t_k \end{aligned}$$

Minimiser \mathcal{O} pour la variable $f^{-1}(c)$ revient alors à annuler sa dérivée partielle :

$$\frac{\partial \mathcal{O}}{\partial f^{-1}(c)} = 0 \iff f^{-1}(c) = \frac{\sum_{\substack{s \in S \\ k \in K \\ c_{sk} = c}} w_{sk} l_s t_k}{\sum_{\substack{s \in S \\ k \in K \\ c_{sk} = c}} w_{sk}}$$

Comme nous considérons les c_{sk} tels que $c_{sk} = c$, alors $w_{sk} = w(c_{sk}) = w(c)$. Nous avons donc :

$$f^{-1}(c) = \frac{w(c) \sum_{\substack{s \in S \\ k \in K \\ c_{sk} = c}} l_s t_k}{w(c) n(c)}$$

où :

$$n(c) = \text{Card}(\{c_{sk} : s \in S, k \in K, c_{sk} = c\})$$

Finalement :

$$f^{-1}(c) = \frac{\sum_{\substack{s \in S \\ k \in K \\ c_{sk} = c}} l_s t_k}{n(c)}$$

Cette équation permet de calculer f^{-1} en fixant la luminance. Nous pouvons alors calculer la réponse et la luminance selon un algorithme itératif. Initialement, f^{-1} est la fonction identité. Une itération consiste à calculer l_s puis f^{-1} grâce aux équations précédentes. Finalement, la solution s'obtient répétant les itérations jusqu'à obtenir une convergence acceptable.

Notons que, comme avec la méthode de Debevec-Malik, la réponse peut-être estimée une seule fois puis réutilisée pour calculer la luminance d'une autre scène (équation 3.2).

La méthode de Robertson-Borman-Stevenson a été testée avec la scène présentée Fig. 3.43 acquise par une caméra mvBlueFox-121C et avec la scène présentée Fig. 3.40 acquise par une caméra Sony HDR-FX7E. Pour chaque scène, deux itérations de la méthode ont été calculées. Les réponses sont données Fig. 3.46 et les luminances sont présentées Fig. 3.47.

Nous constatons que si les réponses sont comparables à celles obtenues par la méthode de Debevec-Malik l'absence de lissage est nettement perceptible. Il s'agit d'un problème classique de l'optimisation : la solution représente abusivement des données initiales bruitées. La méthode est donc moins robuste au bruit, d'autant plus qu'elle n'est pas guidée par un modèle. Pour cette raison, nous préférons utiliser la méthode de Debevec-Malik pour le système Catopsys.

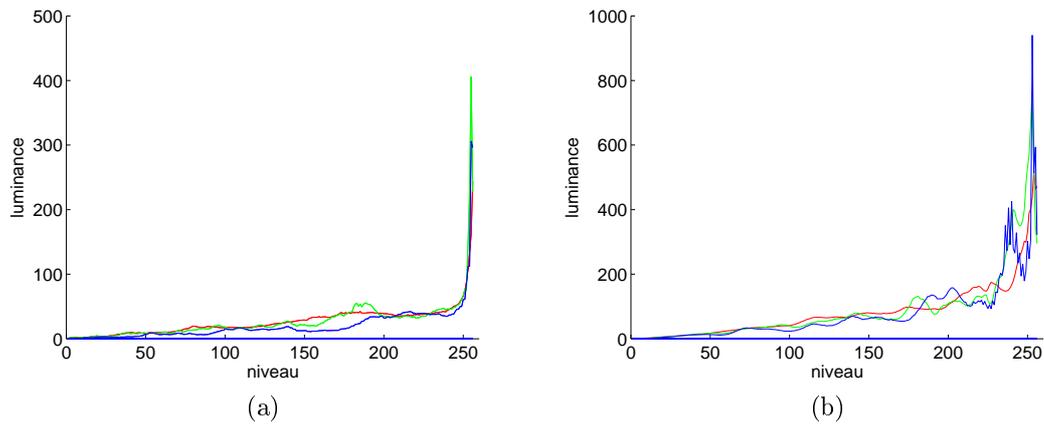


FIG. 3.46 – Réponse des caméras mvBlueFox-121C (a) et Sony HDR-FX7E (b) calculée par la méthode de Robertson-Borman-Stevenson.

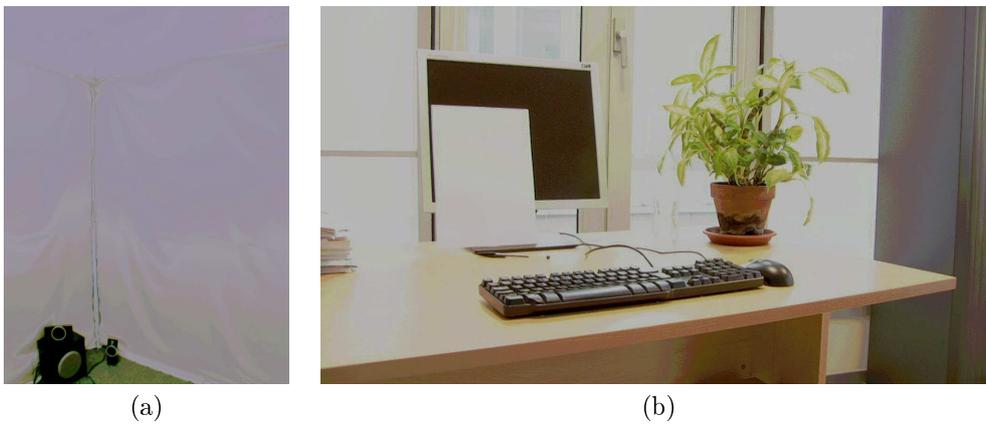


FIG. 3.47 – Log-luminance des scènes acquises par les caméras mvBlueFox-121C (a) et Sony HDR-FX7E (b), calculée par la méthode de Robertson-Borman-Stevenson.

3.6 Gestion de la couleur

3.6.1 Présentation

Dans la vision humaine, la sensation de couleur est obtenue par l'association de la réaction à la lumière de trois types de photorécepteurs possédant chacun leur propre réponse spectrale (voir Section C). Une caméra numérique couleur fonctionne généralement selon le même principe : elle dispose de trois types de photodétecteurs ayant chacun leur réponse spectrale (les fonctions R , G et B représentées Fig. 3.48). Généralement, nous utilisons un type de photodétecteurs pour les rouges, un pour les verts et un pour les bleus, pour être proche de la vision humaine.

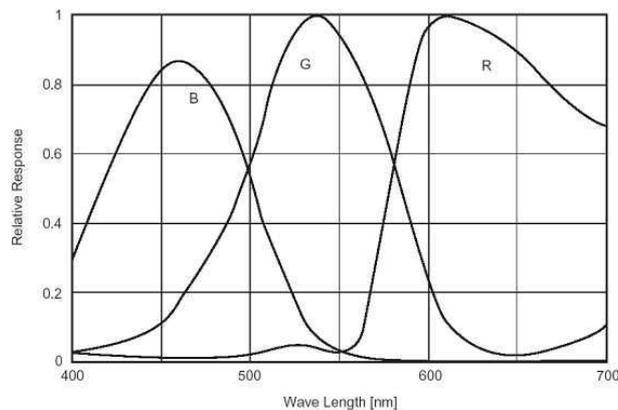


FIG. 3.48 – Réponse spectrale de la caméra mvBlueFox-121C. Image fournie par Matrix Vision®.

Ainsi, la couleur d'un pixel est déterminée par la réaction de photodétecteurs de différents types, répartis selon un schéma précis. Les caméra matricielles couleurs mono-capteurs répartissent généralement leurs trois types de photodétecteurs selon une grille de Bayer, représentée Fig. 3.49.

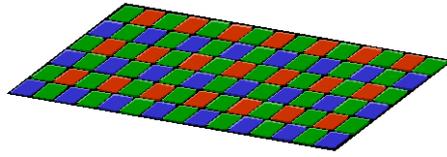


FIG. 3.49 – Répartition des photodétecteurs couleurs selon une grille de Bayer. Image fournie par Wikipedia®.

Une lumière de densité spectrale I sera traduite, par un pixel caméra, en une couleur :

$$\begin{bmatrix} R_I \\ G_I \\ B_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int I(\lambda)R(\lambda)d\lambda \\ \int I(\lambda)G(\lambda)d\lambda \\ \int I(\lambda)B(\lambda)d\lambda \end{bmatrix}$$

où λ désigne la longueur d'onde. Cette couleur est ensuite quantifiée par la caméra puis convertie dans un système de couleurs comme le sRGB.

Il est important de remarquer que les quantités mesurées par la caméra ne sont donc pas des quantités radiométriques car elles correspondent à une intégration de la lumière sur le spectre. De même, ce ne sont pas non plus des quantités photométriques car les réponses spectrales de la caméra ne sont pas les mêmes que celles de la vision humaine, ou plutôt de l'observateur standard défini par la CIE. Dans [Man00], Mann utilise le terme photoquantité pour désigner l'intégration de la lumière selon la réponse spectrale d'un canal de la caméra. Dans cette thèse, nous utilisons les termes photoquantité et, par abus de langage, luminance.

Dans les sections précédentes, les différents phénomènes considérés étaient traités pour chaque canal de façon indépendante. Dans cette section, l'objectif est d'étalonner les canaux de couleurs entre eux c'est-à-dire qu'ils représentent la lumière mesurée de façon similaire. En effet, comme la caméra effectue une intégration de la lumière sur le spectre, les niveaux qu'elle renvoie dépendent aussi de la densité spectrale de la lumière de la scène. Par conséquent, les canaux de couleur doivent être étalonnés en fonction de la densité spectrale de la lumière. Pour Catopsys, nous considérons que la lumière a toujours la même densité spectrale et donc que la caméra peut être étalonner entièrement en une seule fois. En pratique, cette hypothèse est vérifiée car la principale source de lumière est le projecteur.

3.6.2 Étude expérimentale

Objectif : déterminer dans quelle mesure les canaux de couleur peuvent être étalonnés entre eux par un facteur multiplicatif.

Expérience : nous acquérons une image HDR (en utilisant la méthode de Debevec-Malik) d'une scène fixe dans laquelle nous avons placé une mire calibrée ColorChecker®. Sur l'image de photoquantité obtenue, nous calculons la photoquantité moyenne des carreaux CC19 (blanc), CC20 (gris clair), CC21 (gris) et CC22 (gris foncé) pour les trois canaux de couleur. Etalonner la caméra revient à multiplier chaque canal par un facteur propre au canal de telle sorte que pour tout point gris de la scène, la photoquantité correspondante soit identique pour les trois canaux.

Résultats : L'expérience a été réalisée avec les caméras mvBlueFox-121C et Sony HDR-FX7E. Nous présentons ici les résultats obtenus pour la caméra Sony. Nous calculons les facteurs d'étalonnage des canaux de couleur par rapport au canal vert en considérant de façon indépendante chacun des quatre carreaux du ColorChecker® (voir Fig. 3.50).

Sur ces mesures, l'amplitude entre les canaux d'un carreau peut atteindre 20% du signal. En revanche, nous constatons que quelque soit le carreau (et donc la photoquantité «grise») utilisé, les facteurs d'étalonnage à appliquer sont à peu près identiques. Avec nos mesures, l'amplitude maximale entre les facteurs d'un canal selon les carreaux est de 6%. Cette caractéristique est intéressante car, en pratique, nous aimerions pouvoir nous passer du ColorChecker® et étalonner la photoquantité à partir d'un blanc de référence comme une feuille de papier. Fig. 3.51 donne, pour les quatre carreaux, les niveaux obtenus si nous étalonnons avec les facteurs donnés par le carreau CC19. Sur ces mesures, l'amplitude entre les canaux d'un carreau est toujours inférieure à 10%. Nous sommes donc plus proche des gris recherchés.

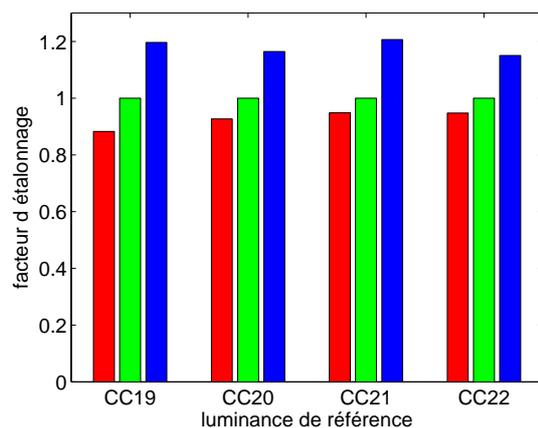


FIG. 3.50 – Facteurs d'étalonnage par rapport au vert calculés à partir de différents carreaux du Color-Checker®.

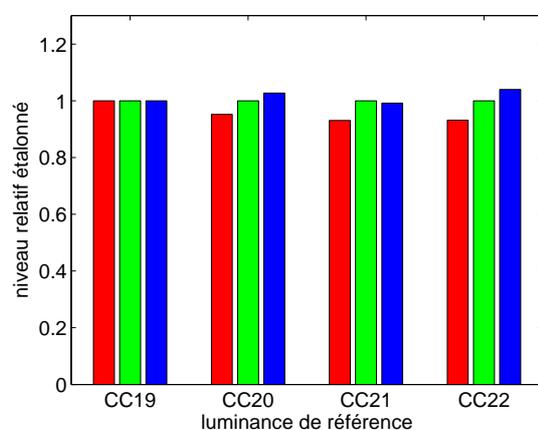


FIG. 3.51 – Niveaux des carreaux après étalonnage selon les facteurs donnés par le carreau CC19.

Finalement, pour étalonner les canaux sur toute l'image de photoquantité, il suffit de multiplier chaque canal par son facteur d'étalonnage (voir Fig. 3.52). Nous constatons que sur l'image étalonée le canal bleu est légèrement amplifié et le canal rouge atténué.

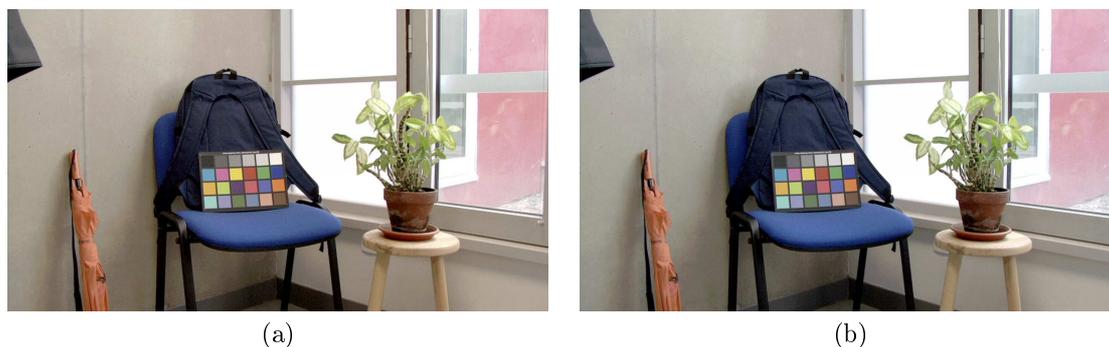


FIG. 3.52 – Etalonnage des couleurs pour la caméra Sony HDR-FX7E : log-photoquantité initiale (a) et log-photoquantité étalonée (b).

3.6.3 Correction

L'étalonnage des images de photoquantité s'effectue en deux étapes. Tout d'abord, l'étape de calibrage, réalisée une seule fois, consiste à obtenir l'image de photoquantité d'une scène contenant un blanc de référence, par exemple, une feuille de papier éclairée par le projecteur. Le blanc de référence doit être

placé à un endroit peu perturbé par la réflexion de surfaces colorées voisines. Sa position dans l'image peut être retrouvée manuellement. Soit $[R_w \ G_w \ B_w]^T$ la photoquantité du blanc de référence. Le facteur d'étalonnage par rapport au canal vert est donc $[G_w/R_w \ 1 \ G_w/B_w]^T$.

La seconde étape, réalisée sur toutes les images de photoquantité à corriger, consiste alors à étalonner les canaux. Soit $[R \ G \ B]^T$ la photoquantité initiale. Soit $[R' \ G' \ B']^T$ la photoquantité étalonnée. Alors

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R.G_w/R_w \\ G \\ B.G_w/B_w \end{bmatrix}$$

Notons que les facteurs d'étalonnage peuvent être intégrés dans la réponse de la caméra. Ainsi, l'étalonnage est réalisé automatiquement lors du calcul de photoquantité.

Cette méthode a été utilisée pour étalonner notre caméra mvBlueFox-121C lorsque la pièce est éclairée par le projecteur (voir Fig. 3.53). Nous constatons que, dans ces conditions d'éclairage, la caméra sous-estime largement le canal rouge (voir Fig. 3.53 (a)). Une feuille de papier (fixée en bas du mur gauche) sert de blanc de référence. Avant étalonnage, le blanc de référence est très déformé ($[123 \ 212 \ 232]^T$). Après étalonnage, les couleurs sont restituées de façon beaucoup plus fidèle ($[212 \ 212 \ 212]^T$ pour le blanc de référence) (voir Fig. 3.53 (b)).

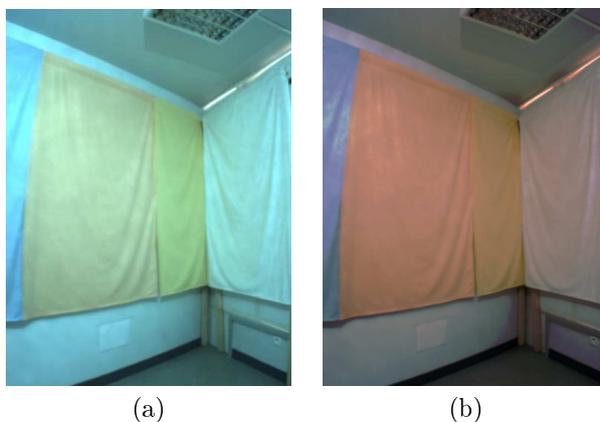


FIG. 3.53 – Etalonnage des couleurs pour la caméra mvBlueFox-121C : photoquantité initiale (a) et photoquantité étalonnée (b).

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différentes perturbations radiométriques intervenant lors de l'acquisition d'une image caméra. Nous avons notamment présenté des méthodes pour caractériser les perturbations ainsi que pour les corriger.

Tout d'abord, nous avons étudié le bruit. Dans nos expériences, nous avons constaté qu'il s'agit surtout d'un bruit de mesure pouvant être corrigé en moyennant plusieurs acquisitions effectuées dans les mêmes conditions. Si le bruit n'introduit pas de biais, cette méthode converge (lentement) vers la valeur cherchée.

Nous avons ensuite caractérisé la variation de sensibilité des photodétecteurs. Sur la caméra testée, nous avons effectivement pu la mettre en évidence mais avons également constaté que ce n'est pas la perturbation la plus influente et qu'elle peut être corrigée, certes de façon approximative, assez simplement.

Nous avons constaté, par contre, que le vignetage est important, surtout avec un objectif grand-angle comme celui du système Catopsys. Nous avons proposé une méthode d'estimation paramétrique du vignetage permise grâce aux informations géométriques fournies par le système.

Nous avons également étudié l'influence de la réponse d'intensité du capteur. Nous avons appliqué et comparé les méthodes classiques d'imagerie HDR à partir d'acquisitions LDR.

Enfin, nous avons traité le problème de l'étalonnage couleur des acquisitions caméra. D'après nos expériences, un simple étalonnage linéaire effectué après linéarisation de la réponse du capteur donne déjà des résultats intéressants.

Cette étude permet désormais de proposer une méthode de correction d'acquisitions caméra, complète, adaptée au système Catopsys et nécessitant peu de supervision. Ceci est réalisé dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Correction radiométrique de la caméra

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié les perturbations radiométriques intervenant durant l'acquisition des images caméra. L'objectif est maintenant de mettre au point une méthode pour corriger ces perturbations et ainsi pouvoir utiliser la caméra pour acquérir une image relativement fidèle de la scène réellement visible.

4.1 Introduction

Au sein du système Catopsys, la caméra doit fournir une mesure fidèle de la lumière présente dans la scène réelle. La méthode de correction radiométrique envisagée doit donc pouvoir corriger les principales perturbations de la caméra, dans le cadre du système de projection. Cette méthode doit, de plus, nécessiter peu de supervision afin de satisfaire les objectifs de facilité d'utilisation du système Catopsys.

La méthode de correction de la caméra doit prendre en compte les principales perturbations radiométriques étudiées précédemment : bruit, variation de la sensibilité du capteur, vignetage de l'objectif, réponse du capteur, gestion de la couleur. Pour cela, nous considérons que le système satisfait les spécifications suivantes :

- le gain et l'ouverture de la caméra sont constants ;
- la durée d'exposition est contrôlable ;
- la caméra peut acquérir une mosaïque d'images géométriquement calibrées ;
- l'objectif de la caméra est amovible.

4.2 Travaux précédents

Les différentes perturbations radiométriques d'une caméra ont beaucoup été étudiées. Cependant, nous nous intéressons ici à un processus d'acquisition caméra complet et spécifique. Dans la littérature, le cadre le plus proche est celui du calibrage radiométrique d'une caméra à partir d'une mosaïque d'images géométriquement calibrées. Ce genre de travaux traite principalement du vignetage et de la réponse du capteur. Cependant, ils n'abordent pas la variation de sensibilité du capteur ni la gestion de la couleur. Enfin, une dernière différence est que, dans ces travaux, les durées d'exposition sont généralement supposées inconnues initialement.

Dans [GC05] Goldman et Chen proposent une méthode pour estimer la réponse, les expositions et le vignetage à partir d'une mosaïque d'images. Ils proposent un modèle de vignetage polynômial et utilisent le modèle de réponse EMoR [GN03b] pour caractériser simultanément le vignetage, les expositions et la réponse de la caméra grâce à une méthode d'optimisation non-linéaire.

Dans [LS05b, LS05a], Litvinov et Schechner proposent une méthode pour estimer simultanément la réponse, l'exposition et le vignetage dans une séquence vidéo. Contrairement à la méthode précédente, leur méthode n'est pas basée sur un modèle de vignetage et un modèle de réponse. Ils utilisent des zones communes pour formaliser le problème comme un problème de moindres carrés linéaire non-paramétrique. Ils en donnent une formulation matricielle qu'ils proposent de résoudre par décomposition en valeurs singulières.

Enfin, dans [KP08], Kim et Pollefeys proposent une méthode assez proche de celle de Goldman et Chen dans la mesure où ils traitent du même problème et utilisent les mêmes modèles de réponse et de vignetage. Cependant, ils proposent une méthode pour décorrélérer la réponse du vignetage, ce qui leur

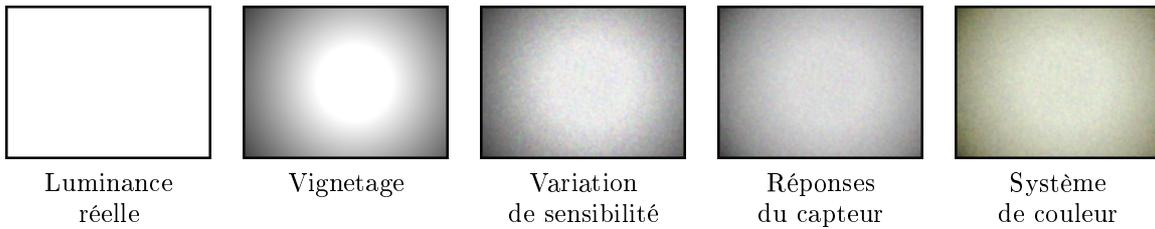


FIG. 4.1 – Caractéristiques du modèle radiométrique de la caméra.

permet d'estimer d'abord la réponse et ensuite le vignetage. À chaque fois, le problème est formalisé comme un problème de moindres carrés linéaire et résolu par décomposition en valeurs singulières.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons tout d'abord un modèle radiométrique du processus d'acquisition. Puis, nous proposons une méthode de calibrage et une méthode de correction adaptées à ce modèle. Nous résumons ensuite les étapes de supervision que doit réaliser au final un opérateur pour mettre en place la correction caméra. Enfin, nous présentons et analysons les résultats obtenus.

4.3 Modèle radiométrique

Le modèle radiométrique du processus d'acquisition que nous nous proposons d'utiliser est illustré Fig. 4.1. Tout d'abord, la scène réelle présente une certaine luminance. Le système optique de la caméra (objectif) réduit la lumière atteignant le capteur et induit du vignetage. Puis le capteur réagit à la lumière de façon non uniforme, de par sa variation spatiale de sensibilité. La réponse d'intensité du capteur introduit ensuite une non-linéarité entre la lumière et sa mesure. Enfin, la réponse spectrale du capteur implique une perte d'information par intégration de la luminance (spectrale) en photoquantité (vectorielle), éventuellement accompagnée d'une variation chromatique si le système de couleur n'est pas adapté au capteur.

Plus rigoureusement, soit l_s la luminance d'un point s de la scène. La caméra acquiert cette luminance par la réaction de ses photodétecteurs. Soit r_λ la réponse spectrale des photodétecteurs de type λ . Alors la photoquantité $l_{s\lambda}$ correspondante vaut :

$$l_{s\lambda} = \int r_\lambda(x) l_s(x) dx$$

Soit $c_{sk\lambda n}$ le niveau du canal λ donné par la caméra pour le point s à l'exposition k de durée t_k lors de l'acquisition n .

$$c_{sk\lambda n} = a_\lambda f_\lambda(u_{s\lambda} v_{s\lambda} t_k l_{s\lambda}) + b_{sk\lambda n}$$

où $v_{s\lambda}$ est le vignetage en s , $u_{s\lambda}$ la sensibilité du capteur en s , f_λ la réponse du canal λ , a_λ le facteur de pondération du canal λ et $b_{sk\lambda n}$ le bruit.

Pour caractériser la radiométrie du processus d'acquisition, nous proposons de modéliser les différentes perturbations radiométriques de la façon suivante :

- la réponse du capteur suit le modèle non-paramétrique de Debevec-Malik ;
- l'étalonnage des canaux de couleur est réalisé par pondération de chaque canal et est intégré dans la réponse d'intensité ;
- la variation de sensibilité correspond à une carte de pondération mesurée lors du calibrage ;
- le vignetage suit un modèle polynômial type Goldman-Chen.

4.4 Calibrage

Le calibrage radiométrique d'une caméra consiste à déterminer ses paramètres a , f , u et v du modèle radiométrique.

4.4.1 Acquisition des images

Pour réduire le bruit d'acquisition, nous acquérons N images d'une même scène dans les mêmes conditions d'acquisition (voir Section 3.2.3). Pour obtenir la photoquantité d'une scène, celle-ci est acquise avec K durées d'exposition différentes. Pour simplifier, nous supposons ici que nous utilisons toujours les mêmes durées d'exposition mais ce n'est en aucun cas une restriction de la méthode. Ainsi, l'acquisition débruitée de la photoquantité d'une scène nécessite NK acquisitions caméra.

Au niveau du nombre de scènes à utiliser pour le calibrage, nous avons besoin

- d'une scène pour estimer la réponse ;
- d'une mire blanche pour l'étalonnage couleur ;
- d'une scène blanche acquise sans objectif pour estimer la variation de sensibilité ;
- de V scènes avec recouvrement pour le vignetage.

En pratique, nous plaçons une mire blanche dans l'environnement réel et acquérons V scènes avec recouvrement pour estimer à la fois la réponse, le vignetage et l'étalonnage (voir Fig. 4.2). Il ne reste ensuite qu'à acquérir une scène blanche, sans objectif, pour la variation de sensibilité (voir Fig. 4.3).

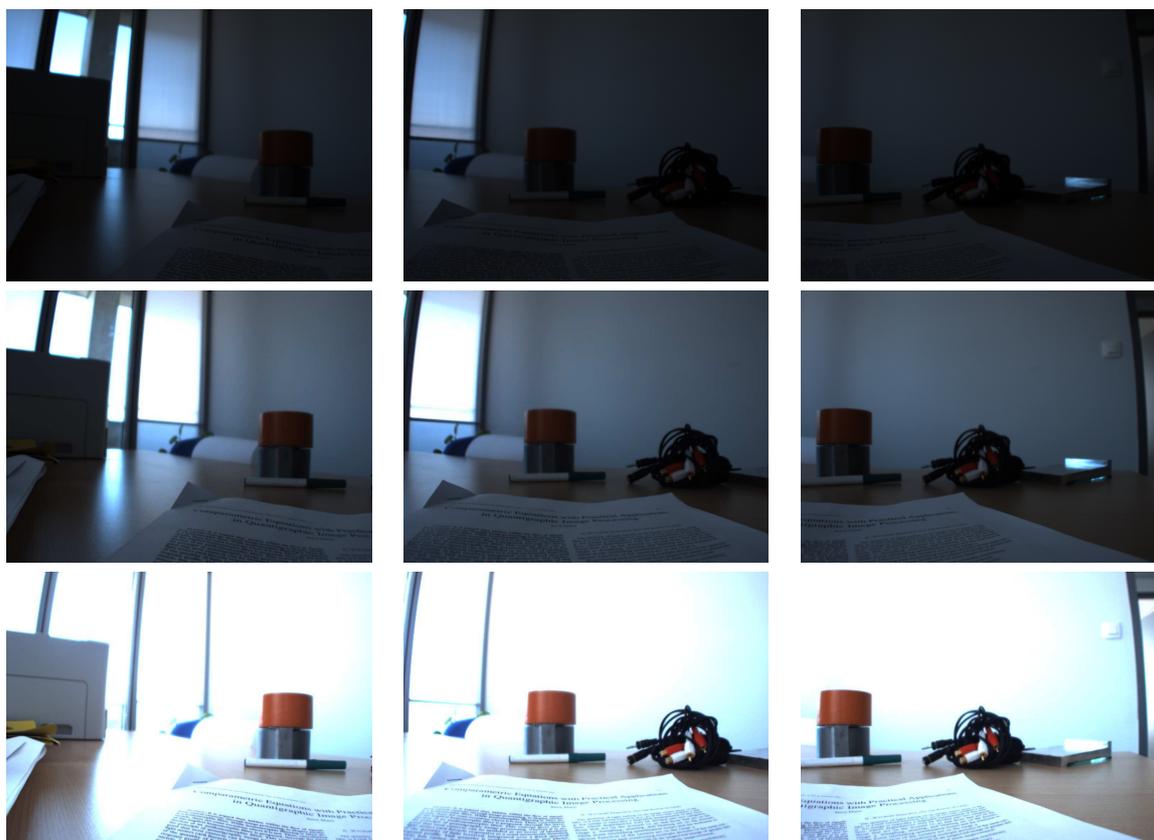


FIG. 4.2 – Acquisition de 3 scènes avec recouvrement et mire blanche (la feuille de papier, à gauche des rouleaux d'adhésif) à 3 durées d'exposition différentes pour estimer la réponse, le vignetage et l'étalonnage couleur.

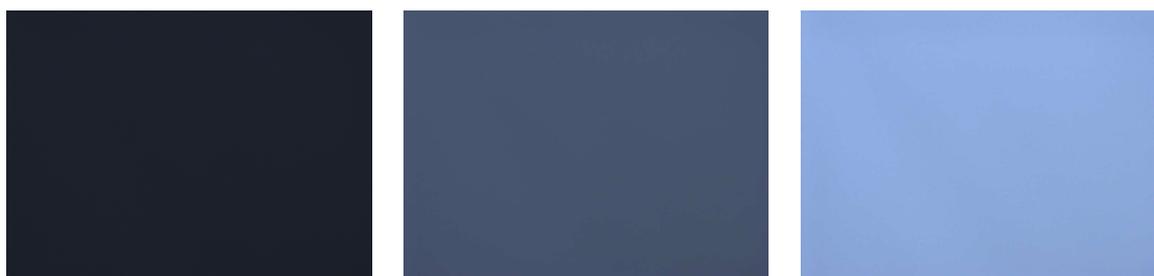


FIG. 4.3 – Acquisition d'une scène blanche, sans objectif, à 3 durées d'exposition différentes pour estimer la variation de sensibilité.

Pour nos tests, nous utilisons $N = 10$, $K = 8$ et $V = 3$ soit $NK(V + 1) = 320$ acquisitions caméra (en fait, un peu moins car l'estimation de la variation de sensibilité nécessite moins de durées d'exposition du fait de l'homogénéité de la scène). Ce nombre peut paraître élevé mais comme la caméra est contrôlée par l'ordinateur, cette phase d'acquisition n'est en réalité pas bien longue (quelques minutes, suivant l'éclairage de l'environnement). De plus, cette étape est réalisée automatiquement et uniquement pour le calibrage, hors-ligne. Pour l'étape de correction, nous pouvons utiliser $N = 1$ pour estimer la photoquantité d'une scène si nous acceptons de négliger le bruit, qui de tout façon est quand même réduit de par l'acquisition selon plusieurs durées d'exposition.

4.4.2 Gestion du bruit

Nous considérons que le bruit est d'espérance nulle. Nous pouvons donc le réduire en calculant le niveau moyen sur les N acquisitions (voir la méthode de correction temporelle présentée Section 3.2.3). Le niveau débruité donné par la caméra pour le point s , la durée d'exposition k et le canal λ est donc :

$$c_{sk\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N c_{sk\lambda n}$$

Évidemment, la correction est meilleure lorsque N est élevé, mais en contre-partie, ceci demande plus d'acquisitions caméra.

4.4.3 Estimation de la réponse du capteur

La réponse d'intensité du capteur est ensuite estimée par la méthode de Debevec-Malik (voir Section 3.5.4) appliquée sur les K acquisitions de l'une des V scènes après correction du bruit. Cette méthode demande plusieurs paramètres : un facteur de lissage β et des points de base pour le calcul de la réponse. Lors de nos tests, nous avons obtenu de bons résultats avec $\beta = 2$. Enfin, pour les points de base, nous choisissons 100 points aléatoirement.

La réponse obtenue lors de nos tests est donnée Fig. 4.4. Nous retrouvons une réponse quasi-linéaire caractéristique des capteurs CCD. Nous constatons sur cette figure que les canaux de couleurs sont traités de façon identique. La réponse ne traduit pas le fait que la caméra sous-estime le canal rouge.

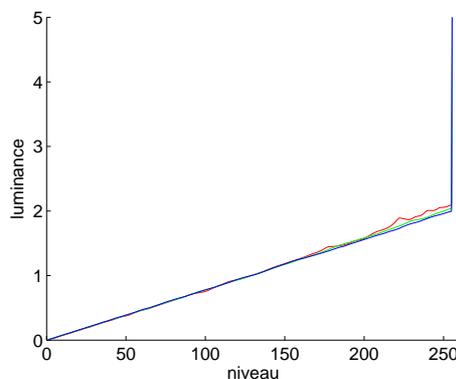


FIG. 4.4 – Réponse de la caméra mvBlueFox-121C.

Les photoquantités des scènes débruitées sont données Fig. 4.5 et Fig. 4.6. Notons que nous obtenons une mesure à grande dynamique de la luminance. Notons également qu'à travers la fenêtre, la lumière est trop puissante et dépasse la dynamique mesurable. Ceci peut-être corrigé par des acquisitions supplémentaires, avec des durées d'exposition plus faibles que celles utilisées.

4.4.4 Étalonnage des canaux de couleurs

L'étalonnage des canaux de couleur est réalisé à partir d'un blanc de référence par la méthode donnée Section 3.6.3. Pour nos tests, une feuille de papier blanc a été placée dans l'environnement réel afin de servir de référence. La méthode donne un facteur de pondération pour étalonner le canal rouge et le canal bleu sur le canal vert de telle sorte que le blanc de référence ait effectivement une photoquantité «blanche». Ces facteurs de pondération sont ensuite intégrés dans la réponse d'intensité du capteur. Ainsi, le calcul de photoquantité réalise automatiquement l'étalonnage.



FIG. 4.5 – Log-luminance des scènes acquises par la caméra mvBlueFox-121C.



FIG. 4.6 – Log-luminance de la scène blanche acquise par la caméra mvBlueFox-121C sans objectif.

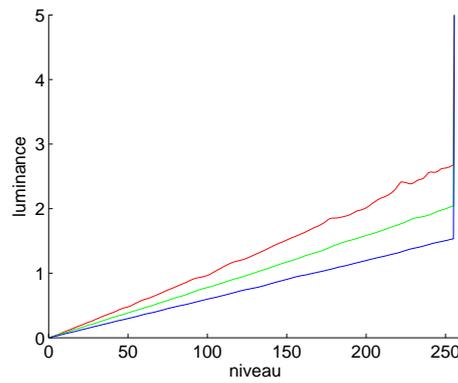


FIG. 4.7 – Réponse étalonée de la caméra mvBlueFox-121C.

La réponse étalonée obtenue lors de nos tests est donnée Fig. 4.7. Nous constatons que la sous-estimation du canal rouge par la caméra est désormais bien prise en compte.

Les photoquantités étalonées des scènes de test sont données Fig. 4.8 et Fig. 4.9. Nous y retrouvons des couleurs beaucoup plus proches de la réalité.



FIG. 4.8 – Log-luminance étalonée des scènes de test.

4.4.5 Estimation de la variation de sensibilité des photorécepteurs

La variation de sensibilité du capteur est ensuite corrigée par la méthode donnée Section 3.3.3. Placé sans objectif face à une scène blanche, le capteur de la caméra est éclairé de façon uniforme. La variation



FIG. 4.9 – Log-luminance étalonée de la scène blanche sans objectif.

de photoquantité étalonée correspond donc à la variation de sensibilité du capteur. Pour la corriger, il suffit donc de normaliser cette photoquantité par rapport à sa valeur maximale et de l'inverser. Nous obtenons une image de pondération (voir Fig. 4.10) qu'il suffit d'appliquer à une image de photoquantité étalonée pour en corriger la variation de sensibilité (voir Fig. 4.11).

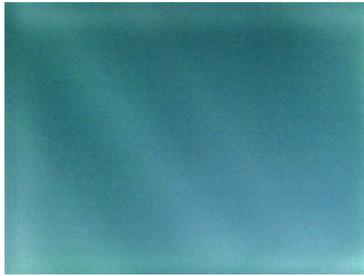


FIG. 4.10 – Image de pondération corrigeant la variation de sensibilité (valeurs amplifiées).



FIG. 4.11 – Log-luminance étalonée et uniformisée.

4.4.6 Estimation du vignetage

Enfin, le vignetage créé par l'objectif est corrigé par la méthode donnée Section 3.4.4. Les scènes avec recouvrement permettent d'obtenir la photoquantité étalonée et uniformisée de différents points ne subissant plus que le vignetage. Ces points peuvent apparaître sur les différentes scènes à des positions différentes et donc avec un vignetage différent. Ceci permet de déterminer, par optimisation, les paramètres d'un modèle de vignetage (Goldman-Chen).

Les paramètres trouvés pour le canal rouge lors de nos tests sont les suivants : $p_1 = -0.89$, $p_2 = 0.31$, $p_3 = 0.24$, $p_4 = 1$, $p_5 = 0.5$ et $p_6 = 0.5$. Le vignetage correspondant est donné Fig. 4.12 (a).

Pour le corriger, il suffit alors de pondérer la photoquantité étalonée et uniformisée par l'inverse du vignetage (voir Fig. 4.12 (b) et Fig. 4.13).

En pratique, nous calculons une seule image de pondération regroupant la correction de vignetage et la correction de variation de sensibilité.

4.5 Correction

Une fois le calibrage radiométrique de la caméra réalisée, la méthode de correction suivante permet de trouver, en-ligne, la photoquantité étalonée et uniformisée de n'importe quelle scène acquise avec

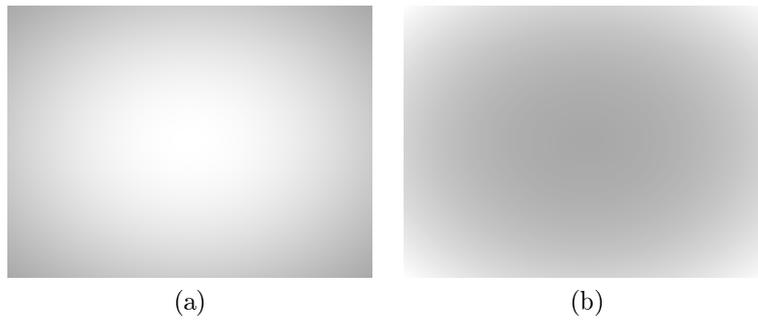


FIG. 4.12 – Vignetage de l’objectif pour le canal rouge (a) et image de pondération pour la correction (b).



FIG. 4.13 – Log-luminance finale des scènes de test, obtenue après toutes les corrections radiométriques.

la caméra. Pour cela, la scène est tout d’abord acquise avec différentes durées d’exposition (voir Fig. 4.14). Pour réduire le temps d’acquisition de la scène, une seule acquisition caméra est effectuée pour chaque durée d’exposition. Il s’agit bien-sûr d’un compromis : le bruit n’est alors pas corrigé de façon aussi rigoureuse que lors du calibrage.

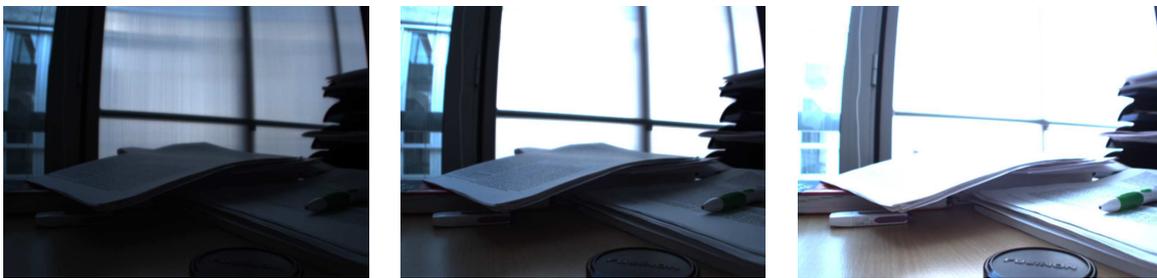


FIG. 4.14 – Acquisitions caméra d’une scène à différentes durée d’exposition.

Nous obtenons ensuite la photoquantité étalonnée en réalisant le calcul de luminance de la méthode de Debevec-Malik avec la réponse étalonnée trouvée lors du calibrage (voir Fig. 4.15 (a)).

Enfin, nous corrigeons le vignetage et la variation de sensibilité du capteur en multipliant par l’image de pondération. Nous obtenons ainsi la photoquantité étalonnée et uniformisée de la scène (voir Fig. 4.15 (b)).

4.6 Manuel d’utilisation

Concrètement, pour mettre en place la correction caméra présentée, un opérateur doit réaliser quelques étapes de supervision :

- il place la caméra dans la scène qui doit être utilisée pour les acquisitions ;
- il enlève l’objectif de la caméra et lance une acquisition HDR (les durées d’exposition peuvent être spécifiées manuellement ou déterminées automatiquement par l’ordinateur en faisant varier le temps d’exposition et en analysant la part de pixels non-activés ou saturés) ;
- il fixe l’objectif sur la caméra, place la mire blanche dans la scène puis lance trois acquisitions HDR en tournant légèrement la caméra entre chaque acquisition ;



FIG. 4.15 – Photoquantité étalonée (a) et Photoquantité étalonée et uniformisée (b) de la scène (échelle logarithmique).

- il spécifie les transformations géométriques réalisées entre les trois acquisitions précédentes, par exemple en sélectionnant des points communs (cette étape peut être réalisée automatiquement par l'ordinateur via un calibrage géométrique préalable ou via un algorithme de détection de points d'intérêt);
- il retire la mire blanche de la scène et place la caméra dans les conditions d'utilisation finale.

Ces étapes sont suffisantes pour que le système calcule son calibrage. La correction en-ligne des images est ensuite automatique et ne nécessite pas de supervision particulière. L'objectif de facilité d'utilisation est donc relativement bien satisfait.

4.7 Résultats et analyse

Dans cette section, nous évaluons la méthode de correction radiométrique de la caméra. Plus précisément, il s'agit d'estimer l'efficacité de l'uniformisation, la fidélité du calcul de luminance et l'influence du bruit.

4.7.1 Uniformité

En corrigeant le vignetage et la variation de sensibilité, la méthode est censée donner une mesure uniforme sur toute l'image. Pour le vérifier, il suffit d'acquérir une scène uniforme, d'appliquer la méthode de correction et de tester l'uniformité du résultat. En pratique, obtenir une scène uniforme n'est pas très facile. C'est pourquoi, la scène de test utilisée est approximative. Nous n'espérons donc pas trouver une uniformisation rigoureuse mais au moins une amélioration. D'après nos tests, la luminance a une amplitude relative de 37 % avant uniformisation (Fig. 4.16 (a)) et de 29 % après (Fig. 4.16 (b)). Nous observons donc effectivement une amélioration.



FIG. 4.16 – Correction de la variation de sensibilité et du vignetage : log-luminance non corrigée (a) et log-luminance corrigée (b).

4.7.2 Luminance

Pour estimer la fidélité de la photoquantité obtenue par notre méthode, nous comparons la photoquantité obtenue avec une vérité terrain. Nous utilisons ici comme référence, un ColorChecker® éclairé uniformément (voir Fig. 4.17).



FIG. 4.17 – Scène de test : acquisition à 20 ms (a) et log-luminance obtenue avec notre méthode (b).

Il faut ici remarquer que la vérité terrain est constituée par la réflectance des carreaux du ColorChecker® (souvent donnée dans un espace non-linéaire). Elle n'est donc pas mesurable directement car corrélée à la lumière incidente. Cependant, comme notre scène de test est éclairée par la lumière du jour, nous pouvons comparer les valeurs mesurées avec les données du Colorchecker® pour l'illuminant CIE-D65.

Notons également, comme expliqué précédemment, que la caméra n'estime pas réellement la luminance de la scène mais une mesure de sa densité spectrale selon les réponses spectrales des photodétecteurs (cette mesure est parfois appelée photoquantité). Ainsi, la précision de la correction que l'on peut espérer est conditionnée par la similarité des réponses spectrales des photodétecteurs avec celles de l'observateur standard défini par la CIE et utilisé pour caractériser les réflectances du Colorchecker®.

La correction de la réponse du capteur est censée donner la photoquantité dans un espace linéaire et étalonnée selon les canaux de couleur. Il ne s'agit donc pas d'une mesure absolue. C'est pourquoi, la photoquantité doit être comparée à la vérité terrain «à une fonction affine près». Pour cela, nous considérons le nuage de points dans l'espace à deux dimensions (photoquantité, vérité terrain). La photoquantité est fidèle si les points sont localisés sur la droite correspondant à la fonction affine. Pour nos tests, nous déterminons la droite correspondant au nuage de points par régression linéaire. Pour estimer l'efficacité de notre méthode de correction, nous comparons la vérité terrain non seulement avec la photoquantité obtenue par notre méthode mais également avec les niveaux de la meilleure acquisition caméra (voir Fig. 4.18). Sur l'acquisition caméra, le nuage est assez dispersé : la distance des points à la droite est de 14,4 en moyenne et de 64,3 au maximum. Pour la photoquantité, le nuage est mieux localisé sur la droite : la distance est de 8,6 en moyenne et de 26,2 au maximum.

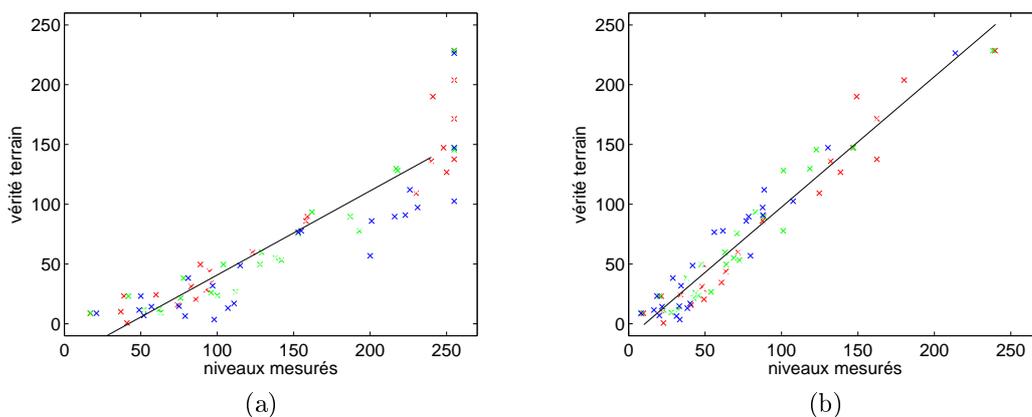


FIG. 4.18 – Comparaison de la vérité terrain avec l'acquisition à 20 ms (a) et la luminance obtenue avec notre méthode (b) (pour les trois canaux RGB).

4.7.3 Gestion du bruit

Contrairement à l'étape de calibrage, l'étape de correction n'effectue pas la correction temporelle du bruit. Pour estimer la perte de précision ainsi obtenue, nous comparons ici les résultats obtenus avec et sans correction de bruit pour la scène précédente (voir Fig. 4.19). Nous constatons que l'erreur relative causée par l'absence de correction de bruit est assez faible (entre -1% et +3%, valeur maximale sur les canaux de couleur). En fait, le bruit est implicitement réduit par l'acquisition à plusieurs durées d'exposition. Étant donné que la correction de bruit temporelle nécessite de multiplier le nombre d'acquisitions caméra (ce qui n'est pas souhaitable pendant l'étape de correction), ce compromis semble justifié.

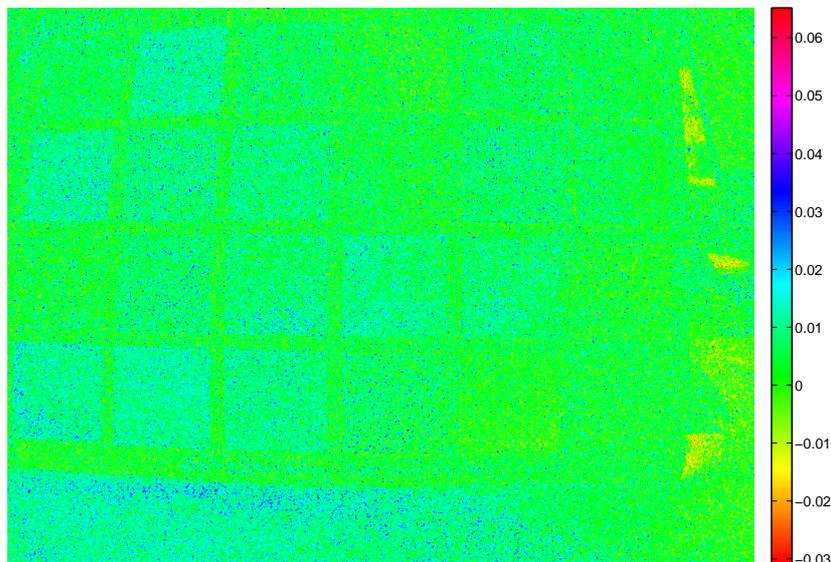


FIG. 4.19 – Différence relative entre la luminance débruitée et la luminance bruitée de la scène présentée Fig. 4.17.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé les perturbations intervenant au cours du processus d'acquisition. La lumière venant de la scène subit tout d'abord le vignettage du système optique. Le capteur réagit ensuite à la lumière incidente de façon non-uniforme (entre photodétecteurs) et non-linéaire (entre intensités). Enfin, la réponse spectrale du capteur et le système de couleur utilisé introduisent une variation chromatique.

Nous avons ensuite détaillé une méthode de calibrage, hors-ligne, consistant à déterminer les paramètres de ce modèle pour une caméra, puis une méthode de correction, en-ligne, consistant à inverser le modèle selon les données du calibrage.

Enfin, nous avons analysé les résultats obtenus. Nous avons en particulier étudié l'efficacité de la correction, grâce à une vérité terrain, ainsi que l'influence du bruit.

Notons que ces méthodes sont modulables en fonction du système d'acquisition. Nous pouvons, par exemple, augmenter le débruitage lors de la correction si la caméra génère beaucoup de bruit, ou encore supprimer la gestion de la non-uniformité du capteur si son influence est négligeable.

Implémentées dans le système Catopsys, ces méthodes permettent d'acquérir une image relativement fidèle de la scène réelle. Ceci est nécessaire pour pouvoir ensuite calibrer le système de projection, ce qui est l'objet des chapitres suivants.

Chapitre 5

Étude radiométrique des sources de lumière

5.1 Introduction

5.1.1 Problématique

Un des objectifs de cette thèse est de permettre un certain contrôle de la radiométrie au sein du système Catopsys. Ceci nécessite d'avoir un minimum de connaissance concernant les différentes sources de lumière mises en jeu, ce qui est l'objet de ce chapitre. Il s'agit donc d'étudier comment quelques sources types peuvent interagir avec le système.

Au sein du système Catopsys, nous distinguons deux types de sources :

- le vidéo-projecteur, source principale, contrôlée par l'ordinateur ;
- les autres sources, non contrôlées par l'ordinateur : par exemple la lumière du jour ou les voyants lumineux des différents appareils. Pour de bonnes conditions d'utilisation, ces sources parasites doivent être faibles par rapport au vidéo-projecteur.

Le but de cette étude est de mettre au point une méthode de caractérisation radiométrique de sources et d'appliquer cette méthode pour caractériser les différentes sources pouvant être présentes dans le cadre du système Catopsys. La suite de cette section présente les critères radiométriques caractérisant les sources de lumière ainsi que les outils de mesures accessibles (prix, mise en oeuvre) permettant de quantifier ces critères.

La section 5.2 présente les recherches déjà publiées concernant la caractérisation de sources de lumière, notamment les dispositifs d'affichage.

La section 5.3 décrit la méthode employée pour notre étude des sources de lumières. Il s'agit notamment de proposer un protocole de mesure pour caractériser une source de lumière selon les critères présentés et en utilisant les outils de mesures précédents.

La section 5.4 présente et analyse les résultats de l'étude de diverses sources de lumière. Elle décrit les sources étudiées puis les mesures réalisées selon le protocole donné.

Enfin, la section 5.5 conclut le chapitre en donnant les principales déductions de l'étude des sources de lumière, applicables au système Catopsys.

5.1.2 Caractéristiques des sources de lumière

Rappelons que deux types de sources peuvent intervenir dans le système Catopsys :

- le vidéo-projecteur, source principale, à plusieurs canaux de couleur, étendue et contrôlable ;
- des sources parasites, non contrôlables.

Leurs caractéristiques sont nombreuses et parfois difficiles à mesurer. Il s'agit donc ici d'estimer leur influence potentielle sur le système de projection. Nous décrivons ci-dessous les caractéristiques principales d'une source type vidéo-projecteur. Certaines de ces caractéristiques sont applicables à des sources plus simples, parfois même non contrôlables.

Puissance

C'est la quantité de lumière que peut émettre la source par unité de temps. La puissance peut varier pour une source contrôlable. Dans le cadre de Catopsys, nous pourrions penser que le système nécessite

un projecteur de forte puissance car le faisceau est dispersé dans toutes les directions après réflexion sur le miroir. Cependant, comme la pupille de l'oeil adapte la vision à la quantité de lumière, c'est plus la dynamique du projecteur que sa puissance maximale qui sera intéressante.

Contraste, dynamique

Ces notions caractérisent l'étendue de la plage de puissance offerte par une source contrôlable. En notant L_{min} et L_{max} les luminances respectivement minimale et maximale de la source, nous pouvons définir le contraste par :

$$C = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{min}}$$

Avec cette définition, le contraste exprime la dynamique de la source relativement à la luminance minimale (on dit alors que la source a un taux de contraste de, par exemple, 1 000 : 1). Notons que pour certaines sources étendues, le contraste en un point peut varier selon l'état des autres points. Notons également que le contraste peut être temporel (en un point, par rapport à deux images successives) ou spatial (en deux points d'une même image).

Spectre (SPD)

Le spectre d'une source décrit la puissance de la source en fonction de la longueur d'onde. Toute source a un spectre particulier. La vision humaine met en jeu trois types de photorécepteurs ayant des réponses spectrales différentes. Ainsi chaque type de photorécepteurs est sensible à différentes régions du spectre, ce qui permet de créer trois stimuli, interprétés comme une couleur.

Une source couleur est en fait composée de plusieurs sources de spectres différents, ce qui définit autant de canaux de couleurs. Moduler l'intensité de chaque canal permet de moduler le spectre final émis par la source et de contrôler les stimuli, donc la sensation de couleur, au niveau de la vision humaine.

Comme la vision humaine dispose de trois types de photorécepteurs, trois canaux de couleurs différents sont théoriquement suffisants pour synthétiser toutes les couleurs visibles. C'est dans cet objectif que la CIE a défini les trois spectres standards du tristimulus CIE-XYZ. Ainsi, une couleur peut être définie par ses valeurs de tristimulus. Ceci fournit une base de couleurs où Y représente la luminance et X et Z la chrominance de la lumière.

Gamut

Le gamut permet de caractériser l'ensemble des couleurs synthétisables par une source de lumière contrôlable, à plusieurs canaux. Un diagramme de chromacité est parfois utilisé pour représenter les couleurs dans un plan, indépendamment de la luminance. En effet, la luminance est théoriquement indépendante de la chrominance et n'influe pas sur la couleur perçue. Cependant, pour caractériser les sources plus précisément et vérifier si celles-ci peuvent synthétiser leurs couleurs sur toute la plage de luminance, nous représentons le gamut dans l'espace 3D.

Indépendance des canaux

Une source couleur contrôlable a des canaux indépendants si la variation d'intensité émise par un canal n'affecte pas l'intensité émise par les autres canaux. Cette propriété est importante car elle facilite l'utilisation de la source (synthèse d'une couleur donnée) et garantit la possibilité de synthétiser une large palette de couleurs (en effet, nous aimerions que les canaux forment une base de couleurs et non une famille liée).

Fonction de transfert d'intensité (ITF)

La fonction de transfert d'intensité d'une source contrôlable caractérise la lumière émise (intensité lumineuse) en fonction de la valeur d'entrée (intensité électrique). Cette fonction est souvent modélisée par une LUT, une fonction gamma ou une sigmoïde.

Variation spatiale

Il s'agit de la variation de lumière émise par une source étendue en ses différents points lorsque les valeurs d'entrée sont identiques pour tous les points. En pratique, cette variation est surtout d'origine géométrique (vignette) et se modélise par un facteur d'atténuation défini pour chaque point de la source.

Indépendance des pixels

Un point d'une source étendue contrôlable est indépendant s'il ne peut pas être modifié en changeant la valeur des autres points. Il s'agit bien sûr d'une propriété importante mais qui n'est pas toujours rigoureusement respectée (voir la remarque précédente sur le contraste).

Particularités du système Catopsys

Pour le système Catopsys, nous avons besoin d'une source contrôlable étendue à grande dynamique et large gamut. En effet, d'une part, la puissance pure est atténuée par l'adaptation de la vision et, d'autre part, la variation spatiale et l'ITF peuvent être corrigées (voir le Chapitre 7 sur la compensation radiométrique). L'important est donc de disposer d'une large palette de nuances de couleurs exploitables (nous retrouvons d'ailleurs cette tendance dans le domaine du home-cinema où le contraste est préféré à la puissance).

5.1.3 Appareils de mesure

Spectroradiomètre

Un spectroradiomètre permet de mesurer le spectre de la lumière. Il est théoriquement également capable de mesurer la plupart des caractéristiques des sources de lumière mentionnées précédemment. Cependant, c'est un appareil peu accessible (prix, mise en oeuvre).

Colorimètre

Un colorimètre permet de mesurer le tristimulus CIE-XYZ de la lumière. Il est généralement constitué de trois capteurs dont les réponses spectrales sont proche du tristimulus. Le colorimètre est également un appareil spécifique mais beaucoup plus accessible que le spectroradiomètre (il existe des colorimètres professionnels interfaçable avec un ordinateur à moins de 300 €).

Caméra

Une caméra vidéo couleur, comme celle utilisée dans le système Catopsys, est capable de mesurer la lumière relativement aux réponses spectrales de ses différents types de photorécepteurs. La caméra a pour avantages de pouvoir mesurer plusieurs zones en même temps et d'être relativement accessible (prix raisonnable, interface avec ordinateur).

En revanche, une caméra n'est généralement pas conçue pour servir d'appareil de mesure. Il est donc indispensable de la calibrer un minimum. Il est généralement judicieux de :

- corriger les variations spatiales (vignelage, sensibilité du capteur) ;
- effectuer des mesures avec une grande dynamique (HDR) ;
- linéariser les canaux de couleur (ITF) ;
- convertir les valeurs fournies par la caméra (donc selon sa réponse spectrale) dans un espace de couleur indépendant du matériel (par exemple, CIE-XYZ).

Dans [BDKH98], Brydges et al. proposent une méthode pour déterminer les valeurs du tristimulus CIE-XYZ en utilisant une caméra CCD couleur. Cependant, leur méthode nécessite un colorimètre pour calibrer la caméra.

Dans [KK08], Kim et Kautz proposent une méthode pour pouvoir utiliser une caméra comme colorimètre. Leur méthode utilise l'imagerie HDR pour corriger l'ITF de la caméra et gérer les dynamiques élevées. Enfin, ils utilisent également une lampe et des mirettes étalonnées pour déterminer une matrice de conversion de l'espace de couleur de la caméra vers l'espace CIE-XYZ.

Pour le projet Catopsys, nous utilisons la méthode de calibrage caméra proposée Section 4. Cette méthode ne convertit pas explicitement les valeurs dans un espace de couleur indépendant du matériel (en fait, les valeurs sont conservées dans le système de couleurs de la caméra, qui peut être un espace normalisé). Cependant, elle est simple à mettre en oeuvre, autorise les dynamiques élevées, effectue une balance de blanc et corrige l'ITF et les variations spatiales.

5.2 Travaux précédents

De nombreux travaux ont été réalisés concernant la caractérisation des différents systèmes d'affichage en utilisant différents appareils de mesure.

Ces travaux ont tout d'abord été consacrés aux écrans CRT (à tube cathodique) puis LCD (à cristaux liquides). Pour cela des appareils de mesure spécifiques étaient utilisés : photomètre (mesure de la luminance), colorimètre (mesure du tristimulus CIE-XYZ) ou spectroradiomètre (mesure du spectre).

Par la suite, d'autres travaux ont été consacrés aux projecteurs LCD puis DLP (à micro-miroirs) toujours en utilisant les appareils de mesure spécifiques. Enfin, des travaux plus récents tentent de caractériser des projecteurs en utilisant des appareils de mesure non spécifiques et plus accessibles (prix, mise en oeuvre), notamment des caméras vidéo contrôlées par ordinateur.

Caractérisation d'écrans

Pour caractériser et corriger la fonction de transfert d'intensité (ITF) d'écrans CRT, Cowan utilise une cellule photosensible à réponse linéaire (peu coûteuse) [Cow83]. Dans [Ber96], Berns utilise un colorimètre. Ainsi, pour corriger l'ITF d'un écran CRT, plusieurs méthodes de correction existent, basées notamment sur un modèle GOG (gain, offset, gamma) ou sur une LUT (table de données).

Concernant la caractérisation d'écran LCD, Kim et MacDonald utilisent un spectroradiomètre pour étudier le spectre (SPD), la variation spatiale et l'ITF [KM06]. Dans une étude très détaillée [GF00], Gibson et Fairchild utilisent un colorimètre et un spectroradiomètre pour caractériser des écrans LCD et CRT, notamment la SPD, l'ITF, la luminosité, le contraste, la variation spatiale et temporelle, l'indépendance interpixels et intercanaux et la stabilité de la chromaticité en fonction de la luminosité.

Différentes méthodes de correction d'écran LCD ont été proposées. Dans [FW98], Fairchild et Wyble utilisent un colorimètre, un photomètre et un spectroradiomètre pour étudier un écran LCD. Ils proposent également de modéliser l'ITF par une LUT et la SPD par une matrice 3×3 établissant une correspondance entre le tristimulus et la couleur d'entrée de l'écran. Day et al. présentent des travaux similaires dans [DTB04]. Enfin, pour déterminer la matrice modélisant la SPD d'un écran, Tamura et al. proposent d'utiliser une base colorimétrique spécifique, calculée par analyse en composantes principales [TTM02].

Caractérisation de projecteurs

Kwak et MacDonald ont réalisé une étude détaillée de projecteurs LCD [KM00]. Ils utilisent un spectroradiomètre pour étudier, entre autres, l'ITF, la SPD, l'indépendance intercanaux, le gamut, le contraste et la variation spatiale et temporelle. Ils comparent également plusieurs méthodes de calibrage.

Concernant les projecteurs DLP, nous trouvons plusieurs études dans la littérature. À l'aide d'un spectroradiomètre, Packer et al. ont étudié l'ITF, la SPD, le contraste, le gamut et la variation spatiale et temporelle d'un projecteur DLP [PDV⁺01]. Leur étude a été réalisée dans le but d'évaluer la capacité des projecteurs DLP à créer des stimuli pour des applications en biologie. Bastani et al. s'intéressent au calibrage de projecteurs DLP dans [BFG05]. Ils utilisent un spectroradiomètre pour évaluer la capacité de différentes méthodes de calibrage à corriger les effets de l'ITF et de la SPD. Dans [HF06], Heckaman et Fairchild présentent une caractérisation théorique et expérimentale des projecteurs DLP. Ils prennent en compte la perception humaine et réalisent des tests avec des personnes.

Certaines études comparent différentes technologies de projection voire d'affichage. Ainsi, Madar et al. comparent des projecteurs LCD et DLP à travers des mesures au spectroradiomètre [MKS03]. Bastani et al. réalise une étude encore plus large dans [BCF05] où ils comparent 3 méthodes de calibrage sur 7 dispositifs d'affichage (écrans CRT, écrans LCD, projecteurs LCD).

Notons également que le domaine de la projection et notamment du home cinema dispose de quelques méthodes de calibrage de projecteurs, utilisant généralement des mirettes ou des colorimètres [Far02, Huf03].

Enfin, les dispositifs multi-projecteurs (affichages haute définition réalisés en combinant plusieurs projecteurs) ont grandement contribué à la caractérisation des projecteurs de par leur nécessité d'une projection homogène. Dans [MHTW00], Majumder et al. étudient la caractérisation et le calibrage de projecteurs LCD et DLP. Ils utilisent un spectroradiomètre et prennent en compte l'ITF, la SPD et la variation spatiale. De même, dans [Sto01b, Sto01a], Stone caractérise des projecteurs LCD, DLP et D-ILA (technologie JVC) avec pour objectif de réaliser de la multi-projection. Citons également les travaux de Bern et Eppstein [BE03] et de Wallace et al. [WCL03] qui proposent des méthodes pour déterminer un gamut commun à tous les projecteurs d'un dispositif multi-projecteur.

Caractérisation projecteur-caméra

La caméra vidéo est un complément particulièrement intéressant au projecteur car d'une part, tout comme le projecteur, elle utilise des images 2D et d'autre part, elle est très accessible (prix, mise en oeuvre). En contrepartie, elle n'offre pas les performances d'appareils de mesure spécifiques comme les colorimètres ou les spectroradiomètres.

Dans [MS04], Majumder et Stevens présentent une méthode pour corriger les variations spatiales d'un système d'affichage multi-projecteur. Ils effectuent des mesures au spectroradiomètre et concluent

que dans un tel système, la luminance varie beaucoup tandis que la chrominance varie peu. Ils proposent alors de corriger les variations de luminance par une carte d'atténuation, déterminée grâce à une caméra.

Dans [SC05], Song et Cham proposent plusieurs méthodes pour déterminer l'ITF d'un système d'affichage multi-projecteur, en utilisant uniquement une caméra.

Dans [BMY05], Brown et al. synthétisent les travaux concernant la correction de systèmes multi-projecteurs avec caméras. Ils suggèrent de déterminer les ITFs et les variations spatiales du système multi-projecteur grâce aux caméras, par l'acquisition d'images HDR. Ceci permet de trouver la plage de luminance commune et de corriger les variations interpixels.

Majumder et Stevens proposent une autre méthode pour corriger l'ITF et la variation interpixels de systèmes multi-projecteurs [MS05]. Ils calibrent tout d'abord le système en utilisant une caméra et un photomètre puis calculent une image de correction par optimisation. Leur calcul pondère l'écart de luminance entre deux pixels par la distance entre ces deux pixels, ce qui permet de réduire la variation spatiale tout en conservant la dynamique du système de projection.

Enfin, Juang et Majumder proposent une méthode pour caractériser l'ITF et la variation interpixels d'un projecteur à partir d'une caméra [JM07]. Le problème est de séparer les variations spatiales dues à la caméra de celle dues au projecteur. Pour cela, les auteurs font varier l'ouverture de la caméra, ce qui leur permet de caractériser l'influence de la caméra sur la variation spatiale puis d'en déduire celle du projecteur.

5.3 Méthode d'analyse

Cette section décrit la méthode d'analyse, adaptée au contexte de Catopsys, réalisée pour évaluer les principales caractéristiques de sources de lumière.

5.3.1 Mesure à pleine puissance

Cette première expérience est applicable à toutes les sources de lumière, contrôlables ou non. Elle consiste tout simplement à mesurer la lumière émise par une source. Dans le cas d'une source contrôlable, la puissance maximale est demandée (par exemple, pour un projecteur, nous affichons une image blanche). Cette expérience a essentiellement pour but de comparer la couleur des différentes sources.

5.3.2 Caractérisation de la fonction de transfert d'intensité

Cette expérience consiste à mesurer la variation de lumière émise par une source contrôlable en fonction de la variation de l'entrée. Il s'agit en fait d'une extension de l'expérience précédente. En pratique, il suffit de mesurer la lumière émise pour différents niveaux de gris. Nous obtenons ainsi l'ITF de chaque canal de la source. Il peut être intéressant d'utiliser un espace luminance/chrominance pour évaluer la qualité de la source (i.e. luminance linéaire et chrominance constante).

5.3.3 Caractérisation du gamut

Cette expérience consiste à mesurer le gamut d'une source contrôlable, c'est-à-dire l'ensemble des couleurs qu'elle peut synthétiser. Les sources mesurées dans cette étude sont des afficheurs à 3 canaux de couleurs (RGB) de 8 bits chacun. Il faut donc théoriquement réaliser 256^3 mesures (un peu plus de 16 millions). En pratique, nous nous contentons de considérer 5 valeurs régulièrement réparties pour chaque canal, ce qui nous donne déjà $5^3 = 125$ mesures à réaliser. Comme la chrominance n'est pas toujours conservée en fonction de la luminance, nous conservons les 3 valeurs de chaque mesure et construisons un gamut 3D.

5.3.4 Caractérisation du contraste

Classiquement, deux expériences sont réalisées pour caractériser le contraste (temporel) d'une source contrôlable telle qu'un écran ou un projecteur. La première consiste à mesurer la lumière émise lorsque la source affiche une image entièrement blanche et la lumière émise lorsque la source affiche une image entièrement noire. Ceci permet de calculer le contraste maximal de la source (FULL). Cependant, selon la technologie de la source, cette mesure n'est pas toujours représentative de la dynamique synthétisable par la source au sein d'une image. C'est pourquoi, une seconde expérience consiste à afficher un damier noir et blanc et à mesurer la lumière émise pour un carreau blanc et celle émise pour un carreau noir. En pratique, nous plaçons la sonde au milieu d'un carreau et affichons successivement une image puis son complémentaire. Ceci donne le contraste ANSI, représentatif de la dynamique synthétisable au sein d'une image.

Désignation	Désignation commerciale	Type d'appareil
Sonde 1	Minolta Chroma meter xy-1	colorimètre conforme à l'observateur standard CIE
Sonde 2	Datacolor Spyder3 Elite	colorimètre conforme à l'observateur standard CIE
Sonde 3	MatrixVision BlueFox-121C	caméra CCD couleur

TAB. 5.1 – Appareils de mesure utilisés pour l'étude des sources de lumière.

5.3.5 Espaces de couleur utilisés

Pour les sources contrôlables, l'image d'entrée est donnée dans un espace RGB. Si la mesure est effectuée dans le même espace de couleur, que la source et la mesure sont parfaites, nous obtenons le gamut représenté Fig. 5.1. Sur cette figure, les points représentent les mesures. Les lignes rouges (resp. vertes, bleues) relient deux mesures dont seul le canal rouge (resp. vert, bleu) est modifié sur l'image d'entrée. Evidemment, nous obtenons ici un cube unité découpé régulièrement.

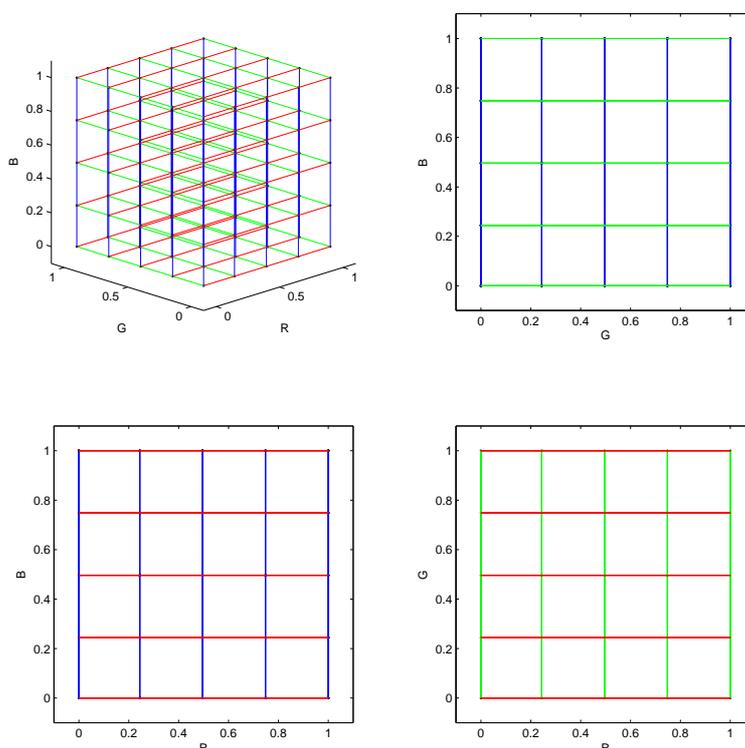


FIG. 5.1 – Gamut RGB théorique d'une source idéale CIE-RGB.

Pour comparer les sources, nous utilisons l'espace CIE-LUV. Cet espace de couleur est indépendant du matériel et à peu près perceptivement uniforme (une même variation de couleurs est perçue de la même façon dans tout l'espace). Le gamut théorique dans l'espace CIE-LUV d'un projecteur idéal synthétisant l'espace CIE-RGB est représenté Fig. 5.2. Notons les déformations sensées uniformiser la perception.

5.3.6 Appareils de mesure utilisés

Toutes les mesures de l'étude ont été réalisées avec les trois appareils mentionnés Tab. 5.1.

La sonde 1 est un colorimètre manuel à affichage digital. Elle mesure l'éclairement (en lx) et donne des valeurs dans l'espace CIE-xyY. Le gamut de la source 7 (écran LCD, voir la section 5.4) mesuré par la sonde 1 est représenté Fig. 5.3 dans l'espace CIE-LUV.

La sonde 2 est un colorimètre connecté à un ordinateur par USB et piloté par le logiciel Colorimètre HCFR. Elle mesure la luminance (en cd m^{-2}) et donne des valeurs dans différents espaces dont CIE-XYZ. Le gamut CIE-LUV de la source 7 mesuré par la sonde 2 est représenté Fig. 5.4. Notons que ce gamut est très proche de celui obtenu avec la sonde 1.

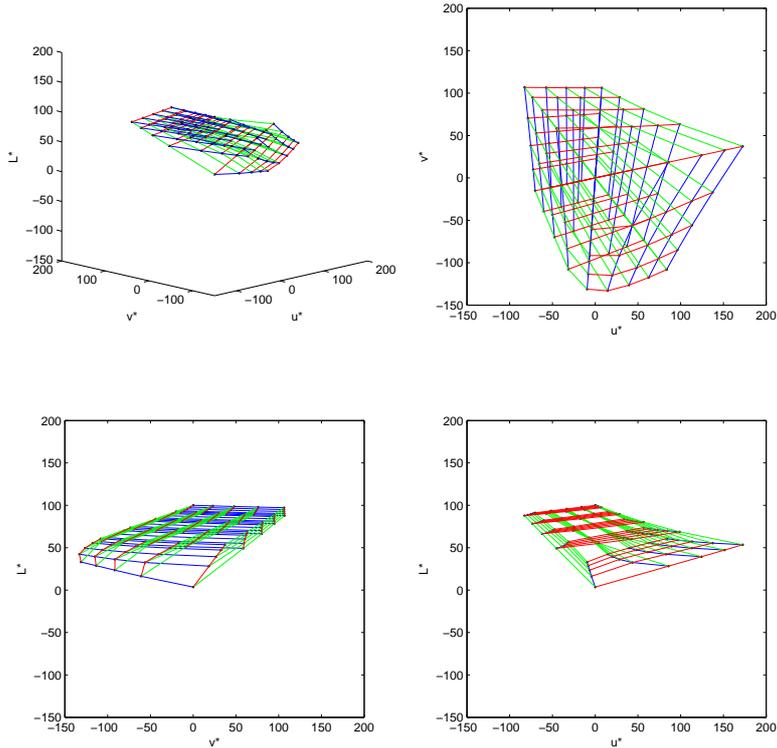


FIG. 5.2 – Gamut CIE-LUV théorique d’une source idéale CIE-RGB.

La sonde 3 est une caméra connectée à un ordinateur par USB. Les acquisitions sont réalisées en HDR avec correction de l’ITF et balance de blanc. Le capteur de la caméra est utilisé sans objectif et mesure donc l’éclairement. La réponse spectrale du capteur n’est pas conforme à l’observateur standard de la CIE. Par conséquent, elle donne des valeurs dans son propre espace de couleurs. Une méthode de conversion est utilisée pour estimer les valeurs correspondantes dans l’espace CIE-XYZ. Le gamut CIE-LUV de la source 7 mesuré par la sonde 2 est représenté Fig. 5.5. Ce gamut est légèrement différent des deux précédents ce qui confirme que la réponse spectrale de la sonde 3 (caméra CCD couleur) n’est pas conforme à la réponse de l’observateur standard de la CIE. Ceci n’est pas un problème pour une caméra car elle n’a pas été conçue pour servir d’instrument de mesure. Pour Catopsys, nous pouvons néanmoins utiliser la caméra comme instrument de mesure; simplement, l’espace de couleurs de référence est imposé par la caméra.

L’ITF de la source 10 (projecteur LCD) mesuré par chacune des 3 sondes est représenté Fig. 5.6 (CIE-RGB) et Fig. 5.7 (CIE-LUV). Nous constatons, ici aussi, que les sondes 1 et 2 (qui sont des appareils de mesure) donnent des résultats très proches alors que la sonde 3 (qui n’est pas un appareil de mesure) donne un résultat légèrement différent.

5.4 Résultats et analyse

5.4.1 Sources testées

Les différentes sources considérées dans cette étude sont listées dans Tab. 5.2.

Sources non contrôlables

La source 1 est la lumière du soleil mesurée en milieu de journée par ciel dégagé. Il s’agit d’une source puissante de lumière blanche (puissance à peu près constante sur tout le spectre visible).

La source 2 est une lampe portative. Elle émet un faisceau de lumière étroit via une ampoule à incandescence au xénon qui produit une lumière assez chaude (température de couleur basse). Le constructeur annonce une puissance de 33 lm et un éclairement de 10 000 lx à 1 m.

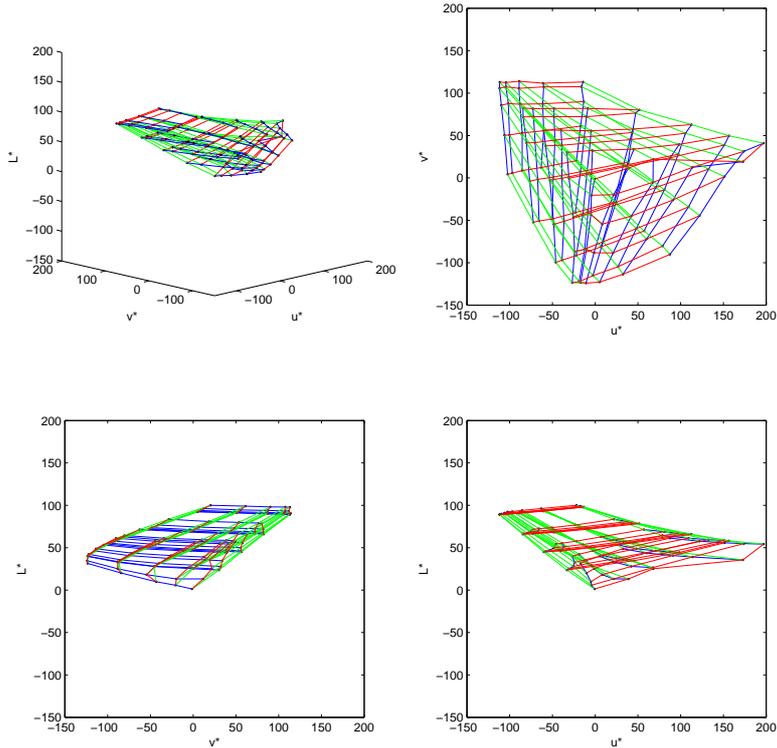


FIG. 5.3 – Gamut CIE-LUV de la source 7 mesuré par la sonde 1.

La source 3 est une classique ampoule à incandescence de 100 W. Ce type d'ampoule a un faible rendement lumineux (inférieur à 20 lm W^{-1}). En effet, une grande partie de l'énergie est transformée en lumière infrarouge (chaleur) d'où également une température de couleur basse.

La source 4 est une lampe comportant 4 LED blanches. Elle produit un faisceau large de lumière blanche légèrement bleutée (température de couleur élevée). Sa puissance lumineuse est de 35 lm.

La source 5 est une source de lumière dédiée à des applications de vision industrielle. Elle est composée d'une lampe halogène reliée par fibre optique à un système de diffusion surfacique. Il s'agit donc d'une source à incandescence de température de couleur basse et de rendement lumineux faible.

Enfin, la source 6 est une lampe à tube fluorescent. Dans ce type de lampe, des décharges électriques, réalisées dans un gaz particulier, produisent une lumière dont le spectre est ensuite modifié par une poudre fluorescente recouvrant les parois intérieures du tube. Ce type de lampe a un assez bon rendement lumineux mais la lumière émise peut avoir un spectre discontinu qui pénalise la perception des couleurs. La lampe considérée ici est une baladeuse 8 W à température de couleur élevée.

Désignation	Type de source
Source 1	lumière naturelle
Source 2	lampe portable, ampoule au xénon
Source 3	ampoule à incandescence 100 W
Source 4	lampe portable à LED
Source 5	source halogène avec diffuseur surfacique
Source 6	lampe portable, tube fluorescent 8 W
Source 7	écran LCD (LG® Flatron L1919S)
Source 8	écran CRT (Dell® M991)
Source 9	projecteur DLP (Dell® 5100MP)
Source 10	projecteur LCD (Canon® XEED SX50)

TAB. 5.2 – Sources de lumière utilisées dans cette étude.

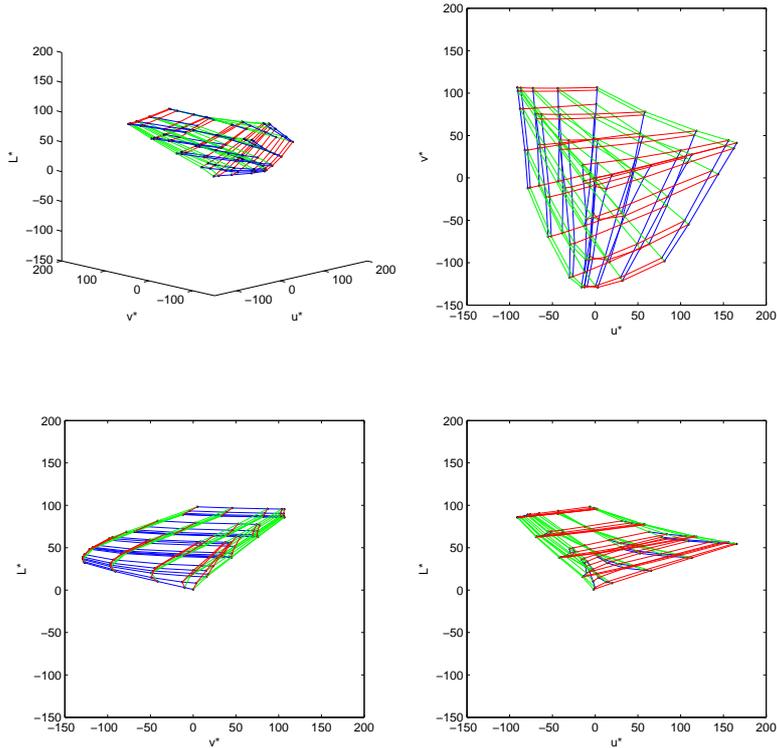


FIG. 5.4 – Gamut CIE-LUV de la source 7 mesuré par la sonde 2.

Sources contrôlables

Les sources 7, 8, 9 et 10 sont des systèmes d’affichage d’ordinateurs (écran ou projecteur). Ce type d’affichage permet de contrôler la lumière en un certain nombre de pixels disposés selon une grille rectangulaire. Ces systèmes utilisent 3 canaux de couleur 8 bits, ce qui leur permet de représenter plus de 16 millions de couleurs. Les couleurs sont représentées dans le système normalisé sRGB.

Ces systèmes d’affichage fonctionnent selon le même principe de base :

- une lampe (à décharge ou à incandescence) produit de la lumière;
- la lumière arrivant au niveau d’un pixel est modulée selon la couleur désirée.

Certains appareils considèrent tous les pixels en même temps, d’autres procèdent par balayage (un pixel à la fois). Certains appareils possèdent un iris dynamique pour moduler l’ensemble de la lumière en fonction de l’image à afficher.

Il existe plusieurs technologies d’affichage :

- CRT : un faisceau d’électrons variable balaie la surface de l’écran activant ainsi plus ou moins les points lumineux ;
- LCD : une source de lumière polarisée est modulée par une dalle de cristaux liquides dont l’orientation, et donc la transparence à la lumière polarisée, varie ;
- DLP : une lampe émet de la lumière vers des micro-miroirs orientables (un par pixel) pour ainsi réfléchir plus ou moins la lumière à travers un filtre chromatique (à 3 ou 4 couleurs) en rotation.

Pour récapituler les sources contrôlables utilisées : la source 7 est un écran CRT où un faisceau d’électrons balaie des cellules au phosphore; la source 8 est un écran LCD où la lumière d’une lampe à décharge est modulée par une dalle LCD ; la source 9 est un projecteur DLP où la lumière d’une lampe à incandescence est modulée par une matrice de micro miroirs et un filtre chromatique à 4 segments ; la source 10 est un projecteur LCD où la lumière d’une lampe à incandescence est modulée par une dalle LCD.

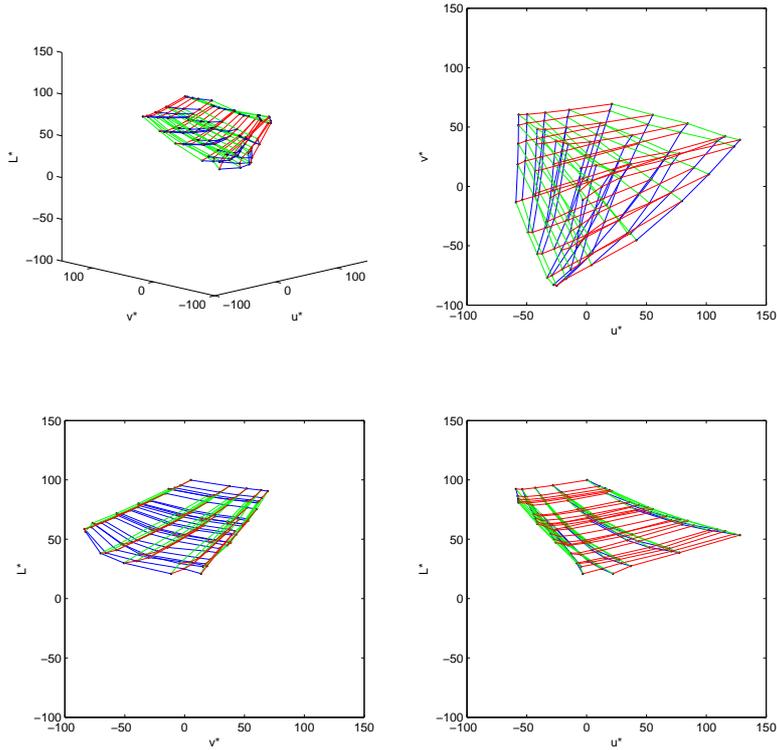


FIG. 5.5 – Gamut CIE-LUV de la source 7 mesuré par la sonde 3.

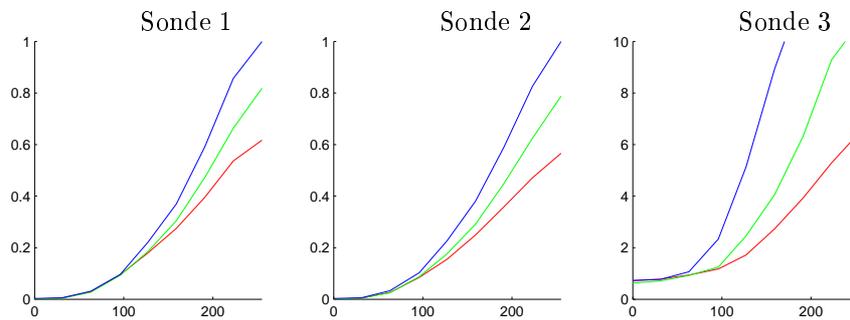


FIG. 5.6 – ITF de la source 10 mesuré par les différentes sondes dans CIE-RGB (R est en rouge, G en vert et B en bleu).

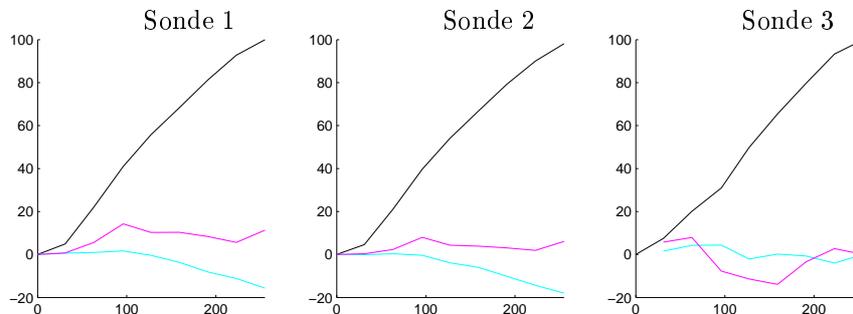


FIG. 5.7 – ITF de la source 10 mesuré par les différentes sondes dans CIE-LUV (L^* est représenté en noir, u^* en cyan et v^* en magenta)

5.4.2 Étude expérimentale

Mesure à pleine puissance

Il s'agit ici de mesurer et de comparer la chrominance des différentes sources de lumières existantes. La lumière de chaque source, à pleine puissance, a été mesurée. Les valeurs obtenues sont représentées Fig. 5.8

dans le diagramme (u^* , v^*) (la courbe représente la couleur du corps noir à différentes températures (locus planckien) et le triangle le gamut normalisé Rec709).

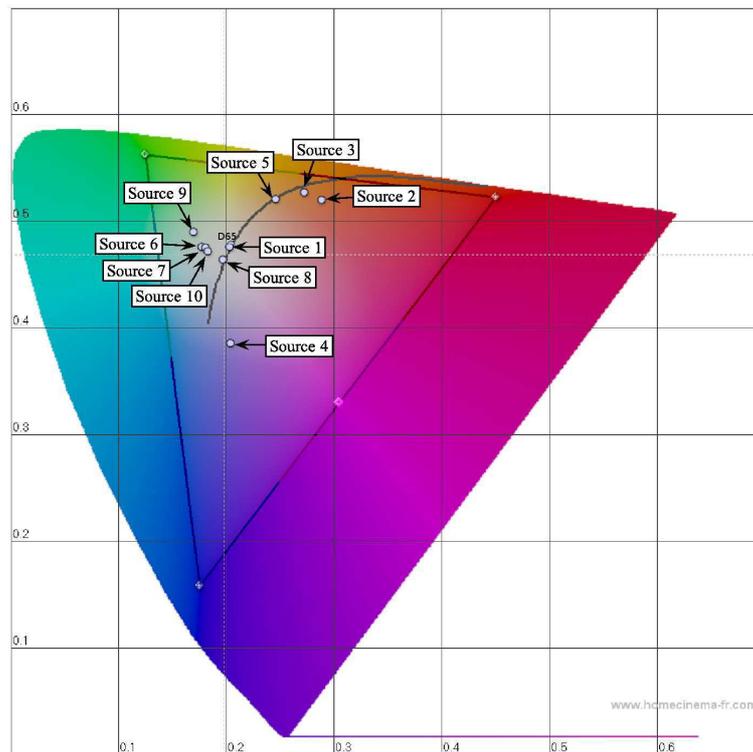


FIG. 5.8 – Chrominance des sources à pleine puissance dans (u^* , v^*).

Comme attendu, nous constatons que :

- la source 1 (lumière naturelle en plein jour) est très proche de l'illuminant D65, ce qui est cohérent avec la définition de ce dernier ;
- les sources à incandescence 2, 3 et 5 émettent une lumière chaude (température de couleur basse) ;
- la source 4, à LED, produit une lumière froide, peu naturelle ;
- la source 8 (écran CRT) est assez neutre, proche de l'illuminant D65 ;
- les sources 6, 7, 9 et 10 produisent une lumière assez froide, dans les tons cyans, de par leur technologie assez proches (les sources 6 et 7 utilisent une lampe à décharge et à vapeur de mercure basse pression ; les sources 9 et 10 utilisent des lampes à incandescence à vapeur de mercure haute pression).

En conclusion de cette expérience, remarquons que la couleur de la lumière dépend de la technologie utilisée pour la produire et que les sources utilisables pour le système Catopsys (sources 9 et 10) sont légèrement colorées à pleine puissance mais restent suffisamment neutres pour être exploitables.

Fonction de transfert d'intensité

Rappelons que la fonction de transfert d'intensité décrit la lumière émise par une source contrôlable en fonction du niveau d'entrée. Nous étudions ici la variation des fonctions de transfert d'intensité et leurs relations suivant les différents canaux. Nous pouvons penser qu'une source idéale est une source qui émet une couleur CIE-RGB proportionnelle à la couleur d'entrée CIE-RGB demandée (Fig. 5.9 (b)). Cependant, la sensation perçue, c'est-à-dire la couleur CIE-LUV correspondante, n'est alors pas proportionnelle à l'intensité d'entrée (Fig. 5.9 (a)). Nous préférons donc prendre comme référence une source neutre dans CIE-LUV, c'est-à-dire dont la luminance est linéaire et la chrominance constante (Fig. 5.10 (a)). Ramenée dans CIE-RGB, une telle source n'est plus linéaire, ni même homogène suivant les canaux de couleurs (Fig. 5.9 (b)).

La fonction de transfert d'intensité de la source 7 (écran LCD) est illustrée Fig. 5.11. Cette source est assez fidèle : la luminance est pratiquement linéaire et la chrominance varie peu. Notons cependant une certaine coloration à haute intensité.

La source 8 (écran CRT) est un peu moins fidèle (Fig. 5.12). Sur une plage assez large d'intensités moyennes, la luminance est assez linéaire et la chrominance non neutre mais constante. En revanche, pour

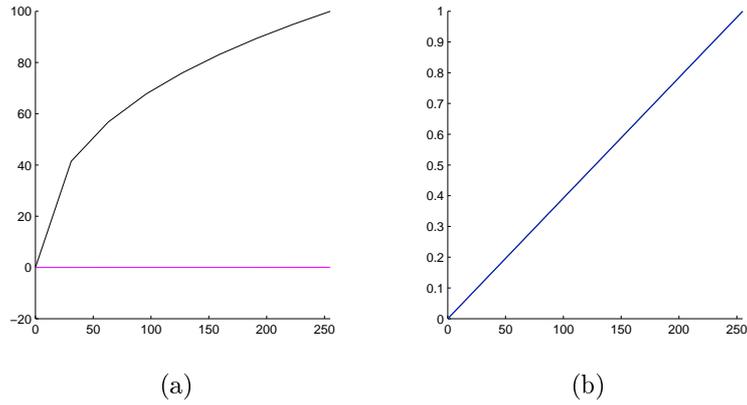


FIG. 5.9 – Fonction de transfert d'intensité d'une source neutre CIE-RGB dans CIE-LUV (a) et dans CIE-RGB (b). Dans (a), u^* et v^* sont confondus. Dans (b), r , g et b sont confondus.

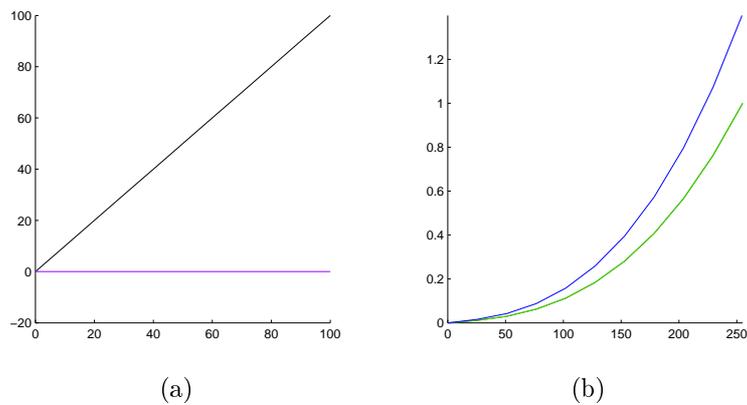


FIG. 5.10 – Fonction de transfert d'intensité d'une source neutre CIE-LUV dans CIE-LUV (a) et dans CIE-RGB (b). Dans (a), u^* et v^* sont confondus. Dans (b), r et g sont confondus.

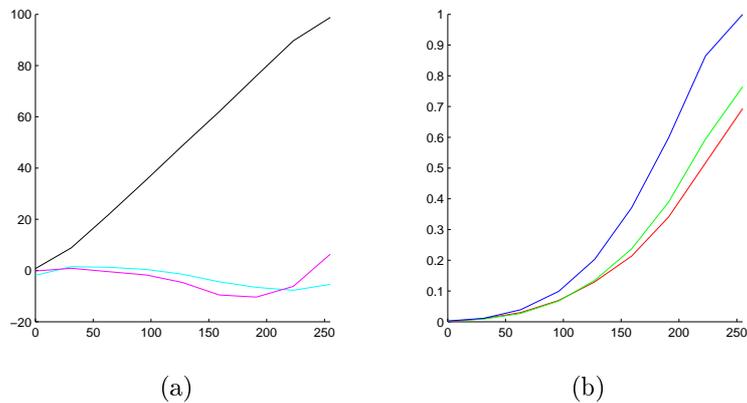


FIG. 5.11 – Fonction de transfert d'intensité de la source 7 (écran LCD) dans CIE-LUV (a) et dans CIE-RGB (b).

les très faibles et les très fortes intensités le comportement de la source se dégrade avec une luminance non linéaire et une coloration.

La source 9 (projecteur DLP) est assez fidèle pour les faibles et moyennes intensités (Fig. 5.13). Pour les intensités fortes, la luminance sature et la lumière se colore.

Enfin, la source 10 (projecteur LCD) a un comportement assez homogène sur toute la plage d'intensité (Fig. 5.14). La luminance est globalement assez linéaire, quant à la chrominance, elle s'accroît en même temps que l'intensité d'entrée.

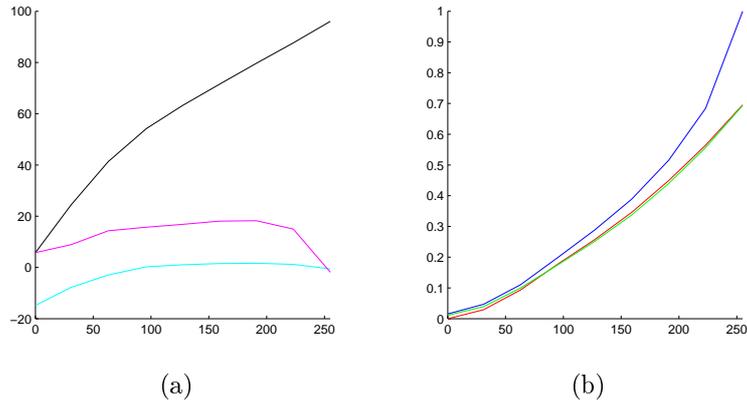


FIG. 5.12 – Fonction de transfert d'intensité de la source 8 (écran CRT) dans CIE-LUV (a) et dans CIE-RGB (b).

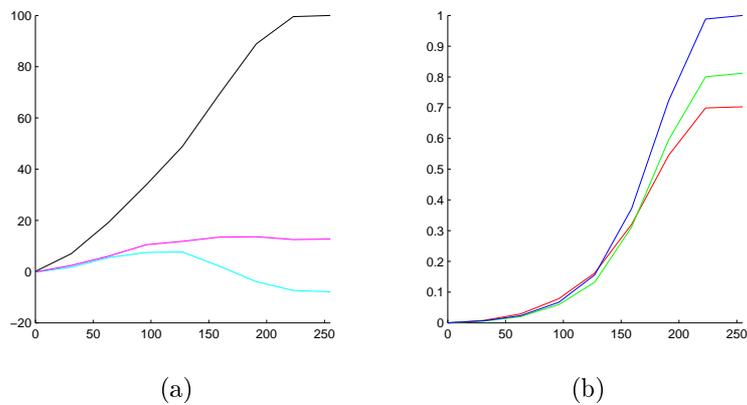


FIG. 5.13 – Fonction de transfert d'intensité de la source 9 (projecteur DLP) dans CIE-LUV (a) et dans CIE-RGB (b).

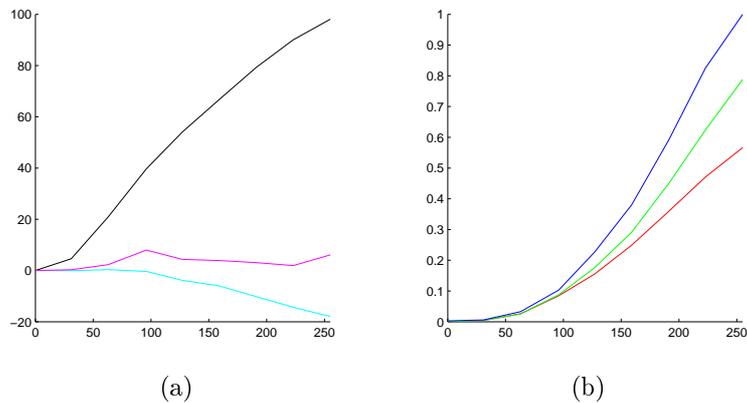


FIG. 5.14 – Fonction de transfert d'intensité de la source 10 (projecteur LCD) dans CIE-LUV (a) et dans CIE-RGB (b).

En conclusion, nous constatons que les sources testées ont des comportements assez variés au niveau du transfert d'intensité. Concernant la luminance, toutes les sources testées ont une fonction de transfert strictement croissante et dont les éventuelles non-linéarités sont assez limitées. En revanche, l'évolution de la chrominance est beaucoup plus chaotique. Certaines sources ont une coloration générale non neutre mais stable (source 8). D'autres présentent une coloration qui s'accroît suivant l'intensité (source 10). D'autres encore, sont faiblement colorées à faible intensité puis prennent différentes colorations au fur et à mesure que l'intensité augmente (sources 7 et 9).

Gamut

Comme expliqué précédemment, le gamut permet de caractériser précisément une source contrôlable. Les caractéristiques du gamut étudiées ici sont :

- son étendue : un gamut large signifie que la source est capable de synthétiser des couleurs contrastées ;
- sa forme : la forme du gamut nous renseigne sur les couleurs synthétisables par la source et sur son système de couleurs (proche des standards, canaux indépendants) ;
- sa répartition interne : un découpage régulier fournit la meilleure répartition des couleurs synthétisables par la source.

Soit une source dont le gamut est un cube dans CIE-LUV (Fig. 5.15) ou au moins une forme invariante selon L^* . Alors, cette source est capable de synthétiser une même couleur à différentes luminances, ce qui est généralement la principale caractéristique cherchée pour une source contrôlable. Cependant, ceci n'est pas toujours compatible avec les valeurs d'entrée dans CIE-RGB qu'une telle source doit gérer (Fig. 5.16). Nous pouvons donc préférer comparer les gamuts mesurés avec le gamut théorique CIE-RGB illustré Fig. 5.1 et Fig. 5.2, mais nous nous éloignons alors de l'uniformité de la perception des couleurs. Par exemple, notons, Fig. 5.2, que la source idéale CIE-RGB est en fait peu définie pour les luminances faibles. Pour résumer, nous avons donc 2 gamuts de référence : la source idéale CIE-LUV perceptuellement uniforme et bien définie mais éloignée des considérations matérielles, et la source idéale CIE-RGB qui permet de décrire les sources réellement utilisées mais assez éloignée de la qualité des couleurs perçues. Un bon compromis consiste à rechercher la forme du cube CIE-RGB avec une répartition interne régulière dans CIE-LUV.

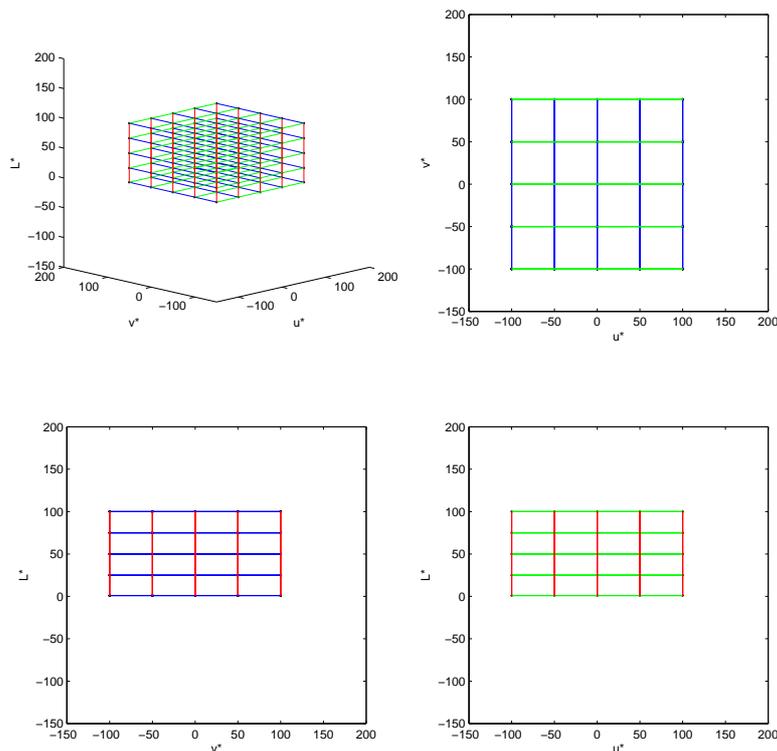


FIG. 5.15 – Gamut théorique CIE-LUV dans CIE-LUV (en rouge, vert et bleu, respectivement, les variations selon L^* , u^* et v^*).

Le gamut de la source 7 (écran LCD) est illustré Fig. 5.17 et Fig. 5.18. Sa forme est très proche du gamut idéal CIE-RGB. Seul un léger cisaillement selon G dans le plan (R, G) laisse penser que le canal G de la source 7 est lié au canal G mais également R du système CIE-RGB. Enfin, la répartition interne du gamut de la source 7 est assez peu régulière, notamment vers les faibles niveaux RGB.

Le gamut de la source 8 (écran CRT) est illustré Fig. 5.19 et Fig. 5.20. Sa forme est également proche du gamut idéal CIE-RGB, hormis un cisaillement selon G un peu plus prononcé. En revanche, la

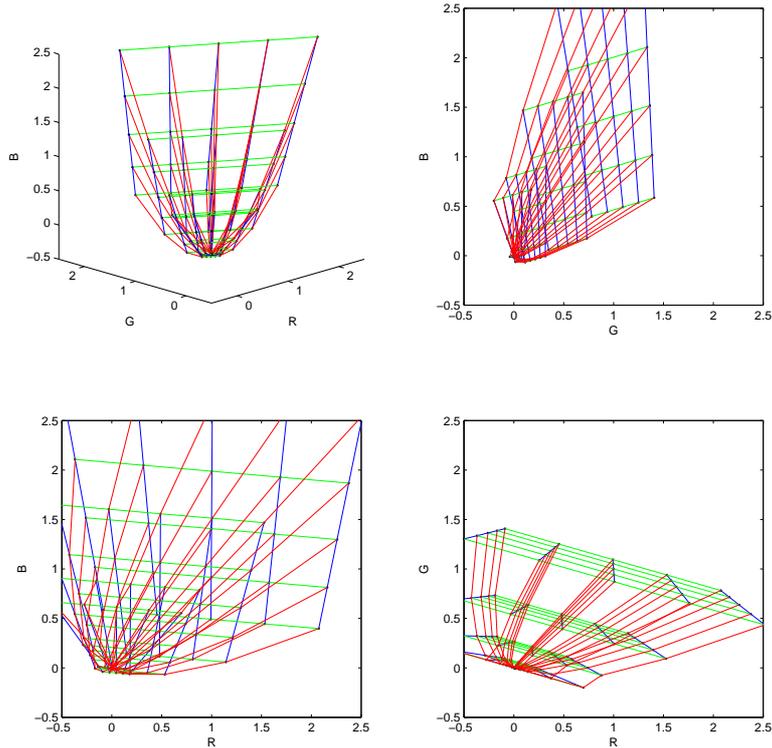


FIG. 5.16 – Gamut théorique CIE-LUV dans CIE-RGB.

répartition interne est beaucoup plus régulière que pour la source 7.

Le gamut de la source 9 (projecteur DLP) est illustré Fig. 5.21 et Fig. 5.22. Sa forme est assez éloignée de celle du gamut idéal CIE-RGB. Nous constatons en effet une perte significative dans les fortes luminances, ce qui indique que la source 9 synthétise des couleurs peu contrastées à forte puissance. Ceci s'explique par l'utilisation d'une composante de blanc dans la technologie DLP pour augmenter le contraste du projecteur, au détriment du rendu des couleurs. Nous constatons également des cisaillements du gamut dans CIE-RGB, ce qui indique que le système de couleur de la source 9 est assez différent du système CIE-RGB. Concernant la répartition interne du gamut, nous constatons un manque de régularité vers les niveaux faibles et vers les niveaux forts.

Enfin, le gamut de la source 10 (projecteur LCD) est illustré Fig. 5.23 et Fig. 5.24. Sa forme est assez proche du gamut idéal CIE-RGB mais nous constatons une nette contraction selon R (ce qui se retrouve sur les diagrammes dans CIE-LUV). Notons également quelques cisaillements du gamut et une répartition interne assez peu régulière.

Pour résumer, toutes les sources contrôlables testées ont un gamut suffisamment large et régulièrement défini pour synthétiser toute une gamme de couleurs. Ces gamuts sont de forme assez similaires, proches du gamut idéal CIE-RGB. En revanche, leurs proportions et répartition interne sont parfois assez différentes. Remarquons que la répartition interne du gamut des sources n'est pas régulière dans CIE-RGB mais que ceci la rend plus régulière dans CIE-LUV. En d'autres termes, la non-linéarité des sources dans CIE-RGB tend à linéariser ces sources dans CIE-LUV ce qui améliore la perception des couleurs par l'utilisateur. Enfin, notons que la composante de blanc utilisée par la technologie DLP déforme le gamut et pénalise le rendu des couleurs ; c'est pourquoi, lors de l'utilisation d'un projecteur DLP, nous conseillons de régler l'ajout de blanc au minimum (si le rendu des couleurs est à privilégier sur la puissance brute).

Contraste

Rappelons que le contraste donne une idée de la dynamique d'une source contrôlable. Nous considérons deux types de contraste : le contraste FULL (visible entre une image complètement blanche et une image complètement noire) et le contraste ANSI (visible entre une région blanche et une région noire dans une image mi-blanche mi-noire).

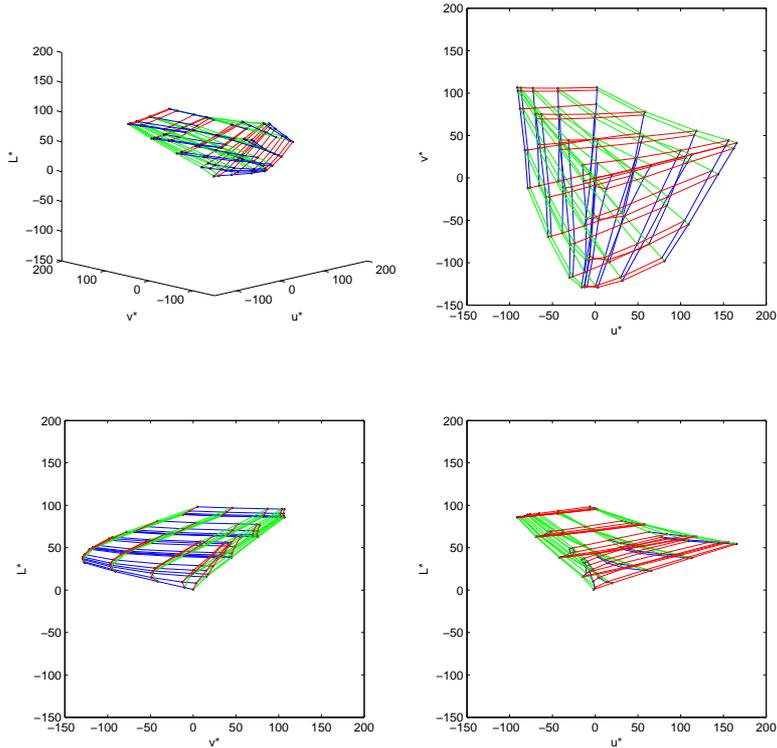


FIG. 5.17 – Gamut de la source 7 (écran LCD) dans CIE-LUV.

Ici, les contrastes sont calculés à partir de la composante Y du système CIE-XYZ. Les mesures obtenues pour les sources testées sont illustrées Fig. 5.25. Nous vérifions, sur ce graphique, que les écrans (sources 7 et 8) sont moins puissants que les projecteurs (sources 9 et 10), que l'écran CRT (source 8) est moins puissant que l'écran LCD (source 7) et que le contenu de l'image influence généralement la luminance minimale synthétisable (FULL black / ANSI black). Notons également que la luminance minimale de l'écran CRT est particulièrement élevée, ce qui est peut-être dû au modèle bas de gamme ou à la vétusté du matériel utilisé.

Les contrastes obtenus sont donnés Fig. 5.26. Pour la source 7 (écran LCD), nous obtenons un contraste FULL de 1400 : 1, ce qui correspond aux données constructeur. En revanche, le contraste ANSI est nettement plus faible (550 : 1).

Pour la source 8 (écran CRT), nous obtenons un contraste FULL très faible, inférieur à 50 : 1. Le constructeur ne donne aucune valeur de contraste mais les mesures couramment constatées pour ce type de matériel oscillent autour de 200 : 1. Pour le contraste ANSI de la source 8, nous obtenons une valeur légèrement supérieure au contraste FULL. Ceci peut s'expliquer par la technologie à balayage qui concentre le faisceau d'électrons sur les zones activées de l'écran ; comme celles-ci sont moins nombreuses pour les mesures ANSI, les blancs sont plus intenses.

Pour la source 9 (projecteur DLP), nous obtenons un contraste FULL de 600 : 1 ce qui est nettement inférieur aux 2 500 : 1 annoncés par le constructeur. Deux explications peuvent être avancées. Première explication, la réalisation des mesures est plus difficile et donc moins précise pour un projecteur que pour un écran. En effet, il faut placer et orienter la sonde en face du faisceau de projection, ce qui est assez délicat et rend, de plus, la mesure plus sensible à la lumière parasite. Seconde explication, le projecteur dispose d'une composante de blanc pour augmenter la puissance émise ; or cette composante a été réglé à la valeur médiane pour ne pas trop déformer le rendu des couleurs (voir la section précédente sur le gamut). Concernant le contraste ANSI, nous obtenons une valeur très faible, peut-être à cause de la technologie DLP mais certainement aussi à cause de la lumière parasite perturbant le protocole de mesure.

Enfin, pour la source 10 (projecteur LCD), nous obtenons un contraste FULL de 550 : 1, inférieur aux 1000 : 1 constructeurs, et un contraste ANSI très faible. Ceci peut s'expliquer, comme pour la source 9, par le protocole de mesure peu adapté aux projecteurs.

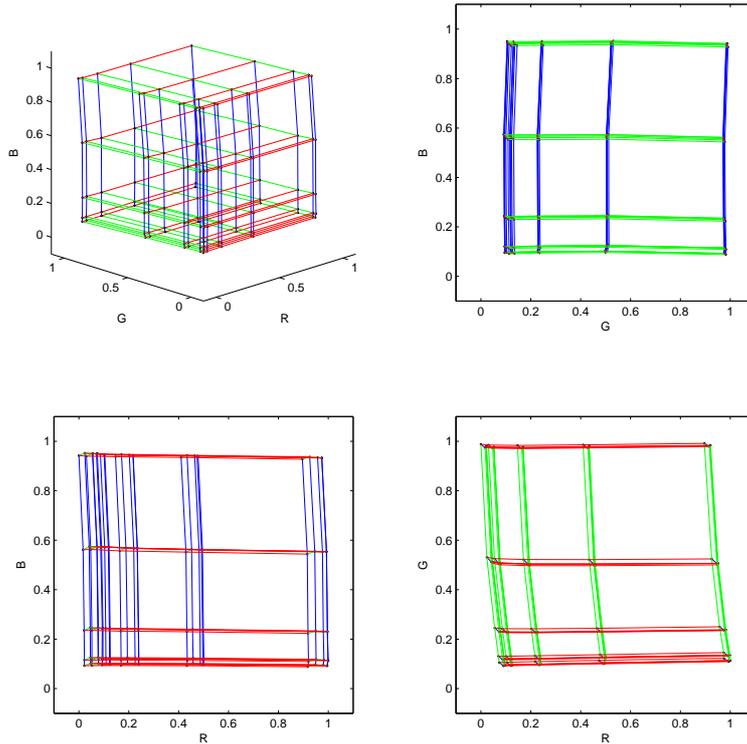


FIG. 5.18 – Gamut de la source 7 (écran LCD) dans CIE-RGB.

Pour résumer, le contraste n'est pas toujours facile à mesurer, en particulier dans le cas d'un projecteur. Les données constructeurs doivent être considérées avec précaution car elles concernent généralement le contraste FULL qui est rarement représentatif du contraste réel au sein d'une image. Enfin, la situation est encore plus délicate dans le cas des projecteurs DLP. En effet, le contraste est alors donné pour une configuration où la composante de blanc ajoutée est maximale. Or, en pratique, cette configuration dégrade fortement le rendu des couleurs. Lorsque la composante de blanc ajoutée est réduite au minimum, le rendu des couleurs est satisfaisant mais le contraste beaucoup moins élevé.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié quelques aspects radiométriques des sources de lumière pouvant intervenir d'une façon ou d'une autre dans le système Catopsys. Nous avons distingué les sources contrôlables, typiquement le projecteur utilisé par le système, des sources parasites. Nous avons passé en revue les différentes caractéristiques radiométriques d'une source de lumière, contrôlable ou non, ainsi que quelques appareils de mesure permettant d'estimer ces caractéristiques. Nous en avons déduit un protocole relativement simple pour étudier la température de couleur d'une source, son contraste, sa fonction de transfert d'intensité et son gamut (dans le cas d'une source contrôlable). Enfin, nous avons appliqué notre protocole pour étudier 10 sources (4 contrôlables et 6 non).

Notre étude indique que, pour notre système de projection, les sources contrôlables utilisables ont un comportement radiométrique tout à fait exploitable sous réserve, parfois, de certaines précautions d'utilisation. En particulier, la technologie DLP permet d'ajouter de la lumière blanche pour augmenter le contraste mais ceci déforme le gamut et donc détériore le rendu des couleurs. Nous avons également remarqué que les sources contrôlables produisent une lumière relativement neutre, assez froide et dans un gamut proche du gamut théorique du cube CIE-RGB. Enfin, nous avons noté, toujours dans le cas des sources contrôlables, que le transfert d'intensité n'est pas linéaire mais que cette non-linéarité physique tend à linéariser la perception. Concernant les sources non contrôlables, nous avons remarqué une grande diversité tant en termes de température de couleur que de puissance. Enfin, il faut garder à l'esprit le fait que les lumières parasites risquent de rendre très rapidement le système inexploitable.

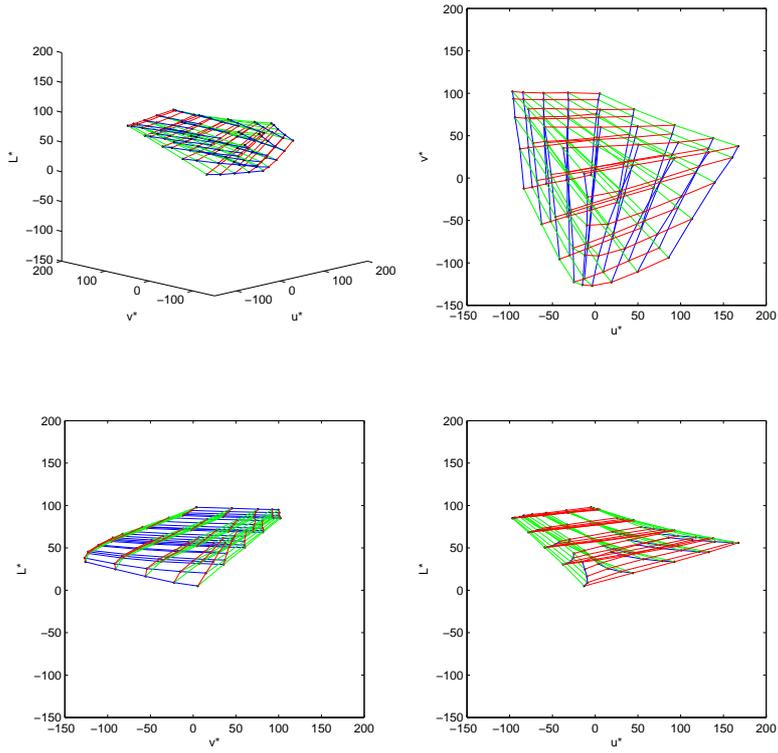


FIG. 5.19 – Gamut de la source 8 (écran CRT) dans CIE-LUV.

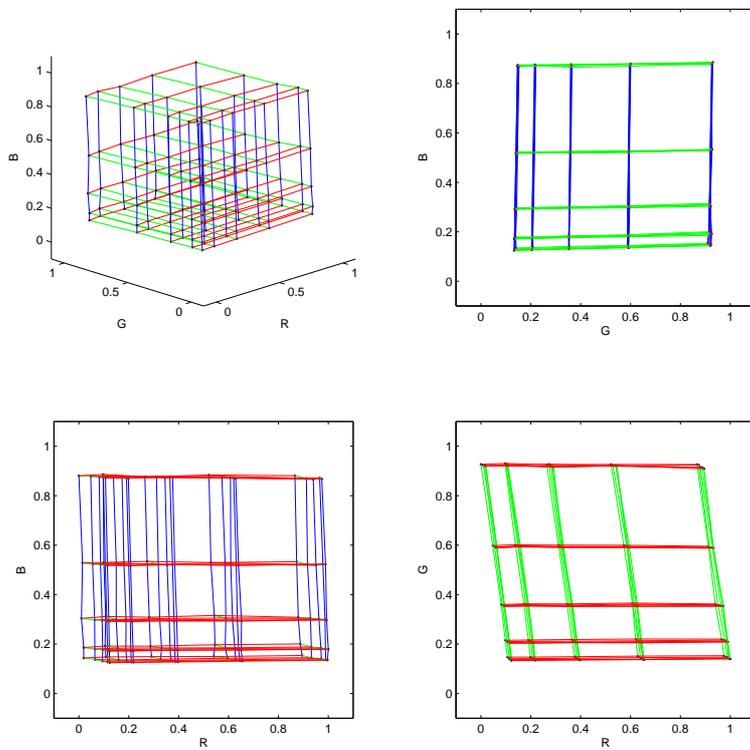


FIG. 5.20 – Gamut de la source 8 (écran CRT) dans CIE-RGB.

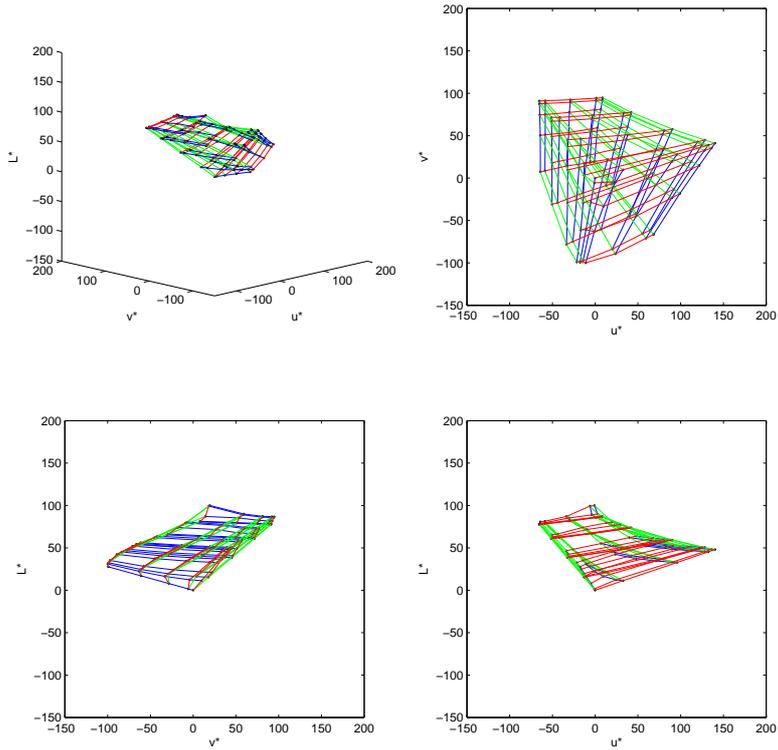


FIG. 5.21 – Gamut de la source 9 (projecteur DLP) dans CIE-LUV.

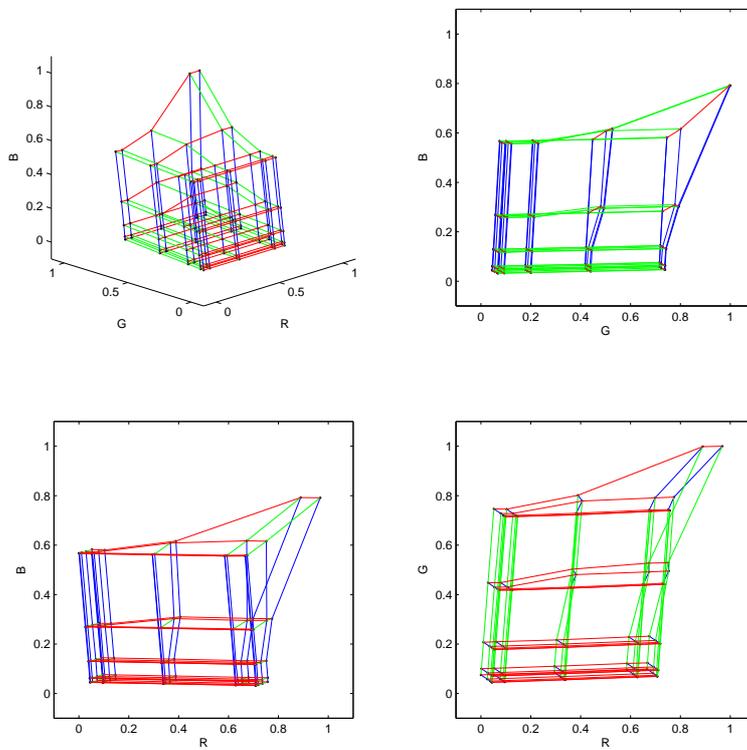


FIG. 5.22 – Gamut de la source 9 (projecteur DLP) dans CIE-RGB.

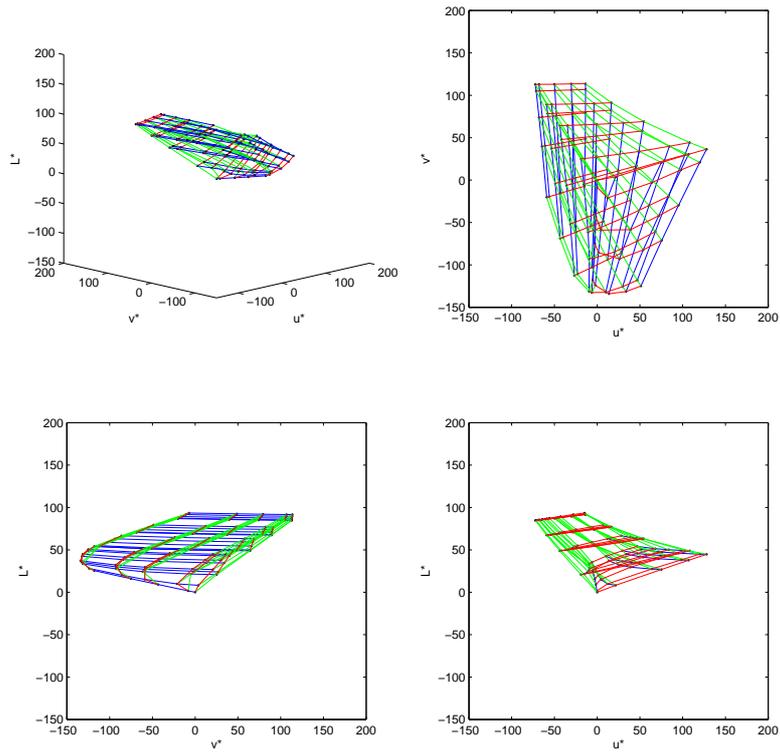


FIG. 5.23 – Gamut de la source 10 (projecteur LCD) dans CIE-LUV.

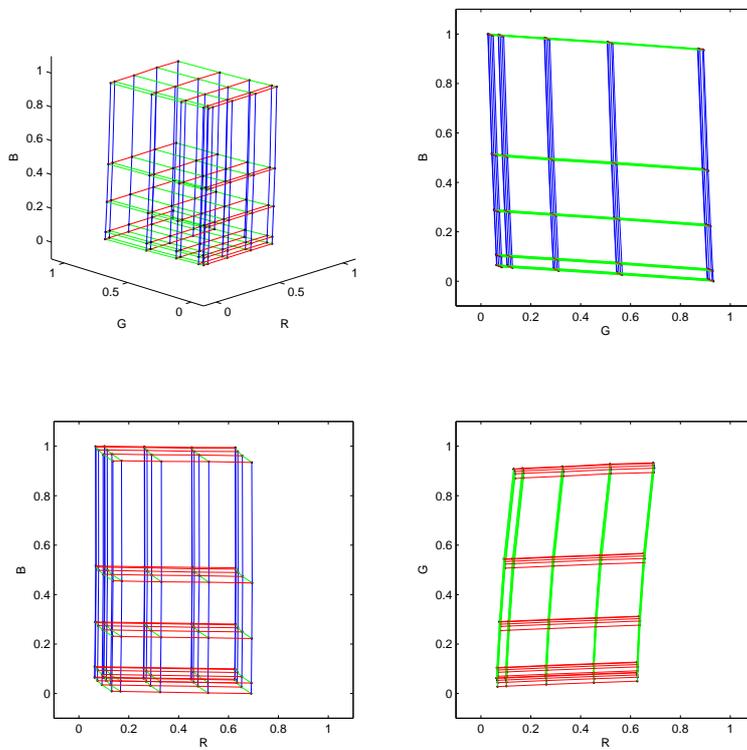


FIG. 5.24 – Gamut de la source 10 (projecteur LCD) dans CIE-RGB.

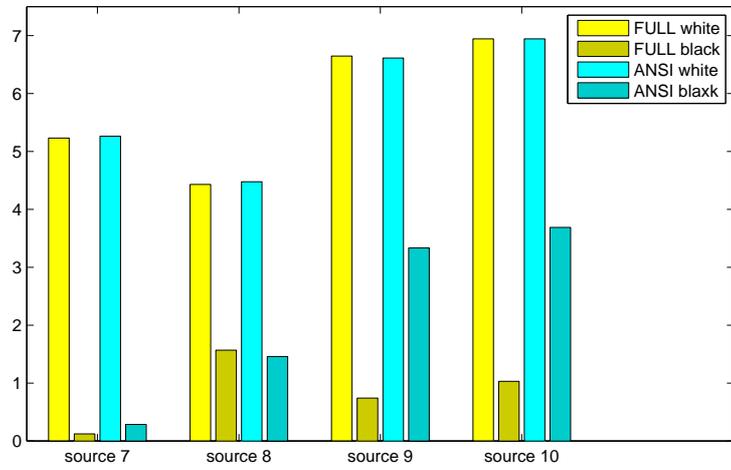


FIG. 5.25 – Y mesurés pour les calculs de contraste (échelle logarithmique).

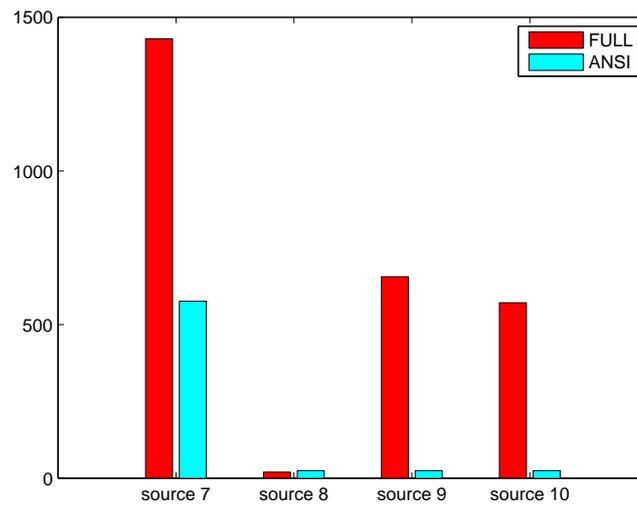


FIG. 5.26 – Contraste des sources contrôlables, calculé d'après Y .

Chapitre 6

Étude radiométrique de l'écran de projection

6.1 Introduction

Dans les sections précédentes, nous avons étudié le comportement radiométrique de la caméra et des sources de lumière (en particulier le vidéo-projecteur). L'objectif est maintenant de caractériser l'influence de l'écran de projection (i.e. les différentes surfaces de la pièce atteintes par la projection), dernier maillon de la chaîne de projection-acquisition du système Catopsys.

Deux phénomènes liés à la pièce peuvent perturber la projection. Tout d'abord, les matériaux des différentes surfaces réfléchissent plus ou moins la lumière selon la longueur d'onde, la direction d'incidence et la direction de réflexion. Enfin, des réflexions multiples entre les surfaces peuvent se produire et augmenter la lumière finalement vue par la caméra.

Nous cherchons ici à caractériser ces deux phénomènes ainsi que leur influence sur la projection. Nous espérons ensuite pouvoir trouver une méthode pour réduire, sinon corriger, cette influence.

6.2 Travaux précédents

Dans le cadre de l'informatique graphique, la réflexion de la lumière par la matière est un sujet vaste qui a donné lieu à de nombreux travaux.

Le problème a été abordé de façon théorique dans le but de le formaliser et d'en proposer des modèles ou autres méthodes de simulation. Ainsi la notion de réflectance a été formalisée [NRH⁺77] et de nombreux modèles ont été proposés [BS63, TS67, Sch94b]. De même, les réflexions multiples ont été étudiées à travers la simulation d'éclairage, le transfert radiatif d'énergie ou le transport de lumière, avec des objectifs de formalisation ou de simulation [Gla94, GTGB84, Kaj86].

D'un point de vue plus expérimental, des travaux ont été réalisés pour proposer des systèmes d'acquisition de BRDF (fonction de réflectance bidirectionnelle) sur des échantillons de matière (appareils de mesure spécifiques, vision par ordinateur) [WLL⁺09]. D'autres travaux ont permis de constituer des bases de données de mesures réelles pour, entre autres, alimenter des logiciels de simulation, déduire des classes de matériaux ou valider des méthodes de compression. Enfin, dans le cadre de la réalité augmentée, des travaux ont été réalisés pour acquérir toutes sortes d'informations avec différents matériels (caméra, scanner...), contraintes (nombre d'images, nombre de points de vue, supervision, informations extérieures...) ou applications (reconstruction géométrique, rendu inverse, compensation radiométrique de vidéo-projection...).

Par exemple, [War92] propose un appareil pour mesurer la BRDF d'un échantillon de matière. [WMC⁺05] propose une méthode pour calculer la BRDF d'un objet non plan à partir d'une image. [MPBM03, DGNK97] proposent des bases de données de BRDF. [ZTCS99] présente les différentes techniques de reconstruction géométrique basé ombrage et utilisant une image. [BG01, RH01, YDMH99] proposent des méthodes de rendu inverse permettant de retrouver différentes informations (matériaux, lumières) d'une scène réelle d'après des photographies. [BIWG07] présentent différentes méthodes de compensation de vidéo-projection sur une surface quelconque.

Pour notre système de projection, nous ne nous intéressons pas à caractériser très précisément les matériaux et réflexions ni à fournir des méthodes permettant d'y arriver mais plutôt d'avoir une idée des différents phénomènes et de leur influence. Pour cela, nous nous intéressons ici aux matériaux et aux réflexions multiples pouvant intervenir dans le système Catopsys, à travers des études théoriques, expérimentales et en simulation.

6.3 Étude des matériaux

Lors d'une réflexion, la lumière prend la couleur du matériau. Si celui-ci n'est pas neutre (i.e. dans les tons de gris), la lumière réfléchie risque alors de changer de couleur. De même, la réflexion sur un matériau brillant crée un reflet spéculaire intense alors que la réflexion dans les zones éloignées du reflet est beaucoup plus faible. Ainsi, un matériau peut grandement modifier la lumière qu'il réfléchit.

Il est important d'étudier l'influence des matériaux car le système de projection a pour objectif de s'adapter à un environnement non spécifique (idéalement pour le grand-public). Ceci implique que nous ne pouvons pas modifier les matériaux déjà existants et que ces matériaux ne sont pas forcément adaptés au système de projection.

6.3.1 Étude théorique

Équation de réflectance

Soient ω_i une direction d'incidence, ω_r une direction de réflexion, λ une longueur d'onde, $L_i(\vec{\omega}_i, \lambda)$ la luminance incidente dans la direction ω_i et pour la longueur d'onde λ , $L_r(\vec{\omega}_r, \lambda)$ la luminance réfléchie dans la direction ω_r et pour la longueur d'onde λ , θ_i l'angle entre ω_i et la normale à la surface, Ω_i l'espace des directions incidentes et f_r la BRDF caractérisant le matériau considéré (voir Annexe A). La lumière réfléchie en un point est donnée par l'équation suivante (équation de réflectance [Gla94]).

$$L_r(\vec{\omega}_r, \lambda) = \int_{\Omega_i} f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r, \lambda) L_i(\vec{\omega}_i, \lambda) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i = R(\vec{\omega}_r, \lambda, f_r, L_i)$$

Linéarité

De par la linéarité de l'intégrale, l'équation de réflectance est linéaire par rapport à la lumière incidente :

$$R(\vec{\omega}_r, \lambda, f_r, kL_i + k'L'_i) = kR(\vec{\omega}_r, \lambda, f_r, L_i) + k'R(\vec{\omega}_r, \lambda, f_r, L'_i)$$

Dans le cas du système de projection, ceci signifie que la réflexion de la lumière par les matériaux n'introduit pas de non-linéarité.

De même, l'équation de réflectance est linéaire par rapport à la BRDF :

$$R(\vec{\omega}_r, \lambda, kf_r + k'f'_r, L_i) = kR(\vec{\omega}_r, \lambda, f_r, L_i) + k'R(\vec{\omega}_r, \lambda, f'_r, L_i)$$

Conservation de l'énergie

L'équation de réflectance respecte également le principe de conservation de l'énergie car :

$$\int_{\Omega_r} L_r(\vec{\omega}_r, \lambda) \cos \theta_r d\vec{\omega}_r = \int_{\Omega_r} \int_{\Omega_i} f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r, \lambda) L_i(\vec{\omega}_i, \lambda) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i \cos \theta_r d\vec{\omega}_r$$

ce qui équivaut à :

$$\int_{\Omega_r} L_r(\vec{\omega}_r, \lambda) \cos \theta_r d\vec{\omega}_r = \int_{\Omega_i} \int_{\Omega_r} f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r, \lambda) \cos \theta_r d\vec{\omega}_r L_i(\vec{\omega}_i, \lambda) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i$$

or la BRDF f_r conserve l'énergie :

$$\forall \vec{\omega}_i, \int_{\Omega_r} f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r, \lambda) \cos \theta_r d\vec{\omega}_r \leq 1$$

donc

$$\int_{\Omega_r} L_r(\vec{\omega}_r, \lambda) \cos \theta_r d\vec{\omega}_r \leq \int_{\Omega_i} L_i(\vec{\omega}_i, \lambda) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i$$

c'est à dire que l'éclairage réémis est inférieur à l'éclairage reçu :

$$E_r \leq E_i$$

La conservation de l'énergie assure que la lumière visible par la caméra est toujours plus faible que la lumière émise par le projecteur et les éventuelles sources externes. Elle assure également qu'en tout point de la pièce, la lumière réfléchie est plus faible que la lumière incidente. Cependant, les réflexions multiples rendent la situation plus complexe (voir Section 6.4).

Couleur

La couleur d'un matériau correspond à la façon dont celui-ci réfléchit les différentes longueurs d'ondes. La couleur est donnée par la BRDF f_r . De nombreux matériaux ont une couleur à peu près identique pour toutes les directions de la BRDF, c'est-à-dire que nous pouvons séparer la réponse spectrale de la fonction de réflectance :

$$f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r, \lambda) = m(\lambda)f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r)$$

Cette propriété n'est pas valable pour tous les matériaux (par exemple, les matériaux réalisant de la dispersion chromatique) mais peut raisonnablement s'appliquer dans le cadre de Catopsys.

Une autre propriété intéressante est que si nous avons f_r et f'_r tels que :

$$\exists k, \forall \vec{\omega}_i, f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r, \lambda) = k f'_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r, \lambda)$$

alors (linéarité par rapport à la BRDF) :

$$R(\vec{\omega}_r, \lambda, f_r, L_i) = k R(\vec{\omega}_r, \lambda, f'_r, L_i) = R(\vec{\omega}_r, \lambda, f'_r, k L_i)$$

Ainsi, si un matériau f_r est «deux fois plus rouge» qu'un matériau f'_r , alors il réfléchit deux fois plus une même lumière rouge incidente. Autrement dit, f_r réfléchit autant de lumière rouge que f'_r soumis à une lumière rouge deux fois plus importante. Ceci signifie que nous pouvons uniformiser la lumière réfléchie par deux matériaux différents en agissant sur la lumière incidente.

De même, si nous considérons un même matériau f_r à deux longueurs d'ondes différentes λ et λ' telles que :

$$\exists k, \forall \vec{\omega}_i, f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r, \lambda) = k f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r, \lambda')$$

alors :

$$R(\vec{\omega}_r, \lambda, f_r, L_i) = k R(\vec{\omega}_r, \lambda', f_r, L_i) = R(\vec{\omega}_r, \lambda', f_r, k L_i)$$

C'est-à-dire que nous pouvons également neutraliser la lumière réfléchie par un matériau non neutre (coloré) en modifiant la couleur de la lumière incidente.

Cependant, si un matériau absorbe complètement certaines couleurs, celles-ci ne peuvent pas être réfléchies. Dans le cas du système Catopsys, pour pouvoir obtenir un bon rendu, les matériaux doivent donc être le plus clair possible, pour minimiser la perte d'énergie, et le plus neutre possible, pour maximiser les couleurs affichables.

BRDF

La fonction de réflectance bidirectionnelle (RDF) caractérise la part de lumière réfléchie par un matériau en fonction de la direction d'incidence et de la direction de réflexion (voir Annexe A).

Un matériau purement spéculaire (par exemple un miroir face avant) réfléchit une direction d'incidence dans une seule direction de réflexion, donnée par la formule de Snell-Descartes. Un matériau purement diffus répartit uniformément la lumière d'une direction d'incidence dans toutes les directions de réflexion. Un grand nombre de matériaux courants ont un comportement intermédiaire.

Pour le système Catopsys, le matériau idéal serait un matériau purement spéculaire géométriquement adapté à la pièce. En effet, le projecteur et le miroir convexe sont fixes, donc la lumière arrive sur les murs de la pièce avec des directions d'incidence fixes. Si le matériau renvoie la lumière uniquement dans la direction de la caméra, alors il y a très peu de perturbation par perte d'énergie et réflexions multiples. Cependant, ce matériau est irréalisable en pratique car il reviendrait à placer sur les murs, pour chaque pixel du projecteur, un micro-miroir réfléchissant du miroir convexe vers la caméra. De plus, dans de telles conditions, l'utilisateur doit se placer exactement à l'endroit de la caméra, sans quoi le rendu serait vite dégradé.

À l'opposé, un matériau diffus est plus facile à réaliser et permet de modifier le point de vue. Cependant, ce type de matériau est source de nombreuses réflexions multiples, difficilement contrôlables.

Enfin, les matériaux intermédiaires ont une légère réflectance dans toutes les directions de réflexion (caractère diffus) avec une région de plus forte réflectance vers la direction de réflexion idéale (caractère spéculaire). Le caractère diffus nous assure qu'une partie de la lumière est réfléchie vers la caméra et donc que la surface peut être utilisée comme support de projection. Le caractère spéculaire implique qu'une grande partie de la lumière est réfléchie dans la direction de réflexion idéale. D'après la géométrie du système et de la pièce, cette direction n'est généralement pas celle de la caméra. La lumière correspondante est donc propagée vers les autres surfaces de la pièce, ce qui se traduit finalement par des réflexions multiples importantes.

6.3.2 Étude expérimentale de la BRDF

Dans la section précédente, nous avons vu qu'il est théoriquement possible de contrôler la lumière réfléchie en modifiant la lumière incidente. Nous avons vu également que nous ne contrôlons par contre pas la répartition de la lumière selon les différentes directions de réflexions. Cette répartition est caractéristique du matériau (BRDF) et influence le rendu final de la projection.

Dans cette section, l'objectif est de mesurer approximativement la BRDF des matériaux de la pièce en la comparant à des matériaux courants afin d'estimer l'influence attendue des matériaux sur le rendu de la projection.

Protocole de mesure

Pour mesurer la BRDF d'un matériau, on utilise classiquement un gonio-réfectomètre. Cet appareil permet de placer une source et un capteur de lumière vers un échantillon de matière, dans des directions précises d'incidence et de réflexion. Il peut ainsi mesurer la lumière réfléchie par le matériau selon les différentes directions d'incidence et de réflexion, et en déduire la BRDF caractérisant le matériau.

Cependant, le gonio-réfectomètre est un appareil peu accessible (coût, utilisation, spécificité). Comme, de plus, nous ne nous intéressons pas ici à des mesures précises mais à une comparaison qualitative, nous effectuons des mesures approximatives, «à la main», dans le plan contenant la direction d'incidence, la direction de réflexion et la normale à la surface de l'échantillon de matière. La source utilisée est une lampe portative à faisceau étroit, comportant une ampoule à incandescence au xénon. Le capteur est un colorimètre xyY où Y est la luminance photométrique. Pour mesurer des valeurs de luminance (i.e. de flux par unité d'aire et par unité d'angle solide), la source et le capteur sont placés au bout de tubes opaques de même dimensions et dirigés vers l'échantillon à mesurer (Fig. 6.1). Pour que les mesures ne soient pas perturbées, l'expérience est réalisée dans une salle sans lumière parasite (éclairage éteint, fenêtres obstruées) et sans réflexion multiples (surfaces environnant l'échantillon recouvertes d'un tissu noir).

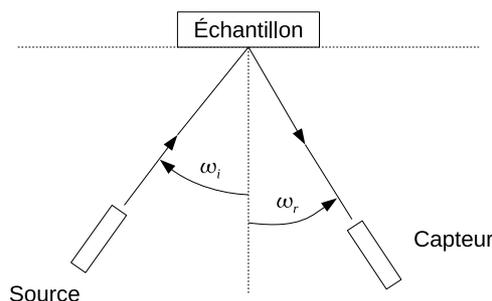


FIG. 6.1 – Mesure expérimentale d'un plan de BRDF.

La BRDF est définie par :

$$f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r) = \frac{dL_r(\vec{\omega}_r)}{dE_i(\vec{\omega}_i)} = \frac{dL_r(\vec{\omega}_r)}{\cos \theta_i dL_i(\vec{\omega}_i)}$$

Avec notre système de mesure, nous pouvons considérer que $dL_r(\vec{\omega}_r)$ est la grandeur mesurée par le capteur et $dL_i(\vec{\omega}_i)$ la grandeur apportée par la source. Si nous ne connaissons pas explicitement $dL_i(\vec{\omega}_i)$, nous savons en revanche que cette grandeur est constante pour une même incidence. Nous obtenons donc une mesure de la BRDF à une constante près (ce qui suffit pour notre étude qualitative) :

$$\alpha f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r) = \frac{dL_r(\vec{\omega}_r)}{\cos \theta_i}$$

Résultats et analyse

Notre salle de test comporte principalement deux types de matériaux : des murs peints et des panneaux recouverts d'un revêtement plastifié (ces panneaux permettent d'obstruer les fenêtres). Nous avons mesuré la BRDF de ces matériaux selon le protocole décrit précédemment ainsi que celle de cinq matériaux de référence : papier, CD, plastique, bois, tissu.

Les mesures ont été réalisées pour des angles de réflexion θ_r de -80° , -60° , -40° , -20° , 0° , 20° , 40° , 60° et 80° et pour des angles d'incidence θ_i de 0° , 40° et 60° (soit 27 mesures par matériau).

La BRDF mesurée de l'échantillon de papier est représentée Fig. 6.2. La figure de gauche donne la réflectance mesurée en fonction de l'angle de réflexion, pour les différents angles d'incidence. La figure de droite est une représentation polaire, peut-être plus intuitive. Nous constatons que le matériau est à peu près diffus i.e. réfléchit la lumière uniformément dans toutes les directions. Nous constatons également l'apparition d'un léger lobe spéculaire lorsque l'angle d'incidence est important (lumière rasante). Nous sommes en fait en présence d'un matériau rugueux et ces constatations sont conformes à ce qu'annonce la théorie des micro-facettes [BS63] pour ce genre de matériaux.

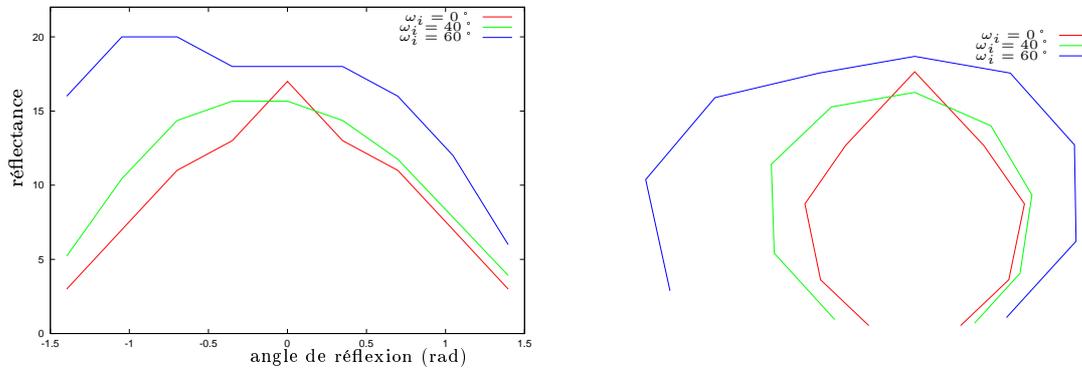


FIG. 6.2 – Réflectance de l'échantillon de papier.

Dans le cas du CD, nous sommes en présence d'un matériau très spéculaire, comparable à un miroir. La BRDF mesurée, représentée Fig. 6.2, confirme qu'à une incidence donnée, toute la lumière est réfléchie dans une seule direction (plus rigoureusement dans un angle solide très faible).

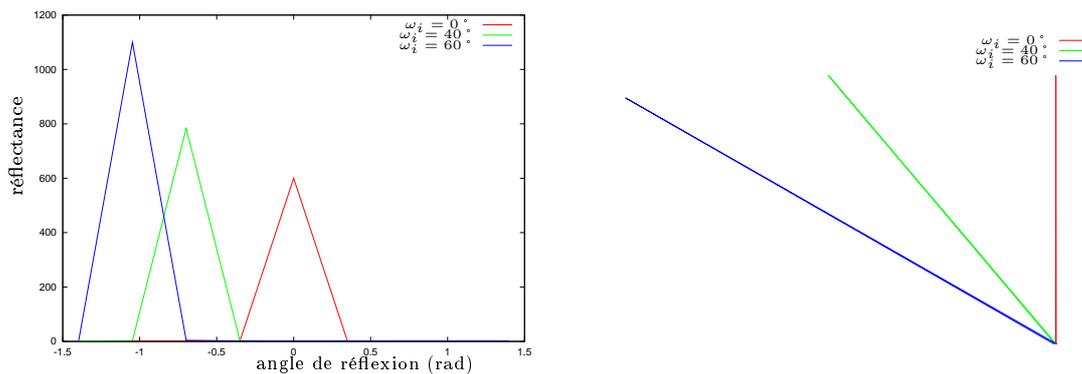


FIG. 6.3 – Réflectance d'un CD.

L'échantillon de plastique se situe entre ces deux extrêmes. La BRDF (Fig. 6.4) présente une base diffuse à laquelle s'ajoute un lobe spéculaire qui grandit avec l'angle d'incidence (comportement typique des matériaux brillants).

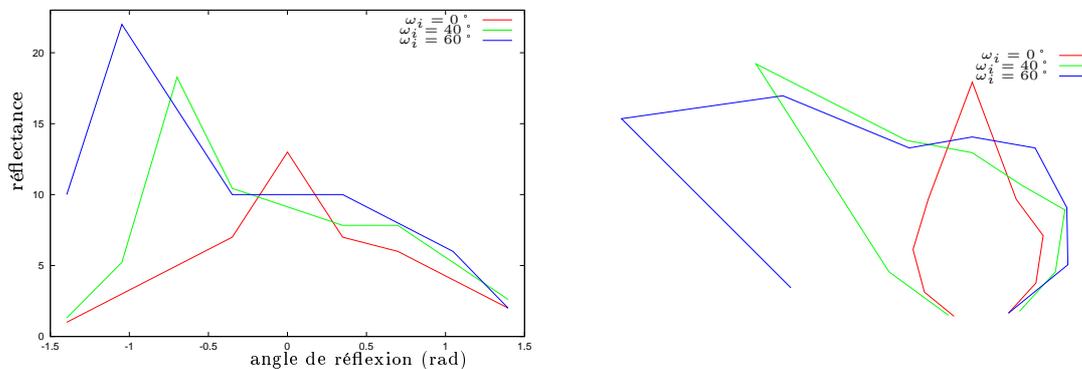


FIG. 6.4 – Réflectance de l'échantillon de plastique.

L'échantillon de bois a également un comportement diffus + spéculaire. Cependant la BRDF obtenue

(Fig. 6.5) est plus complexe car l'échantillon de bois n'est pas rigoureusement uniforme ni même opaque. Or, dans ces conditions, la BRDF ne permet pas une modélisation précise de la réflectance.

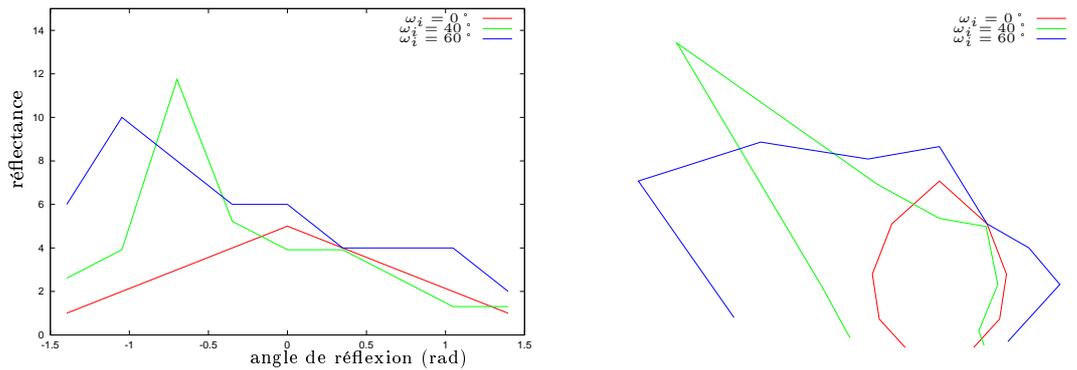


FIG. 6.5 – Réflectance de l'échantillon de bois.

Enfin, l'échantillon de tissu se comporte comme un matériau diffus, avec cependant un lobe spéculaire important sous forte incidence (Fig. 6.6). Ceci peut s'expliquer par la structure microscopique du matériau (fibres textiles), et se vérifie visuellement par un aspect satiné lorsque la lumière est rasante.

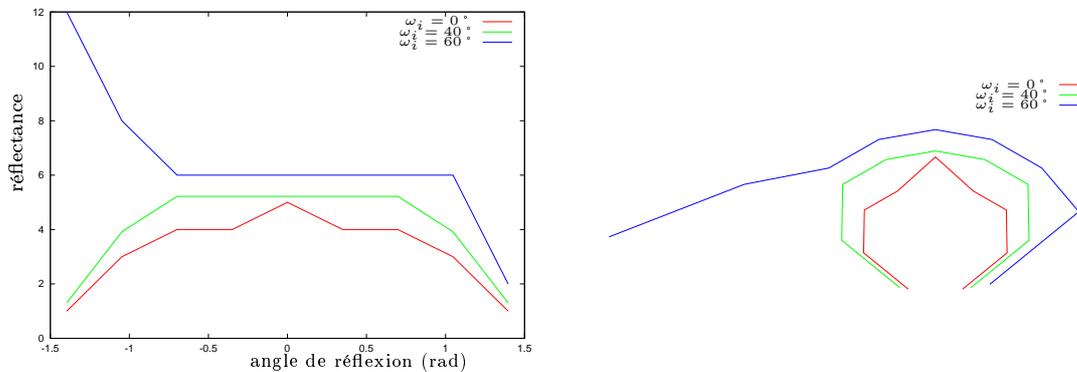


FIG. 6.6 – Réflectance de l'échantillon de tissu.

Les BRDF obtenues pour les matériaux de la salle de test sont données Fig. 6.7 (mur peint) et Fig. 6.8 (revêtement plastifié). Dans les deux cas, nous retrouvons une base diffuse avec un lobe spéculaire qui augmente avec l'angle d'incidence. Nous constatons également que le revêtement plastifié a un caractère spéculaire plus marqué, ce qui le rapproche logiquement de l'échantillon de plastique présenté précédemment.

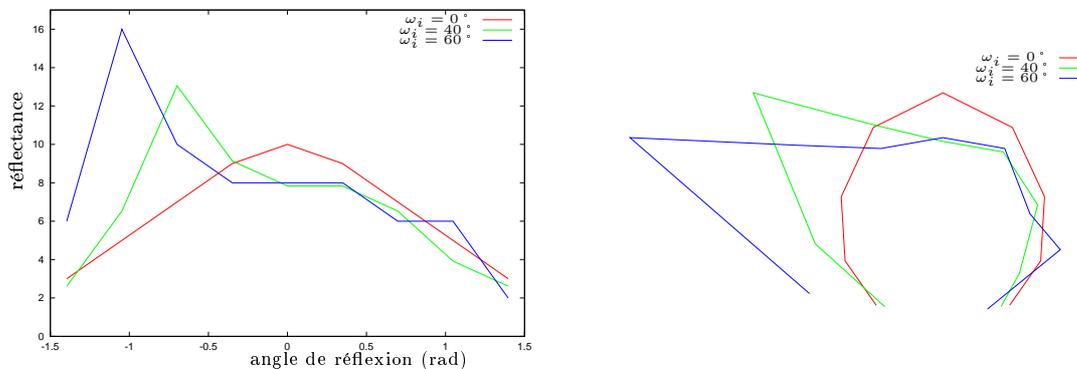


FIG. 6.7 – Réflectance d'un matériau de la pièce : mur peint.

Dans le cadre du système Catopsys, l'étude de ces deux matériaux nous indique que les surfaces diffusent une partie de la lumière, ce qui signifie qu'elle peuvent bien servir d'écran de projection et ce quel que soit la position du point de vue. En revanche, le caractère spéculaire plus ou moins prononcé,

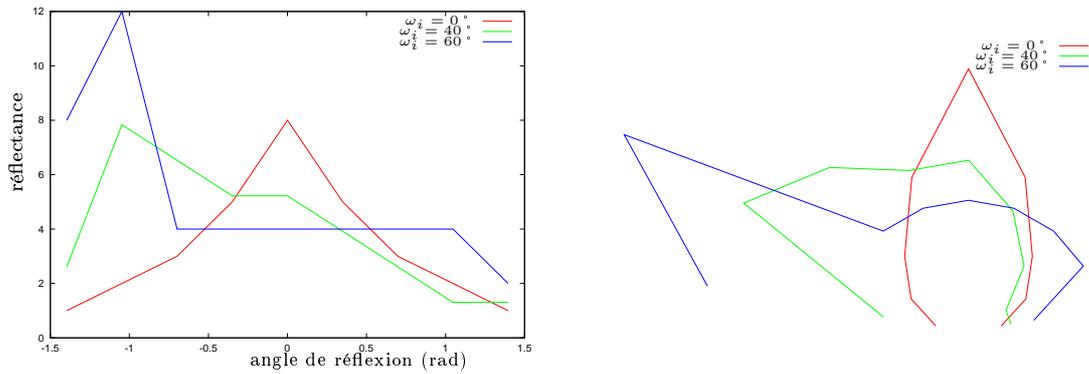


FIG. 6.8 – Réflectance d'un matériau de la pièce : panneau avec revêtement plastifié.

associé à la géométrie de la pièce, indique qu'une partie non négligeable de la lumière est perdue sous forme de réflexions multiples. En fait, le caractère spéculaire des matériaux est doublement dommageable à la qualité de rendu de la projection car d'une part, lorsque la direction spéculaire ne correspond pas au point de vue, elle induit des réflexions multiples importantes et d'autre part, lorsque la direction spéculaire correspond au point de vue, elle produit un éblouissement local qu'il faut atténuer en prétraitement au prix, certainement, d'une réduction de la dynamique utile de la source de lumière.

6.4 Étude des réflexions multiples

Un imageur (oeil, capteur CCD. . .) retranscrit des valeurs de luminance que nous pouvons décrire par l'équation générale de luminance suivante [Gla94] :

$$L(x, \vec{\omega}_o) = L_e(x, \vec{\omega}_o) + \int_{\Omega_i} f_r(x, \vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_o) L(y, \vec{\omega}_i) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i$$

où $L(x, \vec{\omega})$ est la luminance émise au point x dans la direction $\vec{\omega}$, L_e la fonction d'auto-émission, f_r la BRDF, et θ_i l'angle entre $\vec{\omega}_i$ et la normale à la surface en x .

Replaçons-nous dans notre cadre de travail i.e. l'affichage d'environnements immersifs. Pour réaliser l'immersion, nous nous plaçons à l'intérieur d'une pièce close. Ceci est propice aux réflexions multiples car la lumière arrivant sur une surface est toujours réfléchiée vers une autre surface, quelle que soient les directions d'incidence et de réflexion considérées.

Dans l'équation de luminance, la fonction d'auto-émission L_e permet de décrire les sources de lumière. Au niveau d'un système de projection immersive (CAVE, Catopsys. . .), nous pouvons considérer que les sources de lumières sont tous les points de la pièce directement atteints par la lumière des pixels projecteur. Ainsi, en un point de la pièce, l'imageur voit la lumière apportée par le projecteur en ce point mais également la lumière apportée par réflexion multiple de la lumière des autres points.

Dans un CAVE, l'affichage est réalisé par projection derrière l'écran (mur, plafond, sol). Ceci permet d'obtenir une répartition homogène de la lumière et de minimiser les réflexions multiples (voir Fig. 6.9). En effet, en tout point de l'écran, la lumière issue du projecteur arrive selon une direction relativement proche de la normale à l'écran. Elle est donc ensuite transmise de façon homogène à travers l'écran vers l'utilisateur. Concernant les réflexions multiples, elles sont très faibles car chaque écran laisse passer, par transmission, la lumière issue des autres écrans en dehors de la pièce.

Dans le système Catopsys, la projection est réalisée par devant, généralement sous incidence forte et sur des matériaux intermédiaires diffus-spéculaire. Ainsi, la lumière issue du projecteur et arrivant sur une surface est en grande partie réfléchiée vers une autre surface et donne ainsi lieu à des réflexions multiples importantes. La lumière utile (i.e. la lumière provenant du projecteur et réfléchiée une seule fois, vers l'imageur) est quant à elle faible. Notons que ce phénomène est très variable car pour quelques points de la pièce, l'imageur est placé dans la direction de réflexion idéale, ce qui rend alors la lumière utile majoritaire mais induit un comportement très hétérogène des différents points de la pièce.

Dans la suite de cette section, l'objectif est d'étudier l'influence des réflexions multiples, d'abord expérimentalement avec notre système Catopsys réel, puis en simulation, dans un cas lambertien plus simple.

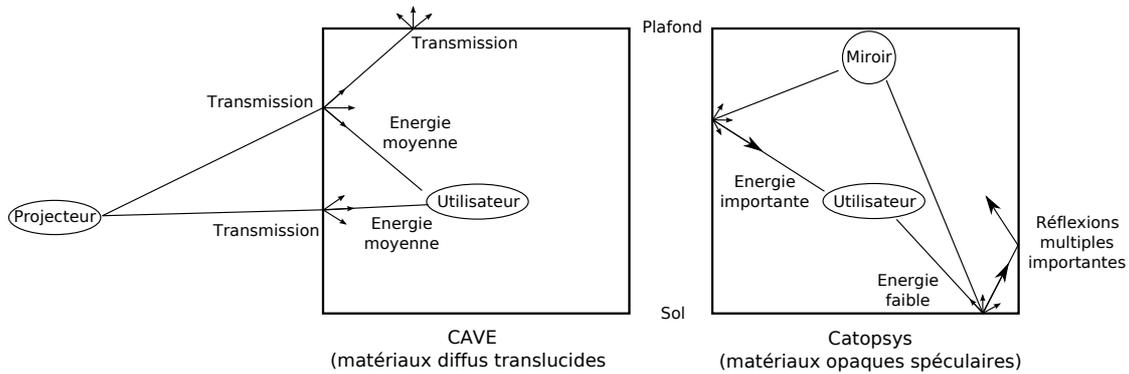


FIG. 6.9 – Comparaison entre le système CAVE et le système Catopsys. Un CAVE produit une lumière homogène avec peu de réflexions multiples. Un système Catopsys produit une lumière très variable avec des réflexions multiples importantes.

6.4.1 Mesure de l'éclairage réfléchi indirectement vers la caméra

L'objectif est ici de comparer, avec le système Catopsys, l'éclairage réfléchi directement (i.e. la lumière émise par le projecteur et réfléchi par l'écran vers la caméra) et l'éclairage réfléchi indirectement (i.e. la lumière vue par la caméra après réflexions multiples). Idéalement, nous voudrions que l'éclairage réfléchi directement soit important et l'éclairage réfléchi indirectement faible.

Considérons une scène virtuelle entièrement blanche (i.e. une image projecteur blanche). Après projection de cette scène, l'image vue par la caméra dans un coin de la pièce est donnée Fig. 6.10 droite.



FIG. 6.10 – Séparation de l'éclairage réfléchi directement (gauche) et de l'éclairage réfléchi indirectement (milieu) d'une scène réelle (droite).

Pour séparer, l'éclairage réfléchi directement de l'éclairage réfléchi indirectement, nous utilisons la méthode proposée dans [NKGR06]. Cette méthode consiste à projeter un damier noir et blanc au lieu de l'image blanche initiale (Fig. 6.11). Sur l'image caméra (HDR), la lumière vue au niveau d'un carreau blanc du damier comprend de l'éclairage réfléchi directement (lumière projecteur non nulle) et de l'éclairage réfléchi indirectement (réflexions multiples). En revanche, au niveau d'un carreau noir, la caméra ne voit que de l'éclairage réfléchi indirectement car le projecteur n'émet pas de lumière à cet endroit. Ainsi, en projetant un damier puis son dual, nous obtenons l'éclairage réfléchi indirectement produit par la projection du damier. Comme le damier correspond à deux fois moins de lumière que l'image blanche et que l'équation de luminance est linéaire par rapport à L_e , nous obtenons l'éclairage réfléchi indirectement de la scène blanche en multipliant par deux l'éclairage réfléchi indirectement du damier (Fig. 6.10 milieu).

L'éclairage réfléchi directement de la scène entière peut ensuite être reconstruit. Pour cela, il suffit d'enlever l'éclairage réfléchi indirectement déjà calculé, au niveau des carreaux blancs des images caméra des scènes de damiers (Fig. 6.10 gauche).

Notons, que cette méthode suppose que l'éclairage réfléchi indirectement est identique dans les deux images. Nous pouvons considérer cette hypothèse vérifiée ici car les réflexions multiples constituent une composante basse fréquence de la lumière et le damier une composante haute fréquence. Ainsi, le passage

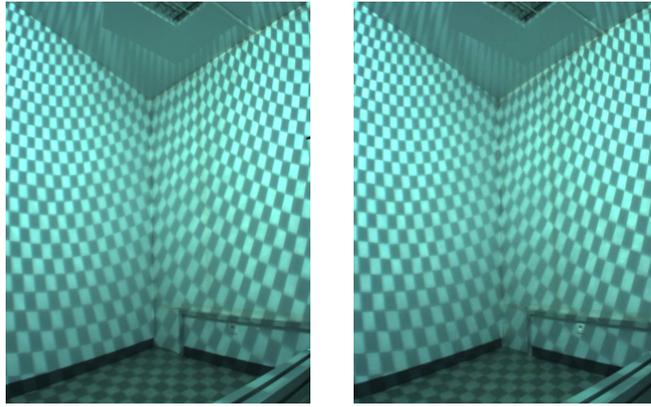


FIG. 6.11 – Projection de damiers permettant de séparer l'éclairage réfléchi directement et l'éclairage réfléchi indirectement.

au dual du damier a peu d'influence sur les réflexions multiples. C'est également pour cette raison que la méthode ne permet pas de reconstruire l'éclairage réfléchi indirectement qui présente des hautes fréquences comme les caustiques.

Notons également qu'en pratique, nous obtenons un résultat plus robuste en projetant plus d'images (avec recouvrement des damiers).

À partir des composantes réfléchies directement et indirectement de l'éclairage ainsi calculées, nous pouvons reconstruire l'éclairage de la scène et comparer celui-ci à l'éclairage réel. Fig. 6.12 donne la distance euclidienne entre les couleurs de l'image réelle et de l'image reconstruite (en valeurs absolues ou relativement à l'image réelle). Ainsi, l'erreur de reconstruction est en moyenne de 2% de la dynamique du capteur. L'erreur relative à l'image réelle est en moyenne de 4%. La méthode de séparation de l'éclairage semble donc cohérente au niveau de la conservation de l'énergie.

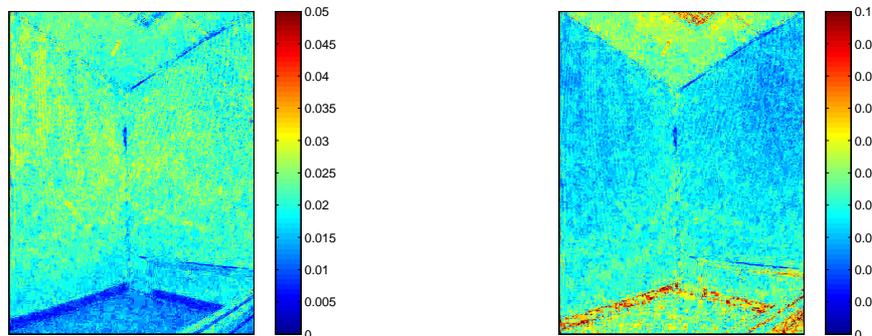


FIG. 6.12 – Erreur de reconstruction de l'éclairage : erreur absolue (gauche) et erreur relative à l'image réelle (droite).

Les résultats donnés Fig. 6.10 sont inquiétants car ils montrent que l'éclairage réfléchi directement est faible par rapport à l'éclairage réfléchi indirectement i.e. que la lumière utilisable est faible et les perturbations par réflexions multiples fortes. Fig. 6.13 donne le rapport entre l'éclairage réfléchi directement et l'éclairage réfléchi indirectement, ce qui constitue en quelque sorte notre rapport signal sur bruit. En moyenne, l'éclairage réfléchi directement représente 16% de l'éclairage réfléchi indirectement. Cependant, ce résultat n'est pas très représentatif car nous nous sommes placés vers un coin de mur, c'est-à-dire dans une zone propice aux réflexions multiples et en dehors des directions spéculaires. Néanmoins, le fait est que le rapport passe de 70% vers le centre de mur à 4% dans le coin de la pièce. Ceci s'explique par la géométrie et les matériaux spéculaires de la pièce : au centre, nous sommes proche de la direction spéculaire et éloigné des autres surfaces pouvant produire des réflexions multiples, d'où un rapport élevé ; au coin de la pièce, c'est la situation inverse.

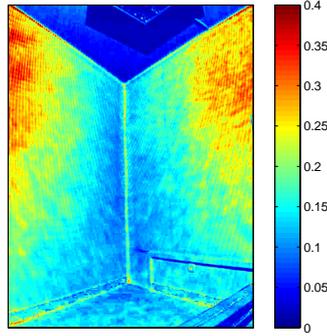


FIG. 6.13 – Rapport direct/indirect.

Pour résumer, la géométrie et les matériaux de la pièce créent des conditions défavorables à la qualité du rendu de la projection. Non seulement une grande partie de la lumière est souvent perdue mais en plus, elle produit des réflexions multiples qui perturbent le rendu. Enfin, l'influence des réflexions multiples varie de façon importante suivant la position dans la scène (faible au centre des murs, élevée dans les coins), ce qui rend le problème encore plus complexe.

6.4.2 Simulation des réflexions multiples

Dans la section précédente, nous avons vu que les réflexions multiples sont importantes au sein du système Catopsys. Nous allons maintenant étudier plus précisément l'influence des réflexions multiples sur le rendu de la projection et dans quelle mesure celles-ci peuvent théoriquement être corrigées.

Pour simplifier le problème, nous considérons ici que les matériaux sont diffus. Cette hypothèse n'est pas contradictoire avec le fait que les matériaux réels sont assez spéculaires. En effet, le cas diffus induit un rendu plus homogène et moins perturbé par les réflexions multiples. Nous obtenons donc ainsi une «borne inférieure» du phénomène.

Dans la suite de cette section, nous rappelons quelques éléments théoriques indiquant comment la méthode de radiosité permet de résoudre numériquement l'équation de luminance, dans un cadre particulier. Ceci nous permet ensuite de mettre au point un programme de simulation de la projection et de correction des réflexions multiples. Enfin, nous effectuons la simulation de différentes scènes de test pour étudier le comportement du système.

Rappels théoriques

Il s'agit ici de rappeler comment l'équation générale de luminance peut être résolue numériquement via l'équation de radiosité constante discrète. Pour plus de détails, voir [Zeg97, Gla94].

Tout d'abord, rappelons l'équation générale de luminance, qui décrit comment la lumière se propage dans une scène et notamment comment la lumière est perçue par le capteur :

$$L(x, \vec{\omega}_o) = L_e(x, \vec{\omega}_o) + \int_{\Omega_i} f_r(x, \vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_o) L(y, \vec{\omega}_i) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i$$

où $L(x, \vec{\omega})$ est la luminance émise au point x dans la direction $\vec{\omega}$, L_e la fonction d'auto-émission, f_r la BRDF, Ω_i l'espace des directions incidentes, et θ_i l'angle entre $\vec{\omega}_i$ et la normale à la surface en x (voir Fig. 6.14).

Si nous considérons les surfaces lambertiennes (émetteurs et réflecteurs), nous avons :

$$L(x, \vec{\omega}) = \frac{B(x)}{\pi}, \quad L_e(x, \vec{\omega}) = \frac{E(x)}{\pi} \quad \text{et} \quad f_r(x, \vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_o) = \frac{\rho(x)}{\pi}$$

où $B(x)$ est la radiosité au point x , $E(x)$ la radiosité auto-émise en x et $\rho(x)$ la réflectivité en x .

De plus, d'après la relation reliant l'angle solide à l'aire projetée :

$$d\vec{\omega}_i = \frac{\cos \theta_y dA_j}{\|\vec{x}\vec{y}\|^2}$$

En remplaçant dans l'équation de luminance, nous obtenons l'équation de radiosité :

$$B(x) = E(x) + \rho(x) \int_{A_j} B(y) \frac{V(x, y) \cos \theta_i \cos \theta_y}{\pi \|\vec{x}\vec{y}\|^2} dA_j$$

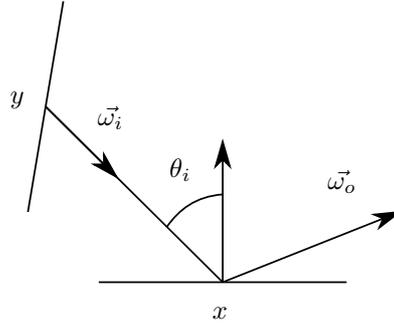


FIG. 6.14 – Notations pour l'équation de luminance.

où $V(x, y) = 1$ si les points x et y sont visibles l'un de l'autre, $V(x, y) = 0$ sinon (voir Fig. 6.15).

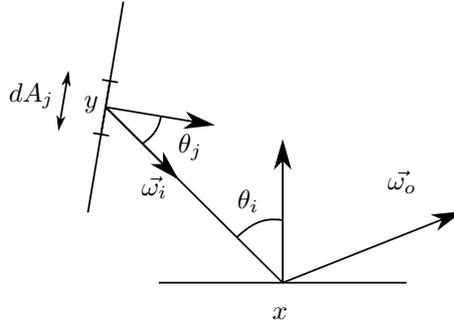


FIG. 6.15 – Notations pour l'équation de radiosité.

En utilisant la méthode de Galerkin [Ike72, Zeg97] et en considérant que les surfaces peuvent être subdivisées en carreaux dont la radiosité $B(x)$ est constante sur tout le carreau, nous obtenons finalement la très classique équation de radiosité constante discrète :

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^N F_{ij} B_j$$

où B_i est la radiosité du carreau i , E_i la radiosité auto-émise par le carreau i , ρ_i la réflectivité du carreau i , N le nombre de carreaux et F_{ij} le facteur de forme (part d'énergie quittant le carreau j et arrivant sur le carreau i) défini par (voir Fig. 6.16) :

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{V(x_i, x_j) \cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi \|x_i - x_j\|^2} dA_i dA_j$$

Sous forme matricielle, nous obtenons :

$$B = E + GB$$

avec :

$$G_{ij} = \rho_i F_{ij}$$

ce qui équivaut à :

$$(I - G)B = E$$

Programme de simulation

L'équation de radiosité constante discrète nous permet de simuler les réflexions multiples dans une pièce virtuelle. Nous proposons ici un programme de simulation de videoprojection basé sur la méthode

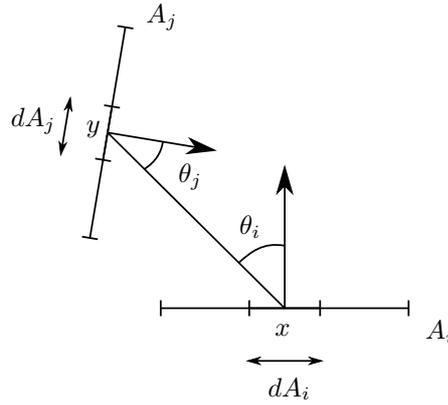


FIG. 6.16 – Notations pour l'équation de radiosité constante discrète.

de radiosité et prenant en compte l'ensemble du processus : projection de l'image, réflexions multiples, visualisation caméra. Nous abordons également le problème de compensation de la projection. Enfin, nous présentons des optimisations d'implémentation utilisant le GPU.

Hypothèses principales : La méthode de radiosité nous impose de considérer toutes les surfaces lambertiennes. La méthode nécessite également que la scène soit composée de carreaux suffisamment petits pour que la radiosité soit à peu près constante sur la surface du carreau. Pour simplifier le problème, nous ignorons le miroir du système Catopsys et considérons que le projecteur est orienté directement vers les surfaces de la pièce (voir Fig. 6.17). Enfin, nous considérons que le projecteur et la caméra sont confondus et photo-électriquement uniformes, ce qui nous permet d'avoir une correspondance immédiate entre les pixels projecteur et les pixels caméra et de considérer la valeur des pixels projecteur ou caméra comme des valeurs de luminance comparables.

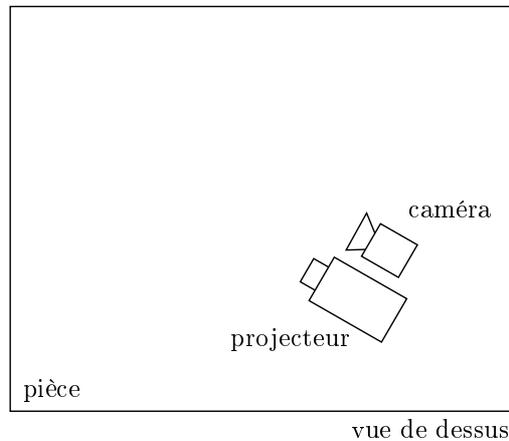


FIG. 6.17 – Système projecteur-caméra considéré pour l'étude en simulation des réflexions multiples dans une pièce fermée. Pour simplifier, nous pouvons considérer que le projecteur et la caméra sont confondus.

Calcul de la matrice de radiosité auto-émise E : Les pixels projecteur sont uniformes i.e. pour un niveau demandé, tout pixel produit la même luminance. Supposons que la luminance L_p^k émis par un pixel projecteur k atteint un et un seul carreau i . Après réflexion, la luminance r -émise est :

$$L_r^k = \frac{\rho_i}{\pi} \cos \theta^k L_p^k$$

où ρ_i est la réflectivité du carreau i et θ^k l'angle entre la normale au carreau et la direction d'incidence.

Rappelons que la radiosité d'une surface est le flux émis par cette surface par unité d'aire et que la luminance est le flux par unité d'aire et par unité d'angle solide. Nous obtenons donc la radiosité en intégrant la luminance sur l'hémisphère. Comme nous sommes dans le cadre de surfaces lambertiennes, la radiosité issue de k auto-émise par le carreau i est donc :

$$E_i^k = \pi L_r^k = \rho_i \cos \theta^k L_p^k$$

Finalement, nous obtenons la radiosité auto-émise par i , issue de l'image projetée, en calculant :

$$E_i = \frac{\rho_i}{\#K} \sum_{k \in K} \cos \theta^k L_p^k$$

où K est l'ensemble des pixels se projetant sur le carreau i et $\#K$ le nombre d'éléments de K .

Notons, pour être rigoureux, que ce calcul suppose que le carreau est soit complètement soit aucunement recouvert par la lumière du projecteur.

Le calcul de la radiosité auto-émise nécessite de déterminer, pour chaque pixel du projecteur, quel est le carreau de la scène atteint. Le problème ainsi posé peut être résolu naïvement par une méthode de lancer de rayons mais ceci induit un coût de calcul important.

Une méthode plus efficace pour calculer ce mapping image-scène, consiste à prendre le problème dans l'autre sens : déterminer la position des carreaux sur l'image projecteur. Il s'agit d'un problème de rendu classique, résolvable en temps-réel par un GPU.

Concrètement, il suffit d'affecter une couleur unique à chaque carreau et d'effectuer un rendu de la scène depuis un point de vue similaire au projecteur. Nous obtenons ainsi, pour chaque pixel, via sa couleur, le carreau atteint. Le calcul de la radiosité auto-émise se résume alors à parcourir l'image projecteur et à prendre en compte la luminance du pixel pour le carreau correspondant.

Notons que le cosinus nécessaire au calcul de la radiosité auto-émise peut également être précalculé simplement et efficacement, grâce au GPU.

Calcul de la matrice d'échange énergétique G : Comme $G_{ij} = \rho_i F_{ij}$, nous obtenons G en multipliant les coefficients de chaque ligne i de la matrice F par la réflectivité ρ_i du carreau i correspondant.

Rappelons que les facteurs de formes sont donnés par :

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{V(x_i, x_j) \cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi \|\vec{x}_i \vec{x}_j\|^2} dA_i dA_j$$

Il existe différentes formules pour calculer analytiquement les facteurs de formes, selon la configuration géométrique. Cependant, hormis pour quelques configurations particulières, ces formules sont assez complexes à implémenter et coûteuses à évaluer. C'est pourquoi il est courant d'utiliser, pour calculer les facteurs de forme, des méthodes numériques comme la technique de l'hémicube [CG85] ou l'intégration par quadrature [PTVF92]. Pour notre application, nous utilisons la quadrature :

$$F_{ij} \approx \frac{A_j}{N_i N_j} \sum_{k_i} \sum_{k_j} \frac{V(k_i, k_j) \cos \theta_{k_i k_j} \cos \theta_{k_j k_i}}{\pi \|\vec{k}_i \vec{k}_j\|^2} \quad (6.1)$$

où N_i (resp. N_j) est le nombre de points considérés sur le carreau i (resp. j), k_i (resp. k_j) est l'un des points considérés (régulièrement répartis) sur i (resp. j), et $\theta_{k_i k_j}$ (resp. $\theta_{k_j k_i}$) l'angle entre $\vec{k}_i \vec{k}_j$ (resp. $\vec{k}_j \vec{k}_i$) et la normale à i (resp. j) (voir Fig. 6.18).

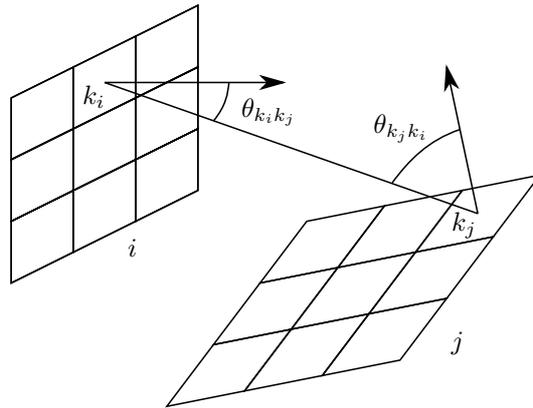


FIG. 6.18 – Notations pour le calcul par quadrature des facteurs de forme.

Notons que dans notre pièce de test, il n'y a pas d'occlusion et donc que la fonction de visibilité vaut toujours 1. Notons enfin que les coefficients de F peuvent être calculés indépendamment et donc en parallèle.

Concernant la complexité, si n est le nombre de carreaux et p le nombre d'échantillons par carreau considérés par la méthode de quadrature, le calcul des facteurs de forme nécessite de considérer $n^2 p^2$ échantillons, un espace de stockage de n^2 et aucun surcoût mémoire pour le calcul.

Calcul de la radiosité B : Connaissant E et G , nous devons désormais calculer B tel que $(I - G)B = E$. Dans le cas de la radiosité classique où nous nous trouvons, la matrice $(I - G)$ est à diagonale dominante ce qui permet de résoudre l'équation par la méthode de Jacobi ou par calcul de la matrice inverse. Nous pouvons également précalculer $(I - G)^{-1}$ pour pouvoir simuler la projection de différentes images dans une même scène en calculant :

$$B = (I - G)^{-1}E \quad (6.2)$$

Dans notre implémentation, nous calculons la matrice inverse par décomposition LU [PTVF92]. Cette méthode n'est certes pas optimale ($O(n^3)$ en temps, $O(n^2)$ en espace) mais présente l'avantage, outre de pouvoir réutiliser la matrice inverse, d'être simple à implémenter (6 lignes de code en utilisant la bibliothèque Boost).

Calcul de l'image caméra : Comme nous l'avons déjà fait remarqué, la grandeur physique associée à un pixel projecteur ou à un pixel caméra est la luminance. Ainsi, en un point de la scène, e.g. un point quelconque d'un carreau i de radiosité B_i , la luminance est identique quelle que soit la direction de vue. La luminance mesurée par le pixel caméra correspondant est donc :

$$L_c = \frac{B_i}{\pi}$$

De cette façon, nous pouvons calculer toute l'image caméra mais la qualité est alors limitée par la taille des carreaux. En effet, un carreau reçoit généralement plusieurs pixels projecteur. Pour obtenir un meilleur rendu, nous décomposons donc la luminance en deux termes : la luminance (par carreau) issue des réflexions multiples et la luminance (par pixel) issue du projecteur. Pour obtenir le premier terme, il suffit de calculer la luminance issue des réflexions multiples uniquement, c'est-à-dire $B - E$. Pour le second terme, notons L_p la luminance venant du projecteur. La luminance reçue, après projection sur la surface, est $L_p \cos \theta$ où θ est l'angle entre la normale et la direction d'incidence (voir Fig. 6.19). Enfin, la luminance réfléchiée par la surface (lambertienne de réflectivité ρ_i) est $L_p \cos \theta \rho_i / \pi$. Finalement, la luminance mesurée par le pixel caméra est donc :

$$L_c = \frac{B_i - E_i}{\pi} + \frac{\rho_i}{\pi} \cos \theta^k L_p^k$$

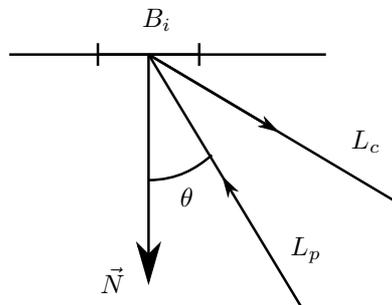


FIG. 6.19 – Notations pour le calcul de l'image caméra.

Notons que ces valeurs sont retournées par la caméra à un facteur près, dépendant de la sensibilité du capteur et de la durée d'exposition. Pour simplifier les équations, nous fixons donc ce facteur à π , ce qui ramène le calcul précédent à :

$$L_c = B_i - E_i + \rho_i \cos \theta^k L_p^k$$

Ce calcul peut être implémenté sur GPU, en une passe (vertex shader + fragment shader), de la façon suivante.

1. $B - E$ est précalculé et stocké comme couleur des carreaux.
2. L_p est obtenu par la technique de projection de texture. Cette technique consiste à positionner la caméra virtuelle à la place du projecteur. La matrice de transformation correspondante est récupérée et stockée dans la matrice de texture de la carte graphique. Il suffit ensuite, dans le fragment shader, d'utiliser la position du fragment dans le repère monde comme coordonnées de texture dans l'image projetée, préalablement chargée comme texture, pour obtenir la luminance projetée à cet endroit.
3. $\cos \theta$ est obtenu en calculant le produit scalaire entre la normale et la direction du projecteur dans le repère monde (vecteurs unitaires). La normale est fournie en entrée des shaders mais la direction du projecteur doit être calculée. Pour cela, nous connaissons déjà la position du fragment dans le repère monde; quant à la position du projecteur, nous l'obtenons en extrayant la composante de translation de la matrice de texture utilisée pour la projection de texture.

Compensation des réflexions multiples : La compensation des réflexions multiples a pour objectif de trouver l'image à projeter permettant de voir, après projection, une image donnée. Il s'agit donc du problème inverse : à partir des L_c^k , calculer B puis E puis les L_p^k .

Rappelons que dans le cas lambertien, la radiosité du carreau i correspondant au pixel k est :

$$B_i^k = \pi L_c^k$$

où L_c^k est la luminance caméra du pixel k .

D'où la radiosité totale du carreau :

$$B_i = \frac{\pi}{\#K} \sum_{k \in K} L_c^k$$

Comme expliqué précédemment, de par le système d'acquisition, l'image visible correspond à la lumière réelle à un facteur près, fixé ici à π . D'où finalement :

$$B_i = \frac{1}{\#K} \sum_{k \in K} L_c^k$$

Connaissant la radiosité B qui doit être visible, nous pouvons alors calculer la radiosité auto-émise E que les carreaux doivent fournir :

$$E = (I - G)B$$

En réalité, la lumière ne provient pas de l'auto-émission des carreaux mais de la réflexion lambertienne de la lumière du projecteur. La luminance que doit apporter le projecteur est donc :

$$L_r = \frac{E_i}{\pi}$$

c'est-à-dire :

$$L_p = \frac{\pi L_r}{\rho_i \cos \theta} = \frac{E_i}{\rho_i \cos \theta}$$

où L_p est la luminance fournie par le projecteur, E_i la radiosité auto-émise du carreau correspondant au pixel considéré, ρ_i la réflectivité du carreau et θ l'angle entre la direction incidente de la lumière du projecteur et la normale à la surface.

Comme nous avons des pixels plus petits que les carreaux, nous obtenons une image de compensation plus détaillée en calculant :

$$L_p^k = \frac{E_i}{\rho_i \cos \theta^k} \times \frac{L_c^k}{B_i}$$

où L_c est la luminance de l'image voulue et B_i la radiosité du carreau correspondant au pixel considéré. Ce calcul revient à moduler L_p par rapport à E_i de la même façon que L_c module par rapport à B_i .

Cette méthode de calcul nous permet d'étudier l'influence des réflexions multiples et donc la faisabilité de la compensation pour une pièce et une image données (ceci en analysant dans quelle mesure l'image de compensation respecte la dynamique du projecteur). Nous pouvons également considérer d'autres problèmes, e.g. que se passe-t-il, au niveau des réflexions multiples, si nous enlevons un mur ou le plafond ; quelle est l'influence de la réflectivité des matériaux ; quelle est l'influence de la proportion de la pièce recouverte par la projection. . .

Résultats et analyse

Scène de test : Pour notre simulation, nous utilisons une pièce virtuelle carrée de 4,8 m de côté et de 2.4 m de hauteur. Les matériaux sont lambertiens et les surfaces sont discrétisées en carreaux rectangulaires. Le projecteur est placé à l'intérieur de la pièce et vise un coin de murs. Conformément à la méthode décrite précédemment, la caméra est définie avec les mêmes caractéristiques que le projecteur, ce qui signifie que nous avons une correspondance directe entre l'image projetée et l'image visible (voir Fig. 6.20).

La machine de test est équipée d'un CPU Intel® Core™ 2 Duo E6600 2,4 GHz et d'un GPU Nvidia® GeForce® 8800 GTS. Le temps de calcul est essentiellement consacré au calcul des facteurs de forme (matrice F , méthode de quadrature à 9 échantillons par carreau par facteur de forme calculé) et à l'inversion de matrice $((I - G)^{-1})$ (voir Fig. 6.21). Ces calculs sont réalisés par le CPU. Comparativement, le temps consacré aux autres calculs (CPU et GPU) est négligeable.

Pour nos tests, nous avons utilisé une discrétisation de la pièce en 576 carreaux. Les temps de calculs correspondant n'ont en pratique pas été excessifs car le calcul des facteurs de forme et de l'inversion matricielle n'est réalisé que si la réflectance ou la géométrie de la pièce changent. De plus, rappelons que l'objectif de la simulation est d'analyser l'influence des réflexions multiples et non de fournir un résultat en temps-réel.



FIG. 6.20 – Simulation des transfert d'énergie (projection, réflexions multiples, acquisition caméra).

nombre de carreaux	144	256	576
facteurs de forme	1,18 s	3,73 s	19,21 s
inversion matricielle	0,92 s	4,57 s	52,6 s

FIG. 6.21 – Temps de calcul des principaux traitements CPU pour différentes discrétisations de la scène.

Évaluation : Un premier critère pour évaluer l'importance des réflexions multiples lors de la projection est le niveau de radiosité indirecte i.e. $B_i - E_i$. Ce critère donne une notion d'erreur : un niveau élevé indique que les réflexions multiples perturbent fortement la projection.

Un second critère est la proportion de radiosité auto-émise parmi la radiosité visible i.e. E_i/B_i . Ceci donne une indication sur l'information utile (même principe que le rapport signal sur bruit) : un rapport élevé indique que les réflexion multiples perturbent peu la projection.

Concernant la compensation, nous nous intéressons tout d'abord au niveau de radiosité auto-émise à apporter pour compenser les réflexions multiples. En effet, celle-ci conditionne l'image de compensation à projeter. Pour que cette image soit synthétisable, il faut que la lumière à émettre respecte la dynamique du projecteur et donc que la radiosité auto-émise de compensation ne soit ni trop élevée ni négative. Notons, que la dynamique de la compensation peut être ramenée linéairement dans la plage synthétisable mais que ceci implique une perte de contraste après projection de l'image de compensation.

Enfin, un dernier critère pour évaluer l'efficacité de la compensation est de comparer l'image voulue avec l'image visible (après projection) sans et avec compensation (voir Fig. 6.22).

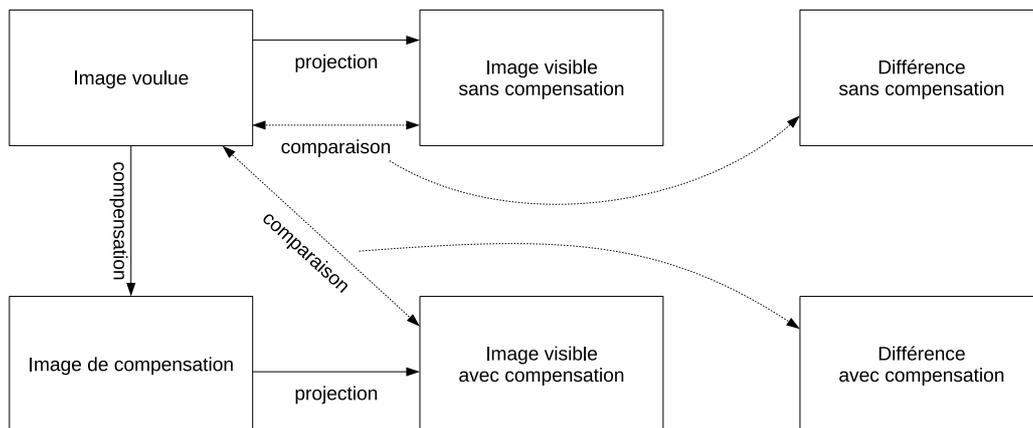


FIG. 6.22 – Evaluation des réflexions multiples avec ou sans compensation.

Cas nominal : Dans notre cas nominal, les matériaux de la pièce ont une réflectivité de 0,7 (ce qui est élevé). La projection est réalisée sur environ 50% de la surface de la pièce. Enfin, l'image projetée est une photo d'extérieur (définie dans $[0, 255]^3$), de niveau moyen 123 et d'écart-type 46. Le résultat de la projection sans et avec compensation, suivant le schéma donné Fig. 6.22, est donné Fig. 6.23. L'évaluation des résultats obtenus est donnée Tab. 6.1.

Nous constatons que l'influence des réflexions multiples lors de la projection sans compensation perturbe l'image visible. La géométrie de la pièce est ainsi nettement perceptible. D'après nos calculs, la radiosité créée par les réflexions multiples est de 43 à 153 (71 en moyenne).

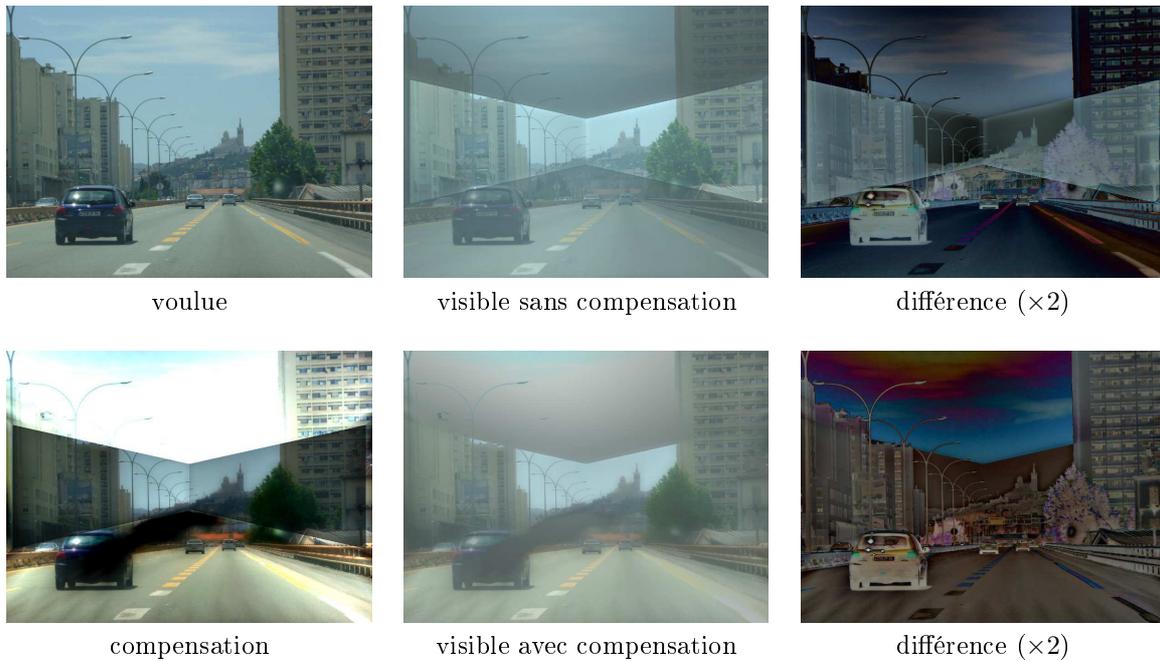


FIG. 6.23 – Résultat de la projection et de la compensation dans le cas nominal.

Le passage de la radiosité auto-émise à la luminance que doit apporter le projecteur est soumis à la réflexion lambertienne. Ceci implique que, pour apporter une même radiosité, le projecteur doit émettre plus de lumière vers les carreaux quasi parallèles que vers les carreaux perpendiculaires. C'est pour cette raison que l'image de compensation est saturée au niveau du plafond de la pièce. Sur l'image visible, le potentiel de l'éclairage réfléchi directement (et donc contrôlable) est de 35% en moyenne de l'éclairage total, avec des variations importantes (voir Fig. 6.24).

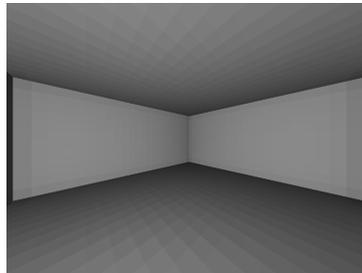


FIG. 6.24 – Rapport lumière réfléchi directement sur lumière totale (lumière réfléchi directement + réflexions multiples), lorsque le projecteur projette une image blanche. Un pixel sombre indique que la lumière visible provient essentiellement des réflexions multiples.

Nous constatons également que la compensation des réflexions multiples permet de réduire les perturbations mais que celle-ci est rapidement limitée par la saturation de l'image de compensation. En effet, la radiosité voulue dans la pièce s'étend de 0 à 204 selon les carreaux. La radiosité que devraient émettre les carreaux pour réaliser la compensation s'étend de -76 à 153. Bien évidemment, le projecteur ne peut pas apporter de l'énergie négative et la compensation ne peut donc pas être réalisée parfaitement. Ceci se vérifie sur l'image visible avec compensation (Fig. 6.23). Au niveau du plafond, l'image voulue est trop claire pour que, même à pleine puissance, le projecteur puisse apporter suffisamment de lumière. De même, au dessus de la voiture de gauche, l'image voulue est trop sombre pour que, même à la puissance minimale, la projection (avec les réflexions multiples inhérentes) permette d'afficher les niveaux voulus ; il faudrait pour cela que le projecteur puisse émettre, à cet endroit, de l'énergie négative.

Concernant l'erreur visible après projection sans ou avec compensation (images de différence Fig. 6.23), sans compensation, nous obtenons une erreur moyenne de 32 et un écart-type de 18. Avec compensation, l'erreur moyenne est de 27 et l'écart-type de 12, soit une amélioration.

Influence de l'image projetée : Nous projetons désormais une photo d'intérieur dont le niveau moyen est plus faible (102) et l'écart-type plus élevé (55) (voir Fig. 6.25).

	cas nominal	photo d'intérieur	image grise	immersion à 25%	sans plafond	$\rho = 0,4$
$B_i - E_i$ mini	43	43	28	25	13	5
$B_i - E_i$ maxi	153	140	64	127	64	25
$B_i - E_i$ moyen	71	71	46	38	20	13
E_i/B_i moyen	35%	35%	35%	45%	71%	60%
B_i compensation mini	0	0	0	0	0	0
B_i compensation maxi	204	255	69	196	186	194
E_i compensation mini	-76	-115	-48	-48	-66	-51
E_i compensation maxi	153	217	48	150	166	166
delta projection moyen	32	27	10	21	19	83
écart-type delta projection	18	20	8	18	23	37
delta compensation moyen	27	32	21	22	6	47
écart-type delta compensation	12	17	3	11	9	38

TAB. 6.1 – Evaluation des différents résultats obtenus. $B_i - E_i$: radiosité apportée par les réflexions multiples sur le carreau i . E_i/B_i : part de la radiosité auto-émission sur la radiosité totale du carreau i . B_i compensation : radiosité que doit émettre le carreau i pour compenser les réflexions multiples. E_i compensation : radiosité que doit auto-émettre le carreau i pour compenser les réflexions multiples. Delta projection : écart entre le niveau voulu et le niveau visible après projection sans compensation. Delta compensation : écart entre le niveau voulu et le niveau visible après projection avec compensation.

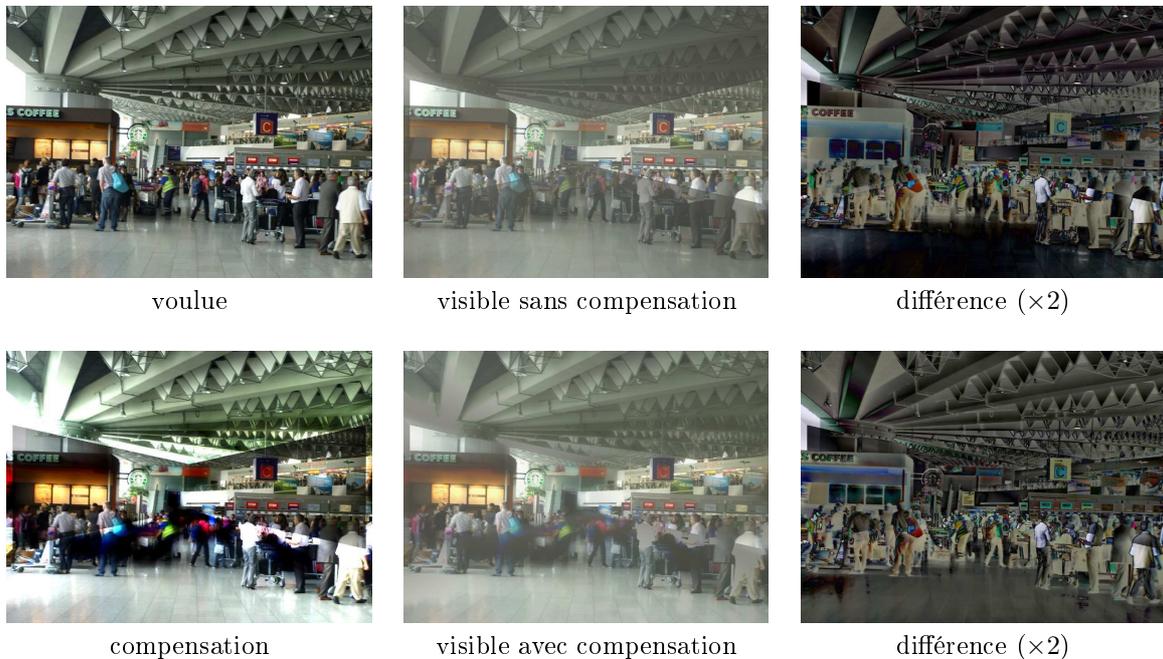


FIG. 6.25 – Résultat de la projection et de la compensation d'une image d'intérieur.

Ici aussi, la radiosité issue des réflexions multiples est importante, de 43 à 140, 71 en moyenne. L'image visible sans compensation est perturbée et laisse percevoir la pièce réelle.

La radiosité voulue s'étend sur toute la dynamique (0 à 255). Pour réaliser la compensation, la radiosité à apporter s'étend de -115 à 217. L'image visible avec compensation donne un résultat relativement satisfaisant dans la mesure où la pièce réelle est beaucoup moins perceptible (l'énergie négative concerne ici des carreaux non visibles par la caméra et ne perturbe donc pas l'image visible). Si l'erreur moyenne passe de 27 (sans compensation) à 32 (avec compensation), l'écart-type passe de 20 à 17. l'erreur est donc en moyenne plus forte avec la compensation (à cause de la saturation et des approximations de calcul) mais moins contrastée ; d'où le rendu visuellement meilleur.

Nous pouvons ainsi déduire que la compensation est plus efficace si l'image voulue est relativement sombre et peu contrastée. Pour le confirmer, nous réalisons une simulation avec une image grise (niveau moyen 70, écart-type 0) (voir Fig. 6.26).

La radiosité issue des réflexions multiples s'étend de 28 à 64, 46 en moyenne, ce qui est dû à l'image plus sombre, qui apporte donc moins de lumière. La radiosité voulue dans la scène s'étend de 0 à 69. La

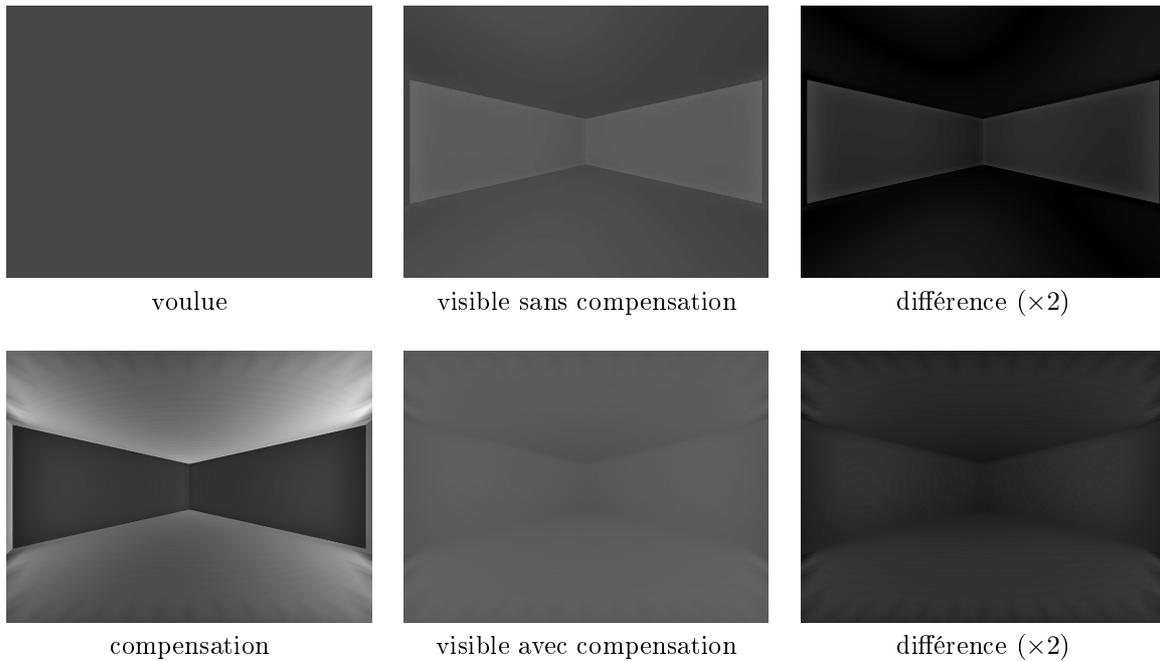


FIG. 6.26 – Résultat de la projection et de la compensation d’une image grise.

radiosité à apporter pour réaliser la compensation s’étend de -48 à 48. Au niveau des images visibles, l’écart-type passe de 8, sans compensation, à 3, avec compensation. La compensation est donc plus efficace si l’image voulue est relativement sombre et peu contrastée.

Influence de la projection immersive : Dans le cas nominal, la projection est réalisée sur 50% de la pièce. Nous nous plaçons ici dans le cas d’une projection sur 25% de la pièce (voir Fig. 6.27 et Fig. 6.28).

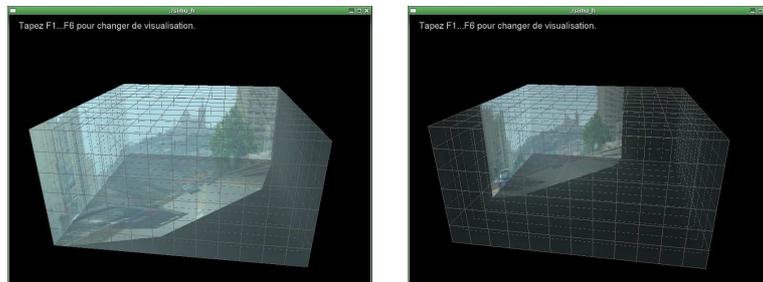


FIG. 6.27 – Projection sur 50% de la pièce (à gauche) et sur 25% de la pièce (à droite).

La radiosité issue des réflexions multiples est sensiblement plus faible, de 25 à 127, 38 en moyenne. Ceci se vérifie sur l’image visible, nettement moins perturbée (erreur moyenne plus faible). Autre conséquence, la proportion de radiosité auto-émise est plus importante, 45% au lieu de 35% pour le cas nominal. Concernant la compensation, nous obtenons des résultats comparables aux résultats précédents.

Influence de l’environnement immersif : Dans la littérature, les travaux concernant la compensation des réflexions multiples sont généralement appliqués à des écrans de projection concaves mais ouverts. Par exemple, dans [YCC10], une projection est réalisée sur une maquette de pièce sans plafond. Ceci implique que la lumière peut s’échapper par les ouvertures et donc réduire l’importance des réflexions multiples. Pour Catopsys, nous utilisons une pièce d’habitation fermée. L’idée est donc ici de comparer ces deux configurations en réalisant la simulation dans les mêmes conditions que le cas nominal mais avec une pièce sans plafond (voir Fig. 6.29 et Fig. 6.30).

Nous constatons que l’influence du plafond est importante. Sans le plafond, la radiosité issue des réflexions multiples est fortement réduite, de 13 à 64, 20 en moyenne. La proportion de radiosité auto-émise double (71%). Enfin, la compensation devient très efficace (erreur moyenne de 6 avec un écart-type de 9).

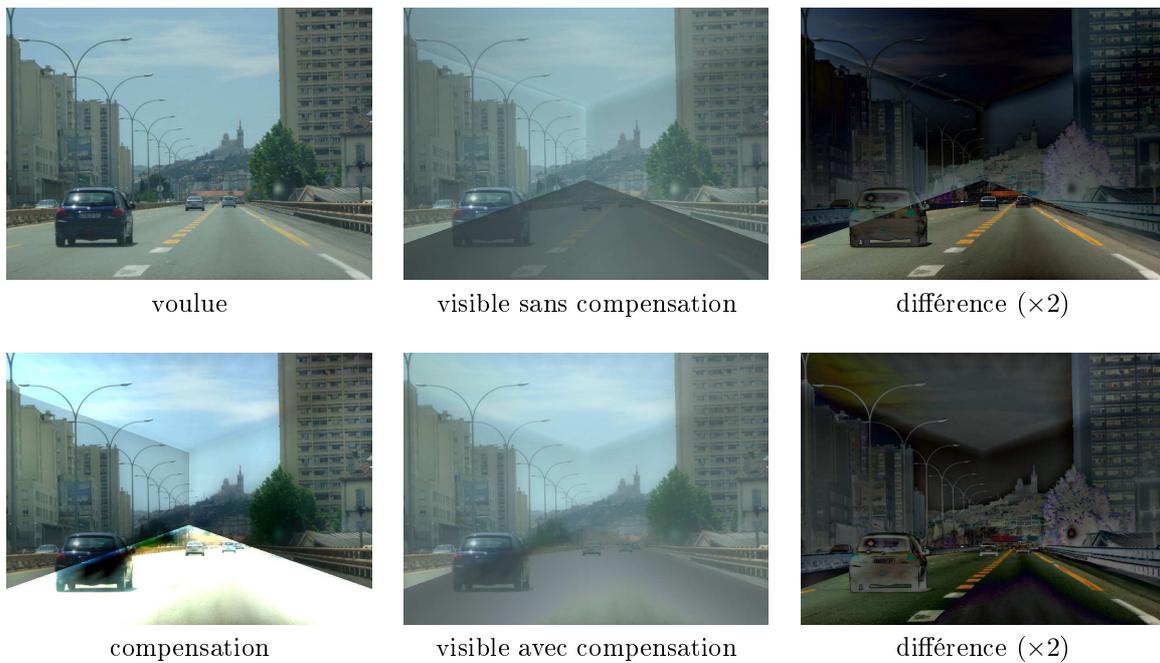


FIG. 6.28 – Résultat de la projection et de la compensation utilisant une surface plus petite de la pièce.

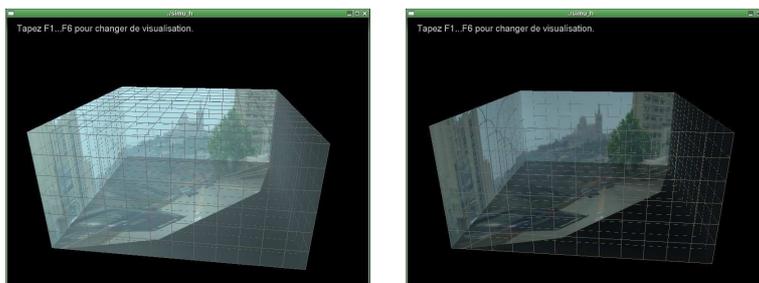


FIG. 6.29 – Projection dans une pièce avec plafond (à gauche) et sans plafond (à droite).

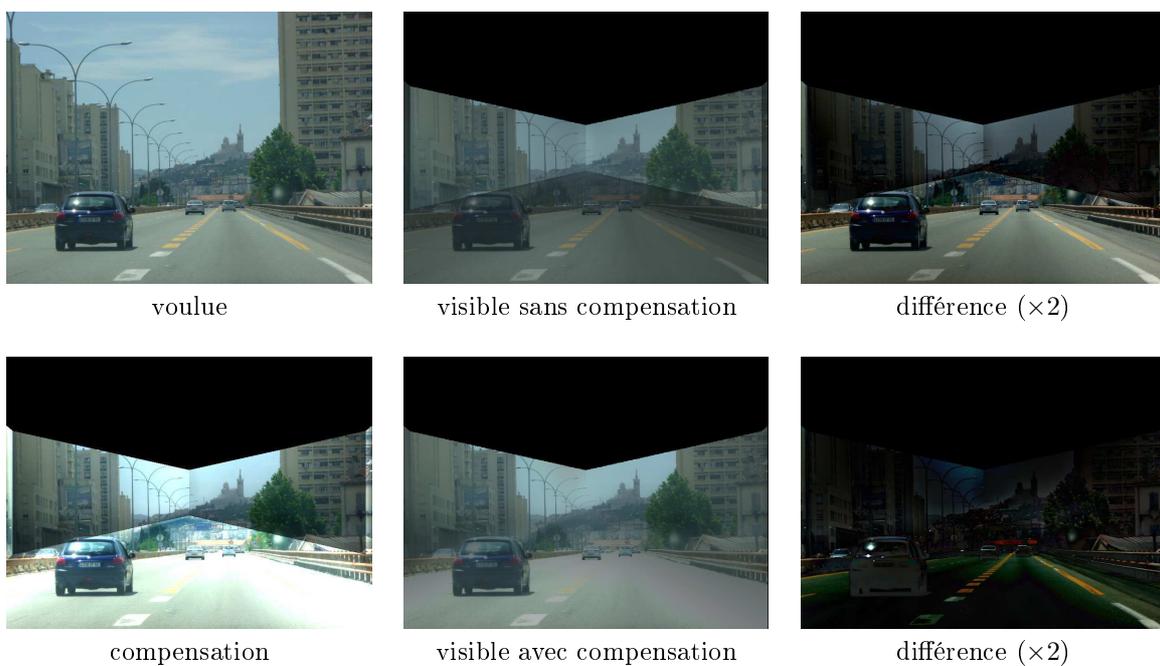


FIG. 6.30 – Résultat de la projection et de la compensation dans une pièce sans plafond.

Ceci signifie que les réflexions multiples sont plus importantes si la pièce est fermée et donc que le

système Catopsys est particulièrement propice aux réflexions multiples.

Influence de la réflectivité : Enfin, le dernier paramètre étudié est la réflectivité des matériaux, fixé ici à $\rho = 0,4$ (voir Fig. 6.31 et Fig. 6.32).

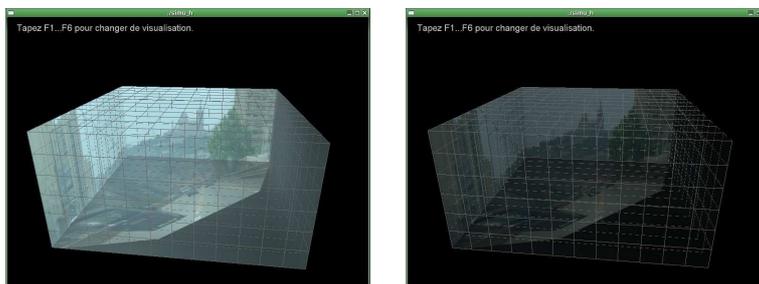


FIG. 6.31 – Projection avec $\rho = 0,7$ (à gauche) et avec $\rho = 0,4$ (à droite).

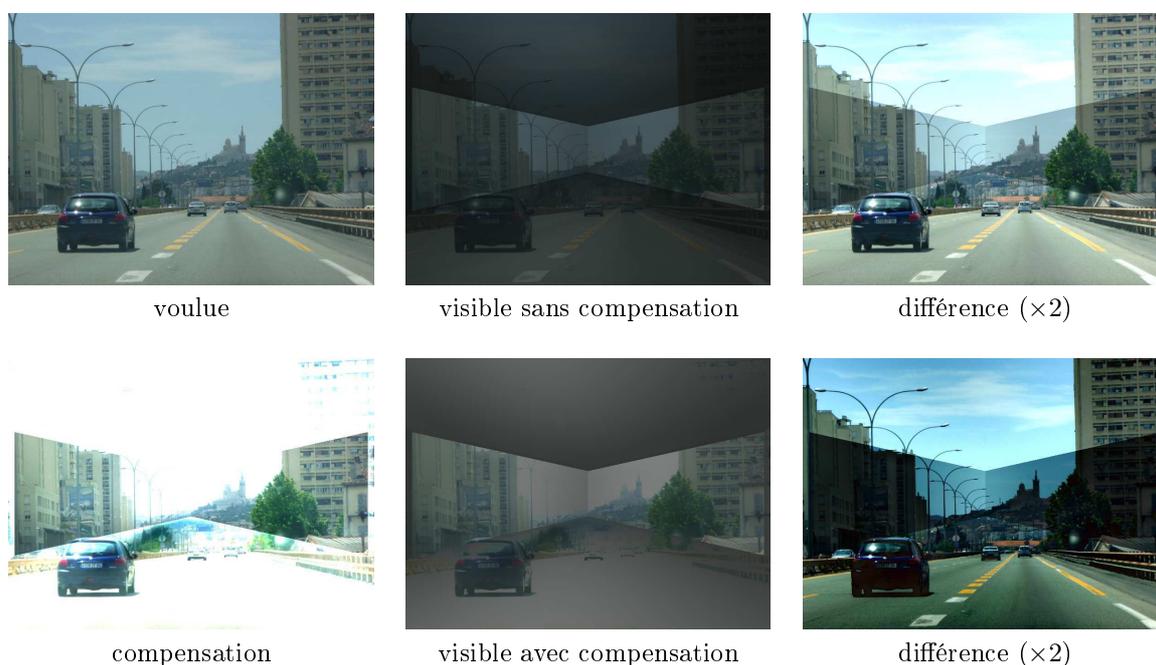


FIG. 6.32 – Résultat de la projection et de la compensation avec $\rho = 0,4$.

La radiosité issue des réflexions multiples est alors beaucoup plus faible, de 5 à 25, 13 en moyenne. La proportion de radiosité auto-émise passe à 60% en moyenne. En revanche, l'image visible est nettement moins bonne (erreur moyenne de 83 avec un écart-type de 37), ce que la compensation ne peut que légèrement corriger (erreur moyenne de 47 avec un écart-type de 38).

Conclusion

D'après les simulations réalisées, nous pouvons déduire que les réflexions multiples sont particulièrement importantes si la pièce est fermée et que la projection est réalisée sur une part importante de la pièce (ce qui est malheureusement le cas pour Catopsys). Enfin, nous avons constaté que la compensation permet de réduire l'influence des réflexions multiples à condition que les matériaux aient une réflectivité relativement importante et que l'image projetée soit relativement sombre et peu contrasté (ce qui permet de laisser une marge de manoeuvre à la compensation).

6.5 Conclusion

Dans le cadre du système Catopsys, les différentes surfaces de la pièce, utilisées comme écran de projection, influencent l'affichage à travers deux phénomènes : la réflectance des matériaux et les réflexions multiples entre les surfaces.

Concernant les matériaux, nous avons tout d'abord réalisé une étude théorique basée sur la BRDF (modèle de réflectance permettant de caractériser un grand nombre de matériaux) et l'équation de réflectance. Cette étude montre notamment que la lumière réfléchie peut être contrôlée, assez simplement, en contrôlant la lumière incidente. Pour Catopsys, cela prouve que l'on peut théoriquement afficher une image à l'utilisateur, par projection sur des surfaces aux matériaux non neutres, ni homogènes.

Nous avons ensuite caractérisé, de façon approximative, la BRDF des matériaux de notre salle de test ainsi que différents matériaux types, à titre de comparaison. Nous avons vérifié que nos matériaux ont une composante diffuse et une composante spéculaire. Le caractère diffus (réflexion de la lumière dans toutes les directions) nous assure que l'affichage peut être réalisé quel que soit la position du point de vue. Le caractère spéculaire (réflexion dans une direction privilégiée) implique un éblouissement, qu'il faut réduire au prix d'une perte de la dynamique utile, ou des réflexions multiples particulièrement importantes.

Concernant les réflexions multiples, nous avons réalisé une étude expérimentale dans notre salle de test. Celle-ci montre clairement que le système Catopsys est intrinsèquement très touché par les réflexions multiples. Elle montre également que ces perturbations sont très variables (faibles au centre des murs, fortes dans les coins de la pièce).

Enfin, nous avons réalisé une simulation pour étudier plus précisément les réflexions multiples dans le cas de matériaux diffus. Nous nous sommes inspirés de la méthode de radiosité qui consiste à discrétiser la scène en éléments de surface et à exprimer les échanges énergétiques sous forme de combinaisons linéaires de l'énergie émise par ces éléments. Nous pouvons ainsi prédire l'image visible après projection. En inversant le problème d'échange énergétique, nous pouvons également calculer une image compensant les réflexions multiples. Nous avons cependant constaté que la compensation est, en pratique, assez limitée. En effet, les images de compensation ne sont pas toujours synthétisables car elles nécessitent une grande dynamique, voire de l'énergie négative. De plus, une discrétisation efficace de la scène n'est pas forcément simple à réaliser. Enfin, l'hypothèse des matériaux diffus n'est en pratique pas acceptable.

Chapitre 7

Compensation radiométrique de la projection

7.1 Introduction

Les études radiométriques réalisées dans les chapitres précédents précisent comment les différents éléments du système Catopsys perturbent la projection et l'acquisition d'images et dans quelle mesure ces perturbations peuvent être corrigées. En particulier, nous savons que la réponse du projecteur n'est pas neutre, que les matériaux de la salle sont généralement peu adaptés à la projection et que les réflexions multiples entre les différentes surfaces qui composent la salle sont particulièrement importantes à l'intérieur d'un espace clos. Ainsi, au niveau du système Catopsys, une image projetée subit l'ensemble du processus de projection et, par conséquent, accumule les perturbations radiométriques, si bien que l'environnement visible par l'utilisateur peut être très différent de l'environnement que nous souhaitons recréer initialement.

Pour améliorer le rendu final, notre seul moyen d'action est de modifier l'image envoyée au projecteur de telle sorte que l'environnement visible après projection soit proche de l'environnement souhaité. Pour réaliser cette compensation radiométrique, le système Catopsys dispose d'un point de vue panoramique (la caméra en rotation) et d'une source de lumière omnidirectionnelle contrôlable (l'association projecteur-miroir).

L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthode de compensation radiométrique automatisée et adaptée aux spécificités du système Catopsys. Pour cela, dans les sections suivantes, nous décrivons le processus radiométrique du système puis en proposons un modèle ainsi qu'une méthode de calibrage et une méthode de compensation. Certains de ces travaux ont donné lieu à des publications [DZR⁺08a, DZR⁺08b, DZR⁺09].

Les travaux présentés dans ce chapitre découlent et parfois reprennent les travaux des chapitres précédents. En effet, l'idée est ici de présenter de façon complète, synthétique et autonome comment compenser les perturbations radiométriques. Certaines méthodes sont donc de nouveau abordées, mais de façon plus concise ou simplifiée.

Notons également que nous ignorons ici la réflexion par le miroir convexe du système Catopsys. En effet, son influence radiométrique est quasi nulle et son influence géométrique est prise en compte par le calibrage géométrique du système projecteur-caméra, de façon transparente (voir Section 7.5).

Enfin, rappelons quelques termes utilisés dans le cadre de Catopsys :

- une *image caméra* est une image retournée par la caméra (à un pas de rotation donné), dans le système de couleurs et de la résolution de la caméra ;
- une *image projecteur* est une image envoyée au projecteur, dans son système de couleurs et de sa résolution ;
- une *image projecteur mesurée* donne, pour chaque pixel du projecteur, la couleur retournée par la caméra au point de la pièce correspondant (i.e. atteint lors de la projection du pixel projecteur). Une image projecteur mesurée utilise donc le système de couleurs de la caméra et est de la résolution du projecteur.

7.2 Travaux précédents

La restitution fidèle d'images projetées sur des surfaces non adaptées à la projection a fait l'objet de nombreux travaux récents [BIWG07]. Nous n'évoquons ici que quelques méthodes de compensation en deux passes utilisant un système projecteur-caméra. Ces méthodes consistent à évaluer, hors-ligne, la réponse radiométrique du système puis à inverser cette réponse pour calculer, en-ligne, les images de compensation.

[NPGB03] propose un modèle de projection sur des surfaces non adaptées. Les auteurs donnent également une méthode de calibrage et de compensation basée sur ce modèle. Leur méthode modélise la projection par une réponse non linéaire de chaque canal de couleur suivi d'un mélange linéaire de ces canaux. Cependant, elle suppose que l'écran de projection est plat et donc qu'il n'y a pas de réflexion multiple.

[BGZ⁺06] propose une méthode de compensation prenant en compte les réflexions multiples entre surfaces diffuses grâce au concept de radiosit^é inverse (*reverse radiosity*). Cependant, les auteurs n'expliquent pas comment obtenir la géométrie et les réflectivités de la salle nécessaires à leur méthode. De plus, ils supposent linéaire la réponse du projecteur.

Une méthode de compensation par calibrage exhaustif est proposée dans [WB07]. Cette méthode consiste à mesurer la matrice de transport de la lumière, c'est-à-dire l'influence de chaque pixel projecteur sur chaque pixel caméra. Les images de compensation peuvent être calculées grâce à la matrice inverse. Cependant, cette méthode ne prend pas en compte la non-linéarité de la réponse du projecteur. De plus, l'obtention de la matrice demande un très grand nombre d'acquisitions caméra (avec notre projecteur 1400x1050 et notre caméra 1024x768 à 6 pas de rotation, il faut théoriquement plus de 6×10^{12} images).

Dans [BCNR10], Bai et al. présentent une théorie sur la dualité entre le transport et le transport inverse de la lumière. Ils proposent notamment de décomposer l'opérateur de transport inverse en série de Neumann, comme cela avait été fait pour l'opérateur de transport. Ceci permet de calculer le problème du transport inverse de façon itérative sans avoir à inverser explicitement une matrice de très grande taille. Malheureusement, même si des approximations peuvent être envisagées, cette théorie suppose que les matériaux sont diffus.

Enfin, Sheng et al. proposent une méthode de compensation de l'éclairage global issu de la projection [YCC10]. Ils proposent de reformuler le problème de radiosit^é inverse en un problème de programmation quadratique dont les contraintes à minimiser sont données par des calculs d'erreurs de luminance et de chrominance. Malheureusement, cette méthode n'est applicable que pour des matériaux diffus. De plus, elle prend en compte l'ensemble du contenu de l'image : le traitement d'un pixel est dépendant de la valeurs des autres pixels. La compensation peut ainsi assombrir l'image pour préserver le contraste de l'image visible ce qui pose le problème de la cohérence temporelle puisque les niveaux de deux images différentes ne sont alors plus directement comparables.

7.3 Processus radiométrique

Une image projetée par le système Catopsys subit des perturbations radiométriques. En effet, les vidéo-projecteurs ne produisent pas une image parfaitement fidèle à l'image d'entrée. De même, les murs d'une pièce, utilisés ici comme support de projection, sont très différents d'un écran de projection dédié (c'est-à-dire à peu près plat, blanc et lambertien). La problématique qui se pose alors est la suivante : comment faire pour que la projection restituée à l'utilisateur une image donnée, malgré les perturbations radiométriques? L'unique degré de liberté autorisé par le système réside dans le contenu de l'image envoyée au projecteur. L'idée de la compensation radiométrique est de modifier cette image de telle sorte qu'une fois projetée, et donc «radiométriquement perturbée», elle apparaisse à l'utilisateur comme l'image désirée initialement. Cette compensation radiométrique n'est cependant réalisable qu'après avoir caractériser les perturbations. Ceci nécessite un appareil de mesure, ici la caméra. Le dernier problème qui se pose alors est qu'une caméra n'est généralement pas un appareil de mesure fidèle et introduit, elle aussi, des perturbations radiométriques.

Le processus radiométrique de projection-acquisition, réalisé par le système Catopsys, est présenté Fig. 7.1. Une image d'entrée est envoyée au projecteur. Celui-ci émet la lumière correspondante dans la pièce. La lumière est ensuite réfléchiée de mur en mur, de nombreuses fois, ce qui est classiquement appelé *réflexions multiples*. Finalement, une partie de la lumière est réfléchiée par les murs vers la caméra. Cette lumière subit les perturbations de la caméra avant de constituer l'image retournée par celle-ci à l'ordinateur. Pour notre application, nous supposons que la lumière perçue par l'utilisateur correspond à la lumière perçue par la caméra c'est-à-dire que l'utilisateur est proche de la caméra et voit donc la scène à peu près de la même façon.

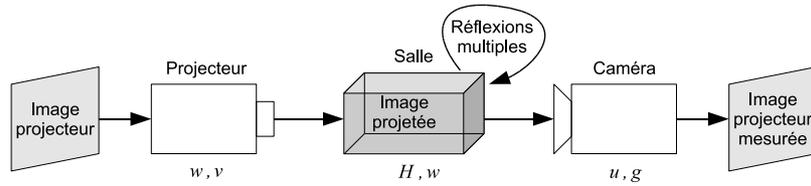


FIG. 7.1 – Processus radiométrique du système projecteur-caméra. Les composantes du modèle radiométrique mises en jeu sont données en italique (voir Section 7.5).

Les perturbations radiométriques introduites au cours du processus de projection-acquisition sont résumées Fig. 7.2 et détaillées ci-dessous :

- L'image envoyée au projecteur par l'ordinateur est codée dans un certain système de couleurs (en général, un système normalisé comme le sRGB). Le projecteur utilise son propre système de couleurs, donné par la réponse spectrale de ses différents canaux. Ceci produit un mélange inter-canal linéaire. Par exemple, si l'image envoyée est rouge et que le projecteur allume son canal rouge, de réponse spectrale différente, la lumière émise aura dans le système de couleur initial, des composantes verte et bleue non nulles.
- La puissance de la lumière émise par le projecteur n'est pas toujours proportionnelle au niveau de l'image d'entrée. Le projecteur introduit ainsi une non-linéarité entre l'intensité d'entrée du canal et la puissance émise correspondante.
- Le système optique du projecteur laisse passer plus de lumière au centre qu'au bord. Ce phénomène, appelé *vigneting*, atténue la lumière d'un facteur constant, donné par la position du pixel correspondant.
- La lumière émise par le projecteur atteint un point de la salle. Elle est alors réfléchiée dans toutes les directions, plus ou moins fortement. La lumière se propage ensuite dans toute la salle, atteint d'autres points où le processus se répète à nouveau, réalisant ainsi une répartition de la lumière par réflexions multiples. Cette répartition dépend de la géométrie et des matériaux de la salle. D'après la linéarité de la réflexion de la lumière, nous pouvons dire que la lumière atteignant un point, après réflexions multiples, est une combinaison linéaire de la lumière initiale incidente aux différents points de la salle.
- En un point donné de la salle, une partie de la lumière incidente (éventuellement après réflexions multiples) est réfléchiée dans la direction de la caméra. Comme la géométrie (de la salle et du système) et les matériaux sont constants, cette réflexion se ramène à une pondération constante (chaque canal de chaque pixel a son propre facteur).
- Comme pour le projecteur, le système optique de la caméra produit du vigneting, c'est-à-dire que chaque pixel est atténué d'un facteur constant qui lui est propre.
- Le capteur de la caméra introduit une non-linéarité entre la puissance reçue et l'intensité retournée. Ceci est dû non seulement à la réponse d'intensité du capteur mais également à son exposition qui pose des problèmes de saturation.
- Enfin, la couleur retournée par la caméra est codée dans son propre système de couleurs donné par la réponse spectrale de ses différents canaux.

Origine	Perturbation	Description	Modélisation
projecteur	système de couleurs	mélange inter-canal linéaire	–
projecteur	transfert d'intensité	non-linéarité intra-canal	w
projecteur	vigneting	pondération constante du pixel	w
salle de projection	réflexions multiples	mélange inter-pixel linéaire	H
salle de projection	réflexion vers la caméra	pondération constante intra-canal	w
caméra	vigneting	pondération constante du pixel	u
caméra	réponse du capteur	non-linéarité intra-canal	g
caméra	système de couleurs	mélange inter-canal linéaire	v

FIG. 7.2 – Description et modélisation des perturbations radiométriques au cours du processus de projection-acquisition.

7.4 Modèle radiométrique

Dans la section précédente, nous avons détaillé les perturbations radiométriques introduites par le processus de projection-acquisition du système Catopsys. Nous proposons maintenant une modélisation de ce processus, inspirée de celle proposée par Nayar et al. dans [NPGB03].

Notre modèle radiométrique est illustré Fig. 7.3 (voir également Fig. 7.2). Lors de la projection, chaque canal de chaque pixel de l'image subit une transformation non-linéaire w (transfert d'intensité du projecteur, vignetage du projecteur et réflexion de la lumière depuis la salle vers la caméra). Puis les canaux de chaque pixel font l'objet d'une combinaison linéaire v (due aux réponses spectrales du projecteur et de la caméra différentes). Enfin, les réflexions multiples se traduisent par une combinaison linéaire h des pixels. En ce qui concerne la caméra, l'acquisition subit une pondération u propre à chaque pixel (vignetage caméra) puis une transformation non-linéaire g commune à tous les pixels (réponse d'intensité). L'image ainsi capturée est codée dans le système de couleurs de la caméra.

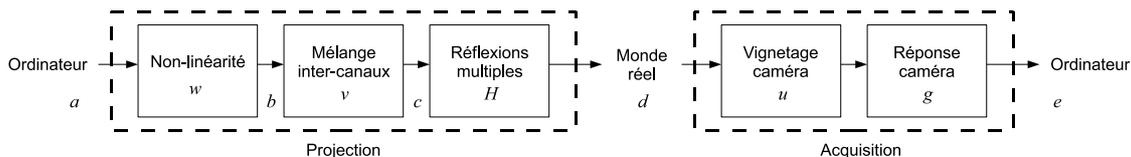


FIG. 7.3 – Modèle radiométrique du système projecteur-caméra.

Le reste de cette section décrit plus précisément le modèle radiométrique, en considérant que les systèmes de couleurs sont à 3 dimensions¹. Soit p un pixel de l'image à projeter. Soit $x = [x_r \ x_g \ x_b]^T$ la couleur de p dans le système de couleurs initial (r, g, b) . Soit $y = [y_R \ y_G \ y_B]^T$ la couleur de p dans le système de couleur final (R, G, B) , celui de la caméra. La conversion de x dans (r, g, b) en y dans (R, G, B) est modélisée par une combinaison linéaire des canaux de couleur, c'est-à-dire $y = tx$, avec :

$$t = \begin{bmatrix} t_{Rr} & t_{Rg} & t_{Rb} \\ t_{Gr} & t_{Gg} & t_{Gb} \\ t_{Br} & t_{Bg} & t_{Bb} \end{bmatrix}$$

Soient v et v' définis par :

$$v = \begin{bmatrix} 1 & t_{Rg} & t_{Rb} \\ t_{Gr} & 1 & t_{Gb} \\ t_{Br} & t_{Bg} & 1 \end{bmatrix}$$

$$v' = \begin{bmatrix} t_{Rr} - 1 & 0 & 0 \\ 0 & t_{Gg} - 1 & 0 \\ 0 & 0 & t_{Bb} - 1 \end{bmatrix}$$

Nous avons donc $t = v + v'$. Intuitivement, v traduit les transformations inter-canaux de la conversion de (r, g, b) à (R, G, B) et v' les transformations (linéaires) intra-canaux.

Ceci nous permet de décrire les différentes composantes du modèle radiométrique. Soit a la couleur du pixel p dans l'image à projeter. Appelons a_λ la valeur du canal λ de la couleur a (donc ici $\lambda \in \{r, g, b\}$). La première composante du modèle est la fonction non-linéaire w_λ qui modélise la non-linéarité et les pondérations intra-canaux du processus pour le pixel p (transfert d'intensité du projecteur, vignetage du projecteur et réflexion de la lumière depuis la salle vers la caméra). Notons que w_λ contient implicitement le terme $v'_{\lambda\lambda}$ décrit précédemment. En appliquant w_λ sur a nous obtenons la couleur b :

$$b_\lambda = w_\lambda(a_\lambda) \quad (7.1)$$

La composante suivante v modélise la conversion, en p , dans le système de couleurs de la caméra (mélange inter-canal). Nous obtenons la couleur c :

$$c = vb \quad (7.2)$$

Enfin, la dernière composante, pour la projection, modélise les réflexions multiples entre pixels (ou, plus précisément, entre les surfaces éclairées par la lumière correspondant aux pixels). Soit C_λ le vecteur des couleurs, comme calculées précédemment pour p , de tous les pixels. H_λ modélise le transport de la lumière entre les éléments de surfaces c'est-à-dire la lumière apportée en chaque élément par réflexions multiples de la lumière des autres éléments. Nous obtenons alors D_λ , vecteur des couleurs, réellement visibles, de tous les pixels :

$$D_\lambda = C_\lambda + H_\lambda C_\lambda \quad (7.3)$$

¹Il s'agit d'un choix pour expliquer la méthode plus simplement, non d'une limitation.

Notons que nous avons ainsi discrétisé la pièce en éléments de surface donnés par la projection des pixels projecteur. Notons également que la matrice H_λ obtenue est une matrice de taille $n \times n$ où n est le nombre de pixels de l'image c'est-à-dire une matrice très grande qu'il n'est pas raisonnable de manipuler telle quelle en pratique. Pour résoudre ce problème, nous pouvons regrouper les pixels en groupes et modéliser les réflexions multiples entre ces groupes.

La couleur d , donnée par les vecteurs D_λ pour le pixel p , correspond à la couleur visible dans la salle de projection, depuis le point de vue de la caméra. Son acquisition par la caméra est modélisée ainsi : le facteur de pondération u_λ modélise le vignetage caméra en p et la fonction non-linéaire g_λ la réponse d'intensité de la caméra (identique pour tous les pixels de la caméra). Au final, nous obtenons donc la couleur e_λ retournée par la caméra pour p , après projection et acquisition :

$$e_\lambda = g_\lambda(u_\lambda d_\lambda) \quad (7.4)$$

7.5 Méthode de calibrage

Les sections précédentes ont permis de proposer un modèle radiométrique du processus de projection-acquisition du système Catopsys. Nous proposons maintenant une méthode de calibrage basée sur ce modèle c'est-à-dire une méthode permettant de déterminer les paramètres v , w , H , u et g caractérisant un système Catopsys particulier. Cette méthode comporte plusieurs étapes :

- calibrer géométriquement la caméra et le projecteur
- calibrer radiométriquement la caméra :
 - déterminer u et g
- calibrer radiométriquement la projection :
 - déterminer v (sans réflexions multiples)
 - déterminer w (sans réflexions multiples)
 - déterminer H (réflexions multiples)

7.5.1 Calibrage géométrique

Pour réaliser le calibrage radiométrique, nous avons besoin d'un calibrage géométrique, c'est-à-dire un moyen de connaître, pour chaque pixel projeté, la couleur correspondante vue dans la salle. Pour cela, le système dispose d'une caméra matricielle en rotation. Nous pouvons donc projeter une image (image projecteur) et capturer des images de la scène à différents angles de rotation (images caméra) pour voir le résultat de la projection dans presque toute la salle.

Comme expliqué Section 2.4.1, le calibrage géométrique du système Catopsys sort du cadre de cette thèse. Afin de présenter une méthode de compensation complète, nous présentons tout de même une méthode de mapping permettant de réaliser un calibrage géométrique simple. Le mapping géométrique consiste à établir une correspondance entre l'image projecteur et les images caméra. L'objectif est d'obtenir une image projecteur mesurée c'est-à-dire une image donnant, pour chaque pixel de l'image projecteur, la couleur correspondante vue par la caméra dans la pièce.

Nous considérons que la caméra utilise toujours les mêmes pas de rotation. Pour obtenir un mapping géométrique, nous projetons un point (i.e. une image projecteur noire sauf en un pixel, blanc) et nous récupérons les images caméra de cette scène. Nous retrouvons ainsi à quel pixel de quelle image caméra correspond le pixel projecteur. En pratique, un pixel projecteur peut correspondre à plusieurs pixels d'une ou plusieurs images caméra ; il suffit alors de calculer une moyenne des couleurs caméra pour obtenir la couleur projecteur mesurée. Théoriquement, nous pouvons ainsi obtenir un mapping pour tous les points de l'image projecteur. En pratique, nous nous contentons de quelques points et nous interpolons les données manquantes. Nous pouvons même précalculer, pour chaque pas de rotation, une carte donnant pour chaque pixel de l'image caméra, le pixel projecteur correspondant et le facteur de pondération du moyennage. Ainsi, calculer une image projecteur mesurée revient à initialiser une image projecteur, puis à parcourir tous les pixels caméra en ajoutant à chaque fois la couleur au pixel projecteur correspondant affectée de la pondération associée (voir Fig. 7.4). Ceci implique que tout pixel caméra doit correspondre à au plus un pixel projecteur. En pratique, cette limitation n'est pas un problème car la caméra a vocation à mesurer tous les pixels projecteur. Pour cela, nous nous efforçons d'avoir une correspondance 1 pixel projecteur - n pixels caméra, ce qui nous permet bien d'attribuer, à chaque pixel caméra, un pixel projecteur au plus.

7.5.2 Calibrage de la caméra

Le calibrage radiométrique d'une caméra est détaillé Section 4. Nous rappelons ici les deux perturbations majeures de l'acquisition caméra et donnons quelques détails permettant d'appliquer concrètement

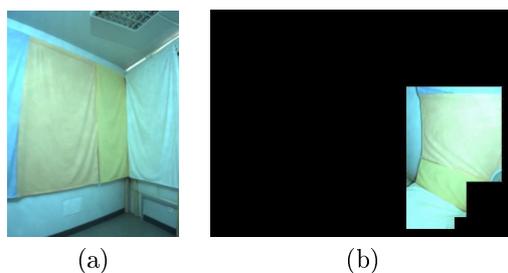


FIG. 7.4 – Image caméra (a) et image projecteur (partielle) correspondante (b).

les méthodes déjà présentées au système Catopsys.

Réponses du capteur

La couleur retournée par une caméra n'est pas toujours proportionnelle à l'intensité de la lumière perçue (voir Fig. 7.5 (a)). De plus, si cette lumière est trop intense, le capteur sature. Il existe des méthodes (par exemple, [DM97]) permettant de calibrer la réponse d'intensité du capteur (g) et de capturer des images à grande dynamique (HDR) sans saturation. Pour cela, ces méthodes nécessitent d'utiliser uniquement des images d'une même scène avec des temps d'acquisition différents. Notons cependant que ces méthodes traitent chaque canal de couleur indépendamment. Nous pouvons étalonner les canaux entre eux (réponses spectrales) en pondérant leur réponse d'intensité à partir d'un blanc de référence.

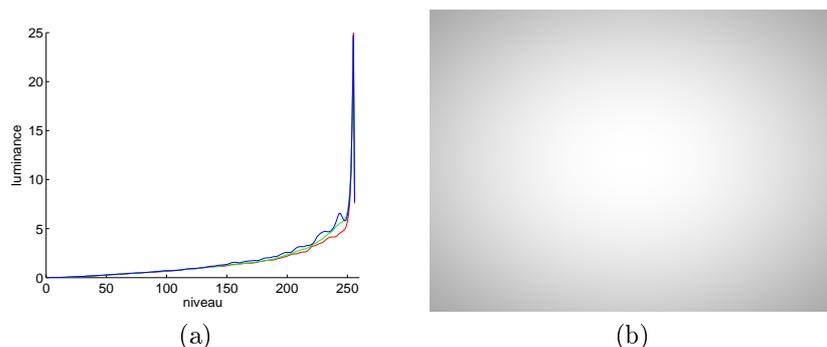


FIG. 7.5 – Réponse d'intensité (a) et vignetage (b) d'une caméra couleur équipée d'un grand-angle.

Cette méthode est tout à fait adaptée au système Catopsys. En effet, la caméra est contrôlée par l'ordinateur. Celui-ci peut donc faire varier les durées d'exposition et ainsi estimer la réponse d'intensité. Enfin, en plaçant une mire dans la pièce, nous obtenons le blanc de référence qui permet l'étalonnage couleur (il faut juste préciser où se trouve la mire sur l'image caméra).

Vignetage

Le vignetage est à l'origine du fameux effet «coins noirs» visible sur les images issues de caméra ou d'appareil photo. Le vignetage est en partie dû à la géométrie du système optique. En effet, la lumière pouvant atteindre le capteur est plus faible aux bords qu'au centre car l'ouverture du système optique y est plus petite. Il existe plusieurs modèles caractérisant le vignetage. Ici, nous proposons d'utiliser le modèle de Goldman-Chen [GC05] qui est un modèle polynômial à 5 paramètres.

Caractériser le vignetage caméra revient donc à déterminer le facteur d'atténuation (u) en fonction du pixel caméra (voir Fig. 7.5 (b)). Le système Catopsys dispose de tous les éléments pour résoudre ce problème. En effet, il permet d'afficher un point, via le projecteur, et de mesurer ce point en plusieurs pixels caméras, via la rotation de la caméra. Dans la salle de projection, le point produit toujours la même lumière mais sur les images caméra, le pixel atteint est différent. Le vignetage et donc la couleur retournée peuvent également varier, uniquement à cause du vignetage. Ainsi, en considérant suffisamment de points et donc de pixels caméras, nous obtenons un ensemble de données suffisant pour déterminer les paramètres du modèle de vignetage de la caméra (par exemple, par optimisation selon la méthode de Levenberg-Marquardt).

7.5.3 Calibrage de la projection

Avec le calibrage géométrique et le calibrage caméra, nous disposons d'une fonctionnalité d'acquisition relativement fidèle de la radiométrie réelle. Cette fonctionnalité prend en entrée une image projecteur et retourne une image projecteur mesurée, HDR, et dont les perturbations de la caméra ont été corrigés. En d'autres termes, cette fonctionnalité inverse l'équation 7.4 pour donner les couleurs d des pixels projecteur.

Il s'agit maintenant d'estimer les composantes restantes du modèle radiométrique, celles relatives à la projection. L'idée essentielle de la méthode proposée ici est de décorréler les réflexions multiples des autres composantes. Pour cela, nous utilisons une méthode de mesure de la lumière réfléchi directement (du projecteur vers la caméra), ce qui permet d'annuler l'influence des réflexions multiples et donc de ramener l'équation 7.3 à :

$$D_\lambda = C_\lambda$$

Il est alors possible d'estimer w puis v sans l'influence des réflexions multiples qui sont estimées dans un dernier temps.

Lumière réfléchi directement

La lumière réfléchi directement est la lumière que verrait la caméra s'il n'y avait pas de réflexions multiples c'est-à-dire la lumière émise par le projecteur et réfléchi une seule fois, dans la direction de la caméra.

L'acquisition de la lumière réfléchi directement est abordée Section 6.4.1. Rappelons que nous utilisons la méthode proposée dans [NKGR06]. Cette méthode nécessite un système projecteur-caméra. Elle permet de séparer la lumière vue par la caméra en une composante réfléchi directement et une composante réfléchi indirectement d'une scène éclairée uniformément par le projecteur. Elle consiste à projeter un damier (où les carreaux alternent entre la couleur d'éclairage et le noir). Un point de la salle correspondant à un pixel d'un carreau noir n'est pas éclairé directement par le projecteur. Donc, la lumière correspondante, capturée par la caméra est exclusivement de la lumière réfléchi indirectement. En répétant ceci avec un damier différent, par exemple dont les carreaux sont décalés, nous obtenons la lumière réfléchi indirectement au niveau de chaque pixel. Finalement, nous calculons la lumière réfléchi directement d'après les carreaux colorés : ici, la lumière est la somme de la composante réfléchi directement et de la composante réfléchi indirectement. Comme la composante réfléchi indirectement est désormais connue, nous retrouvons la composante réfléchi directement (voir Fig. 7.6).

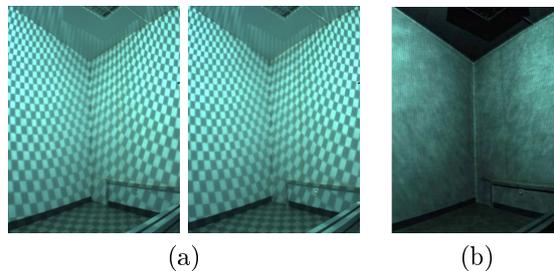


FIG. 7.6 – Acquisition de la lumière réfléchi directement. Projection de damiers (a). Lumière réfléchi directement (b).

En théorie, la méthode fonctionne en projetant deux images : un damier et son dual. En pratique, nous obtenons un meilleur résultat en projetant un plus grand nombre d'images. Dans notre implémentation, nous projetons des damiers dont les carreaux font 6 pixels de côté et nous les décalons de 3 pixels selon l'une ou l'autre des deux dimensions, ce qui implique donc de déterminer 16 images projecteur mesurées.

Mélange inter-canal

La méthode de mesure de la lumière réfléchi directement permet d'utiliser la méthode proposée dans [NPGB03] pour déterminer v . En reprenant les notations de la section 7.4 où (r, g, b) est le système de couleurs initial et (R, G, B) le système de couleurs de la caméra :

$$a = \begin{bmatrix} a_r \\ a_g \\ a_b \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_r \\ b_g \\ b_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_r(a_r) \\ w_g(a_g) \\ w_b(a_b) \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} 1 & v_{Rg} & v_{Rb} \\ v_{Gr} & 1 & v_{Gb} \\ v_{Br} & v_{Bg} & 1 \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} c_R \\ c_G \\ c_B \end{bmatrix} = vb$$

Pour trouver les coefficients de v , par exemple v_{Gr} et v_{Br} , nous projetons deux images en faisant varier un seul canal. Par exemple, en faisant varier le canal rouge du pixel projecteur, nous obtenons :

$$a^{(1)} = \begin{bmatrix} a_r^{(1)} \\ a_g^{(1)} \\ a_b^{(1)} \end{bmatrix}, \quad a^{(2)} = \begin{bmatrix} a_r^{(2)} \\ a_g^{(1)} \\ a_b^{(1)} \end{bmatrix}$$

Le pixel mesuré correspondant c vérifie :

$$\begin{bmatrix} c_R^{(1)} \\ c_G^{(1)} \\ c_B^{(1)} \end{bmatrix} = v \begin{bmatrix} b_r^{(1)} \\ b_g^{(1)} \\ b_b^{(1)} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} c_R^{(2)} \\ c_G^{(2)} \\ c_B^{(2)} \end{bmatrix} = v \begin{bmatrix} b_r^{(2)} \\ b_g^{(1)} \\ b_b^{(1)} \end{bmatrix}$$

D'après la définition de v :

$$\begin{aligned} \Delta c_R &= \Delta b_r \\ \Delta c_G &= v_{Gr} \Delta b_r \\ \Delta c_B &= v_{Br} \Delta b_r \end{aligned}$$

Ce qui équivaut à :

$$v_{Gr} = \frac{\Delta c_G}{\Delta c_R}, \quad v_{Br} = \frac{\Delta c_B}{\Delta c_R}$$

C'est-à-dire que nous calculons v_{Gr} et v_{Br} d'après la variation de couleur mesurée. Les autres coefficients de v se calculent de façon similaire, en faisant varier le canal vert puis le canal bleu de l'image projecteur. Enfin, notons que le calcul est indépendant d'un pixel à un autre et que donc toutes les matrices v peuvent être calculées en projetant uniquement 4 images (4 images de lumière réfléchie directement soit 64 images de damiers avec notre implémentation).

Non-linéarité

Pour déterminer w , nous utilisons, ici aussi, la méthode proposée dans [NPGB03], appliquée sur des acquisitions de lumière réfléchie directement. La fonction w_λ peut être estimée en projetant toutes les valeurs de a_λ . En effet, si nous projetons a_λ , nous pouvons capturer c_λ et calculer $b = v^{-1}c$. Comme $b_\lambda = w_\lambda(a_\lambda)$, nous avons bien caractérisé w_λ pour a_λ . En projetant des images grises, nous pouvons obtenir w_r , w_g et w_b d'après les mêmes images. Pour réduire le nombre de projection-acquisitions, nous mesurons w_λ pour quelques valeurs uniquement et nous interpolons pour les valeurs manquantes (notre implémentation utilise 10 images soit 160 images de damiers).

Réflexions multiples

La dernière étape du calibrage consiste à déterminer la matrice H_λ où $H_{\lambda pq}$ est la proportion de lumière (du canal λ) qui, partant du point de la pièce atteint par le pixel projecteur p , est propagée dans la pièce jusqu'au point de la pièce atteint par le pixel projecteur q puis réfléchi vers la caméra. Nous obtenons ainsi une matrice donnant l'influence d'un point de la pièce sur un autre. Plus précisément, nous connaissons, les v , w et a , ce qui nous permet de calculer les c . De plus, la caméra nous donne les d ce qui nous permet de calculer, en utilisant l'équation 7.3, les matrices H_λ .

Il existe des méthodes optimisées pour acquérir ce genre de matrice [SD09, PML⁺09]. Par exemple, dans [SCG⁺05] Sen et al. proposent une méthode hiérarchique permettant de déterminer des régions indépendantes et donc de les traiter en parallèle. Dans notre implémentation, nous nous contentons de diviser l'image en groupes de pixels. Ainsi, pour mesurer $H_{\lambda pq}$, nous projetons une image dont les pixels du groupe p sont blancs et les autres pixels noirs. Avec la caméra, nous capturons ensuite la lumière complète (et non plus la lumière réfléchie directement) et nous retrouvons $H_{\lambda pq}$ d'après les pixels du groupe q . En fait, cette image permet d'obtenir $H_{\lambda pq}$ pour tous les q (voir Fig. 7.7). Notre implémentation regroupe les pixels en carrés de 25×25 pixels ce qui nécessite la projection-acquisition d'environ 2000 images.

7.6 Méthode de compensation radiométrique

La méthode de calibrage proposée dans la section précédente permet de déterminer les paramètres du modèle radiométrique caractérisant un système Catopsys particulier. Ceci nous permet de connaître comment une image donnée sera altérée lors de la projection. Nous nous intéressons maintenant au problème inverse : nous voulons faire apparaître une image donnée dans la salle, quelle image faut-il projeter pour cela ?



FIG. 7.7 – Mesure des réflexions multiples. Nous éclairons un groupe de points et nous mesurons l'éclairage des autres groupes dû aux réflexions multiples.

La méthode de compensation proposée ici consiste à inverser le modèle radiométrique. Plus précisément, il s'agit tout d'abord de restreindre l'image désirée à une image affichable par le système puis à compenser successivement les réflexions multiples, le mélange inter-canal et la non-linéarité.

7.6.1 Tone mapping inverse

D'après le modèle radiométrique et la méthode de calibrage, le projecteur affiche des images définies dans $[0, 255]^3$ et la caméra retourne des images définies dans $D_r \times D_g \times D_b \in \mathbb{R}^{+3}$ (images HDR). Par conséquent, seules les images définies dans $D_r \times D_g \times D_b$ peuvent être compensées en inversant le modèle. La première étape de la compensation consiste donc à convertir l'image désirée dans le domaine affichable, c'est-à-dire, en général, de $[0, 255]^3$ vers $D_r \times D_g \times D_b$. Il s'agit du problème classique de tone mapping inverse, i.e. convertir une image LDR (à basse dynamique) en image HDR (à haute dynamique).

Diverses solutions à ce problème ont été proposées [BLD⁺07, RTS⁺07]. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque le tone mapping prend en compte non seulement le modèle radiométrique utilisé pour la compensation, mais également le contenu de l'image à traiter [WSOS05, AOSS06]. Cependant, ce genre de méthodes est difficilement applicable pour le système Catopsys car chaque image est traitée indépendamment des autres, ce qui ne permet pas la cohérence temporelle nécessaire aux applications interactives visées. De plus, ces méthodes sont généralement basées sur un algorithme d'optimisation, ce qui nécessite une grande quantité de calculs et risque donc de gêner l'interactivité du système.

Les travaux présentés dans [AFR⁺07] montrent qu'un simple redimensionnement linéaire de la dynamique donne généralement de bons résultats. C'est pourquoi nous avons utilisé cette méthode dans notre implémentation.

Déterminer la transformation linéaire à appliquer est assez problématique avec notre système. Le problème revient à trouver D_{min} et D_{max} telle que les images peuvent être transformées linéairement de $[0, 255]^3$ à $[D_{min}, D_{max}]^3$ et donner de bons résultats après compensation et projection. Il s'agit d'un compromis : si D_{min} et D_{max} sont proches, la dynamique est faible, s'ils sont éloignés, les images satureront rapidement après compensation. En réalité, le problème est même pire car la dynamique affichable commune à tous les pixels est nulle. Dans notre implémentation, nous utilisons la dynamique moyenne de tous les pixels. Des améliorations doivent être possibles en prenant en compte les variations locales et le contenu des images, avec les problèmes déjà évoqués (temps de calcul, cohérence temporelle).

7.6.2 Compensation des réflexions multiples

Une fois l'image à afficher convertie dans le domaine affichable du modèle radiométrique, nous pouvons calculer l'image de compensation correspondante, c'est-à-dire la réciproque selon le modèle radiométrique. Pour compenser les réflexions multiples, nous remarquons que l'équation 7.3 équivaut à :

$$C_\lambda = F_\lambda D_\lambda \tag{7.5}$$

où

$$F_\lambda = (I + H_\lambda)^{-1} = I - H_\lambda + H_\lambda^2 - \dots$$

car, de par la conservation de l'énergie, $\|H_\lambda\|_\infty < 1$.

Comme expliqué dans la section 7.5, les réflexions multiples sont caractérisées en considérant des groupes de pixels. Il faut donc établir une relation entre un groupe et les pixels correspondants. Nous définissons la valeur d'un groupe de D_λ par la somme des pixels mesurés correspondants. Ceci permet de calculer l'équation 7.5 et ainsi d'obtenir C_λ . Nous pouvons alors compenser les réflexions multiples en

pondérant chaque pixel de l’image désirée par la valeur du groupe correspondant de C_λ moyennée par le nombre de pixels du groupe.

Si nous utilisons directement la valeur des groupes de pixels, nous remarquons des discontinuités aux frontières des groupes. Pour limiter ce phénomène, nous réalisons préalablement un classique lissage de Gouraud [Gou71] sur les groupes.

7.6.3 Compensation intra-pixel

La dernière étape consiste à inverser l’équation 7.2 puis l’équation 7.1 avec

$$b = v^{-1}c, \quad a_\lambda = w_\lambda^{-1}(b)$$

Projeter les couleurs a doit faire apparaître, dans la salle, les couleurs d désirées compensant ainsi les perturbations radiométriques de la projection.

Contrairement à l’étape de calibrage, la compensation est réalisée, en-ligne, pour chaque image à projeter. Elle doit donc être effectuée le plus rapidement possible. Pour cela, nous pouvons pré-calculer v^{-1} et F pendant le calibrage. Si nous utilisons l’espace de couleurs RGB et qu’on appelle T (resp. N) le nombre de groupes (resp. de pixels), alors le calcul de F demande trois produits d’une matrice de taille $T \times T$ par un vecteur de taille T ainsi qu’un lissage de Gouraud. La compensation de v nécessite le produit d’une matrice de taille 3×3 par un vecteur de taille 3, pour chaque pixel (soit N produits). Enfin, compenser w_λ (pour chaque canal de chaque pixel) revient à inverser une fonction discrétisée c’est-à-dire à chercher un encadrement et à interpoler les valeurs réciproques.

7.7 Résultats et analyse

Nous avons testé notre méthode sur une implémentation du système Catopsys composée d’un projecteur DLP SXGA et d’une caméra XGA. Notre salle de test présente des murs de peinture blanche assez spéculaire. Nous y avons placé quelques morceaux de tissu colorés. Les méthodes de calibrage et de compensation ont été implémentées sur CPU sans parallélisme et testées sur un processeur Intel® Core™ 2 Duo E6600 2,4 GHz.

L’étape de calibrage nécessite environ 6 heures. Le temps est principalement consacré aux acquisitions caméra. En comparaison, le temps de calculs est négligeable. En pratique, la durée du calibrage n’est pas gênante car la méthode est automatisée et peut se dérouler pendant un moment d’inutilisation. De plus, le calibrage doit être mis à jour uniquement lorsque le système ou la salle sont modifiés, ce qui est censé être exceptionnel.

La compensation est réalisée à environ 5 images par seconde. Le temps de calcul est principalement consacré à compenser les réflexions multiples et notamment au passage pixel-groupe-pixel. Une implémentation GPU devrait améliorer ce résultat de façon significative grâce aux fonctionnalités de texturage, de lissage et de parallélisme que ce genre de calculateur apporte.

Pour analyser les images obtenues, nous définissons l’*erreur* d’une image mesurée par $\frac{1}{N} \sum_p \|c_p - \hat{c}_p\|_2^2$ où N est le nombre de pixels et c_p (resp. \hat{c}_p) la couleur, dans l’espace métrique $L^*u^*v^*$, du pixel p de l’image désirée (resp. de l’image mesurée).

Une illustration du résultat de la compensation sur une scène de réalité mixte est donnée Fig. 7.8. L’image à projeter (a) est une vue panoramique d’un paysage de montagne. Nous avons fixé des morceaux de tissus rose, jaune et blanc en un coin de la salle de test. Sans compensation radiométrique, la projection est très perturbée et l’image vue par l’utilisateur (b) est très différente de l’image souhaitée. Avec compensation des mélanges de couleurs et des non-linéarités (c), la projection est plus fidèle mais l’influence des réflexions multiples reste visible dans les coins de la salle. La compensation complète (d) atténue ce phénomène et donne un résultat relativement satisfaisant. Notons, sur cette dernière image, une diminution du contraste, due à la compensation des réflexions multiples. Ce phénomène est inhérent à la compensation des réflexions multiples et dépend beaucoup de l’image initiale. Une solution serait certainement d’intégrer une méthode d’optimisation de l’ensemble de l’image selon des critères de contraste mais ceci impliquerait les problèmes de cohérence temporelle déjà évoqués.

Les résultats présentés Fig. 7.8 ont été obtenus avec un prototype basse définition du système de projection. En effet, la zone utile de l’image projecteur est de seulement 1000×1000 pixels. De plus cette zone est répartie dans toute la salle (murs, sol et plafond). Nous sommes donc loin des hautes définitions des CAVÉs classiques de plus de 1000×1000 pixels par face (mur, sol ou plafond). Un système Catopsys avec une zone utile de 2000×2000 pixels est actuellement à l’étude et devrait donner des résultats beaucoup plus intéressants.

Fig. 7.9 est donnée l’évolution de l’erreur, sur une ligne de l’image, sans compensation, avec compensation des premières réflexions et avec compensation complète. Vers le pixel 110, la ligne passe d’un

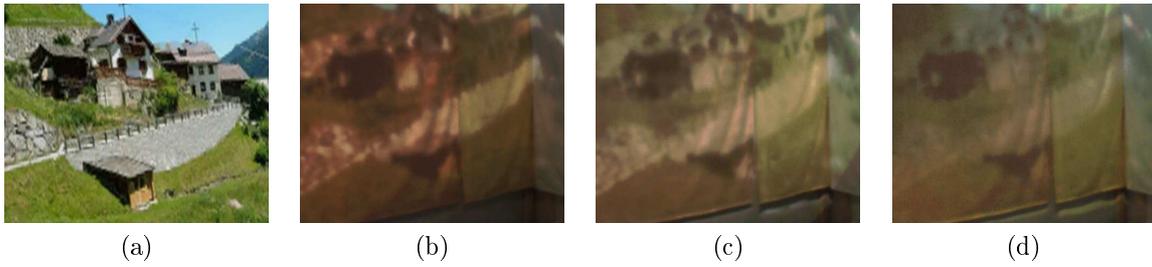


FIG. 7.8 – Résultats de la compensation radiométrique de la projection. Simulation de l’environnement souhaité (a), photo de l’environnement vu par l’utilisateur sans compensation (b) (erreur = 0.023), avec compensation de la première réflexion (c) (erreur = 0.019) et avec compensation complète (d) (erreur = 0.015). Ces résultats ont été obtenus avec un prototype basse définition du système de projection.

morceau de tissu coloré à un autre, moins bien compensé. Nous constatons que si l’influence des matériaux n’est pas totalement compensée, l’erreur est globalement plus faible avec la compensation complète, notamment dans les zones fortement perturbées.

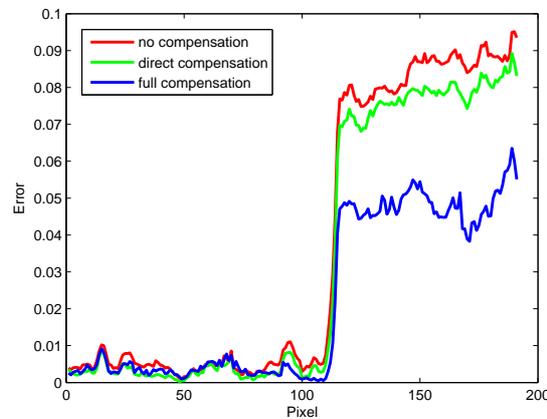


FIG. 7.9 – Erreur de la projection sans compensation (rouge), avec compensation de la première réflexion (vert) et avec compensation complète (bleu) sur une ligne de l’image.

7.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode de compensation radiométrique complète, automatisée et adaptée au système Catopsys. Nous avons détaillé le processus radiométrique de projection-acquisition, depuis le projecteur jusqu’à la caméra, puis nous avons proposé un modèle radiométrique de ce processus. Concernant la projection, le modèle tient compte des réflexions multiples (entre les pixels de l’image), des mélanges inter-canaux (entre les canaux d’un pixel) et des non-linéarités (au sein d’un canal d’un pixel). Concernant l’acquisition, le modèle tient compte de la réponse d’intensité, de la réponse spectrale et du vignettage de la caméra.

À partir de ce modèle, nous avons proposé une méthode complète de calibrage. Cette méthode consiste tout d’abord à établir un mapping géométrique entre la caméra et le projecteur. Puis, elle caractérise les composantes du modèle radiométrique relatifs à la caméra, ce qui permet de corriger les images données par la caméra. Enfin, le calibrage de la projection consiste à caractériser les composantes restantes du modèle en annulant l’influence des réflexions multiples puis à caractériser ces réflexions multiples dans une dernière étape.

Enfin, nous avons proposé une méthode de compensation permettant de calculer l’image à projeter pour afficher une image donnée dans la pièce. Cette méthode revient à calculer l’inverse du modèle sur l’image désirée. Cette compensation peut être utilisée comme post-traitement d’applications de réalité mixte pour corriger automatiquement les perturbations de la projection.

Ces méthodes permettent effectivement d’améliorer la qualité de la projection mais, comme prévu au Chapitre 6, les réflexions multiples inhérentes au système sont très contraignantes.

Enfin, notons quelques améliorations possibles au niveau du temps de traitement. En effet, nous pouvons calibrer les réflexions multiples selon une approche hiérarchique, ce qui devrait réduire le nombre d'acquisitions nécessaires tout en améliorant la précision des résultats. Concernant la compensation, une implémentation sur GPU devrait permettre un traitement temps-réel indispensable aux applications de réalité mixte auxquelles le système Catopsys se destine.

Chapitre 8

Étude géométrique de la projection

8.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous nous sommes intéressés à la radiométrie du système Catopsys, notamment à caractériser les perturbations intervenant au cours du processus de projection et d'acquisition. Nous avons pu alors mettre au point une méthode permettant de compenser les perturbations et d'afficher réellement les images voulues.

Dans les chapitres restant, l'objectif est de produire les images à afficher de façon optimisée pour le système Catopsys. Pour cela, il est tout d'abord nécessaire d'étudier les particularités géométriques du système qui pourront ensuite être exploitées. Ceci est l'objet du présent chapitre.

Le problème consiste principalement à répondre à ces deux questions :

- quelle est la position 3D atteinte, dans la pièce, lors de la projection par un pixel projecteur donné ?
- quel est le pixel qui se projette vers une position donnée dans la pièce ?

Plus précisément, l'objectif est de caractériser, dans les deux sens, le parcours projecteur-miroir-pièce de la lumière, c'est-à-dire, en quelque sorte, les rayons primaires d'un algorithme de rendu par lancer de rayons (voir le Chapitre 9). Enfin, notons qu'un problème sous-jacent est qu'il faut reconstruire la géométrie de la pièce. Dans le cadre du projet Catopsys, une grande partie de ce travail fait l'objet d'un autre sous-projet. Celui-ci nous fournit la géométrie de la pièce ainsi que les caractéristiques géométriques du projecteur et du miroir [ASLZ08].

Nous considérons ici que le miroir est hémisphérique.

8.2 Travaux précédents

Le problème de calibrage géométrique énoncé précédemment est complexe car il nécessite de caractériser toute la chaîne de projection-acquisition : projecteur, miroir convexe, pièce, caméra. En effet, les systèmes projecteur-caméra utilisent habituellement un mapping entre ces deux éléments (voir, par exemple, Section 7.5.1). Ce mapping est obtenu en projetant successivement des points et en repérant leur position au niveau de la caméra. La déformation de l'image visible peut alors être corrigée en inversant le mapping. Cette méthode n'est cependant pas suffisante pour le système Catopsys car elle ne fournit pas la géométrie de la pièce et car elle ne permet pas de faire le lien avec l'espace 3D de la pièce (uniquement avec la projection sur le «plan caméra» de la pièce).

Dans [YT08], Yuen et Thibault proposent un système projecteur-miroir convexe-écran-caméra, proche du système Catopsys. Cependant, leur système utilise un écran particulier, un dôme hémisphérique, pour une projection immersive de réalité virtuelle. Le calibrage géométrique est réalisé par un mapping classique tel qu'expliqué au paragraphe précédent. En effet, ceci est suffisant pour leurs applications de réalité virtuelle, qui ne nécessitent pas explicitement la géométrie de l'environnement réel.

Dans [MP04], Micusik et Pajdla abordent le problème du calibrage géométrique d'un système caméra-miroir convexe. Analytiquement, le chemin caméra-miroir-environnement est simple à résoudre mais le chemin inverse (environnement-miroir-caméra) est plus compliqué car dans ces conditions, le système n'est pas central, ce qui rend la réflexion par le miroir difficile à caractériser. Les auteurs proposent une méthode de résolution numérique ainsi qu'une méthode de reconstruction 3D par points de correspondance entre deux caméras catadioptriques.

Enfin, dans [ASLZ08], Astre et al. présentent la méthode de calibrage géométrique mise au point pour le système Catopsys. Leur méthode consiste à calibrer approximativement les différents éléments du système (par exemple en supposant la projection centrale et la caméra en rotation pure), puis à effectuer un raffinement global en levant les contraintes imposées par les hypothèses précédentes. La reconstruction

3D est ensuite obtenue par projection-acquisition de points et calcul d'intersection des rayons caméra et projecteur correspondant.

8.3 Projection

Nous cherchons ici à caractériser analytiquement le parcours de la lumière, du pixel projecteur à la première intersection avec la pièce en passant par le miroir. Pour cela, nous connaissons les caractéristiques géométriques de la pièce, du miroir et du projecteur.

8.3.1 Notations

Le principe du système de projection est rappelé Fig. 8.1. Chaque pixel de l'image donne, par projection de centre P , un rayon qui est réfléchi par le miroir (hémisphère de centre M) et interrompu par la pièce (mur, sol, plafond. . .).

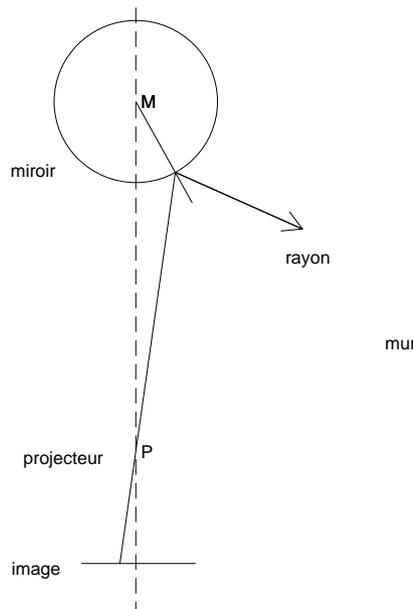


FIG. 8.1 – Principe du système de projection CATOPSYS (le miroir réel est hémisphérique).

Les différents repères utilisés pour faire le lien entre l'image projetée et le monde 3D sont présentés Fig. 8.2.

Le repère $R_{monde} = (x, y, z, O_{monde})$ est le repère de référence. Il permet de définir l'environnement de projection (miroir, murs, projecteur) et les éléments à simuler (lumières, objets. . .).

Le repère $R_{projecteur} = (X, Y, Z, P)$ est associé au projecteur. Il est défini par rapport au repère monde. Le point P est le centre de projection et le vecteur Z son axe de projection. Le vecteur Y pointe vers le haut de l'image projetée («up vector»).

Le repère $R_{image} = (u, v, O_{image})$ est le repère image (2D) associé au projecteur. Il est défini par rapport au repère projecteur : parallèle au plan (X, Y) , à une distance f de P , translaté de (u_0, v_0) et redimensionné de (t_u, t_v) .

8.3.2 Génération des rayons de projection

Il s'agit de caractériser le rayon lumineux émis par le projecteur pour un pixel A (voir Fig. 8.3).

Un rayon est défini par une origine et une direction de propagation. Ici, le centre de projection P peut être considéré comme l'origine du rayon.

La direction est donnée par le vecteur reliant la position (u_a, v_a) de A dans R_{image} au centre de projection P . Nous cherchons donc \vec{AP} dans $R_{projecteur}$. Dans ce repère, P est l'origine et A a pour coordonnées (X_A, Y_A, Z_A) . Par définition,

$$\vec{AP}_{projecteur} = P - A = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} \quad (8.1)$$

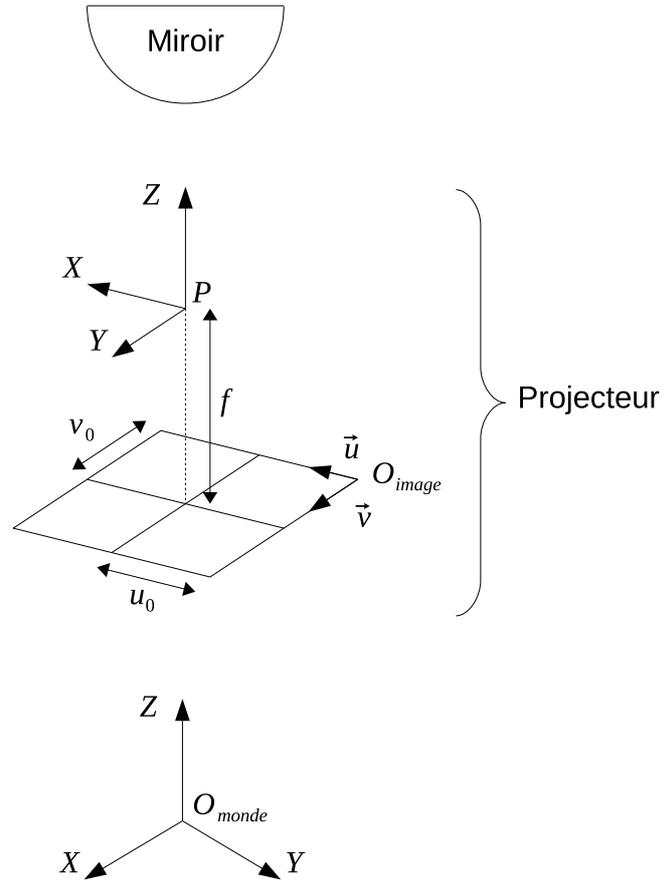


FIG. 8.2 – Repère image, repère projecteur et repère monde caractérisant la projection.

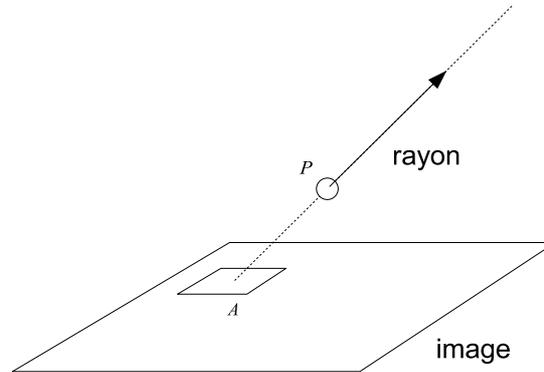


FIG. 8.3 – Génération d'un rayon de projection. Un pixel A est projeté via un rayon d'origine P et de direction $\vec{AP}/\|\vec{AP}\|$.

Ce qui donne, d'après les repères définis précédemment,

$$\begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_u & 0 & 0 \\ 0 & t_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_A \\ v_A \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ f \end{pmatrix} \quad (8.2)$$

Finalement, la direction du rayon dans R_{monde} s'obtient par le changement de repère

$$\vec{AP}_{monde} = (X \ Y \ Z) \vec{AP}_{projecteur} \quad (8.3)$$

8.3.3 Réflexion des rayons sur le miroir

D'après le principe de CATOPSYS, le projecteur est orienté vers le miroir. Une fois généré, un rayon de projection est donc réfléchi par le miroir, s'il le touche (voir Fig. 8.4).

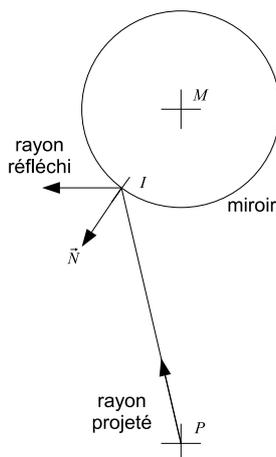


FIG. 8.4 – Réflexion d'un rayon sur le miroir. Un rayon est projeté depuis le centre de projection P , touche le miroir en I et est réfléchi selon la normale \vec{N} correspondante.

- En considérant le miroir comme une sphère de centre M , le problème revient à :
- calculer la première intersection I entre le rayon et la sphère (voir Annexe B) ;
 - calculer la normale $\vec{N} = \frac{\vec{MI}}{\|\vec{MI}\|}$ au miroir en I ;
 - calculer le rayon réfléchi par la surface de normale \vec{N} en I (voir Annexe B).

8.3.4 Intersection des rayons avec la pièce

Après réflexion éventuelle sur le miroir, un rayon de projection est finalement projeté dans la pièce. Comme nous disposons d'un modèle géométrique de la pièce (plans, triangles ou autres), le point atteint par le rayon peut alors être déterminé par un classique calcul d'intersection du rayon avec les primitives du modèle géométrique (voir Annexe B).

8.3.5 Implémentation

Les calculs décrits précédemment permettent de trouver la position dans la pièce atteinte par un pixel projecteur. Comme le nombre de pixels projecteur est relativement faible (de l'ordre de 10^6), il peut être judicieux de précalculer la position 3D de tous les pixels, une fois pour toutes.

Dans notre implémentation, ce précalcul est ensuite utilisé dans le pipeline du processeur graphique pour adapter le rendu d'une scène à l'affichage du système Catopsys, via la technique de cube mapping (voir Section 9.1).

Notons enfin qu'un mapping caméra-projecteur classique (voir Section 7.5.1) fournit également cette carte de positions 3D précalculée qui suffit pour des applications de réalité virtuelle mais pas de réalité mixte.

8.4 Projection inverse

Nous nous intéressons maintenant au problème inverse : trouver le pixel projecteur J passant par une position donnée A de la pièce, après réflexion sur le miroir sphérique de centre M . La difficulté réside dans le fait que le miroir induit une projection non centrale, c'est-à-dire que connaissant la position 3D A , nous ne savons pas, a priori, quel est le point de la surface du miroir dont la réflexion mènera à P , centre de projection du projecteur.

Notons qu'en utilisant un miroir hyperbolique dont le centre optique serait placé à la distance focale du projecteur, nous aurions un système central et le problème de la projection inverse serait simple. Malheureusement ceci n'est, en pratique, pas raisonnablement réalisable. En effet, la construction d'un tel miroir est techniquement délicate. De plus, les caractéristiques du miroir imposeraient des contraintes supplémentaires à la pièce utilisée. Enfin, l'installation du système devrait être réalisée de façon beaucoup plus précise donc contraignante.

8.4.1 Approche analytique

D'après le système de projection, le rayon initial a pour origine le centre de projection P et passe par J . Il est ensuite réfléchi par le miroir de centre M en un point I avant d'atteindre A . Comme la réflexion est facilement inversible (automorphisme), le problème revient à déterminer I (voir Fig. 8.5).

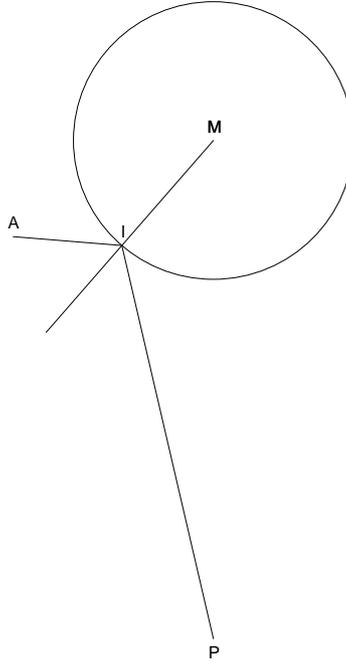


FIG. 8.5 – A est un point du monde par lequel passe le rayon émis depuis le centre de projection P passant par le pixel J et se réfléchissant sur le miroir de centre M en I .

Miroir hémisphérique

Au niveau du miroir, deux contraintes doivent être satisfaites. Première contrainte, le point I est sur le miroir. La distance de I au centre du miroir M est donc égale au rayon du miroir R . Seconde contrainte, au niveau du miroir, l'angle d'incidence et l'angle de réflexion du rayon par rapport à la normale sont égaux.

Soit $O = (MI) \cap (AP)$ (voir la figure 8.6).

Les deux contraintes précédentes s'écrivent donc :

$$\begin{cases} MI = R \\ \widehat{AIO} = \widehat{PIO} \end{cases} \quad (8.4)$$

L'idée de la démonstration suivante est d'exprimer ce problème en fonction d'une unique inconnue $\alpha = \widehat{AMI}$. Soit E (resp. F) le projeté orthogonal de I sur la droite (MA) (resp. (MP)). Nous avons :

$$\begin{cases} \widehat{MIE} + \widehat{EIA} + \widehat{AIO} = \pi \\ \widehat{MIF} + \widehat{FIP} + \widehat{PIO} = \pi \end{cases} \quad (8.5)$$

ce qui équivaut à :

$$\begin{cases} \widehat{AIO} = \pi - \widehat{MIE} - \widehat{EIA} \\ \widehat{PIO} = \pi - \widehat{MIF} - \widehat{FIP} \end{cases} \quad (8.6)$$

Comme $\widehat{AIO} = \widehat{PIO}$, nous avons $\widehat{MIE} + \widehat{EIA} = \widehat{MIF} + \widehat{FIP}$. L'équation 8.4 s'écrit donc :

$$\begin{cases} MI = R \\ \widehat{MIE} + \widehat{EIA} = \widehat{MIF} + \widehat{FIP} \end{cases} \quad (8.7)$$

Nous allons maintenant exprimer \widehat{MIE} , \widehat{EIA} , \widehat{MIF} et \widehat{FIP} en fonction de α . Comme MIE est un triangle rectangle en E :

$$\widehat{MIE} + \widehat{AMI} = \frac{\pi}{2}$$

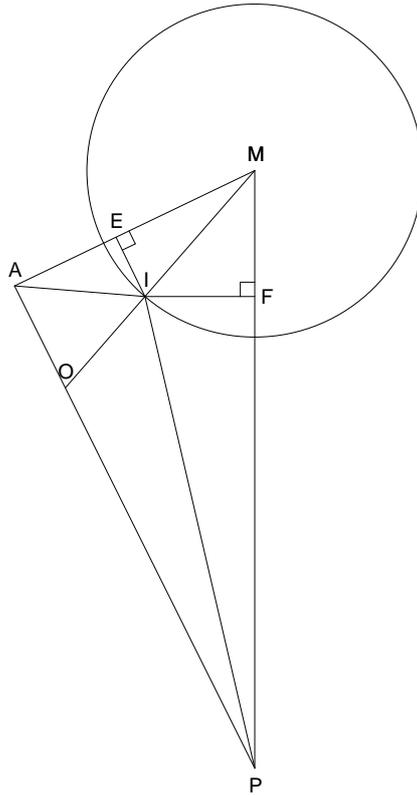


FIG. 8.6 – Le problème revient à trouver I tel que le rayon partant de P et se réfléchissant en I atteigne A .

donc :

$$\widehat{MIE} = \frac{\pi}{2} - \alpha$$

De plus, nous avons :

$$\tan \widehat{EIA} = \frac{EA}{EI} \quad (8.8)$$

Or :

$$EA = MA - ME = MA - MI \cos \alpha = MA - R \cos \alpha$$

et :

$$EI = MI \sin \alpha = R \sin \alpha$$

Donc, l'équation 8.8 implique :

$$\widehat{EIA} = \arctan \frac{EA}{EI} = \arctan \frac{MA - R \cos \alpha}{R \sin \alpha}$$

De la même façon, nous pouvons exprimer \widehat{MIF} et \widehat{FIP} en fonction de α . En effet :

$$\widehat{IMF} = \widehat{AMP} - \alpha$$

Comme MIF est un triangle rectangle en F :

$$\widehat{IMF} + \widehat{MIF} = \frac{\pi}{2}$$

c'est-à-dire :

$$\widehat{MIF} = \frac{\pi}{2} - \widehat{IMF} = \frac{\pi}{2} - (\widehat{AMP} - \alpha)$$

Enfin, nous avons :

$$\tan \widehat{FIP} = \frac{FP}{FI}$$

d'où :

$$\widehat{FIP} = \arctan \frac{FP}{FI} = \arctan \frac{MP - R \cos(\widehat{AMP} - \alpha)}{R \sin(\widehat{AMP} - \alpha)}$$

Finalement, en reprenant l'équation 8.7, nous ramenons le problème à trouver l'inconnue α telle que :

$$\widehat{AMP} - 2\alpha + \arctan \frac{MA - R \cos \alpha}{R \sin \alpha} - \arctan \frac{MP - R \cos(\widehat{AMP} - \alpha)}{R \sin(\widehat{AMP} - \alpha)} = 0 \quad (8.9)$$

Ceci n'est pas très simple à résoudre analytiquement. C'est pourquoi deux solutions algorithmiques sont présentées Section 8.4.2.

Projecteur

Connaissant le point de réflexion I du rayon sur le miroir, il reste à trouver le pixel J de l'image projecteur dont la projection de centre P passe par I (c'est à dire l'intersection du plan image projecteur et de la droite (IP)). Il s'agit donc du problème inverse à celui décrit dans la section 8.3.

Nous connaissons \vec{IP} dans R_{monde} . Nous obtenons \vec{IP} dans $R_{projecteur}$ en calculant :

$$\vec{IP}_{projecteur} = (X \ Y \ Z)^{-1} \vec{IP}_{monde} \quad (8.10)$$

Plaçons nous dans $R_{projecteur}$ (voir Fig. 8.7). Alors :

$$P = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad J = \begin{pmatrix} X_J \\ Y_J \\ Z_J \end{pmatrix}, \quad \vec{IP} = \begin{pmatrix} X_{\vec{IP}} \\ Y_{\vec{IP}} \\ Z_{\vec{IP}} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{PJ} = \begin{pmatrix} X_{\vec{PJ}} \\ Y_{\vec{PJ}} \\ Z_{\vec{PJ}} \end{pmatrix}$$

Comme $J \in (IP)$, il existe k tel que :

$$\vec{PJ} = k \vec{IP} \quad (8.11)$$

Nous avons donc, en particulier :

$$Z_{\vec{PJ}} = k Z_{\vec{IP}} \Leftrightarrow k = \frac{Z_{\vec{PJ}}}{Z_{\vec{IP}}} \quad (8.12)$$

Comme J est dans le plan image projecteur, nous avons :

$$Z_{\vec{PJ}} = f \quad (8.13)$$

D'où :

$$k = \frac{f}{Z_{\vec{IP}}} \quad (8.14)$$

De plus :

$$\vec{PJ} = J - P = \begin{pmatrix} X_J \\ Y_J \\ Z_J \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8.15)$$

Donc :

$$J = \frac{f}{Z_{\vec{IP}}} \begin{pmatrix} X_{\vec{IP}} \\ Y_{\vec{IP}} \\ Z_{\vec{IP}} \end{pmatrix} \quad (8.16)$$

Ce qui donne J dans $R_{projecteur}$. Soit (u_J, v_J) les coordonnées de J dans R_{image} . Alors :

$$J = \begin{pmatrix} t_u & 0 & 0 \\ 0 & t_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_J \\ v_J \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ f \end{pmatrix} \quad (8.17)$$

D'où :

$$\begin{pmatrix} u_J \\ v_J \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_u & 0 & 0 \\ 0 & t_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \left(J - \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ f \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 1/t_u & 0 & 0 \\ 0 & 1/t_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left(J - \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ f \end{pmatrix} \right) \quad (8.18)$$

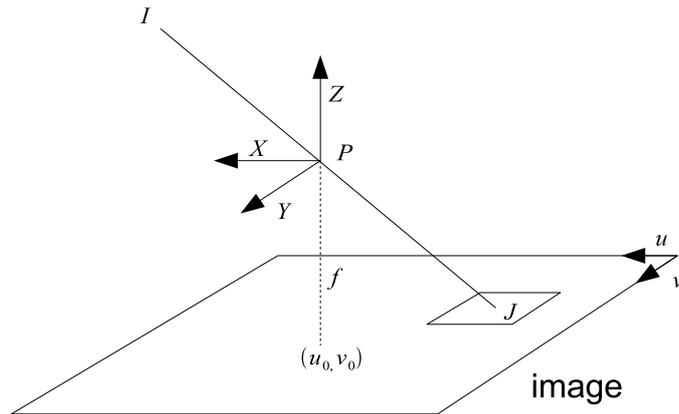


FIG. 8.7 – Connaissant I dans R_{monde} , nous cherchons J dans R_{image} .

8.4.2 Approche algorithmique

Nous présentons ici deux méthodes algorithmiques permettant de résoudre le problème de la projection inverse sans avoir à résoudre explicitement l'équation 8.9.

Première méthode

Cette méthode a été proposée dans [MP04]. L'idée est de trouver, par une recherche itérative, le pixel J de la carte projecteur qui génère le rayon passant le plus près du point A (voir Fig. 8.8).

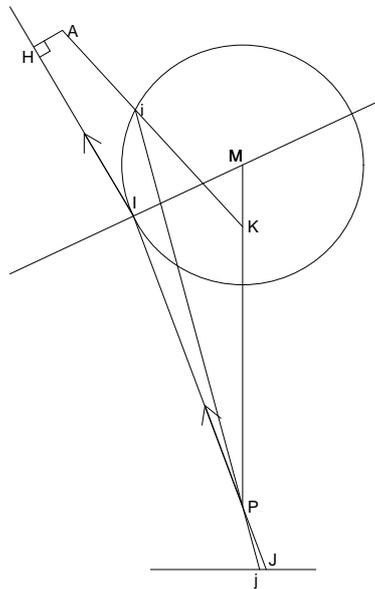


FIG. 8.8 – Première méthode de projection inverse : trouver le point j qui minimise la distance AH (i.e. le point J).

L'algorithme comporte deux étapes :

- déterminer, à partir de A , une première approximation j de J ;
- parcourir la carte itérativement jusqu'à trouver J .

Pour obtenir la première approximation, les auteurs proposent de fixer un foyer fictif K sur l'axe (MP) (plus précisément, ils proposent de fixer $MK = 0.64R$). Le miroir et le segment $[AK]$ se coupent en i . Le point i se projette sur l'image, via le centre de projection P , en j , première approximation de J .

En générant le rayon de projection de j , nous obtenons le rayon réellement émis dans la scène, après réflexion sur le miroir. Nous pouvons alors calculer la distance AH entre le rayon et le point A . La seconde étape de l'algorithme consiste à retenir successivement le point de l'image projecteur voisin du point considéré et dont le rayon de projection est le plus proche de A . La recherche se termine quand le point courant est celui qui génère le rayon le plus proche. La forme du miroir nous assure la convergence vers la solution cherchée et non vers un minimum local.

Seconde méthode

L'idée de cette méthode est d'inverser la réflexion afin de trouver, à partir de A , le point I dont la réflexion inverse passe par P . Le critère de recherche est ici l'angle entre le rayon réfléchi et la direction \vec{IP} .

Soit $R_{\vec{N}}$ la fonction qui associe à un vecteur, son vecteur réfléchi selon la normale \vec{N} . Le problème revient donc à trouver I vérifiant :

$$\frac{\vec{IA}}{\|\vec{IA}\|} = R_{\vec{N}} \left(\frac{\vec{PI}}{\|\vec{PI}\|} \right) \quad (8.19)$$

Comme $R_{\vec{N}}$ est inversible, nous pouvons calculer :

$$R_{\vec{N}}^{-1} \left(\frac{\vec{IA}}{\|\vec{IA}\|} \right) = R_{\vec{N}}^{-1} \circ R_{\vec{N}} \left(\frac{\vec{PI}}{\|\vec{PI}\|} \right) \quad (8.20)$$

La réflexion par un miroir est un automorphisme (voir Annexe B), donc $R_{\vec{N}}^{-1} = R_{\vec{N}}$ et $R_{\vec{N}}^{-1} \circ R_{\vec{N}} = id$. L'équation précédente équivaut alors à :

$$R_{\vec{N}} \left(\frac{\vec{IA}}{\|\vec{IA}\|} \right) = \frac{\vec{PI}}{\|\vec{PI}\|} \quad (8.21)$$

Ce qui signifie simplement que trouver le rayon qui part de P , se réfléchit en I et atteint A revient à trouver le rayon qui part de A , se réfléchit en I et atteint P .

La méthode consiste alors à trouver le point I qui vérifie l'équation 8.21. Pour cela, nous considérons, comme pour la méthode précédente, un foyer fictif K sur l'axe (MP) . Soit i le point d'intersection de $[AK]$ et du miroir. L'algorithme se résume à une recherche par dichotomie de K minimisant l'angle entre $R_{\vec{N}_i}(i\vec{A})$ et \vec{Pi} où \vec{N}_i est la normale au miroir en i (voir Fig. 8.9).

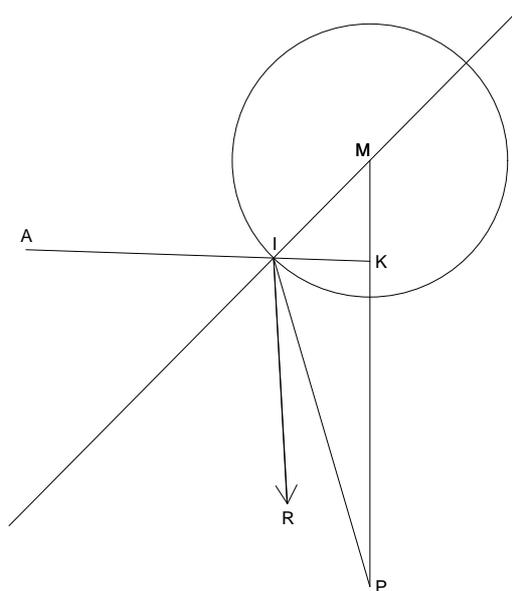


FIG. 8.9 – Seconde méthode de projection inverse : trouver le point K qui minimise l'angle entre \vec{R} et \vec{IP} .

Comparaison

Les deux algorithmes de projection inverse présentés permettent de trouver le pixel projecteur dont la projection passe le plus près d'une position donnée dans l'espace monde 3D. Lors de nos tests au sein des méthodes de rendu présentées au Chapitre 9, la précision et les temps de calculs obtenus selon les deux algorithmes sont globalement comparables. La principale différence réside dans le fait que le premier algorithme travaille dans l'espace image du projecteur alors que le second travaille dans l'espace monde. Cette différence induit un comportement différent des deux algorithmes, plus adapté à des situations différentes.

Concernant la précision de calcul, le premier algorithme permet d'obtenir un résultat au pixel près alors que le second algorithme permet également une précision réglable, éventuellement inférieure au pixel.

Concernant le coût de calcul, le premier algorithme considère des pixels voisins, jusqu'à converger vers la meilleure solution. L'algorithme est donc plus coûteux lorsque plus de pixels doivent être considérés, par exemple, lorsque l'image projecteur est de plus grande définition ou que l'approximation initiale donnée par le foyer fictif est trop imprécise (zone de grande déformation du miroir). Au contraire, le second algorithme introduit un surcoût initial plus important mais se comporte mieux dans ces situations.

8.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé géométriquement le système de projection. Le parcours de la lumière depuis le projecteur jusqu'à la pièce est simple à caractériser et à utiliser. Un précalcul sur toute l'image projecteur peut notamment être effectué et permettre d'accélérer le rendu et l'affichage. Le calibrage d'un système réel est beaucoup plus délicat et sort du cadre de cette thèse. Ici, nous considérons donc acquise la géométrie de la pièce et du système. Ceci est, en effet, indispensable pour des applications de réalité mixte. Le classique mapping des systèmes caméra-projecteur ne permet lui que des applications de réalité virtuelle.

Nous avons également caractérisé la projection inverse, c'est-à-dire trouver le pixel passant, après projection, par un point donnée de la pièce. Le miroir rend ce problème difficile à résoudre analytiquement, c'est pourquoi nous avons présenté deux méthodes de résolution algorithmique. La première, proposée par Micusik et Pajdla, consiste à chercher itérativement le pixel projecteur qui, une fois projeté, passe au plus près du point donné. La seconde, que nous proposons, consiste à chercher, par dichotomie, le point de réflexion, sur le miroir, qui génère le rayon dirigé vers le projecteur. Notons, enfin, que la projection inverse est une application de l'espace 3D continu dans l'image projecteur 2D discrète, ce qui implique, d'une part, une approximation au pixel près de la solution et, d'autre part, que nous ne pouvons pas précalculer la projection inverse pour tous les points de l'espace 3D.

Chapitre 9

Simulation d'éclairage

9.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié géométriquement la projection d'une image par le système Catopsys. L'objectif est maintenant de mettre au point une méthode de rendu d'images adaptée au système. Cette méthode s'intègre dans la chaîne de traitement présentée Section 2.4.1. Notons que nous nous plaçons dans le cadre de la réalité mixte, c'est-à-dire que la scène à simuler est constituée de la pièce réelle (obtenue lors de la reconstruction 3D) dont certaines caractéristiques (lumières, matériaux...) ont été modifiées (voir le Chapitre 10). Nous considérons ici que les objets proviennent de la reconstruction de la pièce réelle; l'intégration d'objets virtuels est traitée au Chapitre 10. Ce cadre de travail permet d'imaginer des méthodes de simulation d'éclairage assez originales.

Le premier problème à traiter est la classique simulation d'éclairage. Nous ne sommes cependant pas tout à fait dans le cadre habituel consistant à calculer l'image retournée par un capteur placé dans une scène comprenant des objets, des matériaux et des sources de lumière. En effet, pour Catopsys, il s'agit de calculer l'image qui, une fois projetée, simule la scène au capteur (la caméra ou l'utilisateur). Grâce au calibrage géométrique nous savons quel point de l'espace 3D est atteint par un pixel projecteur et comment ce point est placé par rapport à la caméra. Nous pouvons alors calculer, par un rendu classique, la couleur que doit voir la caméra en ce point et donc que le projecteur doit émettre (voir Fig. 9.1).

Les méthodes de rendu habituelles sont donc applicables, à la différence que les rayons de vue primaires ne correspondent pas à une caméra virtuelle (par exemple, pinhole). En effet, les rayons primaires sont ici les rayons partant du point de vue (correspondant à l'utilisateur du système) et dirigés vers les positions de la pièce données par le calibrage géométrique. Notons que nous obtenons, de cette façon, toute l'image projecteur simulant la scène voulue et que les déformations géométriques du système de projection ainsi que l'aspect omnidirectionnel du point de vue sont automatiquement pris en compte.

Le second problème à traiter est de prendre en compte les particularités du système pour optimiser la méthode de simulation d'éclairage. Il s'agit principalement de profiter du fait que la reconstruction de la pièce est réalisée depuis l'unique point de vue de la caméra réelle. Ceci implique que, depuis la caméra, la pièce reconstruite ne contient pas de recouvrement d'objets. Ainsi, dans le cadre où nous nous plaçons (utilisateur à proximité de la caméra, scène de réalité mixte), cette propriété est préservée et peut être utilisée pour optimiser les méthodes de simulation.

Concernant les données d'entrée de la méthode de simulation, nous avons la scène de réalité mixte à simuler ainsi qu'une *carte projecteur* contenant les informations de calibrage géométrique (point 3D atteint par le pixel projecteur) et, éventuellement, des informations précalculées sur la scène à simuler (triangle 3D atteint, matériau correspondant...). Pour certaines méthodes de simulation présentées dans ce chapitre, nous pouvons même intégrer toutes les informations nécessaires pour simuler la scène dans la carte projecteur.

```
struct InfoPixel {
    Point3    _position; // position atteinte dans la pièce
    Vecteur3  _normale;  // normale à la surface
    Matériau  _matériau; // matériau de la surface
    double    _distance; // distance par rapport au miroir
    //...
};
```

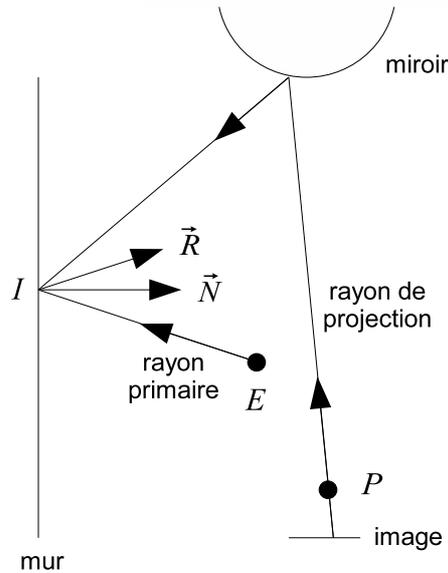


FIG. 9.1 – Génération des rayons primaires pour Catopsys. Le pixel à calculer est projeté en I dans la pièce. Le rayon primaire relie le point de vue E (correspondant à utilisateur du système) à I . Un lancer de rayons classique peut ensuite être réalisé (le rayon se réfléchit en \vec{R} selon la normale \vec{N} . . .).

Pour répondre à notre problématique, la simulation d'éclairage adaptée au système Catopsys, nous pouvons nous baser sur les méthodes de rendu classiques et effectuer les modifications nécessaires à Catopsys. Il existe des algorithmes de rendu si nombreux et si variés (par quadrature, par échantillonnage stochastique, par éléments finis, par calcul des équations de Maxwell . . .) que nous ne les présentons pas ici et renvoyons aux ouvrages de référence comme [Gla94, Dut03, Vea97, PH10]. Nous nous limitons ici à l'algorithme du z-buffer (succinctement) car il est utilisé par les GPU actuels et à l'algorithme de lancer de rayons car, de par sa puissance et sa généralité, il est à la base de nombreuses méthodes de rendu performantes.

Le pipeline de rendu des GPU, basé sur l'algorithme de z-buffer, est programmable et peut donc être modifié et adapté au système Catopsys. Une fonctionnalité particulièrement intéressante est le cube mapping qui permet de définir des textures sur les six faces d'un cube imaginaire puis de trouver la couleur vue depuis le centre du cube dans une direction donnée. En pratique, nous pouvons même utiliser directement une position 3D comme coordonnées de texture du cube, ce qui correspond très exactement à ce que nous fournit la carte projecteur. Pour implémenter cette méthode, il suffit donc de calculer (dans une texture et en utilisant le GPU) les six rendus de la scène à simuler correspondant aux faces du cube puis de calculer le rendu de l'image projecteur en spécifiant les positions 3D comme coordonnées de texture par cube mapping. Notons que tous les calculs sont alors effectués par le GPU, ce qui est très rapide, même avec le surcoût des six rendus du cube. Notons également que si le cube est calculé par rapport au point de vue utilisateur, il faut prendre en compte le décalage par rapport au projecteur et que ceci peut engendrer des imprécisions ou des artefacts.

Enfin, concernant l'algorithme de lancer de rayons, traité en détails dans la suite de ce chapitre, remarquons simplement qu'une position 3D donnée par la carte projecteur permet de trouver le rayon primaire correspondant : c'est le rayon issu du point de vue (utilisateur) et dirigé vers cette position 3D. Comme la carte projecteur peut également fournir le triangle correspondant, dans la scène de réalité mixte, la carte projecteur constitue en fait un précalcul d'intersection de tous les rayons primaires, ce qui est déjà une optimisation importante.

9.2 Méthode de simulation d'éclairage

9.2.1 Lancer de rayons classique

Le principe du lancer de rayons est très général (voir [KAC88]). Il consiste à propager un point selon une trajectoire (le rayon) puis à effectuer un calcul lorsqu'un objet est atteint, ce calcul pouvant lui-même

généraliser récursivement de nouveaux rayons sur lesquels le même traitement est réalisé (voir l'algorithme suivant).

```

lancer le rayon R :
  si R atteint l'étape suivante
    effectuer le calcul
    générer les rayons suivants
    lancer les rayons suivants
  
```

L'algorithme de rendu utilisé ici est une adaptation du lancer de rayons de Whitted [Whi80]. Un algorithme de rendu calcule l'image d'une scène éclairée par des sources de lumière et comportant des objets constitués de matériaux. L'algorithme de Whitted utilise des rayons de vue, i.e. partant du point de vue, dans le sens inverse de la lumière. La réciprocité d'Helmoltz assure l'équivalence des deux sens de parcours (voir Annexe A). Le modèle d'éclairage proposé par Whitted, décompose l'éclairage en un point d'un objet par trois composantes :

- l'éclairage local : réflexion de la lumière provenant directement des sources dans la direction du rayon de vue;
- la réflexion idéale : réflexion de type miroir, dans la direction idéale de réflexion (loi de Snell-Descartes);
- la réfraction : lumière traversant l'objet par transparence.

Déterminer la réflexion idéale (resp. réfraction) nécessite de calculer la lumière venant de la direction de réflexion (resp. réfraction) c'est à dire de calculer l'éclairage en un autre point de la scène, selon un autre rayon, d'où un algorithme récursif.

L'algorithme de lancer de rayons de Whitted est illustré Fig. 9.2. La couleur d'un pixel de l'image finale est obtenue en générant un rayon primaire. Classiquement ce rayon joint le point de vue et le pixel d'un écran virtuel. Pour le système Catopsys, un rayon primaire joint le point de vue (position de l'utilisateur) et une position 3D donnée par la carte projecteur. Lorsqu'un rayon rencontre un objet en un point P :

- l'éclairage local est calculé. Pour cela, un rayon d'éclairage est généré vers chaque lumière pour déterminer si la lumière considérée éclaire P et ainsi contribue à l'éclairage local.
- un rayon réfléchi est généré pour calculer la lumière vue par réflexion idéale de l'objet en P .
- un rayon réfracté est généré pour calculer la lumière vue à travers l'objet en P .

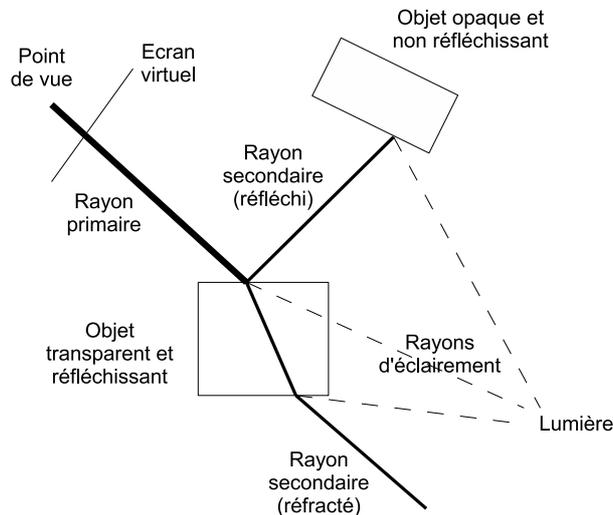


FIG. 9.2 – Principe de l'algorithme de lancer de rayons de Whitted.

Typiquement, un algorithme de rendu par lancer de rayons consiste simplement à générer les rayons primaires puis à calculer leur éclairage par un algorithme récursif (voir l'exemple suivant).

```

CalculerEclairage(rayon R) :
  si R rencontre un objet O en un point P
    EclairageLocal <- CalculerEclairageLocal(R, O, P)
  
```

```

RayonReflechi <- CalculerRayonReflechi(R, O, P)
EclairageReflechi <- CalculerEclairage(RayonReflechi)
                    * coefficient_reflexion(O)

RayonRefracte <- CalculerRayonRefracte(R, O, P)
EclairageRefracte <- CalculerEclairage(RayonRefracte)
                    * coefficient_refraction(O)

retourner EclairageLocal + EclairageReflechi + EclairageRefracte

```

Pour assurer la terminaison de l'algorithme, un nombre maximal d'appel récursif est généralement fixé.

Extensions : Si le principe du lancer de rayons est simple, il peut cependant être étendu à des méthodes plus puissantes, déterministes (lancer de rayons par distribution [CPC84]) ou stochastiques (path tracing, photon mapping, metropolis... [Kaj86, Vea97]). Ces méthodes gèrent différents phénomènes comme les réflexions multiples, les caustiques, les sources de lumière étendues, la profondeur de champ, le flou de mouvement, les matériaux translucides...

Optimisations : De nombreux travaux ont été réalisés pour accélérer le lancer de rayons [Gla89]. Les approches proposées sont très variées : volumes englobants, partitionnement de l'espace 3D [Ben75, FKN80], partitionnement de l'espace des rayons [LW95], cohérence entre rayons, parcours incrémental de l'espace 3D, optimisation des calculs d'intersection, calculs parallèles (multi-processeur, réseau, GPU) [WS01], processeurs dédiés... Dans la suite de ce chapitre, nous nous consacrons davantage aux spécificités de Catopsys qui permettent des optimisations particulières, à notre connaissance non étudiées jusqu'ici.

Primitives géométriques : Certains algorithmes de synthèse d'images nécessitent des primitives géométriques particulières. Par exemple, le z-buffer utilise des triangles et la radiosité des polygones plans. Le lancer de rayons est particulièrement intéressant à ce niveau car il nécessite uniquement une fonctionnalité de calcul d'intersection rayon/primitive. Ainsi, pour décrire parfaitement une sphère, il suffit de préciser son calcul d'intersection et ses quelques paramètres alors qu'avec un algorithme de type z-buffer, il faut discrétiser la sphère en de nombreux triangles pour finalement n'en obtenir qu'une approximation.

9.2.2 Précalculs de rayons pour Catopsys

Les algorithmes de rendu par lancer de rayons développés pour Catopsys utilisent plusieurs types de rayons :

- le rayon primaire, qui permet de calculer la couleur d'un pixel en parcourant, en sens inverse, le trajet de la lumière, depuis le point de vue ;
- le rayon secondaire, qui permet de remonter le trajet de la lumière en un point donné de la scène (par exemple, par réflexion idéale) ;
- le rayon d'éclairement, qui permet de déterminer si une source de lumière est visible en un point donné de la scène.

Rayons primaires

Comme expliqué précédemment, le projecteur, le miroir et la pièce sont fixes. La projection des pixels projecteur sur la pièce l'est donc également. Cette projection est précalculée et stockée dans la carte projecteur. Ainsi, les rayons primaires peuvent être calculés rapidement (il s'agit des rayons partant du point de vue utilisateur et dirigés vers les points de la pièce correspondants). De plus, l'intersection des rayons primaires avec la pièce est déjà connue (points 3D de la pièce stockés dans la carte projecteur). Ceci permet d'éviter le coûteux calcul d'intersection des rayons primaires avec la scène. Cet avantage est significatif car, lors du rendu, chaque pixel de l'image à calculer génère un rayon primaire. Enfin, comme la carte projecteur ne dépend pas du point de vue (position de l'utilisateur), celui-ci peut varier sans invalider la carte (les rayons primaires sont automatiquement mis à jour, les intersections sont inchangées).

Rayons secondaires

La pièce est décrite par la carte projecteur. Un rayon issu d'un point 3D donné et orienté dans une direction donnée atteindra donc un pixel de la carte. Pour propager en temps constant un rayon secondaire issu d'un pixel, nous pourrions donc échantillonner les directions ($\theta \in [0, 2\pi[$ et $\phi \in [0, \pi]$) et précalculer, pour chaque direction, le pixel atteint depuis le pixel courant. Cependant, la complexité en espace de cette méthode la rend irréalisable en pratique. En effet, en notant N_l la largeur de la carte, N_h sa hauteur, N_θ le nombre de directions échantillonnées en θ et N_ϕ le nombre de directions échantillonnées en ϕ , il faudrait $N_l \times N_h \times N_\theta \times N_\phi$ valeurs pour stocker le précalcul. Avec une carte de 1024×768 pixels échantillonnée tous les degrés (soit 360×180 valeurs par pixel), il faut stocker environ cinquante milliards de valeurs, ce qui n'est pas envisageable avec les machines actuelles.

Notons que [LW95] présente un partitionnement 5D de l'espace des rayons (positions et directions) utilisant une structure d'arbre pour limiter le problème de stockage moyennant un coût pour retrouver les valeurs déjà calculées.

Dans notre implémentation, nous calculons les rayons secondaires à l'exécution (sans précalcul) car, d'une part, ils sont moins nombreux que les rayons primaires ou que les rayons d'éclairage (seuls les matériaux transparents ou réfléchissant donnent lieu à des rayons réfractés ou réfléchis), et d'autre part, ils dépendent du point de vue de l'utilisateur qui n'est pas forcément constant.

Rayons d'éclairage

Un rayon d'éclairage permet de déterminer si une lumière est visible en un point de la pièce. Cette visibilité dépend de la position du point, de la position de la lumière et de la pièce. À chaque pixel de la carte projecteur correspond un point de la pièce. Nous pouvons donc précalculer la visibilité d'une lumière pour chaque pixel de la carte. Ainsi, déterminer la visibilité d'une lumière en un point de la pièce est immédiat. Bien entendu, comme les lumières font partie des données à simuler, le précalcul doit être mis à jour après chaque modification d'une source de lumière.

Notons que ce précalcul peut être réalisé via un algorithme de propagation de rayons différent de celui utilisé lors du rendu final (par exemple un algorithme plus lent mais plus précis, le coût du précalcul étant rattrapé lors du rendu).

Le précalcul des rayons d'éclairage permet de réduire fortement les calculs. En effet, les algorithmes présentés dans ce chapitre permettent de calculer le rendu uniquement dans la carte projecteur. Il est donc possible de précalculer pour chaque pixel de la carte projecteur la visibilité des différentes sources de lumière. Ainsi, lors du rendu, déterminer la visibilité d'une source est immédiat. Suivant le nombre de lumières, les rayons d'éclairage peuvent rapidement devenir majoritaires, d'où l'importance de ce précalcul.

9.2.3 Modèle d'éclairage

Le modèle d'éclairage définit comment un algorithme de rendu calcule l'éclairage d'une scène et ainsi la lumière finalement perçue. Il existe de nombreux modèles d'éclairage (voir [Sch94b, Gla94] et la Section A.3.2). Certains modèles ne considèrent que l'éclairage local, c'est-à-dire l'éclairage provenant des sources de lumière et réfléchi vers le point de vue. D'autres modèles considèrent l'éclairage global, c'est-à-dire l'éclairage provenant des sources de lumière mais également des autres points de la scène.

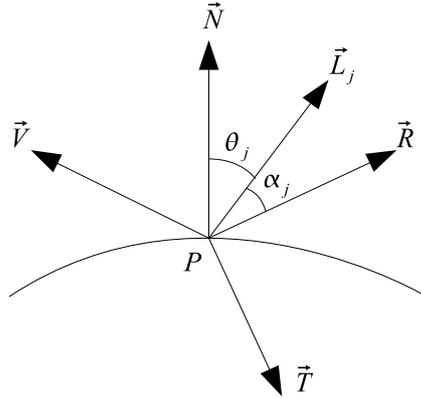
Pour Catopsys, nous voulons que le système de rendu permettent de simuler une classe relativement large de matériaux, au moins les matériaux intermédiaires diffus-spéculaires ainsi que les matériaux de type miroir. Parmi les modèles couramment utilisés, le modèle de Phong permet de simuler les matériaux intermédiaires diffus-spéculaires et le modèle de Whitted les matériaux de type miroir. En combinant ces deux modèles, nous pouvons donc simuler les matériaux voulus. Notons que nous privilégions ici un modèle d'éclairage facilement utilisable par un infographiste au détriment de sa cohérence physique.

Notations

La figure 9.3 présente les notations utilisées. Les vecteurs sont unitaires. Les sources lumineuses sont ponctuelles et omnidirectionnelles.

Modèle de Phong

Le modèle de Phong [Pho75] est également un modèle d'éclairage local empirique permettant de caractériser des surfaces de diffuses à spéculaires. L'équation 9.1 donne l'ombrage en un point P éclairé par une seule lumière.



- P : point d'un objet en lequel l'éclairage est calculé
- \vec{N} : normale à la surface de l'objet en P
- \vec{V} : direction du point de vue
- \vec{R} : direction de réflexion idéale
- \vec{T} : direction de réfraction
- \vec{L}_j : direction de la lumière j
- θ_j : angle entre \vec{N} et \vec{L}_j
- α_j : angle entre \vec{R} et \vec{L}_j

FIG. 9.3 – Notations utilisées pour le calcul de l'éclairage local. Tous les vecteurs sont unitaires.

$$S(P) = dC + (1 - d)C \cos \theta + W(\theta) \cos^n \alpha \quad (9.1)$$

- $S(P)$: ombrage en P
- C : coefficient de réflexion du matériau en P
- d : coefficient de réflexion diffuse environnemental
- W : fonction donnant la part de lumière spéculaire incidente et réfléchie selon l'angle d'incidence
- n : puissance modélisant la lumière spéculaire réfléchie

Le modèle de Phong est plus utilisé sous la forme donnée par l'équation 9.2.

$$I(P) = I_a K_a + \sum_j I_j (K_d \cos \theta_j + K_s \cos^{n_s} \alpha_j) \quad (9.2)$$

- $I(P)$: intensité de la lumière renvoyée par l'objet en P
- I_a : intensité de la lumière ambiante (estimation de l'éclairage global)
- K_a : coefficient de ambiant du matériau
- I_j : intensité de la lumière émise par la source j
- K_d : coefficient de réflexion diffuse du matériau
- K_s : coefficient de réflexion spéculaire du matériau
- n_s : indice de réflexion spéculaire du matériau

Le modèle de Phong n'est pas physiquement cohérent (il n'assure pas la conservation de l'énergie). Cependant, il dispose de trois paramètres permettant de régler le matériaux de façon intuitive.

Modèle de Whitted

Le modèle d'éclairage de Whitted [Whi80] s'inspire du modèle de Phong. Il permet de caractériser des matériaux diffus, réfléchissants ou transparents. Ce modèle est fortement lié au lancer de rayons car il calcule la lumière provenant de la direction de réflexion et celle provenant de la direction de réfraction en lançant deux nouveaux rayons. Ces rayons vont donner lieu à des calculs d'éclairage selon le principe récursif du lancer de rayons. Le modèle de whitted n'est donc pas un modèle local.

$$I(P) = I_a + K_d \sum_j (I_j \cos \theta_j) + K_r R + K_t T \quad (9.3)$$

- $I(P)$: intensité de la lumière renvoyée par l'objet en P
- I_a : intensité de la lumière ambiante
- I_j : intensité de la source lumineuse j
- K_d : coefficient de réflexion diffuse du matériau
- K_r : coefficient de réflexion idéale du matériau
- R : intensité de la lumière provenant de la direction de réflexion idéale (\vec{R})
- K_t : coefficient de réfraction du matériau
- T : intensité de la lumière provenant de la direction de réfraction (\vec{T})

Dans ce modèle, l'aspect spéculaire du matériau n'est pris en compte que par le rayon réfléchi, ce qui est surtout adapté aux surfaces de type miroir (spéculaire pur). Il ne permet donc pas de simuler des matériaux intermédiaires diffus-spéculaires ; c'est pourquoi nous utilisons le modèle dérivé suivant.

Modèle utilisé pour Catopsys

Nous proposons d'utiliser un modèle d'éclairage simple mais suffisamment puissant pour représenter de nombreux matériaux et pour mettre en pratique nos algorithmes de rendu. Ce modèle permet de représenter des surfaces diffuses, spéculaires et réfléchissantes. Il est donné par l'équation 9.4.

$$I(P) = I_a K_a + \sum_j I_j (K_d \cos \theta_j + K_{s_\lambda} \cos^{n_s} \alpha_j) + K_r R \quad (9.4)$$

- $I(P)$: intensité de la lumière renvoyée par l'objet en P
- I_a : intensité de la lumière ambiante
- K_a : coefficient ambiant du matériau
- I_j : intensité de la source lumineuse j
- K_d : coefficient de réflexion diffuse du matériau
- K_s : coefficient de réflexion spéculaire du matériau
- n_s : indice de réflexion spéculaire du matériau
- K_r : coefficient de réflexion idéale du matériau
- R : intensité de la lumière provenant de la direction de réflexion idéale (\vec{R})

Comme pour le modèle de Whitted, la composante de réflexion idéale est calculée en lançant récursivement un nouveau rayon.

Ce modèle n'est pas physiquement correct (il n'assure notamment pas la conservation de l'énergie). Cependant, il permet de simuler les matériaux voulus de façon simple en paramétrant l'éclairage réfléchi via :

- une composante ambiante $I_a K_a$ simulant l'éclairage global ;
- une composante diffuse $K_d \sum_j I_j \cos \theta_j$;
- une composante spéculaire $\sum_j S_j$;
- une composante réfléchie $K_r R$.

Notons enfin que ce modèle ne gère pas la réfraction. S'il est facile d'ajouter une composante de réfraction au modèle d'éclairage, la transparence des objets n'est pas forcément simple à gérer au niveau des algorithmes de rendu. En effet, il faut alors que la topologie des objets permette de distinguer l'intérieur de l'extérieur des objets, ce qui pose des problèmes de par le principe de reconstruction 3D de la scène réelle.

9.2.4 Propagation de rayons

Le modèle d'éclairage donne les calculs à effectuer en un point de la scène ainsi que les nouveaux rayons à lancer. Pour compléter l'algorithme, il reste à déterminer où effectuer ces traitements. Le problème consiste donc à propager un rayon dans la scène, ce qui revient à trouver la première intersection du rayon avec la scène.

C'est à ce niveau que les spécificités du système Catopsys interviennent. La suite de ce chapitre présente plusieurs méthodes de propagation de rayons. Deux catégories peuvent être distinguées suivant les données utilisées :

- la scène 3D, définie par un ensemble de primitives (sphères, plans, triangles...). Ce sont les données utilisées classiquement dans les algorithmes de rendu. Cependant Catopsys permet de prendre des hypothèses particulières et ainsi d'optimiser les calculs.
- la carte projecteur 2D. L'environnement de projection de Catopsys n'est connu que pour les points accessibles par le projecteur (et la caméra). Il s'agit donc d'une approximation inhérente au système. Toute l'information disponible est contenue dans la carte projecteur qui suffit alors pour effectuer le rendu.

Remarque sur la complexité : nous nous intéressons ici uniquement à la complexité en temps. Les algorithmes suivants sont difficilement comparables d'une catégorie à l'autre car leurs critères de complexité sont différents. La complexité étudiée ici correspond au coût de propagation d'un rayon dans la scène (gestion du rayon + calcul d'intersection).

9.3 Propagation de rayons dans la scène 3D

Considérons que la pièce est reconstruite sous forme de triangles 3D. Une scène composée de quatre triangles T_1 , T_2 , T_3 et T_4 est représentée Fig. 9.4. Un rayon part d'un point A du triangle T_2 . Il s'agit de trouver l'intersection du rayon avec la scène, c'est à dire le point B du triangle T_3 .

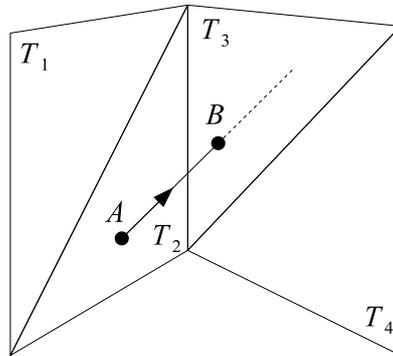


FIG. 9.4 – Un rayon part du triangle T_2 au point A et rencontre le triangle T_3 au point B .

Remarque sur la complexité : le critère de complexité ici pertinent est le nombre de calculs d'intersection entre le rayon et un triangle 3D. Notons m le nombre de triangles 3D.

9.3.1 Calcul d'intersection avec la scène

Propager un rayon revient à trouver sa première intersection avec la scène 3D. De manière exhaustive, il suffit donc de tester toutes les primitives de la scène et de retenir l'intersection la plus proche de l'origine du rayon.

```
/* 3D_scene */
propager le rayon R :
  pour chaque primitive P
    tester s'il y a intersection entre R et P
  retourner la première intersection de R
```

Complexité : cet algorithme naïf est peu performant. Comme il s'agit d'un algorithme exhaustif, sa complexité est m (ou $m - 1$ si l'intersection avec le triangle d'origine n'est pas testée).

9.3.2 Parcours de triangles voisins

Nous proposons ici une structure d'accélération par partitionnement volumique à base de tétraèdres. Celle-ci permet de réduire le nombre de calculs d'intersection à effectuer lors du rendu. Nous considérons que la scène (les triangles) est issue de la reconstruction de la pièce réelle. L'incorporation d'objets virtuels est traitée au Chapitre 10.

Le système Catopsys estime l'environnement de projection grâce à une caméra en rotation autour d'un point fixe. Il peut ainsi reconstruire un maillage triangulaire approximatif de la pièce. Ce maillage constitue une projection centrée sur la caméra et peut être considéré comme connexe.

Cette propriété peut être utilisée pour propager un rayon dans la scène. En effet, vu depuis la caméra, un rayon survole les triangles de la scène. Le premier triangle qu'il traverse correspond à la première intersection potentielle du rayon dans la scène.

Pour trouver le triangle voisin «survolé» par le rayon, il suffit de déterminer où le rayon quitte le triangle courant. Pour cela, la scène est partitionnée en tétraèdres (voir Fig. 9.5). Pour chaque triangle de la scène, est généré un tétraèdre dont la base est le triangle considéré et le sommet un point commun à tous les tétraèdres, typiquement le centre de projection ou la caméra.

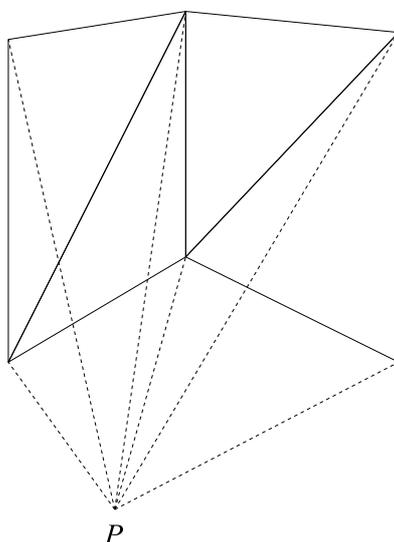


FIG. 9.5 – Partitionnement d'une scène constituée de triangles en tétraèdres de sommet P .

Pour trouver le triangle voisin, il suffit alors de déterminer le côté du tétraèdre que le rayon traverse (voir Fig. 9.6). Pour cela trois tests d'intersection rayon/triangle suffisent. De plus, comparer la normale des triangles avec la direction du rayon permet d'optimiser les calculs et d'assurer que le rayon quitte bien le tétraèdre par le triangle retenu. Le côté trouvé est partagé par un seul autre tétraèdre dont la base est le triangle cherché.

Ainsi, un rayon est parcouru en considérant les tétraèdres qu'il traverse successivement. L'intersection avec la scène est détectée quand le rayon traverse la base d'un tétraèdre. La méthode peut se résumer par l'algorithme suivant.

```
/* 3D_triangle_voisin */
propager le rayon R depuis un tétraèdre T0 :
  T <- T0
  répéter
    trouver le côté C de T tel que R quitte T par C
    T <- tétraèdre voisin (qui partage C)
  si R traverse la base de T
    retourner l'intersection
```

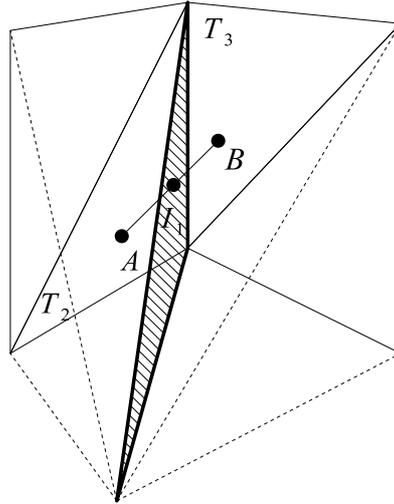


FIG. 9.6 – Un rayon part de T_2 en A et quitte le tétraèdre correspondant en I_1 (par la face hachurée). Il arrive alors sur T_3 qu'il traverse en B .

Complexité : plaçons nous au niveau d'un tétraèdre dont la base n'est pas traversée par le rayon. Au pire, le rayon quitte le tétraèdre par le dernier côté. Ce cas nécessite donc trois calculs d'intersection rayon/triangle (la base et deux des trois côtés). En moyenne, la probabilité qu'un côté soit celui par lequel sort le rayon est la même pour les trois côtés, c'est à dire $1/3$. Si l'intersection a lieu sur le premier côté testé, un seul test est nécessaire sinon, un second permet de déterminer le côté cherché parmi les deux restants. Pour trouver le côté par lequel le rayon sort, il faut donc en moyenne $1 \times 1/3 + 2 \times (1/3 + 1/3) = 5/3$ tests. En tenant compte du test de la base, il faut en moyenne $1 + 5/3 = 8/3$ tests pour traverser un tétraèdre.

Pour parcourir un rayon, l'algorithme `3D_triangle_voisin` traverse T tétraèdres. Il doit également trouver le côté par lequel le rayon quitte le premier tétraèdre et enfin tester l'intersection avec la base du dernier tétraèdre, ce qui revient à traverser un tétraèdre supplémentaire. Le coût d'un parcours est donc le coût de traverser $T + 1$ tétraèdres, c'est à dire $(T + 1) \times 8/3$ en moyenne.

T dépend du rayon et du maillage. Pour un maillage «régulier», par exemple pouvant se déplier en une grille de dimensions $n \times n = m$, nous pouvons faire l'analogie avec un parcours de droite dans une image. L'algorithme `3D_triangle_voisin` correspond à un parcours de la droite, c'est à dire $T = \Theta(n)$. En comparaison, `3D_scene` revient à tester les $m = n^2$ triangles.

Le parcours d'un rayon traversant une scène cylindrique est illustré Fig. 9.7. Cette scène est composée de $2 \times 6 \times 3 = 36$ triangles. Le rayon traverse $T = 6$ tétraèdres. Le coût moyen du parcours est donc de $8/3 \times (6 + 1)$ soit environ 19 calculs d'intersection rayon/triangles. En comparaison, le coût avec `3D_scene` est de $1 \times 36 = 36$ calculs d'intersection.

En résumé, l'algorithme `3D_triangle_voisin` est plus coûteux que `3D_scene` pour traiter un triangle du maillage. En revanche, le nombre de triangles traités est plus faible, ce qui le rend au final plus efficace (complexité asymptotique plus faible).

La méthode de propagation de rayons `3D_triangle_voisin` nécessite de précalculer le partitionnement de la scène en tétraèdres. Les informations nécessaires, au niveau des tétraèdres, sont regroupées dans la structure de données suivante.

```
struct Tetraedre
{
    int _ABC; // Indice du triangle de base du tétraèdre.
    Triangle _coteAB, _coteBC, _coteCA; // Côtés du tétraèdre.
    int _voisinAB, _voisinBC, _voisinCA; // Indice des tétraèdres voisins.
};
```

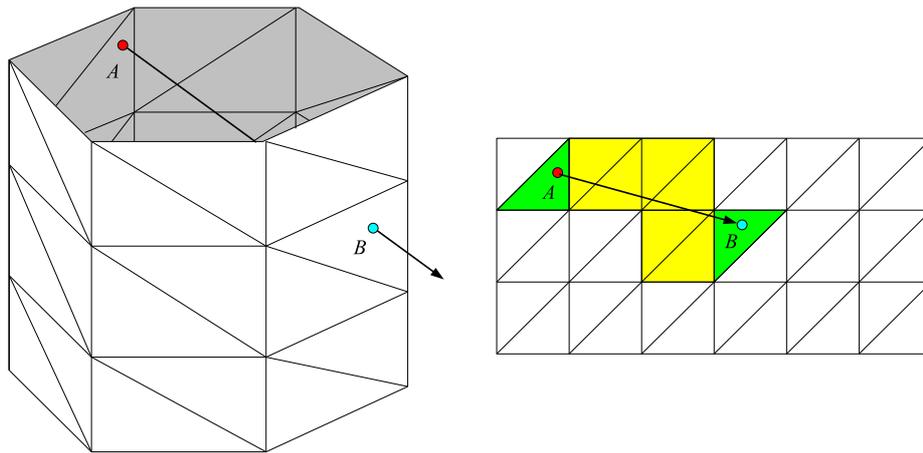


FIG. 9.7 – Considérons une scène cylindrique (à gauche) et son maillage triangulaire déplié (à droite). Un rayon se propage de A à B . Les triangles jaunes (à droite) sont les triangles traversés par l'algorithme `3D_triangle_voisin`. Les triangles verts correspondent aux tétraèdres partiellement traversés (premier et dernier tétraèdre du parcours).

Notons que cette structure permet un accès aux tétraèdres voisins en temps constant donc négligeable du point de vue de la complexité. Les triangles du maillage sont contenus dans un tableau et peuvent être référencés par un indice.

La scène peut alors être partitionnée en un ensemble de tétraèdres par l'algorithme suivant.

```
partitionner la scene S :
  créer une liste vide L de tétraèdres
  pour chaque triangle Tr de S
    créer un tetraedre Te
    Te._ABC <- indice de Tr
    Te._coteAB <- triangle(A, B, Caméra)
    Te._coteBC <- triangle(B, C, Caméra)
    Te._coteCA <- triangle(C, A, Caméra)
    orienter les normales des côtes vers l'extérieur de Te
    ajouter Te à L
  pour chaque tétraèdre T de L
    T._voisinAB <- indice du tétraèdre de L différent de T
      et référénçant les points A et B
    T._voisinBC <- indice du tétraèdre de L différent de T
      et référénçant les points B et C
    T._voisinCA <- indice du tétraèdre de L différent de T
      et référénçant les points C et A
  retourner L
```

Enfin, pour initialiser l'algorithme de propagation de rayons, il faut précalculer et retenir le tétraèdre de départ. Pour cela, il suffit de stocker, pour chaque pixel de la carte projecteur, le tétraèdre dont la base est traversée par le rayon de projection correspondant. Comme il s'agit d'un précalcul, un algorithme exhaustif non optimisé peut convenir.

Notons que cette méthode nécessite un maillage connexe et complet (sans trou). En effet, si un rayon survole un trou, le parcours de voisins ne permet pas de suivre le rayon.

Notons également qu'il existe de nombreuses structures d'accélération par partitionnement volumique (BSP-tree, kD-tree, octree... [FKN80, Ben75]) applicables au rendu. La comparaison de ces structures d'accélération avec la notre (coût de construction et de parcours, équilibre de charge...) fait partie de nos perspectives.

9.4 Propagation de rayons dans la carte projecteur

La carte projecteur contient toutes les informations connues de l'environnement de projection réel (voir Section 9.1). Chaque pixel de la carte donne notamment la position P de la pièce atteinte par le rayon de projection correspondant, la distance de P au miroir et la normale à la surface touchée en P .

Un pixel de la carte projecteur donne en fait directement l'intersection d'un rayon primaire, après réflexion éventuelle sur le miroir. Cette intersection peut donner lieu à de nouveaux rayons (réflexion, éclairément). Comme la scène est contenue dans la carte, l'intersection de ces nouveaux rayons correspond également à des pixels de la carte. Ainsi, en considérant les pixels successivement atteints nous pouvons réaliser un lancer de rayons complet dans la carte projecteur.

Le problème consiste alors à propager un rayon dans la carte, c'est à dire à trouver le pixel atteint par un rayon donné, partant d'un pixel donné. Nous sommes donc dans le cadre suivant :

- la pièce est connue à travers la carte projecteur ;
- le rayon (noté R) est défini dans le monde 3D par son origine (P_R) et sa direction (\vec{V}_R) ;
- le pixel de la carte correspondant à l'origine du rayon est connu (p_R) ;
- le rayon a une distance maximale (le point P_{max} à t_{max} correspondant au pixel p_{max} de la carte). Concrètement, cette limite peut correspondre à l'intersection avec un volume englobant la pièce ;
- l'objectif est de trouver la première intersection du rayon et de la pièce (P_I dans le monde 3D, p_I dans la carte).

Un rayon se propage jusqu'au premier objet rencontré. Pour déterminer cette première intersection, nous pouvons déterminer toutes les intersections du rayon en retenant la plus proche. C'est ce qu'effectue `3D_scene`. Cependant, cette méthode n'est pas applicable ici car les seules primitives 3D connues sont des points (positions 3D données par la carte projecteur), ce qui rend le test d'intersection délicat à réaliser. La première intersection est donc détectée en parcourant le rayon et en testant à chaque étape si le rayon rencontre la pièce. Il est difficile de calculer analytiquement le parcours du rayon dans la carte. C'est pourquoi nous proposons les méthodes de parcours suivantes.

Remarque sur la complexité : Les algorithmes suivants n'ont pas de critère de complexité commun hormis des opérations de bas niveau. Toutefois différentes mesures sont pertinentes : le nombre de calculs d'intersection \mathcal{N}_\cap , le coût de calcul d'une intersection \mathcal{C}_\cap , le nombre de pixels traités $\mathcal{N}_{\text{pixel}}$ et le coût de calcul du pixel à traiter $\mathcal{C}_{\text{pixel}}$. Nous appelons n le nombre de pixels de la projection réelle du rayon sur la carte projecteur.

Remarque sur la projection inverse : Certaines méthodes de parcours de rayon dans la carte projecteur ont besoin de calculer la projection inverse, c'est-à-dire le pixel projecteur passant par un point 3D donné lors de la projection. Nous avons vu, Section 8.4, que ce problème n'est pas simple à résoudre analytiquement mais que des solutions algorithmiques existent.

9.4.1 Parcours de rayon selon un pas 3D

Parcours du rayon à pas constant

Cette méthode consiste à parcourir le rayon régulièrement dans le monde 3D (voir Fig. 9.8). À chaque pas, la position P sur le rayon est calculée puis reportée en p sur la carte par projection inverse. Il y a intersection lorsque le rayon passe derrière la pièce, c'est à dire lorsque la distance de P au miroir est supérieure à la distance de la pièce au miroir (donnée par la carte en p).

```
/* carte_pas_constant */
Propager le rayon R :
  t <- pas de départ du parcours
  répéter
    P <- position de R à t
    distance_rayon <- distance de P au miroir
    p <- projection inverse de P
    distance_piece <- carte[p]._distance
    si distance_rayon > distance_piece
      retourner l'intersection
    sinon
      t <- t + pas
```

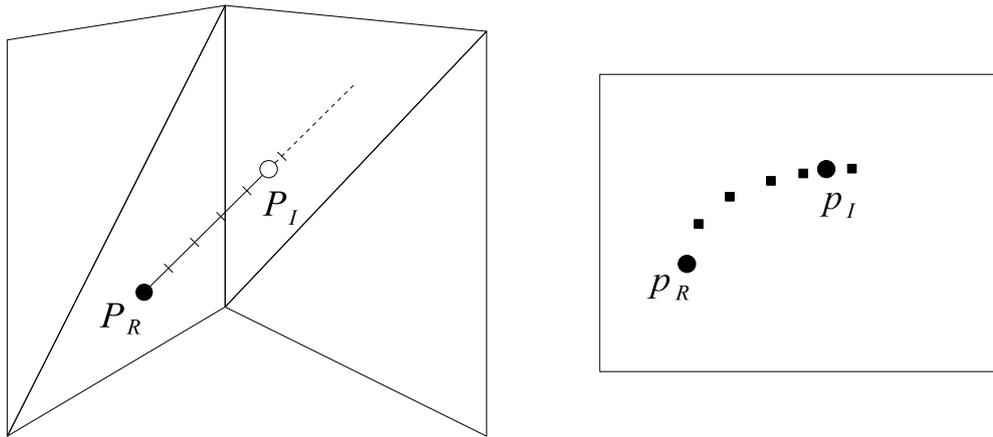


FIG. 9.8 – Parcours d'un rayon à pas constant. À chaque pas, la position sur le rayon est calculée dans la scène 3D (à gauche) puis rétroprojetée dans la carte projecteur (à droite).

L'inconvénient de cette méthode est qu'il faut choisir un pas de parcours. Ce choix dépend de la taille et de la complexité de la pièce. Si le pas est petit, un pixel de la carte sera traité plusieurs fois, ce qui est inutile. Si le pas est grand (ce qui est le cas sur l'exemple Fig. 9.8), certains pixels de la carte seront ignorés, ce qui réduit la précision de la détection. Le pas idéal est celui qui traite un pixel une fois au plus et qui considère des pixels connexes. Cependant, d'après la déformation non linéaire du miroir, un tel pas, constant, n'existe pas. En effet, dans la carte, les distances ont tendance à être «raccourcies» aux bords du miroir.

Complexité : cette méthode parcourt le rayon dans le monde 3D. Si d est la distance de l'origine du rayon à l'intersection trouvée et p le pas du parcours, alors $\mathcal{N}_{\text{pixel}}[\text{carte_pas_constant}] = d/p$. Comme la déformation du miroir n'est pas linéaire, il est difficile d'exprimer $\mathcal{N}_{\text{pixel}}[\text{carte_pas_constant}]$ par rapport à n .

Comme l'intersection est testée pour chaque pixel traité,
 $\mathcal{N}_{\cap}[\text{carte_pas_constant}] = \mathcal{N}_{\text{pixel}}[\text{carte_pas_constant}]$.

$\mathcal{C}_{\text{pixel}}[\text{carte_pas_constant}]$ comprend le coût de calcul d'une position sur un rayon (un produit vecteur/scalaire et une addition de vecteurs) et le coût de projection inverse d'un point 3D.

L'intersection est déterminée par une comparaison de distances. $\mathcal{C}_{\cap}[\text{carte_pas_constant}]$ est donc le coût d'un calcul de distance entre deux points 3D (une soustraction de vecteurs et un calcul de norme) et d'une comparaison avec une distance stockée dans la carte projecteur.

Parcours du rayon à pas variable

Cette méthode repose sur le même principe que la précédente. Cependant, le pas est ici calculé pour que les pixels considérés sur la carte soient connexes (voir Fig. 9.9).

L'idée est de réduire le pas à utiliser pour l'étape courante jusqu'à ce qu'il corresponde à un pixel voisin sur la carte. Ceci peut être réalisé par dichotomie sur un domaine $]0, t_{max}]$ où t_{max} est la distance maximale que peut parcourir le rayon dans la pièce (par exemple, le diamètre de la sphère englobant la pièce). Initialement, nous connaissons les points à $t = 0$ et à $t = t_{max}$ sur le rayon. Si les pixels correspondants ne sont pas voisins, nous calculons le point milieu et reconsidérons les deux premiers points de cette liste. L'algorithme suivant résume la méthode en utilisant une pile d'éléments <point du monde 3D, pixel de la carte, position sur le rayon>.

```
/* carte_pas_variable */
Propager le rayon R :
  // initialise une pile avec les points limites
  L <- liste vide
  L <- empiler <P_max, p_max, t_max>
```

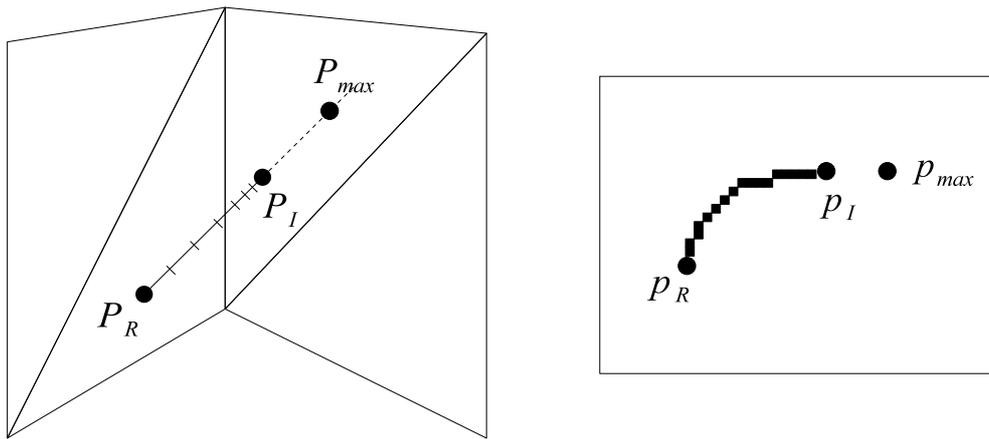


FIG. 9.9 – Parcours d'un rayon à pas variable. Le pas est choisi pour que les pixels traités soient connexes.

```

L <- empiler <P_R, p_R, 0>

// parcourt le rayon
répéter
  <P0, p0, t0> <- sommet de L
  depiler L
  <P1, p1, t1> <- sommet de L
  si p0 et p1 ne sont pas voisins
    // calcule un point intermédiaire
    t <- (t0 + t1) / 2
    P <- position de R à t
    p <- projection inverse de P
    L <- empiler <P, p, t>
    L <- empiler <P0, p0, t0>
  sinon
    si p0 et p1 sont différents
      // détecte l'intersection
      distance_rayon <- distance de P1 au miroir
      distance_piece <- carte[p1]._distance
      si distance_rayon > distance_piece
        retourner l'intersection

```

Cette méthode résoud en partie le problème du pas : les pixels considérés sont connexes mais un pixel peut encore être choisi plusieurs fois.

Complexité : comme l'intersection n'est calculée que pour des pixels connexes et différents entre eux, $\mathcal{N}_{\cap}[\text{carte_pas_variable}] = n$.

$\mathcal{N}_{\text{pixel}}[\text{carte_pas_variable}]$ est plus difficile à évaluer car la projection inverse du milieu de deux points 3D, n'est pas forcément au milieu des pixels correspondants dans la carte projecteur. Un pixel peut alors être choisi plusieurs fois, pour des points 3D différents (voir Fig. 9.10). Finalement nous pouvons simplement assurer $\mathcal{N}_{\text{pixel}}[\text{carte_pas_variable}] \geq n$.

$\mathcal{C}_{\cap}[\text{carte_pas_variable}] = \mathcal{C}_{\cap}[\text{carte_pas_constant}]$

$\mathcal{C}_{\text{pixel}}[\text{carte_pas_variable}]$ comprend le calcul de la dichotomie (moyenne de deux réels), le calcul d'une position sur un rayon et le calcul d'une projection inverse.

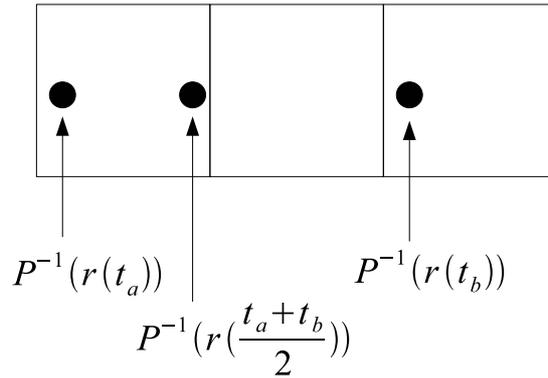


FIG. 9.10 – Projection inverse non linéaire et dichotomie. $r(t)$ est le point (3D) du rayon à t . Nous appelons P^{-1} la projection inverse. Donc $r(\frac{t_a+t_b}{2})$ est le point 3D médian de $r(t_a)$ et $r(t_b)$ mais $P^{-1}(r(\frac{t_a+t_b}{2}))$ n'est pas le point 2D médian de $P^{-1}(r(t_a))$ et $P^{-1}(r(t_b))$.

9.4.2 Parcours de rayon selon la connexité 2D

Cette méthode estime le parcours du rayon itérativement, dans la carte projecteur. L'idée est de parcourir les pixels de proche en proche. À chaque étape, le pixel retenu est celui dont le rayon de projection passe au plus près du rayon 3D (voir Annexe B pour le calcul de la distance entre deux rayons).

Le parcours du rayon de proche en proche, dans la carte, est illustré Fig. 9.11. L'origine p_R du rayon est connue; l'objectif est de parcourir la projection du rayon dans la carte (Fig. 9.11 (gauche)). Pour cela, nous considérons les pixels voisins non déjà traités (partie centrale de la figure). Le pixel retenu est celui dont le rayon de projection est le plus proche du rayon 3D (Fig. 9.11 (droite)). Ces traitements sont réalisés jusqu'à trouver l'intersection.

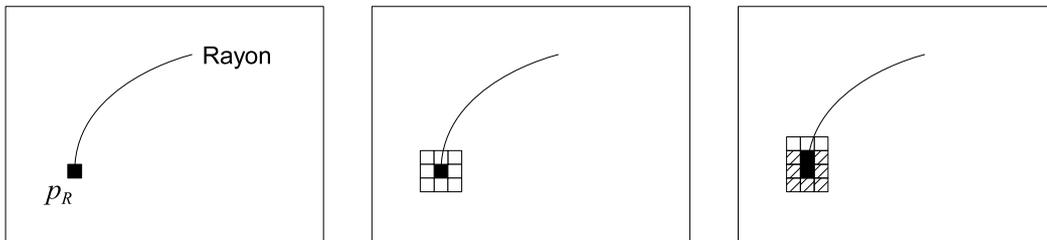


FIG. 9.11 – Parcours du rayon dans la carte projecteur, de proche en proche.

Le test d'intersection au niveau d'un pixel est illustré Fig. 9.12. L'objectif est de trouver la position, sur le rayon 3D, correspondant à ce pixel. La projection de ce pixel correspond à un rayon de projection (en rouge). La perpendiculaire (en bleu) commune au rayon de projection et au rayon 3D permet de trouver la distance entre les deux rayons ainsi que la position (point bleu) du rayon 3D la plus proche du rayon de projection (voir Annexe B pour le calcul de la perpendiculaire commune à deux rayons). Nous pouvons alors comparer les distances au miroir de la position sur le rayon 3D et de la position de la pièce (donnée par la carte projecteur).

```
/* carte_pixel_connexe */
Propager le rayon R :
  D <- direction de R
  p1 <- pixel voisin de p_R dont le rayon de projection est
        le plus proche et dont la position sur R est
        à l'intérieur de la pièce
```

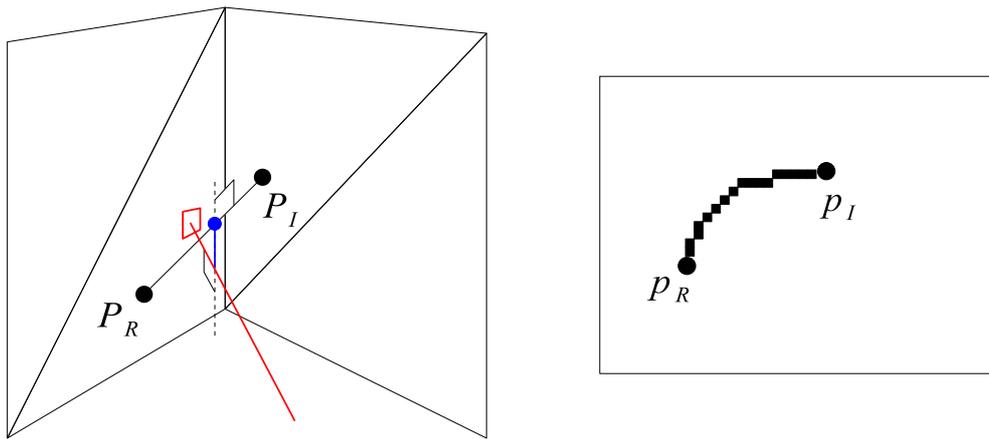


FIG. 9.12 – Parcours du rayon dans la carte par pixel connexe : traitement d'un pixel (gauche), résultat du parcours sur la carte (droite).

```

répéter
  p2 <- voisin non déjà traité de p1 dont le rayon
    de projection est le plus proche de R
  R2 <- rayon de projection de p2
  P <- position de R la plus proche de R2
  distance_rayon <- distance de P au miroir
  distance_piece <- carte[p2]._distance
  si distance_rayon > distance_piece
    retourner l'intersection
  sinon
    p1 <- p2

```

Complexité : l'algorithme parcourt le trajet réel du rayon sur la carte, donc $\mathcal{N}_{\text{pixel}}[\text{carte_pixel_connexe}] = n$.

L'initialisation du premier pixel du parcours nécessite de considérer tous les voisins (soit huit pixels). Le reste du parcours traite les voisins non traités (soit trois pixels à chaque fois). D'où $\mathcal{N}_{\cap}[\text{carte_pixel_connexe}] = 8 + 3(n - 1)$.

$\mathcal{C}_{\cap}[\text{carte_pixel_connexe}]$ comprend quatre parties : le calcul du point d'intersection du rayon 3D et de la perpendiculaire commune (une division de réels et deux déterminants 3×3), le calcul du point correspondant sur le rayon (une addition de vecteurs et un produit vecteur/scalaire), le calcul de distance entre ce point et le miroir (une addition de vecteurs), la comparaison avec la distance de la pièce.

$\mathcal{C}_{\text{pixel}}[\text{carte_pixel_connexe}]$ est le coût d'un calcul de distance rayon/rayon (un déterminant 3×3 , une division de réels, un calcul de norme, un produit vectoriel). Notons que le coût de traitement d'un pixel est important et pénalise l'algorithme `carte_pixel_connexe`.

9.4.3 Parcours de rayons par estimation de trajectoire

En analysant les résultats obtenus avec les algorithmes de parcours de rayons dans la carte projecteur, nous avons constaté que, dans la carte projecteur, les rayons ont une forme courbée assez régulière. L'idée est donc ici d'estimer puis de parcourir la courbe approximant le trajet d'un rayon dans la carte projecteur. L'objectif est de parcourir le rayon rapidement avec une marge d'erreur relativement faible.

Pour cela, le principe des méthodes suivantes est de calculer quelques points du rayon dans la carte projecteur (par projection inverse), d'estimer le reste de la trajectoire du rayon dans la carte puis de parcourir cette trajectoire. L'intersection est détectée en utilisant la même méthode que dans l'algorithme `carte_pixel_connexe`.

Il est difficile de caractériser le trajet du rayon dans la carte à partir de son trajet dans le monde 3D car la projection n'est pas centrale et la déformation du miroir n'est pas linéaire (de par la forme du miroir). Nous proposons donc plusieurs méthodes : interpolation, modélisation par une droite, modélisation par une ellipse et modélisation par une hyperbole. Notons qu'a priori le modèle de la droite est très approximatif alors que les modèles de degré 2 (ellipse et hyperbole) semblent mieux correspondre aux observations réalisées.

Modélisation par une droite

Cette méthode ignore totalement la non-linéarité de la déformation du miroir, ce qui engendre évidemment une erreur importante. L'objectif est d'estimer visuellement l'importance de cette erreur mais également d'avoir un ordre d'idée des performances que l'on peut espérer atteindre en travaillant dans la carte projecteur.

Ici, le parcours est simple. Il revient à tracer, sur la carte, une droite, du pixel d'origine p_R au pixel de limite maximale p_{max} (voir Fig. 9.13).

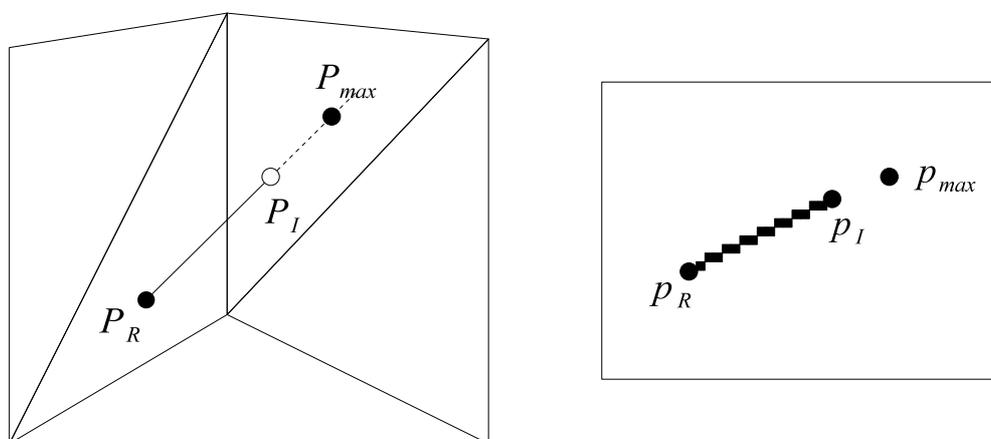


FIG. 9.13 – Modélisation de la trajectoire, dans la carte projecteur, par la droite (p_R, p_{max}) . L'intersection p_I , trouvée sur la droite, est bien sûr très approximative.

En revanche, le calcul d'intersection est plus délicat. Dans les deux méthodes précédentes, le rayon 3D est parcouru par des points connus. Nous pouvons donc calculer leur distance au miroir pour détecter l'intersection. Ici, le parcours dans la carte donne un ensemble de pixels censés correspondre à la projection inverse du rayon 3D. Cependant, les points du rayon 3D qu'ils sont censés représenter ne sont pas connus. Il est possible d'estimer ces points, cependant l'erreur commise en supposant linéaire la trajectoire du rayon 3D dans la carte est importante et rend cette solution peu fiable. La méthode suivante lui est donc préférée.

Soit un pixel appartenant à la projection inverse du rayon sur la carte. Sa position 3D sur le rayon n'est donc pas connue. Cependant, le point de la pièce vu par le projecteur depuis ce pixel est donné par la carte. En suivant les pixels qui décrivent le rayon dans la carte, nous pouvons donc parcourir les points de la pièce survolés par le rayon. Idéalement, dans le monde 3D, le rayon et les points survolés sont dans le même plan. De plus, le rayon décompose ce plan en deux demi-plans D_1 et D_2 : D_1 contient les points situés derrière le rayon, D_2 les points situés devant le rayon (voir Fig. 9.14). L'intersection correspond donc au premier point de la pièce survolé par le rayon qui «quitte» D_1 pour D_2 .

Pour déterminer le demi-plan auquel appartient un point P de la pièce survolé par le rayon, nous calculons le produit vectoriel entre la direction du rayon et $\vec{P_R P}$. Un changement de sens du produit vectoriel indique un changement de demi-plan et donc une intersection.

```
/* carte_droite */
Propager le rayon R :
  D <- direction de R
  pour p parcourant la droite (p_R, p_max) sur la carte
```

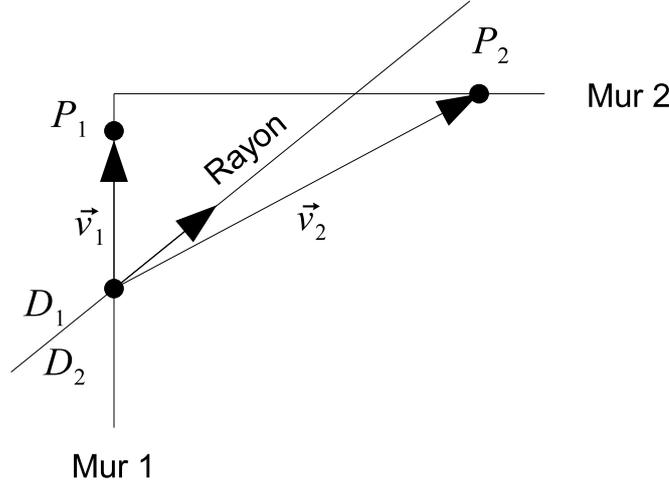


FIG. 9.14 – P_1 est situé derrière le rayon, dans le demi-plan D_1 . P_2 est situé devant le rayon, dans D_2 . L'intersection est donc située entre ces deux points.

```

P <- carte[p]._position
V <- vecteur (P_R, P)
si V ^ D change de sens
    retourner l'intersection

```

Complexité : comme l'intersection est testée pour tous les pixels traités, $\mathcal{N}_\cap[\text{carte_droite}] = \mathcal{N}_{\text{pixel}}[\text{carte_droite}]$. Si l'intersection est bien détectée (au même pixel de la carte), seul le chemin du rayon dans la carte change (et non ses pixels de départ et d'arrivée). Comme la droite est le plus court chemin, $\mathcal{N}_{\text{pixel}}[\text{carte_droite}] \leq n$.

Un parcours de droite permet de déterminer le pixel suivant à traiter. Avec un algorithme incrémental, $\mathcal{C}_{\text{pixel}}[\text{carte_droite}]$ est le coût de deux additions.

$\mathcal{C}_\cap[\text{carte_droite}]$ comprend un calcul de vecteur à partir de deux points, un produit vectoriel et un produit scalaire (pour comparer le sens de deux vecteurs). Notons que $\mathcal{C}_\cap[\text{carte_droite}] > \mathcal{C}_\cap[\text{carte_pas_constant}]$.

Interpolation

Cette méthode estime le trajet Q d'un rayon par interpolation polynômiale de n points $P_k, k \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket$ (en pratique, 3 ou 4 points semblent un bon compromis). Q est un polynôme de degré $n-1$. Il s'agit donc d'une méthode particulière dans la mesure où la courbe modélisant le rayon peut être de degré supérieur à 2 et ne subit pas d'autre contrainte géométrique.

Nous utilisons les polynômes de Lagrange :

$$\forall t \in [0, n-1], L_k(t) = \prod_{i=0, i \neq k}^{n-1} \frac{t-i}{k-i}$$

Le trajet du rayon est alors estimé par une combinaison linéaire des points P_k pondérés par les polynômes de Lagrange L_k :

$$\forall t \in [0, n-1], Q(t) = \sum_{k=0}^{n-1} P_k L_k(t) \quad (9.5)$$

Le trajet d'un rayon calculé par interpolation lagrangienne est illustré Fig. 9.15.

Notons que l'équation 9.5 donne une représentation paramétrique de la courbe. Pour la parcourir, il suffit alors de déterminer le paramètre qui correspond à un point voisin. Il s'agit du parcours déjà utilisé dans l'algorithme `carte_pas_variable`.

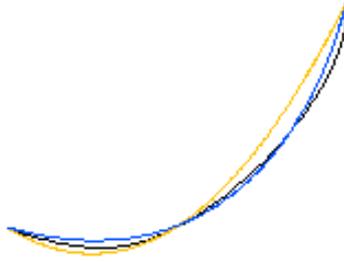


FIG. 9.15 – Interpolation lagrangienne : trajet réel du rayon (en noir) estimé par interpolation de 3 (en jaune) ou 4 (en bleu) points du rayon.

```

/* carte_interpolation */
Propager le rayon R :
  calculer des points 3D appartenant à R
  trouver les pixels projecteur correspondants
  tant que l'intersection n'est pas trouvée
    trouver le paramètre t suivant
    calculer le pixel p correspondant
    tester l'intersection

```

Complexité : l'intersection est testée pour tous les pixels différents traités. Ces pixels sont censés estimer la trajectoire réelle, donc $\mathcal{N}_\cap[\text{carte_interpolation}] \approx n$.

Le parcours est réalisé d'après une équation paramétrique et selon des pixels voisins (même méthode que dans l'algorithme `carte_pas_variable`), donc

$$\mathcal{C}_{\text{pixel}}[\text{carte_interpolation}] = \mathcal{C}_{\text{pixel}}[\text{carte_pas_variable}].$$

Le coût de calcul d'un pixel $\mathcal{C}_{\text{pixel}}[\text{carte_interpolation}]$ est principalement le coût de l'évaluation de l'équation 9.5.

Enfin, le calcul d'intersection est identique à celui de `carte_droite`, donc $\mathcal{C}_\cap[\text{carte_interpolation}] = \mathcal{C}_\cap[\text{carte_droite}]$.

Modélisation par une ellipse

Cette méthode consiste à modéliser le trajet d'un rayon dans la carte par une ellipse centrée sur le miroir (voir Fig. 9.16). L'ellipse semble bien adaptée aux observations de trajectoires, de par sa forme, ses symétries et ses paramètres.

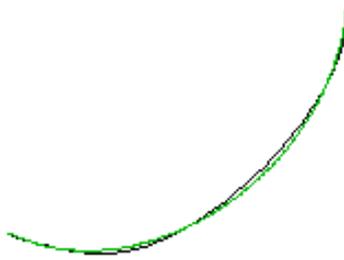


FIG. 9.16 – Modélisation du trajet réel du rayon (en noir) par un arc d'ellipse (en vert).

Considérons le trajet (elliptique) d'un rayon dans la carte. Il est alors défini dans le repère centré (x, y) par l'équation :

$$ax^2 + 2bxy + cx^2 - 1 = 0$$

où a , b et c sont les paramètres de l'ellipse. a et c définissent les axes de l'ellipse et b sa rotation par rapport aux axes du repère.

Les paramètres de l'ellipse passant par trois points $(x_1, y_1)^T$, $(x_2, y_2)^T$ et $(x_3, y_3)^T$ du rayon sont obtenus en résolvant le système linéaire :

$$\begin{pmatrix} x_1^2 & 2x_1y_1 & y_1^2 \\ x_2^2 & 2x_2y_2 & y_2^2 \\ x_3^2 & 2x_3y_3 & y_3^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Pour parcourir le rayon, nous utilisons une équation paramétrique de la courbe. Soit (X, Y) le repère réduit de l'ellipse (c'est à dire le repère aligné et centré par rapport aux axes de l'ellipse). Comme le repère (x, y) est déjà centré, l'ellipse est caractérisée par un angle de rotation ϕ et l'équation :

$$\alpha X^2 + \beta Y^2 - 1 = 0$$

où α et β définissent les axes de l'ellipse dans (X, Y) .

Nous avons :

$$\alpha = \frac{a + c + \sqrt{(a - c)^2 + 4b^2}}{2}$$

$$\beta = \frac{a + c - \sqrt{(a - c)^2 + 4b^2}}{2}$$

$$\phi = \frac{\arctan(\frac{2b}{a-c})}{2}$$

D'où l'équation paramétrique de l'ellipse dans (X, Y) :

$$X = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \cos t$$

$$Y = \frac{1}{\sqrt{\beta}} \cos t$$

Ainsi, en faisant varier t , cette équation permet de parcourir l'ellipse dans (X, Y) et, par la rotation d'angle ϕ suivante, dans (x, y) .

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$$

`/* carte_ellipse */`

Propager le rayon R :

```
calculer 3 points 3D appartenant à R
calculer l'ellipse correspondante
tant que l'intersection n'est pas trouvée
    trouver le paramètre t suivant
    calculer le pixel p correspondant
    tester l'intersection
```

Complexité : l'intersection est testée pour tous les pixels différents traités. Ces pixels sont censés estimer la trajectoire réelle, donc $\mathcal{N}_\cap[\text{carte_ellipse}] \approx n$.

Le parcours est réalisé d'après une équation paramétrique et selon des pixels voisins (même méthode que dans l'algorithme `carte_pas_variable`), donc $\mathcal{C}_{\text{pixel}}[\text{carte_ellipse}] = \mathcal{C}_{\text{pixel}}[\text{carte_pas_variable}]$.

La modélisation de l'ellipse est réalisée une seule fois, ce qui représente un coût constant de la méthode. Le coût de calcul d'un pixel $\mathcal{C}_{\text{pixel}}[\text{carte_ellipse}]$ est donc le coût de l'évaluation de l'équation paramétrique et du calcul de la rotation.

Enfin, $\mathcal{C}_\cap[\text{carte_ellipse}] = \mathcal{C}_\cap[\text{carte_droite}]$.

En pratique, la méthode nécessite quelques subtilités supplémentaires. Il faut tout d'abord détecter les cas limites :

- les points retenus sont trop proches. Cette situation est détectée en calculant la distance entre les points.
- les points retenus sont alignés. Cette situation est détectée en calculant l'angle formé par les points.

Lorsqu'un cas limite se présente, le trajet est modélisé par une droite.

Autre subtilité, l'ellipse doit être parcourue du point origine (à t_0) au point final (à t_1) et dans le bon sens. Pour cela, il faut assurer $|t_1 - t_0| \leq \pi$ (ce qui peut être obtenu en enlevant 2π à t_0 ou à t_1).

Notons qu'il existe des algorithmes incrémentaux en arithmétique entière (type Bresenham) permettant de parcourir des ellipses [VA84]. Cependant, ces méthodes considèrent généralement des ellipses alignées par rapport aux axes. Une généralisation doit être possible mais risque d'induire un coût de calculs plus important.

Modélisation par une parabole

Cette dernière méthode consiste à modéliser le trajet du rayon par une parabole alignée sur l'un des deux axes de la carte (voir Fig. 9.17). De par la symétrie du miroir, l'approximation réalisée ici est donc beaucoup plus grossière. Cependant elle permet de réaliser un parcours incrémental simple et rapide en parcourant l'axe retenu.

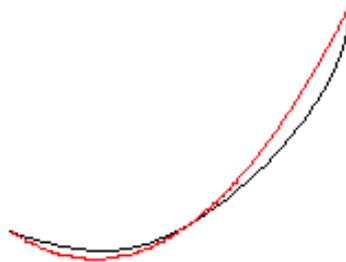


FIG. 9.17 – Modélisation du trajet réel du rayon (en noir) par une parabole (en rouge).

La première étape consiste à déterminer l'alignement de la parabole. Pour cela nous considérons, dans l'ordre, les trois points $(x_1, y_1)^T$, $(x_2, y_2)^T$ et $(x_3, y_3)^T$ du rayon retenus. Pour pouvoir réaliser le parcours incrémental, il suffit que les points soient également positionnés dans l'ordre par rapport à l'axe. Par exemple, si $y_3 < y_2 < y_1$, nous pouvons réaliser un parcours décroissant sur l'axe y .

En pratique, nous retenons l'axe sur lequel les points se différencient le plus tout en restant ordonnés en position. Dans le cas limite où aucun des deux axes ne convient (l'axe de la parabole est oblique), nous appliquons la méthode sur les sous-parcours $[(x_1, y_1)^T, (x_2, y_2)^T]$ et $[(x_2, y_2)^T, (x_3, y_3)^T]$ (il faut alors calculer deux points supplémentaires).

Lors de nos tests, le cas limite s'est présenté réellement pour 3.8% des rayons. Cependant, comme l'algorithme ne considère que trois points par rayon, le cas limite n'a été détecté que pour 0.05% des rayons parcourus.

Une fois l'axe déterminé, il faut caractériser la parabole, en calculant les paramètres de son équation. Par exemple, pour l'axe y , l'équation est :

$$y = ax^2 + bx + c \quad (9.6)$$

où a , b et c sont les paramètres à estimer. Avec les trois points retenus, nous résolvons le système linéaire correspondant.

Lorsque l'équation de la parabole est connue, le parcours incrémental $(\hat{x}_k, \hat{y}_k)^T$ est effectué. Il commence au premier point :

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{y}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$$

Les points successifs sont ensuite calculés en incrémentant par les dérivées partielles de l'équation 9.6.

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_{k+1} \\ \hat{y}_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x}_k + 1 \\ \hat{y}_k + 2a\hat{x}_k + b \end{pmatrix} \quad (9.7)$$

```
/* carte_parabole */
Propager le rayon R :
  calculer 3 points 3D appartenant à R
  calculer la parabole correspondante
  initialiser le parcours de la parabole
```

```

tant que l'intersection n'est pas trouvée
  calculer le pixel p suivant
  tester l'intersection

```

Complexité : ici encore, nous testons l'intersection pour tous les pixels différents censés estimer la trajectoire réelle, donc $\mathcal{N}_\cap[\text{carte_parabole}] \approx n$.

Le parcours est réalisé incrémentalement, selon l'axe principal, donc chaque pixel n'est obtenu qu'une seule fois et $\mathcal{C}_{\text{pixel}}[\text{carte_parabole}] \approx n$.

La modélisation de la parabole est réalisée une seule fois, ce qui représente un coût constant. Le coût de calcul d'un pixel $\mathcal{C}_{\text{pixel}}[\text{carte_parabole}]$ est incrémental et revient à quelques additions et multiplications de scalaires (Equation 9.7).

Enfin, $\mathcal{C}_\cap[\text{carte_ellipse}] = \mathcal{C}_\cap[\text{carte_droite}]$.

9.5 Résultats

Cette section présente les résultats des algorithmes décrits dans les sections précédentes. La scène de test est tout d'abord décrite. Puis les différentes méthodes de propagation de rayons sont comparées à plusieurs niveaux : le rendu de la scène complète, le parcours des rayons issus d'un pixel, les performances.

9.5.1 Scène de test

La pièce réelle utilisée pour le projet Catopsys est illustrée Fig. 9.18. Le miroir mesure 60 cm de diamètre et est fixé à 250 cm du sol. Le projecteur est placé verticalement, en dessous du miroir ; son centre de projection est à 60 cm du sol. L'origine est placée au sol, sous le projecteur et le miroir.

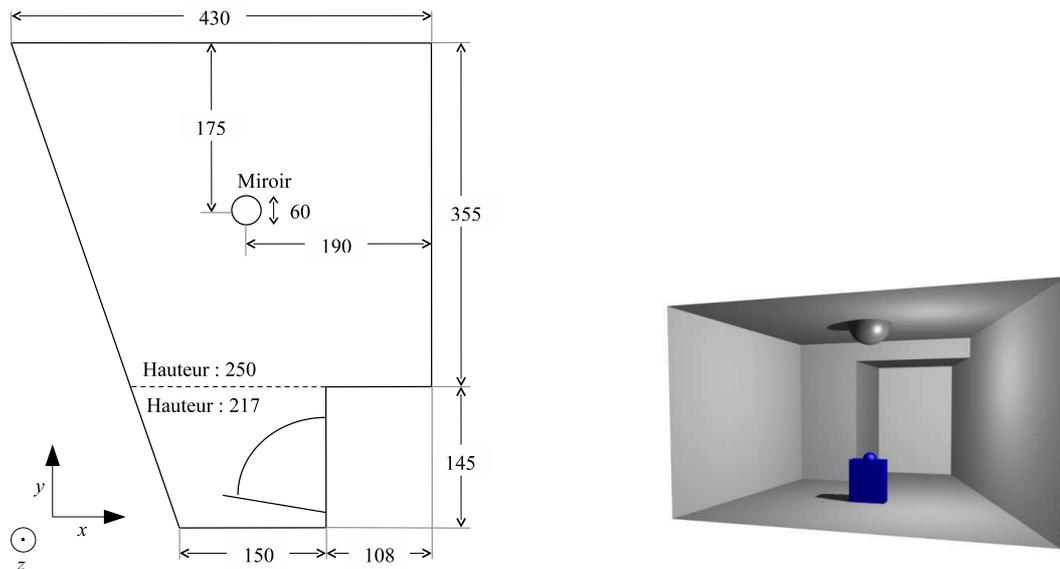


FIG. 9.18 – Salle de projection de test : plan de la pièce réelle vue de dessus (à gauche) et pièce modélisée en 3D (à droite).

La scène à simuler est présentée Fig. 9.19. Il s'agit de la pièce réelle dans laquelle a été ajoutée une sphère virtuelle de 40 cm de rayon à la position $(-20, 120, 40)$. Les données à simuler sont : une lumière d'intensité $(0.7, 0.7, 0.7)$ placée à $(120, 50, 100)$, un matériau sur la sphère et un mur réfléchissant derrière la sphère. Les tests sont réalisés sur une simulation de reconstruction 3D de cette scène, comportant 2299 triangles.

Avec la chaîne de traitement réelle, nous aurions bien sûr ajouté la sphère virtuelle dans la reconstruction 3D (réelle et non simulée) de la pièce. Cependant, notre scène de test simulée permet de tester nos algorithmes sans avoir à gérer les problèmes d'intégration de données virtuelles, ce qui est traité au Chapitre 10.

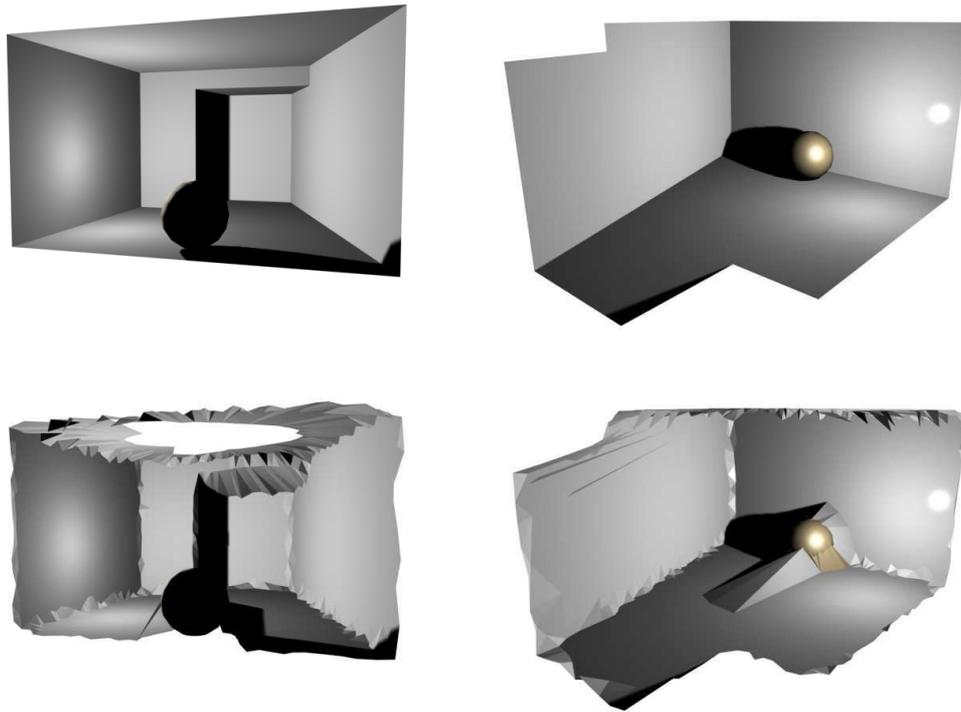


FIG. 9.19 – Scène de réalité mixte de test : scène réalisée à partir du modèle 3D de la pièce réelle (en haut) (ajout d’une sphère virtuelle, d’une lumière virtuelle et d’un matériau réfléchissant sur le mur derrière la sphère) et scène de test finale obtenue par simulation de reconstruction 3D (en bas).

Enfin, notons que certains algorithmes (`carte_interpolation`, `carte_ellipse` et `carte_parabole`) ont été réalisés dans un second temps et ont été testés sur la scène de test modélisée (sans simulation de reconstruction).

9.5.2 Rendu de la scène de test

Les résultats des différents algorithmes de rendu sur la scène de test sont présentés Fig. 9.20, Fig. 9.21 et Fig. 9.22. Le point de vue est placé à $(0, 0, 170)$ et la carte projecteur utilisée comporte 640×480 pixels. Projeter ces images sur le miroir, dans la pièce réelle, est censé simuler les données désirées.

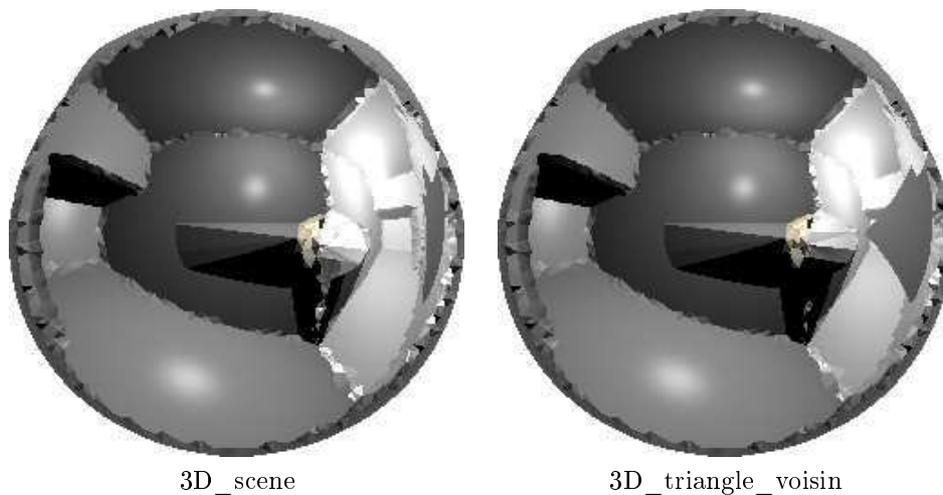


FIG. 9.20 – Rendus de la scène de test obtenus avec les algorithmes de parcours dans la scène 3D.

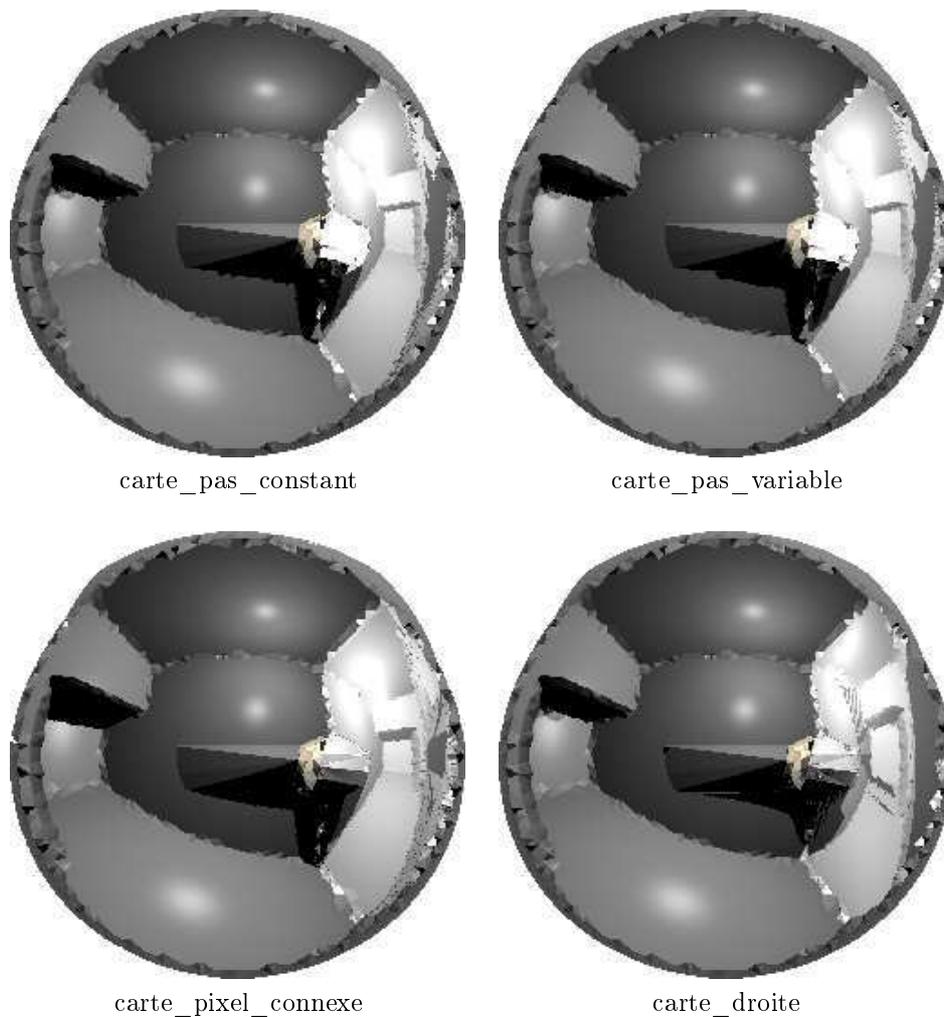


FIG. 9.21 – Rendus de la scène de test obtenus avec les algorithmes de parcours dans la carte (pas 3D, connexité et droite).

L’algorithme `3D_scene` donne le rendu de référence. Notons la présence de la lumière visible à travers l’éclairage des murs et l’ombre derrière la sphère. Le matériau de la sphère est bien présent et la réflexion de la pièce sur le mur réfléchissant est bien visible. Notons enfin la déformation du miroir, en particulier près des bords.

Le rendu de `3D_triangle_voisin` est très proche du rendu de référence. Les données à simuler sont correctement rendues : la lumière est correcte, les ombres sont présentes et correctement placées, les matériaux sont corrects et la réflexion sur le mur suit la même déformation que sur le rendu de référence. Notons cependant, une zone grise importante dans la réflexion du mur. Ce problème est dû au trou dans le plafond. En effet, il manque des triangles dans le maillage, au niveau du miroir. Lors du partitionnement en tétraèdres, une portion de l’espace 3D n’est donc pas renseignée. Les rayons qui traversent cette zone sont alors interrompus. Pour pouvoir utiliser l’algorithme `3D_triangle_voisin`, le trou au plafond doit être corrigé lors de la reconstruction de la pièce.

Le rendu de `carte_pas_constant` est relativement satisfaisant. Les données sont assez correctement simulées. Ceci est en fait dû au choix du pas de parcours de rayons qui a été fait spécialement pour cette scène. Cependant, même avec un pas judicieusement choisi, les limites de la méthode restent visibles. En effet, la déformation du miroir n’étant pas linéaire, un pas constant ne permet pas de conserver la même précision partout. Ainsi, la réflexion du mur au bord du miroir (à droite sur l’image) manque de précision, ce qui est particulièrement visible au niveau du trou dans le plafond. De même, les contours de l’ombre, au centre de l’image sont assez bruités.

Logiquement, le rendu de `carte_pas_variable` est meilleur que celui de `carte_pas_constant`. La détection d’intersection est plus précise dans les zones de grosse déformation, au niveau du trou du plafond. De même, le contour de l’ombre, au centre de l’image est moins bruité. Notons enfin, tant sur le rendu de

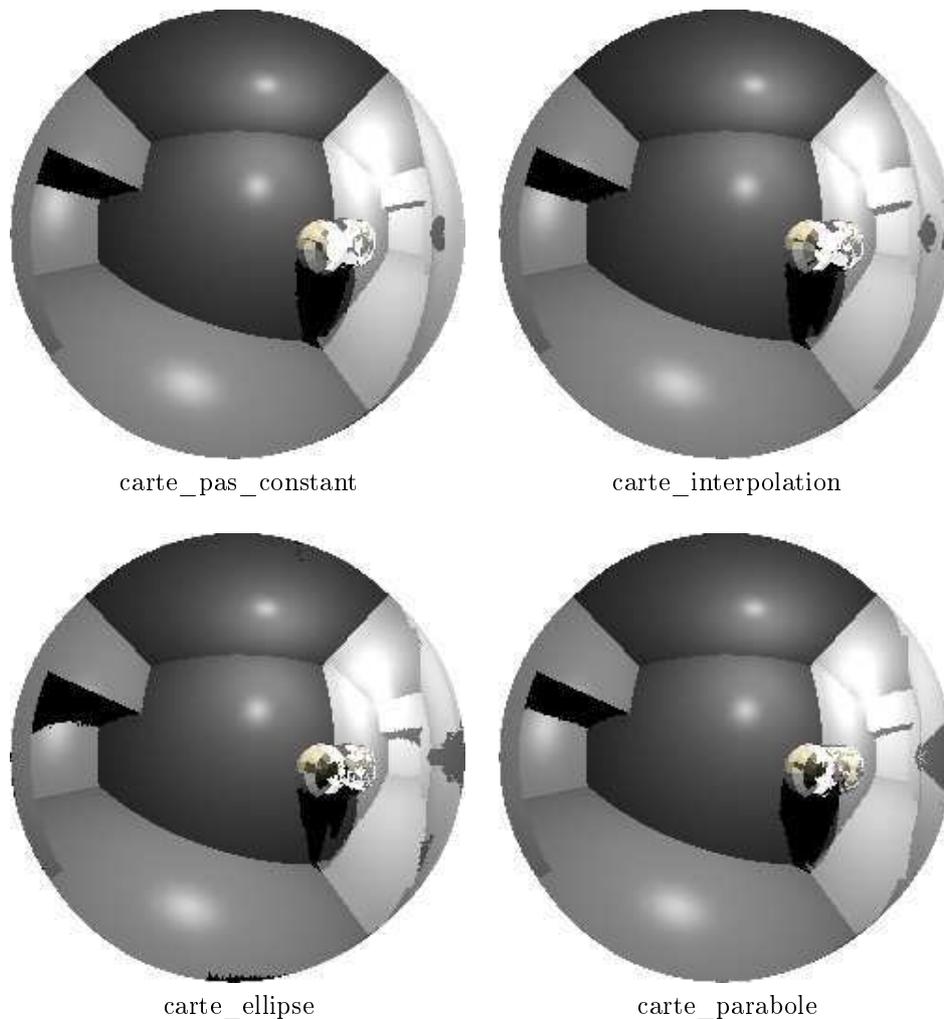


FIG. 9.22 – Rendus de la scène de test obtenus avec les algorithmes de parcours dans la carte (pas 3D et estimation de trajectoire).

carte_pas_constant que sur celui de carte_pas_variable que les triangles reliant la sphère au mur sont trop éclairés. Pour éviter de détecter une intersection dès le début du parcours (à cause des imprécisions numériques), le parcours est commencé à partir d’une certaine distance sur le rayon. Entre la sphère et le mur, les objets sont proches et les rayons d’éclairage devraient rapidement atteindre un objet mais comme le parcours commence après l’intersection, celle-ci n’est pas détectée.

Le rendu de carte_pixel_connexe est satisfaisant : les données sont correctement simulées. Notons cependant, au niveau du trou du plafond, sur le mur réfléchissant, une différence par rapport au rendu de référence. Comme la pièce n’est pas définie au niveau du trou (distance infinie), l’intersection n’est pas détectée et le parcours se poursuit (voir Fig. 9.23). Ce problème peut être résolu par un bouchage de trou de la scène.

Enfin, le rendu de carte_droite est très approximatif. Les pixels calculés uniquement d’après les rayons primaires sont correctement rendus car ils sont directement donnés par la carte. C’est pourquoi la lumière et les matériaux sont corrects. En revanche, les rayons réfléchis et les rayons d’éclairage (ceux réellement calculés par le parcours de rayons) sont peu précis. Ainsi, l’ombre de la sphère est décalée et la réflexion sur le mur complètement déformée (le trou du plafond est méconnaissable).

Sur la scène de test sans simulation de reconstruction (Fig. 9.22), le rendu avec carte_pas_constant est donné comme rendu de référence.

Le rendu avec carte_interpolation est plutôt satisfaisant ; même les zones de forte déformation du miroir sont relativement bien gérées. En revanche, l’algorithme nécessite un réglage au niveau du choix des points à interpoler. En particulier, le nombre de points choisi peut avoir une influence significative sur la qualité du rendu et sur le temps de calcul.

Enfin, les rendus avec carte_ellipse et carte_parabole sont corrects mais de moins bonne qualité.

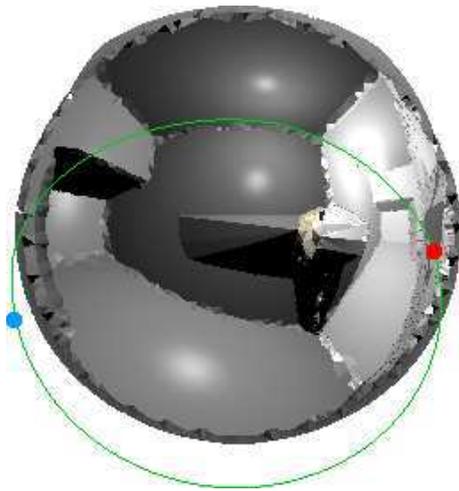


FIG. 9.23 – Carte_pixel_connexe. Un rayon réfléchi (en vert) est généré depuis le pixel d'origine (en rouge). L'intersection réelle (en bleu) a lieu au niveau du trou du plafond et n'est donc pas détectée. Le rayon continue son parcours dans la carte et revient au pixel d'origine. Le rayon représenté sur l'image est parcouru dans le sens horaire.

Des artéfacts apparaissent dans les zones de forte déformation, parfois même du bruit (carte_ellipse). Toutefois le rendu reste beaucoup plus fidèle que celui obtenu avec carte_droite, ce qui semble indiquer que l'hypothèse d'une trajectoire courbe de degré 2 donne des résultats acceptables.

9.5.3 Rendu d'un pixel

Nous considérons ici les rayons nécessaires au rendu d'un pixel donné et comparons les parcours réalisés dans la carte projecteur par certains des algorithmes proposés. Les rayons considérés sont présentés, dans la carte projecteur, Fig. 9.24. Le pixel rouge est le pixel à calculer. Pour cela, un rayon d'éclairement (en jaune) est généré vers la lumière et un rayon réfléchi (en vert) est généré dans la direction de réflexion. Suivant le principe récursif du lancer de rayons, un rayon d'éclairement est également généré depuis le pixel «réfléchi».

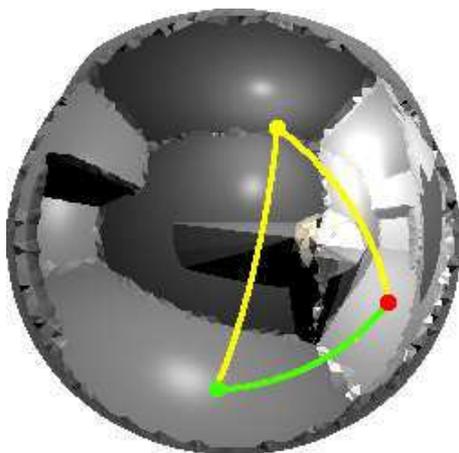


FIG. 9.24 – Rendu du pixel rouge : un rayon réfléchi est parcouru jusqu'à l'intersection (pixel vert) ; pour chacun de ces deux pixels, un rayon d'éclairement vers la lumière est parcouru (en jaune).

Les parcours, dans la carte projecteur, des rayons considérés sont illustrés Fig. 9.25. Nous constatons que carte_pas_constant effectue un parcours assez proche du parcours réel. Notons cependant que les pixels traités ne sont pas connexes, ce qui rend la détection de l'intersection moins précise. De plus, la distance entre les pixels traités n'est pas constante. En effet, elle se réduit sensiblement sur les bords, ce qui illustre bien la non-linéarité de la déformation du miroir : sur les bords, la déformation augmente

et raccourcie les distances sur la carte. Remarquons enfin la distance de sécurité, au début du parcours, permettant d'éviter de détecter une auto-intersection.

`Carte_pas_variable` réalise un parcours très proche du parcours réel. L'objectif de l'algorithme, traiter des pixels connexes, est atteint. Toute la précision de la carte est donc exploitée, à la distance de sécurité du parcours près.

`Carte_droite` effectue bien un parcours linéaire dans la carte. Les pixels traités sont connexes, cependant le parcours et les intersections détectées sont très approximatifs. La lumière est localisée trop à droite sur l'image et le pixel réfléchi beaucoup trop haut à gauche. Ceci confirme les résultats et attentes précédents et montre bien l'importance de l'approximation réalisée.

Enfin, les parcours effectués par `carte_pixel_connexe` sont satisfaisants. Les courbures sont correctes et les intersections bien localisées. Enfin, le parcours commence directement à partir d'un voisin du pixel d'origine.

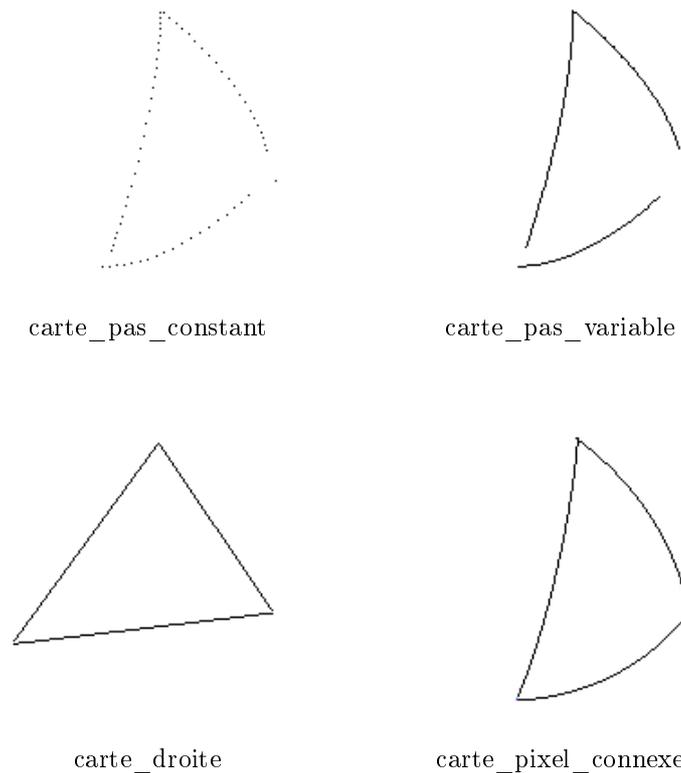


FIG. 9.25 – Parcours de rayons réalisés par quelques algorithmes de propagation de rayons dans la carte projecteur.

9.5.4 Performances

Pour terminer la comparaison des algorithmes, nous donnons ici quelques mesures de qualité de rendu et de temps de calculs. Ces mesures sont à nuancer par le fait que la scène de test comporte beaucoup de triangles et que la carte utilisée est petite, ce qui pénalise les algorithmes 3D au niveau des temps de calculs. Enfin, l'implémentation a été réalisée sur CPU (Intel® P4 2.4 GHz) sans parallélisme ni optimisation très poussée.

Les temps de calculs sont donnés Fig. 9.26 et Fig. 9.27. Nous constatons que `3D_scene` (algorithme 3D exhaustif de référence) est très lent, surtout sur cette scène de test comportant de nombreux triangles.

Les algorithmes `carte_pas_variable` et `carte_pixel_connexe` sont assez lents (environ 50% du temps de référence) car ils traitent des pixels connexes (donc nombreux). De plus, le coût pour déterminer le pixel suivant à traiter est assez important pour ces deux algorithmes.

`Carte_pas_constant`, `carte_interpolation` et `carte_ellipse` sont plus rapides (environ 15% du temps de référence). En effet, `carte_pas_constant` traite moins de pixels et son coût de recherche de pixel est plus faible. En revanche, la taille du pas doit être judicieusement choisi car il réalise un compromis entre

précision du rendu et rapidité des calculs. `Carte_interpolation` et `carte_ellipse` ne gagnent pas de temps sur le nombre de pixels traités mais sur le coût de calcul d'un pixel, qui se fait dans la carte projecteur, sans projection inverse.

`Carte_parabole` et `carte_droite` sont encore plus rapides (2 à 5% du temps de référence) grâce à un coût de calcul de pixel faible. Ceci est dû à un parcours incrémental et réalisé dans la carte projecteur (pas de projection inverse systématique). Rappelons tout de même que `carte_droite` est très imprécis.

Enfin, `3D_triangle_voisin` est également rapide (environ 1% du temps de référence), même sur cette scène qui ne lui est pourtant pas spécialement favorable (nombre de triangles élevé).

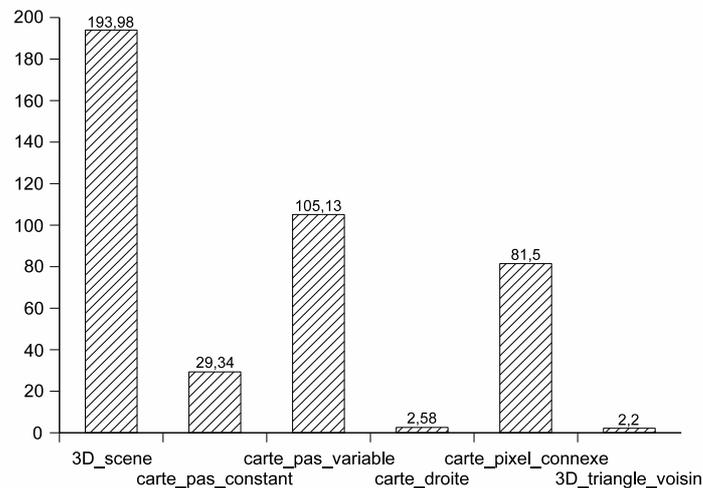


FIG. 9.26 – Temps de rendu en secondes (première série de tests).

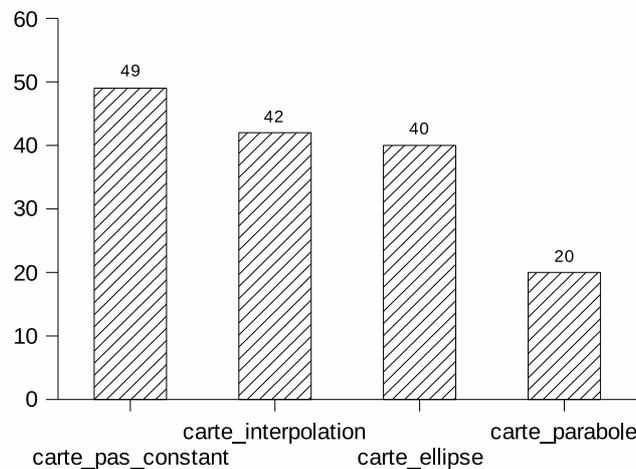


FIG. 9.27 – Temps de rendu en secondes (seconde série de tests).

Au niveau de la qualité du rendu (Fig. 9.28 et Fig. 9.29), nous observons à peu près le comportement inverse. Les algorithmes parcourant le rayon réel (`carte_pas_constant`, `carte_pas_variable` et `carte_pixel_connexe`) sont plus fidèle au rendu de référence alors que les algorithmes estimant la trajectoire du rayon ont tendance à déformer ou à bruyter le rendu. Notons enfin que `3D_triangle_voisin` permet un rendu à la fois rapide et de bonne qualité.

9.5.5 Bilan

Les algorithmes 3D ont l'avantage que le temps de calculs nécessaire pour propager un rayon est indépendant de la taille de la carte projecteur. De plus, ces algorithmes sont plus précis car ils manipulent

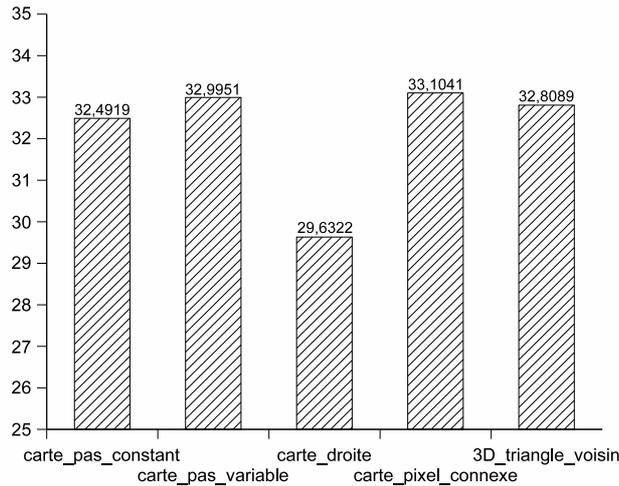


FIG. 9.28 – PSNR (rapport signal/bruit).

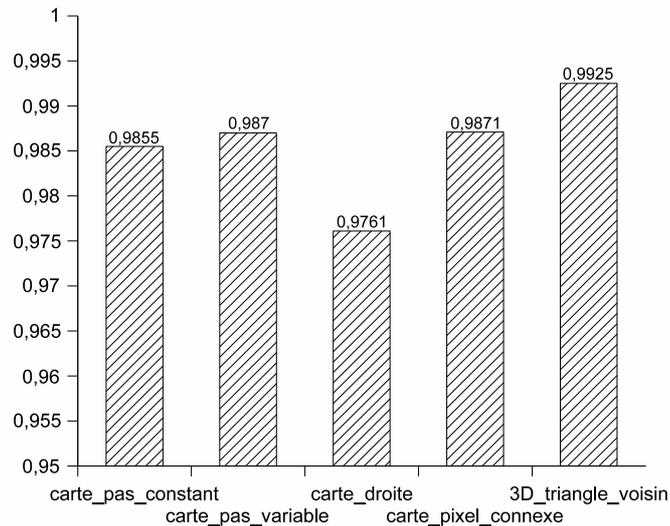


FIG. 9.29 – SSIM (similarité structurale).

directement les données à simuler.

3D_scene est un algorithme 3D exhaustif non optimisé donnant le rendu de référence. Cependant, le temps de calcul nécessaire ne permet pas d'utiliser cet algorithme pour des applications interactives.

3D_triangle_voisin est un algorithme 3D basé sur un partitionnement de la scène en tétraèdres. Il permet un rendu rapide et de bonne qualité. Cependant, le maillage 3D de la pièce doit être complet pour que le partitionnement puisse décomposer tout l'espace 3D parcouru par les rayons.

Les algorithmes de propagation de rayons dans la carte projecteur sont indépendants du maillage 3D de la pièce (au sens où une fois la carte calculée, la connaissance du maillage n'est plus nécessaire). De plus, ils permettent de précalculer la visibilité des lumières ce qui accélère fortement le rendu. En revanche, le temps de calculs dépend de la taille de la carte projecteur.

Carte_pas_constant permet d'avoir un rendu de bonne qualité rapidement mais nécessite le réglage d'un paramètre. Carte_pas_constant et carte_pas_variable donnent également un rendu de bonne qualité et ne nécessitent pas de réglage particulier. En contrepartie, le temps de calculs est plus élevé.

Enfin, les algorithmes d'estimation de trajectoire (carte_interpolation, carte_droite, carte_ellipse et carte_parabole) permettent de réduire les temps de calculs, surtout quand le parcours est effectué de façon incrémentale (carte_droite et carte_parabole). En contrepartie, le rendu est de moins bonne qualité (déformation, bruit).

9.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le problème de simulation d'éclairage de scènes de réalité mixte pour Catopsys. Nous avons montré que le calibrage géométrique du système projecteur-caméra réalisé pour Catopsys permet de ramener le problème à un rendu classique mais avec une caméra virtuelle particulière.

Nous avons également montré comment adapter la méthode de rendu par lancer de rayons au système Catopsys, notamment en proposant des algorithmes particuliers de parcours de rayons. Nous avons ainsi proposé trois classes d'algorithmes :

- les algorithmes parcourant le rayon dans l'espace 3D. Ils donnent un rendu de bonne qualité et peuvent être très fortement accélérés en utilisant un partitionnement particulier de l'espace 3D.
- les algorithmes parcourant le rayon dans la carte projecteur. Ils permettent d'obtenir un rendu correct ainsi que des temps de calculs plus faibles que l'algorithme de base.
- les algorithmes parcourant une estimation de la trajectoire du rayon dans la carte projecteur. Ils permettent, notamment lorsque le parcours est calculé de façon incrémentale, d'accélérer significativement les calculs au détriment d'une qualité de rendu inférieure.

La méthode de rendu par partitionnement de l'espace 3D est très spécifique mais donne des résultats prometteurs. Parmi les perspectives, notons que l'algorithme devrait pouvoir être accéléré en optimisant le recours au calcul d'intersection rayon/faces du tétraèdre (par exemple, en repérant la face par laquelle entre le rayon). Il faudrait également comparer la structure de partitionnement avec les structures classiques (BSP-tree, kD-tree, octree...), en particulier au niveau des coûts de construction et de parcours des structures.

Enfin, les méthodes de rendu utilisant la carte projecteur 2D constituent, à notre connaissance, une approche certes très particulière mais nouvelle à la problématique du rendu par lancer de rayons. À titre de perspective, ces méthodes semblent adaptées à une implémentation GPU efficace car elles fonctionnent dans l'espace image du projecteur et effectuent des traitements bien gérés par le GPU. Ceci devrait permettre d'améliorer leurs performances, relativement modestes sur CPU.

Chapitre 10

Réalité mixte pour Catopsys

10.1 Introduction

L'objectif de ce dernier chapitre est de préciser ce que peut apporter le système Catopsys à des applications de réalité mixte. Nous nous limitons ici à l'aspect radiométrie, c'est-à-dire à la gestion des objets, des matériaux et des lumières. Le système permet également de réaliser de la stéréovision et d'interagir avec l'utilisateur mais ceci dépasse le domaine de cette thèse. Plus précisément, il s'agit de déterminer les données réelles que peut acquérir le système, de préciser les modifications réalisables et de détailler comment ces modifications peuvent s'intégrer dans la chaîne de traitement.

10.2 Acquisition des données réelles

10.2.1 Objets

Il s'agit ici de reconstruire la géométrie 3D des objets à partir d'images caméra. Ce problème est traité dans un autre sous-projet Catopsys. Nous en rappelons ici les grandes lignes afin de fournir un aperçu complet de notre problématique de réalité mixte pour Catopsys.

Le domaine de la reconstruction 3D a fait l'objet de nombreux travaux et a suscité différentes approches, par exemple basées sur la façon dont l'objet réfléchit la lumière (shape from shading [ZTCS99]) ou sur l'utilisation de plusieurs points de vue (structure from motion [DTM96]).

Le système Catopsys n'est pas très adapté au cadre de travail classique car il dispose d'un seul point de vue et n'a pas de connaissance a priori sur les matériaux des objets. De plus, les objets à reconstruire, c'est-à-dire principalement la pièce, sont un peu particuliers dans la mesure où ils englobent le point de vue alors qu'habituellement, le point de vue peut tourner autour des objets.

En revanche, l'association caméra-projecteur du système Catopsys permet de résoudre le problème [ASLZ08]. En effet, nous pouvons projeter un point et récupérer une image caméra de ce point dans la pièce. Comme la caméra et le projecteur sont géométriquement calibrés, nous pouvons retrouver le rayon projecteur et le rayon caméra correspondant et, à l'intersection, déterminer la position 3D du point de la pièce. Nous pouvons ainsi obtenir un nuage de points de la pièce et, par triangulation de Delaunay, en calculer un maillage.

Notons qu'un point n'est valide que si le projecteur peut le projeter dans le champ de la caméra. Par conséquent, tous les points du nuage peuvent être placés distinctement dans l'image projecteur. La triangulation peut donc être réalisée en 2D, dans l'image projecteur (en pratique la déformation non-linéaire du miroir perturbe peu la triangulation) (voir Fig. 10.1).

10.2.2 Matériaux

L'acquisition des matériaux de la pièce réelle, via le système Catopsys, n'est pas triviale. Nous présentons ici nos résultats en considérant les matériaux diffus ainsi que quelques idées pour acquérir des matériaux spéculaires, plus réalistes.

Travaux précédents

De nombreuses méthodes et appareillages ont été développés pour acquérir la fonction de réflectance d'un matériau [WLL⁺09]. Nous mettons de côté les méthodes travaillant à partir d'un échantillon de



FIG. 10.1 – Reconstruction géométrique de la pièce réelle : pièce réelle reconstruite manuellement (à gauche), pièce reconstruite par le système (au milieu) et maillage correspondant dans l’image projecteur (à droite). Images fournies par Henri Astre.

matière (sans éclairage global) ou utilisant un appareillage particulier car elles sont difficilement envisageables pour le système Catopsys. Le domaine qui correspond le mieux à la problématique posée ici est le rendu inverse à partir d’images caméra.

Yu et al. proposent une méthode [YDMH99] pour inverser l’éclairage global et retrouver, pour chaque matériau, les paramètres du modèle de réflectance correspondants. Cependant cette méthode nécessite des photos prises depuis différents points de vue géométriquement calibrés.

Boivin et Gagalowicz proposent une méthode [BG01] pour estimer la réflectance à partir d’un point de vue, de la géométrie des objets et de la position des lumières. Leur algorithme procède par comparaison entre l’image réelle et une simulation obtenue selon un schéma adaptatif relativement complexe.

Ramamoorthi et Hanrahan proposent une approche traitement du signal au problème de rendu inverse [RH01]. Ils définissent notamment la réflexion de la lumière par un matériau comme un produit de convolution entre l’éclairage incident et la fonction de réflectance. Ainsi le problème de rendu inverse peut se ramener à une déconvolution, malheureusement délicate à résoudre (mauvais conditionnement...).

Enfin, Hara et al. proposent une méthode par optimisation [HNI03] permettant de retrouver, à partir d’une seule image, la réflectance de matériaux éclairés par une source non distante (comme c’est généralement le cas pour les scènes d’intérieur). La méthode nécessite cependant une segmentation de l’image selon des matériaux homogènes.

Acquisition de matériaux lambertiens

Pour acquérir les matériaux réels, le système Catopsys ne dispose que d’un point de vue et d’une seule source de lumière (le projecteur) mais il fournit aussi leur géométrie ainsi que celle de la pièce. En utilisant, la méthode d’acquisition de la lumière réelle proposée dans [NKGR06] et présentée Section 6.4.1, nous pouvons obtenir en chaque point (ou en chaque triangle du maillage de la pièce), la fonction de réflectance du matériau, pour une direction d’incidence et une direction de réflexion particulière (voir Fig. 10.2).

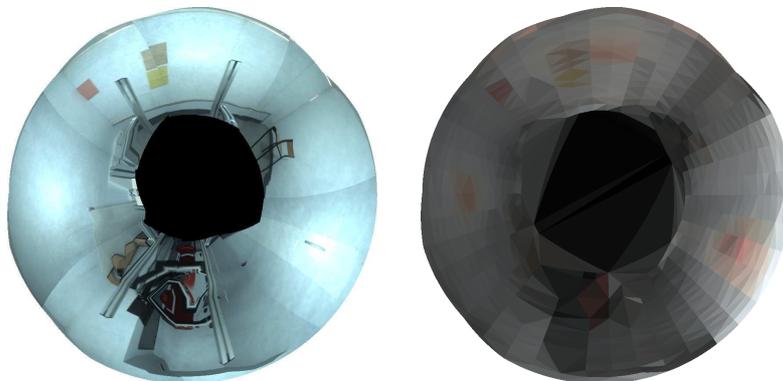


FIG. 10.2 – Acquisition des matériaux : pièce réelle (à gauche) et réflectance, par triangle, dans les directions définies par le système (à droite).

Cette caractérisation de la fonction de réflectance est très pauvre. Certes, en supposant les matériaux lambertiens (purement diffus), nous pouvons calculer la réflectivité, unique coefficient de ce modèle, cependant, les matériaux lambertiens sont très peu répandus dans la vie courante (le Téflon® PTFE est

parfois utilisé comme matériau lambertien). Un modèle de réflectance fournissant un terme de spécularité, comme le modèle de Phong (voir Section A.3.2), est déjà beaucoup plus approprié. Malheureusement, ceci implique de déterminer trois inconnues : le coefficient de réflexion diffuse, le coefficient de réflexion spéculaire et l'indice de spécularité.

Acquisition de matériaux spéculaires via une segmentation

Un modèle de réflectance spéculaire permettrait de caractériser les matériaux réels de façon plus réaliste. Ce type de modèle comporte plus d'un paramètre, ce qui implique de disposer de plusieurs mesures pour caractériser un matériau. Comme expliqué précédemment, le système catopsys ne permet d'obtenir qu'une mesure par pixel. Pour acquérir un matériau spéculaire, il faut donc considérer que plusieurs pixels sont du même matériau. L'acquisition de matériaux spéculaires peut ainsi être réalisée par segmentation de l'image projecteur en régions de même matériau puis par estimation des paramètres du modèle de réflectance pour chaque région.

L'étape de segmentation est assez problématique. En effet, elle est difficile à réaliser de façon automatique car la spécularité peut introduire une forte variation de niveau au sein d'une même région. Une segmentation manuelle peut être réalisée mais ceci implique un niveau de supervision important.

Une fois la segmentation réalisée, déterminer les paramètres du modèle de réflectance caractérisant le matériau d'une région peut être effectué de façon relativement simple et robuste, par optimisation. Considérons un modèle de Phong défini par un coefficient de réflexion diffuse c_d , un coefficient de réflexion spéculaire c_s et un indice de spécularité c_n . Alors, en un pixel k , la lumière réfléchie R_k provenant d'une lumière I_k est :

$$R_k(c_d, c_s, c_n) = (c_d \cos \theta_k + c_s \cos^{c_n} \alpha_k) I_k$$

où θ_k est l'angle entre la normale à la surface et la direction incidente de la lumière et α_k l'angle entre la direction de vue et la réflexion idéale de la direction incidente. Avec le système Catopsys, ces angles peuvent se calculer d'après le calibrage géométrique.

Comme le système nous permet de mesurer la lumière réfléchie O_k au pixel k , nous pouvons calculer l'erreur réalisée par la modélisation :

$$E_k(c_d, c_s, c_n) = [O_k - R_k(c_d, c_s, c_n)]^2$$

En considérant un ensemble K de pixels de la région, nous obtenons l'erreur globale :

$$E(c_d, c_s, c_n, K) = \sum_{k \in K} E_k(c_d, c_s, c_n)$$

L'objectif est alors de déterminer les paramètres du modèle décrivant le mieux le matériau, c'est-à-dire minimisant l'erreur globale. Ceci correspond à un problème d'optimisation classique, auquel la littérature propose différentes solutions :

$$\mathcal{O}(K) = \underset{c_d, c_s, c_n}{\operatorname{argmin}} E(c_d, c_s, c_n, K)$$

$$\mathcal{O}(K) = \underset{c_d, c_s, c_n}{\operatorname{argmin}} \sum_{k \in K} [O_k - (c_d \cos \theta_k + c_s \cos^{c_n} \alpha_k) I_k]^2$$

Il est ainsi théoriquement possible de caractériser les matériaux de la pièce réelle, par segmentation d'une image projecteur puis optimisation d'un modèle spéculaire. Cependant, ceci nécessite de réaliser une segmentation, ce qui peut être problématique. De plus, la méthode d'optimisation nécessite un ensemble de mesures représentatif, ce qui signifie ici que le reflet spéculaire doit être visible. Étant données les conditions de Catopsys (point de vue et source de lumière fixes, pièce englobant le système), cette condition n'est généralement pas satisfaite, ce qui rend la méthode difficilement applicable.

Acquisition de matériaux spéculaires via les réflexions multiples

Comme expliqué précédemment, le système Catopsys ne permet pas toujours, même après segmentation, de «voir» les matériaux sous des angles suffisamment différents. Une solution à ce problème serait de mesurer non pas la réflexion d'ordre 1 (projecteur-point-caméra) mais plutôt la réflexion d'ordre 2 (projecteur-point1-point2-caméra) (voir Fig. 10.3). Ainsi, en considérant n points, nous obtenons un système de n^2 équations à $3n$ inconnues, donc résolvable pour $n \geq 3$. Malheureusement, mesurer une réflexion d'ordre 2 ne semble pas trivial car si nous nous autorisons à capturer les réflexions entre surfaces, nous capturons par la même occasion l'ensemble des réflexions multiples [SMK05].

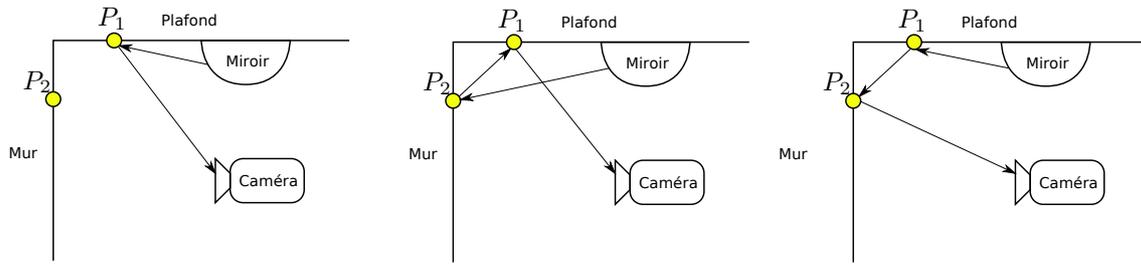


FIG. 10.3 – Caractérisation des matériaux : réflexion d'ordre 1 (à gauche) et réflexions d'ordre 2 (au milieu et à droite).

Une solution serait peut-être d'étendre le principe aux réflexions multiples complètes. Il s'agirait alors de comparer l'image visible avec des simulations d'éclairage pour retrouver les paramètres des modèles de réflectance. Ceci correspond à l'approche proposée par Boivin et Gagalowicz [BG01] et fait partie de nos perspectives. Il faut cependant prévoir un coût de calculs important.

10.2.3 Lumières

Si les projecteurs cinéma sont relativement puissants (1 000 à 3 000 W), les vidéoprojecteurs grand-public tels que ceux utilisés pour le système Catopsys sont beaucoup plus limités (100 à 300 W). De plus, pour réaliser l'immersion, cette puissance est répartie dans toute la pièce. Par conséquent, le système de projection peut difficilement masquer la lumière provenant du système d'éclairage de la pièce (classiquement, l'équivalent de quelques centaines de watts) et encore moins la lumière du soleil.

De plus, caractériser une source de lumière dans les conditions de Catopsys est difficile car nous ne pouvons pas supposer des modèles simples comme une source ponctuelle ou à distance infinie. En pratique des paramètres nombreux et variés peuvent avoir une influence importante : position, volume, puissance, directions d'émission, spectre...

Par conséquent, le système Catopsys doit être utilisé dans une pièce relativement obscure, où la seule source de lumière significative est le vidéoprojecteur du système. La lumière extérieure est alors considérée comme une perturbation : elle est estimée par la caméra lorsque le projecteur ne projette rien (image noire) et prise ensuite en compte par les méthodes de correction caméra et de compensation.

10.3 Modification des données réelles

Une fois les données réelles acquises, le principe des applications de réalité virtuelle est de modifier ces données dans l'environnement réel pour faire apparaître l'effet voulu à l'utilisateur (voir Fig. 10.4). Deux types de modifications sont possibles : l'ajout de données virtuelles et la suppression de données réelles. La réalité mixte permet ainsi tout un éventail de mélange des réalités. Aux cas extrêmes, nous avons la réalité augmentée, qui autorise uniquement l'ajout de données virtuelles, et la réalité virtuelle, qui supprime toutes les données réelles à l'utilisateur.



FIG. 10.4 – Réalité mixte : pièce réelle (à gauche) et scène de réalité mixte avec des matériaux modifiés, un objet virtuel et une source de lumière virtuelle (à droite).

Dans le cadre de Catopsys, tout ceci ne peut être réalisé que par apport de lumière depuis le vidéo-projecteur. Ainsi, l'ajout de données virtuelles semble immédiat : ajouter des données revient à ajouter la lumière qui serait visible si ces données existaient. La suppression de données réelles suit le même principe : apporter, sur les données réelles, la lumière qui serait visible si ces données n'existaient pas.

En pratique, le problème n'est bien sûr pas toujours aussi simple. D'une part, les données réelles conditionnent les possibilités du système (par exemple, le système est inefficace sur un mur noir). D'autre part, les fonctionnalités de réalité mixte ne sont pas toujours évidentes à réaliser et à intégrer dans la chaîne de traitement du système.

10.3.1 Objets

Comme nous nous plaçons dans le cadre de la réalité mixte immersive, nous devons distinguer deux types d'objets : les objets purement virtuels et la pièce environnante (issue de l'acquisition de la pièce réelle). Évidemment, les objets purement virtuels ne peuvent être qu'ajoutés aux données réelles, alors que la pièce environnante peut être complètement modifiée (par exemple, enlever un meuble ou déplacer un mur réels).

Notons que les objets peuvent être représentés de différentes façons, selon l'algorithme de rendu utilisé : un algorithme z-buffer manipule uniquement des maillages de triangles alors qu'un algorithme de lancer de rayons accepte également de nombreuses autres primitives (plan, sphère. . .).

L'essentiel du problème se situe au niveau de l'intégration des modifications dans les algorithmes de rendu développés pour Catopsys (voir Section 9). De ce point de vue, la modification de la pièce environnante ne présente aucune difficulté puisqu'il s'agit des données manipulées par les algorithmes de rendu (sous forme de triangles 3D ou de carte projecteur 2D). Il faut toutefois bien respecter l'hypothèse de visibilité faite par ces algorithmes : les points de la pièce environnante sont visibles de la caméra et (surtout) du projecteur.

L'ajout d'objets virtuels (distincts de la pièce environnante) est plus délicat car il faut alors gérer le recouvrement, ce qui est particulièrement important dans le cas d'objets transparents, d'animation ou si l'on permet à l'utilisateur de se déplacer. La principale difficulté est de prendre en compte les objets virtuels lors de la propagation des rayons.

Détaillons l'intégration des objets virtuels dans les différents algorithmes de rendu. Avec l'algorithme exhaustif `3D_scene`, l'intégration est immédiate car les données virtuelles sont sous une forme déjà gérées (primitives 3D) et peuvent donc être traitées de la même façon. Notons que les optimisations classiques du lancer de rayons peuvent également être mises en place sur ces données (volumes englobants, partitionnement de l'espace. . .).

Dans le cas de l'algorithme `3D_triangle_voisin` (partitionnement en tétraèdres), l'intégration des objets virtuels peut être réalisée en répartissant les nouvelles primitives dans le partitionnement en tétraèdres. Au niveau d'un tétraèdre, le test d'intersection doit alors être réalisé pour la base du tétraèdre mais également pour les primitives traversant le tétraèdre (les optimisations classiques peuvent aussi être intégrées à ce niveau). Notons que seules les primitives occupant les tétraèdres traversés sont traitées mais qu'une primitive occupant plusieurs tétraèdres peut être traitée plusieurs fois.

Enfin, dans le cas des algorithmes de parcours de rayon dans la carte projecteur, les objets virtuels peuvent être intégrés dans la carte projecteur. Ainsi, un pixel contient l'intersection du rayon de projection avec la pièce environnante mais également une liste des intersections avec les objets virtuels. Pour chaque objet, le pixel donne la distance où le rayon entre dans l'objet et celle où il en sort. Il suffit de modifier le test d'intersection du parcours de rayon pour prendre en compte les objets supplémentaires. Notons qu'au niveau d'un pixel projecteur, seuls les objets traversés par le rayon de projection sont considérés mais qu'en parcourant les pixels projecteur, un même objet peut être considéré plusieurs fois.

Notons que le traitement des objets virtuels peut également être réalisé dans une première passe du parcours de rayon. L'intégration est plus simple puisqu'il suffit, pour parcourir un rayon, de trouver l'intersection la plus proche parmi les objets virtuels puis de la comparer avec l'intersection trouvée par l'algorithme de parcours non modifié. Notons, qu'avec cette approche, à chaque rayon traité, tous les objets virtuels sont considérés mais seulement une fois.

10.3.2 Matériaux

Dans la chaîne de traitement du système Catopsys, l'influence des matériaux est corrigée, lors de la projection, par la méthode de compensation radiométrique. Les matériaux de la scène de réalité mixte,

qu'ils soient virtuels ou acquis dans la pièce réelle, sont pris en compte lors du rendu. Ainsi, la modification de matériaux réels ou l'ajout de matériaux virtuels est réalisé au niveau de l'édition de la scène de réalité mixte, ce qui est transparent pour nos algorithmes de rendu et ne pose par ailleurs pas de problème particulier.

Rappelons simplement que si un matériau s'applique à une partie de la pièce environnante, alors il peut être complètement intégré dans la carte projecteur utilisée par certains de nos algorithmes de rendu.

10.3.3 Lumières

Comme nous l'avons justifié précédemment, le système Catopsys ne peut être utilisé que dans des pièces relativement sombres, où le projecteur constitue la seule source de lumière importante. La lumière provenant d'autres sources est considérée comme de la lumière parasite : son influence est corrigée lors des acquisitions caméra et lors de la projection. Les sources de lumière sont donc virtuelles et définies lors de l'édition de la scène de réalité mixte.

Au niveau du rendu, l'utilisation des sources de lumière se résume à un parcours de rayon d'éclairage, ce qui est géré par nos algorithmes de simulation d'éclairage : un point de la scène reçoit la lumière d'une source si le rayon d'éclairage atteint cette source avant tout objet de la scène.

Notons enfin que la visibilité de la lumière peut être précalculée au niveau des pixels projecteur. Ceci peut fortement accélérer le rendu mais nécessite de mettre à jour le précalcul lorsque la lumière est modifiée.

10.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons précisé les fonctionnalités (radiométriques) permises par le système Catopsys pour des applications de réalité mixte.

Le système permet tout d'abord d'acquérir des données de la pièce réelle. La géométrie peut être obtenue, après calibrage géométrique du système, par projection et acquisition de points dans la pièce.

Concernant les matériaux, le système est très limité car il fournit une source de lumière fixe (le projecteur) et un point de vue fixe (la caméra). Ainsi, en chaque point de la scène, le matériau n'est caractérisé que par une direction d'incidence et une direction de réflexion, ce qui est insuffisant pour modéliser le matériau correctement. Segmenter la scène en matériaux homogènes ne permet pas de résoudre le problème car ceci ne permet généralement pas d'obtenir suffisamment d'information (reflet spéculaire). En l'état, le système fournit donc la «couleur» des matériaux, ce qui constitue la principale limitation du système pour la réalité mixte.

Enfin, au niveau des sources de lumière, le système n'est matériellement exploitable que si le vidéo-projecteur est la seule source importante de la pièce. Les autres sources de lumière sont évaluées dans le but de corriger leur influence, considérée gênante.

Le système permet de modifier les données réelles dans le rendu final. Le principe est de calculer et d'afficher dans la pièce réelle la lumière qui serait perçue si les modifications étaient réelles.

Au niveau des objets, nous avons la pièce environnante, correspondant à l'acquisition de la pièce réelle, éventuellement modifiée, et gérée par les algorithmes de rendu proposés au chapitre précédent. Par ailleurs, nous avons également des objets virtuels venant se superposer à la pièce environnante. Ces objets doivent être pris en compte de façon particulière lors du parcours de rayon, soit par un calcul d'intersection spécifique, soit par une intégration des données virtuelles dans les structures de données des algorithmes de rendu.

Les matériaux ne posent pas de problème particulier car ils sont définis à l'édition de la scène de réalité mixte et utilisés tels quels par les algorithmes de rendu, les matériaux de la pièce réelle étant corrigés par compensation lors de la projection.

Enfin, comme le système Catopsys limite les sources de lumière extérieures, la lumière est principalement définie par les sources virtuelles de la scène de réalité mixte, ce qui correspond au cadre classique de la simulation d'éclairage.

Notons que le système Catopsys peut également permettre de réaliser de la stéréovision ou d'adapter l'affichage à la position de l'utilisateur dans la pièce (via un capteur à six degrés de liberté).

Chapitre 11

Conclusion générale

11.1 Travaux réalisés

Dans cette thèse, nous avons étudié, d'un point de vue radiométrique, l'ensemble de la chaîne de traitement du système Catopsys. Ce dernier constitue un moyen abordable (coût, installation, utilisation) de réaliser toutes sortes d'applications de réalité mixte immersives. Il s'installe dans une pièce d'habitation classique, sous réserve que ses matériaux soient relativement clairs et qu'elle puisse réaliser l'obscurité. Un vidéoprojecteur est orienté vers un miroir convexe fixé au plafond pour réaliser une projection immersive, sur toutes les surfaces de la pièce. Une caméra en rotation permet de caractériser la pièce et le résultat de la projection. Tous ces appareils sont contrôlés par un ordinateur.

Le premier objectif de cette thèse était de caractériser et de corriger les perturbations radiométriques intervenant dans la chaîne de traitement du système Catopsys. Ceci permet de modifier l'image projetée afin que la scène visible après projection soit proche de la scène voulue, malgré les perturbations. Le deuxième objectif était de mettre au point des méthodes de simulation d'éclairage optimisées pour Catopsys, permettant ainsi de calculer l'image à projeter pour simuler la scène de réalité virtuelle ou de réalité mixte. Enfin, le dernier objectif était de caractériser les fonctionnalités et données offertes par le système pour réaliser des applications de réalité mixte.

Nous nous sommes tout d'abord intéressés à la caméra car celle-ci est l'unique élément d'acquisition du système Catopsys. Nous avons réalisé une étude expérimentale des différentes perturbations radiométriques intervenant lors des acquisitions caméra, notamment la réponse d'intensité et la réponse spectrale du capteur, le vignettage, le bruit. . . À chaque fois, nous avons présenté une méthode adaptée au système Catopsys pour caractériser puis corriger la perturbation. À partir de cette étude, nous avons proposé une méthode de correction radiométrique de caméra adaptée à Catopsys. Cette méthode est automatisée, relativement simple à implémenter et peut être utilisée, plus généralement, pour d'autres applications de vision par ordinateur.

Nous avons ensuite étudié les sources de lumières pouvant intervenir lors de l'utilisation du système Catopsys. Il s'agit bien sûr du projecteur mais également d'autres sources comme le système d'éclairage de la pièce ou la lumière du jour. Par une étude expérimentale, nous avons constaté que des sources de lumière courantes peuvent être très différentes, selon leur technologie. Nous avons également constaté que les vidéoprojecteurs permettent de synthétiser une gamme relativement large de couleurs mais que ces couleurs ne sont pas réparties uniformément. Enfin, certaines technologies (DLP) disposent de réglages pouvant fortement dégrader le rendu des couleurs.

Nous avons ensuite considéré les matériaux des surfaces de la pièce utilisées comme écran de projection. Les propriétés théoriques de la fonction de réflectance (BRDF) permettent de déduire que, sauf matériau purement spéculaire ou spectre de réflectance particulier, la lumière réfléchie est visible depuis le point de vue et peut être contrôlée en modifiant la lumière incidente. Nous avons vérifié par une étude expérimentale que les matériaux courants, dont ceux utilisés dans notre salle de test, ont généralement un comportement intermédiaire diffus-spéculaire. Enfin, nous avons mis en évidence, par des mesures réelles et en simulation, que les réflexions multiples sur les surfaces d'une pièce fermée sont importantes et limitent la qualité de rendu lors d'une projection sur une grande partie de la pièce.

À partir des études précédentes, nous avons proposé un modèle radiométrique de projection puis une méthode de compensation relativement complète, automatisée et générale. Cette méthode fonctionne en deux passes (calibrage, hors-ligne et compensation, en-ligne) et prend notamment en compte la non-linéarité du projecteur, les matériaux de l'écran de projection, la variation de couleur entre le projecteur et la caméra, et les réflexions multiples.

Nous avons ensuite étudié géométriquement le système de projection. Le trajet projecteur-miroir-pièce peut être calculé simplement par un parcours de rayon classique. En revanche, comme le système n'est pas central, le parcours inverse (point 3D - miroir - image projecteur) revient à résoudre une équation plus complexe. Des méthodes algorithmiques permettent cependant de résoudre le problème.

L'étude géométrique nous a permis de mettre au point des méthodes de simulation d'éclairage très particulières mais adaptées au système Catopsys. Si les algorithmes de rendu classiques peuvent s'appliquer au système, le lancer de rayons lui est particulièrement bien adapté pour le rendu de scène de réalité mixte. En effet, dans ces conditions, le système fournit immédiatement les rayons primaires. Le parcours des rayons secondaires peut ensuite être effectué soit dans l'espace 3D, éventuellement via un partitionnement particulier, soit directement dans la carte projecteur 2D, par parcours du rayon réel ou d'une trajectoire estimée.

Enfin, nous avons détaillé les données et fonctionnalités offertes par le système pour la réalisation de réalité mixte. Il est possible d'acquérir les objets réels mais leurs matériaux sont difficiles à caractériser précisément à cause des limitations du système. Ces données peuvent être modifiées dans l'environnement réel selon le principe de la réalité mixte. La modification des matériaux ou des objets réels et l'ajout de lumière virtuelle s'intègrent directement dans la chaîne de traitement. L'ajout d'objets virtuels peut s'intégrer en modifiant les algorithmes de rendu selon différentes approches.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont permis de participer à la mise au point du système Catopsys, d'étudier la faisabilité de différentes fonctionnalités et d'en réaliser certaines. Ils ont donné lieu à plusieurs papiers publiés (une conférence internationale, une revue nationale, une conférence nationale) ou soumis à publication (une revue internationale).

11.2 Perspectives

L'étude en simulation des réflexions multiples dans une pièce virtuelle lambertienne a permis de mettre en évidence l'importance des réflexions multiples, la marge de manoeuvre de la compensation et l'influence de certains paramètres. Ce travail mérite d'être étendu aux matériaux spéculaires, plus proches du système réel. Ceci implique cependant de revoir le calcul des échanges énergétiques car la méthode de radiosité utilisée n'est applicable que pour des matériaux lambertiens. Il serait également intéressant d'étudier l'efficacité de méthodes de compensation plus évoluées. En effet, il existe, dans la littérature, quelques méthodes basées sur la préservation du contraste et non sur la préservation des niveaux [AOSS06]. Ces méthodes sont plus coûteuses car elles impliquent généralement un calcul d'optimisation. De plus, elles posent un problème de cohérence temporelle car un même niveau sur deux images différentes peut donner lieu à des corrections différentes. Cependant, elles semblent donner des résultats significativement meilleurs.

La méthode de compensation radiométrique de la projection doit pouvoir être optimisée à plusieurs niveaux. Tout d'abord, le calibrage des réflexions multiples doit pouvoir être accéléré, par exemple en mesurant hiérarchiquement et en parallèle des échanges énergétiques indépendants [SCG⁺05]. Au niveau du calcul de la compensation, une implémentation GPU de l'algorithme proposé devrait permettre d'accélérer le calcul et peut-être d'atteindre le temps-réel. Enfin, adapter la méthode à une préservation de contraste plutôt qu'à une préservation de niveau devrait améliorer la qualité de rendu, au prix du coût de calculs et du problème de cohérence temporelle évoqués précédemment.

Concernant les algorithmes de simulation d'éclairage, il serait tout d'abord intéressant de chercher une solution analytique au problème de la projection inverse, soit en résolvant l'équation établie, soit en proposant un modèle empirique suffisamment précis. Une comparaison (précision, temps de calculs) avec les méthodes algorithmiques permettrait de déterminer l'intérêt d'utiliser une telle méthode analytique dans les algorithmes de rendu proposés.

Concernant les algorithmes de rendu, il reste encore à comparer la structure d'accélération par partitionnement de l'espace 3D en tétraèdres avec les structures d'accélération classiques (BSP-tree, kD-tree, octree... [FKN80, Ben75]). De même, utiliser les algorithmes optimisés classiques de calculs d'intersection devrait réduire le temps de calculs.

Concernant les algorithmes de rendu dans la carte projecteur, la pertinence d'une implémentation GPU doit encore être étudiée. En effet, les structures de données ainsi que les traitements mis en oeuvre par ces algorithmes semblent adaptés aux particularités des GPU. Enfin, certains parcours de rayon dans la carte projecteur devrait pouvoir être optimisés. Par exemple, il existe un algorithme incrémental type Bresenham pour parcourir des ellipses alignées par rapport aux axes. Cet algorithme peut être étendu à des ellipses quelconques, ce qui permettrait de réduire les temps de calculs.

Enfin, par rapport aux applications de réalité mixte, nous avons vu qu'il était simple d'acquérir les matériaux de la pièce réelle via un modèle lambertien. Cependant ce modèle n'est pas suffisant ; il faudrait au moins pouvoir déterminer les paramètres d'un modèle spéculaire. Pour cela, il faudrait implémenter une méthode d'estimation des paramètres par comparaison entre l'image mesurée et la simulation d'éclairage [BG01].

Annexe A

Notions de base de radiométrie

Ce chapitre décrit quelques aspects de la lumière comme notions de base de la synthèse d'images. Dans ce domaine, l'ouvrage de Glassner [Gla94] est une référence intéressante.

A.1 Considérations physiques et biologiques de la lumière

A.1.1 Nature de la lumière

La lumière est un phénomène de déplacement d'énergie visible par l'oeil. D'après la physique moderne, la lumière suit la dualité onde-particule définie par la mécanique quantique. Elle est donc à la fois :

- un ensemble d'ondes électromagnétiques (de longueurs d'onde comprises entre 380 nm et 780 nm, pour la lumière visible par l'oeil humain) ;
- un flux de particules (ou quanta d'énergie) appelées photons.

La lumière est donc un rayonnement électromagnétique c'est-à-dire une perturbation des champs électrique et magnétique. Ce rayonnement est porté par des photons, particules sans masse.

Une lumière peut être composée de plusieurs ondes électromagnétiques de longueurs d'onde différentes, ce qui définit son spectre.

Le comportement de la lumière peut être décrit par différentes lois (optique géométrique, optique ondulatoire, lois de Maxwell).

A.1.2 Transport de la lumière

La lumière peut se propager dans le vide ou dans un milieu de matière. En synthèse d'image, on considère que la lumière se propage en ligne droite, par des rayons. La lumière suit alors les règles de l'optique géométrique et subit les phénomènes de changement de milieu décrits plus loin dans cette section. Un milieu participant permet de simuler un milieu hétérogène (donc subissant les phénomènes de changement de milieu) mais dont le comportement à la lumière est uniforme. La région qui sépare deux milieux s'appelle l'interface.

Émission

La lumière est créée par un milieu (appelé source) dans un autre (voir Fig. A.1).

Absorption

La lumière est captée par le nouveau milieu qu'elle rencontre (voir Fig. A.2).

Réflexion et diffusion

À l'interface des milieux la lumière change de sens ou de direction. Après réflexion, la lumière se propage de nouveau dans le milieu initial (voir Fig. A.3 (a)). La réflexion est dite idéale si la lumière est réfléchiée dans une seule direction, donnée par la loi de Snell-Descartes (voir Fig. A.3 (b)). Elle est dite diffuse si la lumière est réfléchiée uniformément dans toutes les directions (voir Fig. A.3 (c)).

Réfraction ou transmission

La lumière change de direction à l'interface puis se propage dans le nouveau milieu (voir Fig. A.4).

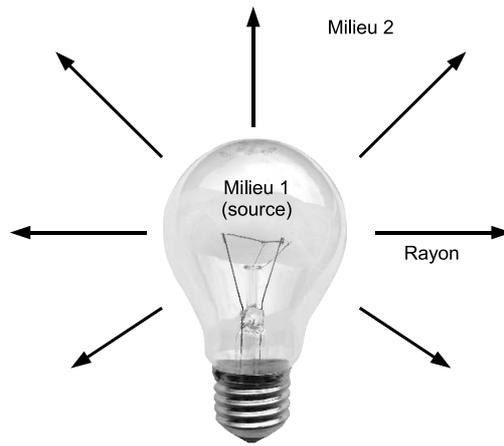


FIG. A.1 – Emission de lumière.

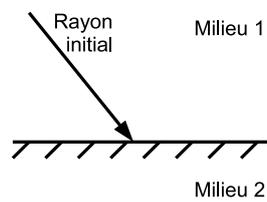


FIG. A.2 – Absorption de lumière.

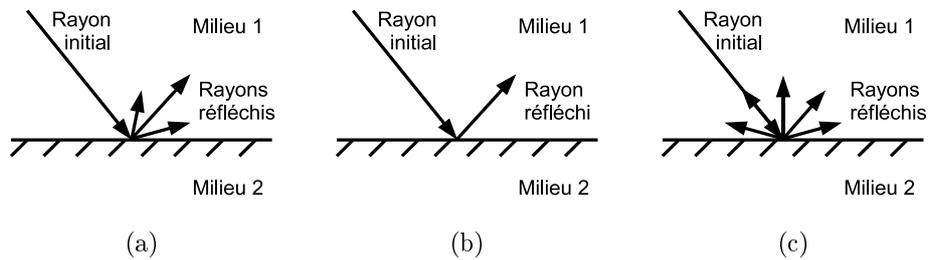


FIG. A.3 – Réflexion de lumière (a), réflexion idéale (b), réflexion diffuse (c).

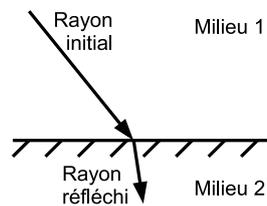


FIG. A.4 – Réfraction de lumière.

Diffraction et interférences

Lorsque le milieu initial traverse un autre milieu en une région de petite taille, la lumière est diffusée en plusieurs points de cette région. Les nouvelles ondes ainsi créées se rencontrent et interagissent (voir Fig. A.5).

Phosphorescence

Le milieu rencontré continue à ré-émettre de la lumière quand il n'est plus éclairé.

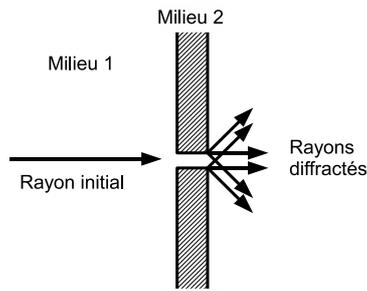


FIG. A.5 – Diffraction et interférences.

Fluorescence

Le milieu réfléchit la lumière dans une autre longueur d'onde (éventuellement inexistante dans la lumière initiale).

Polarisation

La lumière peut être considérée comme une onde vectorielle, c'est-à-dire qu'elle se déplace selon un vecteur autour duquel elle oscille. Une onde est polarisée lorsque sa position dans le plan perpendiculaire au déplacement est périodique (voir Fig. A.6). La polarisation est une caractéristique d'une onde monochromatique (composée d'une seule longueur d'onde). Dans le cas d'une onde polychromatique (train d'onde de longueurs d'onde différentes), les polarisations se cumulent et la lumière paraît non polarisée. La polarisation peut être modifiée par certains phénomènes comme la réflexion sur le verre ou sur le métal.

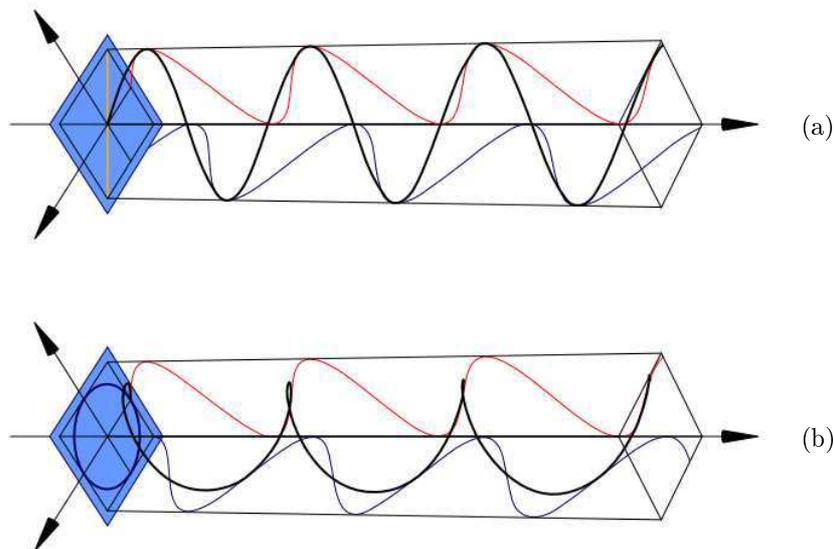


FIG. A.6 – Polarisation rectiligne (a) et circulaire (b) de la lumière. Images fournies par Wikipedia®.

A.1.3 Perception de la lumière

Structure de l'oeil

L'oeil est l'organe qui permet de percevoir la lumière (voir Fig. A.7) et ainsi de créer les images qui seront interprétées par le système nerveux. Il est composé principalement de :

- la cornée, lentille transparente dont le rôle est de focaliser la lumière sur le cristallin ;
- l'iris, membrane circulaire et contractile permettant d'adapter la vision à la luminosité ambiante ;
- la pupille, trou situé au centre de l'iris ;

- le cristallin, lentille biologique servant à l’accommodation («mise au point» d’un point objet en un point image focal sur la rétine) ;
- la rétine, membrane regroupant des cellules nerveuses photoréceptrices (cônes et bâtonnets), servant à la transformation de l’onde électromagnétique en impulsions électriques utilisables par le système nerveux.

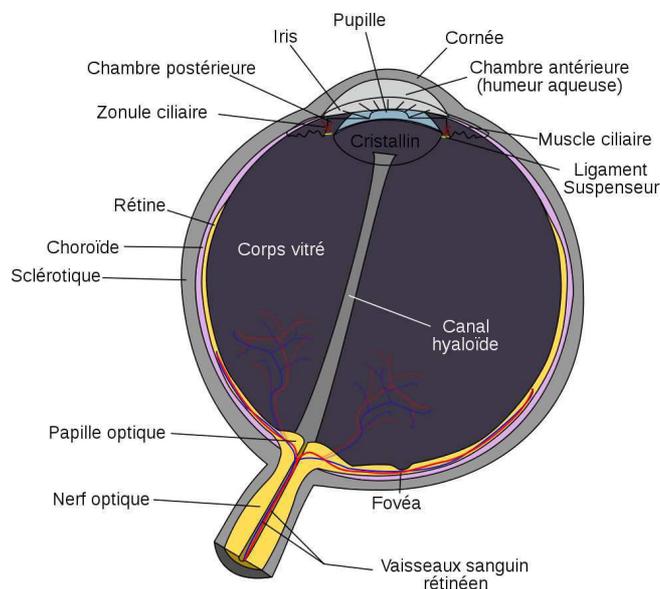


FIG. A.7 – Structure de l’œil humain. Image fournie par Wikipedia®.

Réponse de l’œil

Une première adaptation de l’œil provient de l’écartement de l’iris en fonction de la lumière ambiante. Cette adaptation permet à l’homme de percevoir avec la même sensibilité de jour ou de nuit.

Une autre adaptation de l’œil est due aux différents récepteurs photoélectriques situés sur la rétine (voir Fig. A.8) :

- les cônes, de type bleu, vert ou rouge, permettent de décomposer la lumière en couleurs. Ils sont sensibles à des intensités lumineuses relativement importantes (vision photopique) ;
- les bâtonnets sont sensibles à des intensités lumineuses faibles (vision scotopique) mais ne permettent pas de distinguer les couleurs.

Les sensibilités relatives de l’œil humain en vision photopique et scotopique ont été caractérisées par la CIE et sont présentées Fig. A.9.

La CIE a également défini un observateur standard via notamment les trois fonctions de sensibilité spectrale $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$ où λ est la longueur d’onde (voir Fig. A.10 et Annexe C).

Phénomènes visuels

De nombreux phénomènes visuels peuvent se produire de par la complexité (physiologique et psychologique) du système visuel : pupille, type et répartition des photorécepteurs, fonctionnement d’un photorécepteur, interprétation par le système nerveux. . . Cette section présente quelques phénomènes visuels intéressants.

Aliasing : l’œil perçoit la lumière grâce à des photodétecteurs qui produisent une image discrétisée de la réalité. Il est donc sujet aux effets d’aliasing. Les photorécepteurs de l’œil sont répartis de façon à limiter ces effets.

Bruit : intuitivement, le bruit est une perturbation aléatoire d’un signal perçu ou mesuré. Il est généralement lié au processus de détection du signal et est, en pratique, toujours présent. L’œil est capable

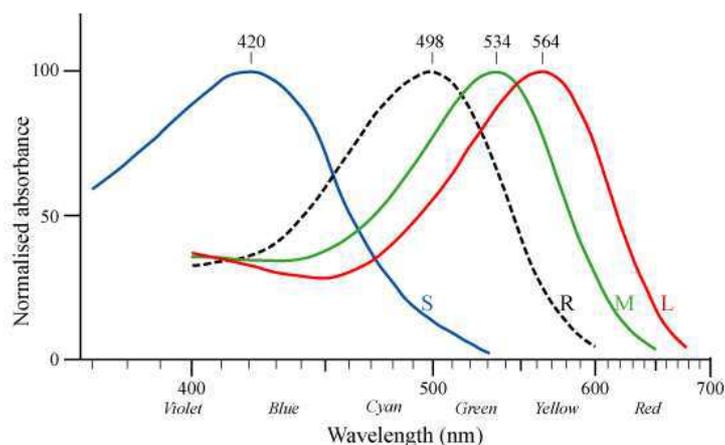


FIG. A.8 – Courbes d'absorbance des cônes bleus (S), des cônes verts (M), des cônes rouges (L) et des bâtonnets (R) de l'oeil humain. Image fournie par Wikipedia®.

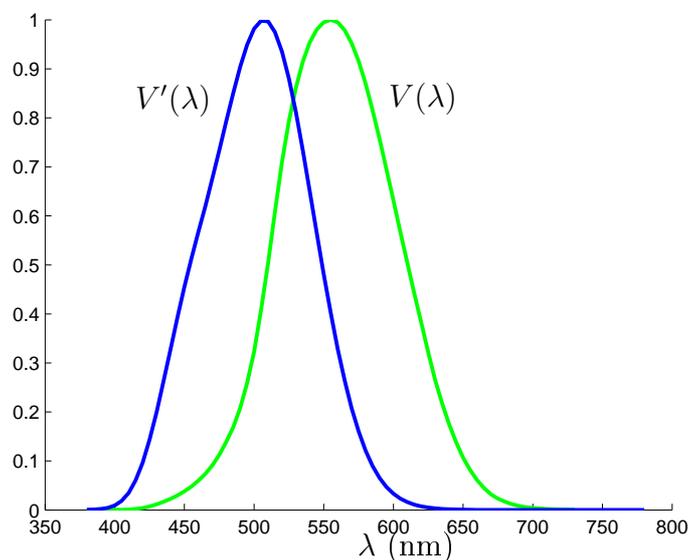


FIG. A.9 – Courbe de luminosité photopique à 2 degré CIE 1924 (V) et courbe de luminosité scotopique CIE 1951 (V').

de réduire ce phénomène grâce à la répartition des photorécepteurs et à l'interprétation par le système nerveux de l'image perçue.

Contraste : l'oeil n'est pas sensible à des valeurs absolues mais à des valeurs relatives. Pour un niveau I , il existe une variation ΔI à partir de laquelle, l'oeil perçoit la différence entre les niveaux I et $I + \Delta I$ (voir Fig. A.11). Le rapport $\Delta I/I$ est à peu près constant selon I et vaut approximativement 0.02.

La figure A.12 illustre un autre aspect du contraste : la couleur des carrés intérieurs semble plus clair sur fond sombre que sur fond clair.

Bandes de Mach : des bandes uniformes de couleurs différentes sont juxtaposées. Le système visuel donne l'impression qu'il y a un dégradé au niveau des transitions entre bandes (voir Fig. A.13). Les bandes de Mach illustrent le caractère intégrateur des photorécepteurs : le centre des cellules répond positivement au signal alors que leur périphérie répond négativement (voir Fig. A.14).

Ellipses de MacAdam : l'oeil a une certaine sensibilité aux couleurs. Ainsi, pour une couleur donnée, il existe un ensemble de couleurs que l'oeil n'est pas capable de distinguer. Ces couleurs peuvent être

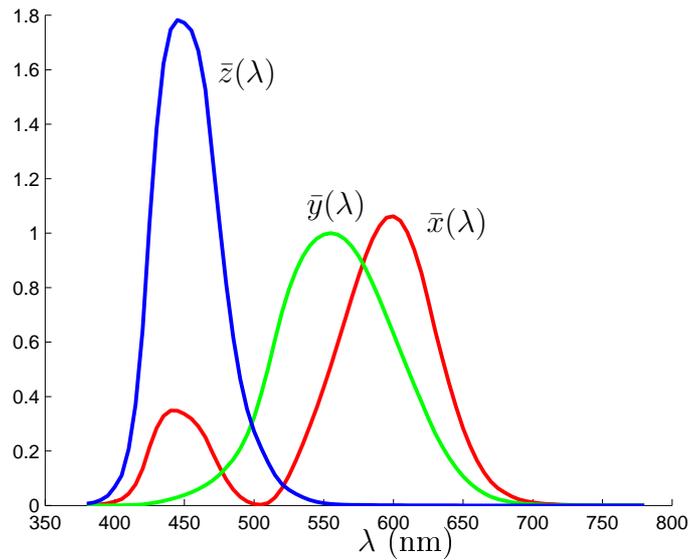


FIG. A.10 – Réponse de l'observateur standard CIE 1931.

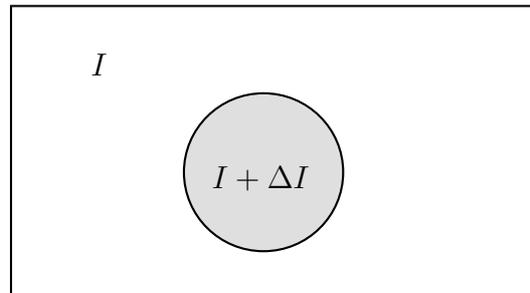


FIG. A.11 – Sensibilité de l'oeil au contraste : l'oeil distingue l'objet si $\Delta I/I > 2\%$.



FIG. A.12 – Effet du contraste sur la perception : les deux carrés intérieurs sont de la même couleur mais donne une impression visuelle différente.

représentées sur un diagramme de chromaticité (par exemple un plan XZ dans un espace XYZ) où elles sont contenues à l'intérieur d'une ellipse (appelée ellipse de MacAdam).

Couleurs métamères : la couleur est perçue grâce aux trois types de cônes (S, M et L). Ces trois types de photodétecteurs ont une réponse spectrale particulière. Une couleur est perçue comme une combinaison des réponses des photodétecteurs. Ainsi, des couleurs ayant des spectres différents peuvent susciter les mêmes réponses des photodétecteurs et donc donner la même impression visuelle. De telles couleurs (appelées couleurs métamères) ne peuvent donc pas être distinguées par le système visuel (voir Fig. A.16).

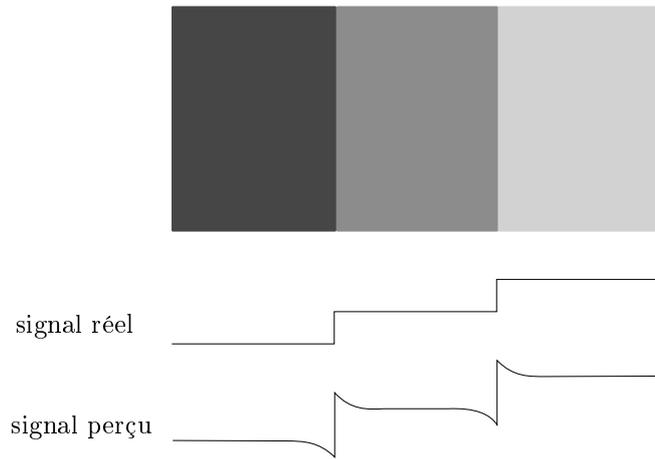


FIG. A.13 – Bandes de Mach.

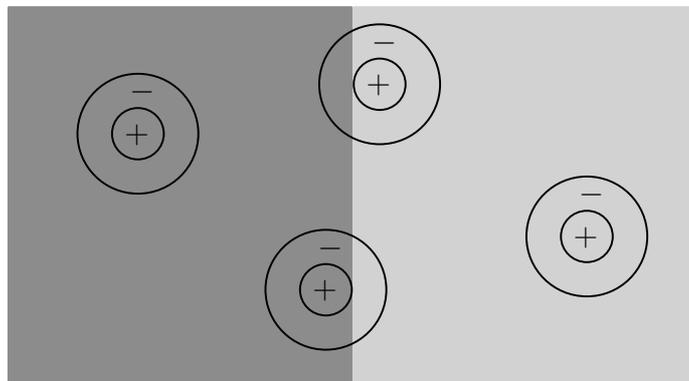


FIG. A.14 – Interprétation des bandes de Mach par les photodétecteurs et le système nerveux.

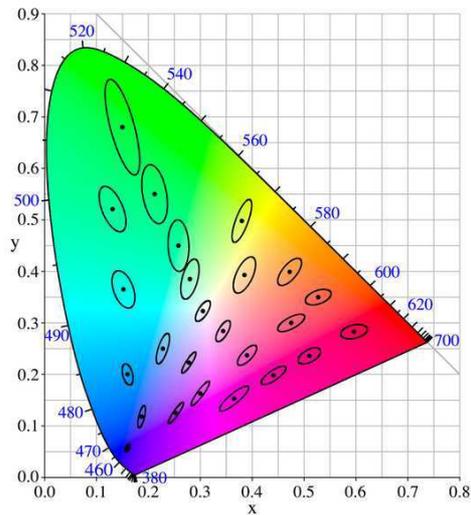


FIG. A.15 – Ellipses de MacAdam : chaque ellipse contient un ensemble de couleurs que l'oeil ne peut pas distinguer. Image fournie par Wikipedia®.

A.2 Grandeurs radiométriques et photométriques

A.2.1 Généralités

Cette section décrit quelques grandeurs radiométriques et photométriques définies dans [IES86]. Ces grandeurs sont présentées dans les tableaux Tab. A.1 et Tab. A.2, puis détaillées par la suite.

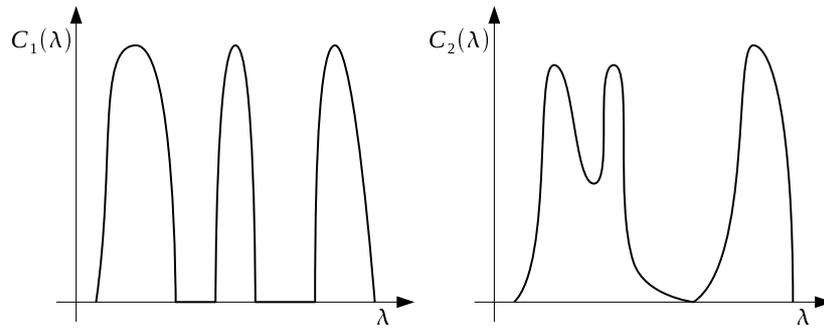


FIG. A.16 – Exemple de couleurs métamères : ces deux spectres produisent la même impression visuelle.

Grandeur	Terme anglais	Notation	Unité
Énergie	radiant energy	Q_e	W s \triangleq J
Puissance radiante	radiant flux	Φ_e	W
Éclairement énergétique	irradiance	E_e	W m ⁻²
Exitance énergétique	radiant exitance	M_e	W m ⁻²
Intensité énergétique	radiant intensity	I_e	W sr ⁻¹
Luminance énergétique	radiance	L_e	W sr ⁻¹ m ⁻²

TAB. A.1 – Principales grandeurs radiométriques.

La radiométrie est la branche de l'optique qui étudie la mesure des ondes électromagnétiques (ce qui comprend la lumière visible par l'homme). La photométrie est la branche de l'optique qui étudie la mesure de la lumière perçue par l'oeil humain. Ainsi, l'énergie au sens photométrique Q_v correspond à l'énergie au sens radiométrique Q_e pondérée par la sensibilité de l'oeil humain, généralement la fonction de sensibilité photopique V (voir Fig. A.9) :

$$Q_v = K_m \int V(\lambda) Q_e(\lambda) d\lambda$$

K_m est un facteur de conversion qui vaut conventionnellement 680 lm/W.

Comme il y a équivalence entre radiométrie et photométrie, on se place généralement dans l'un des deux cadres et on utilise des notations sans indice.

A.2.2 Énergie

L'énergie, concept fondamental de la physique, peut être définie comme la capacité à produire un travail (mouvement, chaleur, lumière). En radiométrie, l'énergie correspond à l'énergie de l'onde électromagnétique, exprimée en watt seconde (W s) ou joule (J) . En photométrie, l'énergie lumineuse ou quantité de lumière correspond à l'énergie de la lumière perçue, exprimée en lumen seconde (lm s) ou talbot.

Grandeur	Terme anglais	Notation	Unité
Quantité de lumière	luminous energy	Q_v	lm s \triangleq talbot
Flux lumineux	luminous flux	Φ_v	lm
Éclairement	illuminance	E_v	lm m ⁻² \triangleq lx
Exitance	luminous emittance	M_v	lm m ⁻²
Intensité lumineuse	luminous intensity	I_v	lm sr ⁻¹ \triangleq cd
Luminance	luminance	L_v	lm sr ⁻¹ m ⁻² \triangleq nit

TAB. A.2 – Principales grandeurs photométriques.

A.2.3 Puissance et flux

La puissance correspond à un débit d'énergie, c'est-à-dire la quantité d'énergie transmise par unité de temps dt :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

La puissance d'une source de lumière est donc la puissance de toute la lumière émise (voir Fig. A.17). En radiométrie, on parle de puissance radiante, exprimée en watt (W). En photométrie, on parle de flux lumineux, exprimé en lumen (lm).

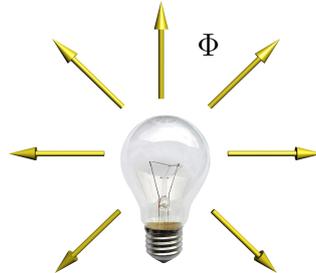


FIG. A.17 – Flux d'une source de lumière.

A.2.4 Éclairement

L'éclairement (également appelé éclairage) correspond à la puissance reçue par une surface par unité d'aire dA (voir Fig. A.18) :

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

En radiométrie, il est appelé éclairement énergétique et est exprimé en watt par mètre carré (W m^{-2}). En photométrie, il est appelé éclairement et est exprimé en lumen par mètre carré (lm m^{-2}) ou lux (lx).

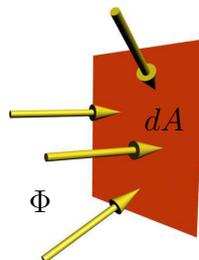


FIG. A.18 – Éclairement d'une surface.

A.2.5 Exitance

L'exitance (également appelé éclairement émis) correspond à la puissance émise par une surface par unité d'aire dA (voir Fig. A.19) :

$$M = \frac{d\Phi}{dA}$$

En radiométrie, elle est appelée exitance énergétique et est exprimée en watt par mètre carré (W m^{-2}). En photométrie, elle est appelée exitance et est exprimée en lumen par mètre carré (lm m^{-2}) (l'unité lux est réservée à l'éclairement).

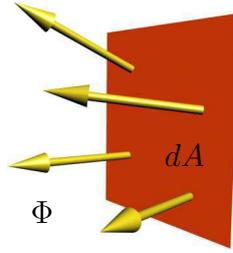


FIG. A.19 – Exitance d’une surface.

A.2.6 Intensité

L’intensité correspond à la puissance émise par une source ponctuelle par unité d’angle solide $d\vec{\omega}$ (voir Fig. A.20) :

$$I = \frac{d\Phi}{d\vec{\omega}}$$

En radiométrie, elle est appelée intensité énergétique et est exprimée en watt par stéradian (W sr^{-1}). En photométrie, elle est appelée intensité lumineuse et est exprimée en lumen par stéradian (lm sr^{-1}) ou candela (cd). Le candela fait partie des sept unités du Système International d’Unités. Pour respecter la convention, il faudrait donc définir les grandeurs photométriques par rapport au candela. Ici, nous avons préféré utiliser le lumen pour illustrer le parallèle avec les grandeurs radiométriques.



FIG. A.20 – Intensité d’une source de lumière.

A.2.7 Luminance

La luminance correspond à la puissance émise ou reçue par une surface par unité d’angle solide $d\vec{\omega}$ et par unité d’aire apparente $\cos\theta dA$ (voir Fig. A.21) :

$$L = \frac{d^2\Phi}{\cos\theta dA d\vec{\omega}}$$

En radiométrie, elle est appelée luminance énergétique et est exprimée en watt par stéradian et par mètre carré ($\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2}$). En photométrie, elle est appelée luminance et est exprimée en lumen par stéradian et par mètre carré ($\text{lm sr}^{-1} \text{m}^{-2}$) ou nit.

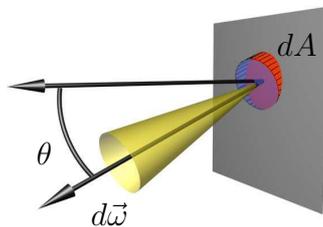


FIG. A.21 – Luminance reçue ou émise par une surface.

Sur la figure A.21, l’unité d’angle solide ($d\vec{\omega}$) est représentée en jaune et l’unité d’aire de la surface considérée (dA) en rouge. θ est l’angle entre la normale à la surface et la direction $\vec{\omega}$ de l’angle solide. L’unité d’aire apparente dans la direction $\vec{\omega}$ (représentée en bleu sur la figure) est donc bien $\cos\theta dA$.

À noter que la luminance sert de grandeur fondamentale en synthèse d’images car elle est plus pratique à utiliser que la puissance.

Modèle	Notation	Description
BRDF	f_r	Bidirectional reflectance-distribution function
BTDF	f_t	Bidirectional transmission-distribution function
BPDF	f	Bidirectional scattering-distribution function
BSSRDF	S	Bidirectional scattering-surface-distribution function

TAB. A.3 – Principaux modèles de réflectance.

A.3 Réflectance

La notion de réflectance a été formalisée dans [NRH⁺77]. Les notations utilisées dans cette section sont reprises de [Gla94].

A.3.1 Modèles de réflectance

Intuitivement, la réflectance donne la proportion de puissance incidente qui est réfléchiée par une surface. Elle caractérise donc le comportement du matériau de la surface à la lumière. Suivant les matériaux, ce comportement peut être complexe, c'est pourquoi il existe différents modèles de réflectance, plus ou moins complets (voir Tab. A.3 et Fig. A.22).

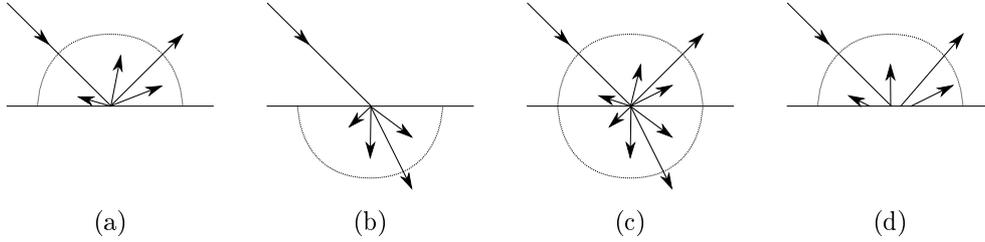


FIG. A.22 – Illustration des principaux modèles de réflectance : BRDF (a), BTDF (b), BSDF (c) et BSSRDF (d).

Les notations utilisées sont présentées Fig. A.23. On considère Q comme point de référence ainsi qu'une longueur d'onde donnée.

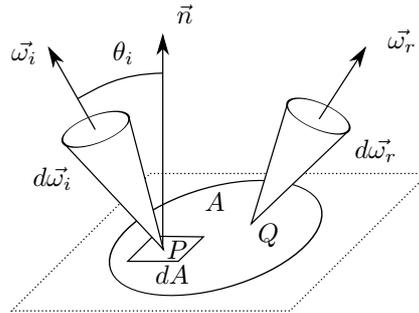


FIG. A.23 – Notations utilisées pour les modèles de réflectances.

BSSRDF

La BSSRDF est un modèle de réflectance relativement complet. Comme tous les modèles présentés ici, il suppose que, pour une longueur d'onde donnée, la puissance réfléchiée est proportionnelle à la puissance incidente. Ce coefficient de proportionnalité S est donné par l'équation A.1.

$$S(d\vec{\omega}_i, P, d\vec{\omega}_r) = \frac{dL_r(d\vec{\omega}_i, P, d\vec{\omega}_r)}{L_i(d\vec{\omega}_i, P) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i dA} \quad [\text{sr}^{-1} \text{ m}^{-2}] \quad (\text{A.1})$$

S dépend de l'angle solide d'incidence $\vec{\omega}_i$, de la position d'incidence P et de l'angle solide de réflexion $\vec{\omega}_r$. $L_i(d\vec{\omega}_i, P)$ est la luminance incidente selon $d\vec{\omega}_i$ en P . La puissance reçue par la surface dA selon $d\vec{\omega}_i$

en P est donc $L_i(d\vec{\omega}_i, P) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i dA$. Enfin, $dL_r(d\vec{\omega}_i, P, d\vec{\omega}_r)$ est l'élément de luminance réfléchié selon $d\vec{\omega}_r$ apportée par la lumière incidente selon $d\vec{\omega}_i$ en P .

Une autre façon de voir S consiste à se placer du point de vue de la lumière réfléchié :

$$dL_r(d\vec{\omega}_i, P, d\vec{\omega}_r) = S(d\vec{\omega}_i, P, d\vec{\omega}_r) L_i(d\vec{\omega}_i, P) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i dA \quad [W \text{ sr}^{-1} \text{ m}^{-2}]$$

On obtient alors la luminance réfléchié dans la direction $\vec{\omega}_r$ par intégration selon $\vec{\omega}_i$ et P :

$$L_r(\vec{\omega}_r) = \int_{P \in A} \int_{\omega_i \in \Omega_i} S(\vec{\omega}_i, P, \vec{\omega}_r) L_i(\vec{\omega}_i, P) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i dA \quad [W \text{ sr}^{-1} \text{ m}^{-2}]$$

BRDF, BTDF et BSDF

La BRDF est une simplification de la BSSRDF. Elle suppose que la surface A est plane et éclairée uniformément ce qui permet de considérer que la luminance incidente ne dépend pas de P . On suppose également que le matériau est uniforme et isotrope, donc que la BRDF f_r ne dépend finalement pas de Q .

La BRDF caractérise donc un matériau et ne dépend que des directions d'incidence et de réflexion. Elle peut être définie à partir de la BSSRDF par l'équation A.2.

$$f_r(d\vec{\omega}_i \rightarrow d\vec{\omega}_r) = \int_{P \in A} S(d\vec{\omega}_i, P, d\vec{\omega}_r) dA \quad [\text{sr}^{-1}] \quad (\text{A.2})$$

En développant S d'après l'équation A.1, on obtient :

$$f_r(d\vec{\omega}_i \rightarrow d\vec{\omega}_r) = \int_{P \in A} \frac{dL_r(d\vec{\omega}_i, P, d\vec{\omega}_r)}{L_i(d\vec{\omega}_i) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i dA} dA \quad [\text{sr}^{-1}]$$

D'après les simplifications réalisées, la luminance incidente ne dépend pas de P et s'exprime donc $L_i(d\vec{\omega}_i)$. Ceci permet également de sortir la lumière incidente de l'intégrale :

$$f_r(d\vec{\omega}_i \rightarrow d\vec{\omega}_r) = \frac{\int_{P \in A} dL_r(d\vec{\omega}_i, P, d\vec{\omega}_r)}{L_i(d\vec{\omega}_i) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i} \quad [\text{sr}^{-1}]$$

Finalement, f_r peut être définie par rapport à la luminance réfléchié par tous les points P de A :

$$f_r(d\vec{\omega}_i \rightarrow d\vec{\omega}_r) = \frac{dL_r(d\vec{\omega}_i, d\vec{\omega}_r)}{L_i(d\vec{\omega}_i) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i} \quad [\text{sr}^{-1}] \quad (\text{A.3})$$

Ainsi la BRDF caractérise la réflexion de la lumière par un matériau, c'est-à-dire la lumière propagée dans le même hémisphère que la lumière incidente. La BTDF est très proche de la BRDF. Elle caractérise la transmission de la lumière par un matériau, c'est-à-dire la lumière propagée dans l'autre hémisphère que celui de la lumière incidente. Enfin, la BSDF regroupe la BRDF et la BTDF. Elle est définie sur les deux hémisphères et caractérise donc à la fois la réflexion et la transmission de la lumière par un matériau.

Propriétés physiques d'une BRDF

Réciprocité d'Helmholtz : une BRDF physiquement correcte respecte la règle de réciprocité d'Helmholtz c'est-à-dire qu'une lumière incidente dans la direction $\vec{\omega}_1$ est réfléchié dans la direction $\vec{\omega}_2$ dans la même proportion qu'une lumière incidente dans la direction $\vec{\omega}_2$ est réfléchié dans la direction $\vec{\omega}_1$. En d'autres termes, la BRDF ne varie pas lorsqu'on permute les directions d'incidence et de réflexion :

$$\forall (\vec{\omega}_1, \vec{\omega}_2), f_r(\vec{\omega}_1 \rightarrow \vec{\omega}_2) = f_r(\vec{\omega}_2 \rightarrow \vec{\omega}_1)$$

Conservation de l'énergie : une BRDF physiquement correcte respecte la loi de conservation de l'énergie, c'est-à-dire que l'énergie réfléchié ne peut pas être plus élevée que l'énergie reçue :

$$\forall \vec{\omega}_i, \int_{\vec{\omega}_r \in \Omega_r} f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r) \cos \theta_r d\vec{\omega}_r \leq 1$$

Limites des modèles de réflectance

Tout d'abord, ces modèles de réflectance sont limités au niveau fonctionnel. En effet, il ne prennent pas en compte tous les phénomènes de propagation de la lumière comme la polarisation, la phosphorescence, la fluorescence, la diffraction. . . De même, seule la BSSRDF permet de caractériser des matériaux translucides comme le marbre, la peau humaine, le lait. . . Ces matériaux ont la propriété de propager la lumière à l'intérieur de la matière avant de la réfléchir ou de la transmettre (sub-surface scattering), ce qui nécessite de prendre en compte le point d'incidence de la lumière.

Enfin, ces modèles de réflectance sont limités au niveau pratique. Mesurer une BRDF revient à discrétiser une fonction à quatre variables (les deux angles d'incidence et les deux angles de réflexion) ce qui nécessite du temps, de l'espace mémoire et du matériel spécifique (gonioréfectomètre. . .). De même, l'utilisation de ces données pour de la simulation d'éclairage n'est pas forcément pratique. C'est pourquoi, les matériaux sont souvent simplifiés par des modèles paramétriques de BRDF (voir Section A.3.2).

Caractériser un matériau est donc un compromis entre la précision de la description de son comportement à la lumière et l'efficacité de cette description. En synthèse d'images, on se limite généralement à utiliser des modèles voire des mesures de BRDF, ce qui permet tout de même de caractériser une classe relativement conséquente de matériaux.

A.3.2 Modèles de BRDF

Il est possible de mesurer la BRDF d'un matériau réel puis de la réutiliser dans une simulation d'éclairage. Cependant, le processus d'acquisition est peu pratique à mettre en oeuvre. De plus, cette méthode laisse peu de place à la créativité artistique, application importante de la synthèse d'image. C'est pourquoi, on préfère généralement utiliser des modèles de BRDF. Ces modèles permettent, grâce à quelques paramètres, de décrire toute une classe de matériaux. Il existe de nombreux modèles de BRDF [Gla94, Sch94b] dont quelques uns sont présentés ici.

Petit historique

Si certains modèles de BRDF sont empiriques, d'autres sont basés sur des théories décrivant le comportement de matériaux à la lumière.

En 1750, Bouguer présente la théorie des microfacettes. Cette théorie décrit les matériaux rugueux, dont la surface est, à l'échelle microscopique, un ensemble de facettes de tailles et d'orientations différentes. Au niveau de la lumière, la géométrie de ces facettes produit des phénomènes d'ombrage et de masquage.

En 1760, Lambert propose la loi du cosinus pour décrire les matériaux purement diffus (voir Fig. A.24).

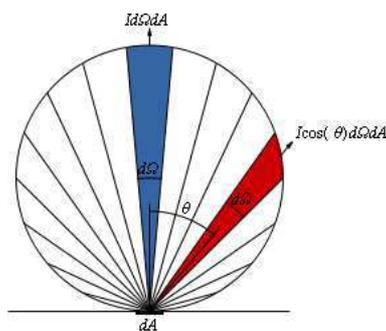


FIG. A.24 – Réflexion de Lambert. Image fournie par Wikipedia®.

En 1815, Fresnel propose un modèle pour décrire les matériaux purement spéculaires (voir Fig. A.25). Ce modèle est une dérivation des équations proposées plus tard par Maxwell.

Qualités d'un modèle de BRDF

Un modèle de BRDF doit être capable de décrire une ou plusieurs classes de matériaux (par exemples des plastiques, métaux, matériaux multicouches, matériaux anisotropes. . .).

La cohérence physique du modèle peut être importante. Le modèle doit notamment vérifier la réciprocité d'helmholtz ainsi que la loi de conservation de l'énergie. De même, une certaine fidélité du modèle au matériau réel peut être recherchée.

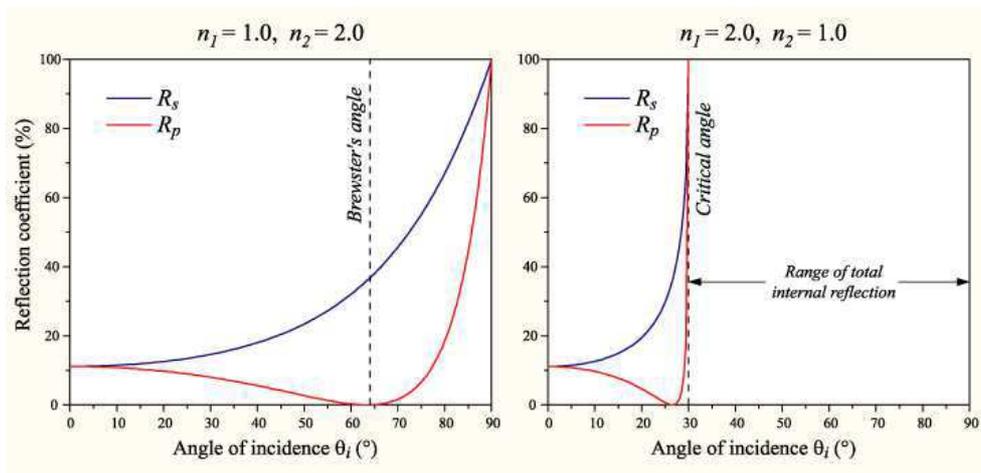


FIG. A.25 – Réflexion de Fresnel en fonction de l'angle d'incidence et de la polarisation. Image fournie par Wikipedia^(R).

Pour une utilisation artistique, il est important que le modèle soit intuitif à paramétrer. Il faut notamment que les paramètres soient peu nombreux, indépendants et qu'ils traduisent chacun une caractéristique intuitive du matériau.

Pour une utilisation interactive, le modèle doit pouvoir être évalué avec peu de calculs. Cette qualité est d'autant plus importante que l'évaluation du modèle est réalisée de nombreuses fois lors d'une simulation d'éclairage.

Enfin, le modèle doit pouvoir s'intégrer facilement dans les algorithmes qui les utilisent. Il existe notamment des algorithmes probabilistes de rendu par lancer de rayons qui imposent certaines particularités à leurs modèles de BRDF.

Modèle de Lambert

Le modèle de BRDF de Lambert permet de caractériser les matériaux purement diffus, c'est-à-dire qui réfléchissent la lumière de la même façon dans toutes les directions (voir Fig. A.26). Par définition, la BRDF d'un tel matériau est :

$$\forall(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r), f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r) = C_d$$

où $C_d \in [0, 1]$ est le coefficient de réflexion diffuse caractérisant le matériau.

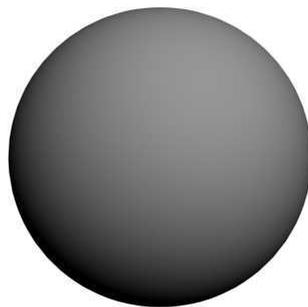


FIG. A.26 – Simulation d'un matériau par le modèle de Lambert.

Si on considère une source de lumière ponctuelle, d'après l'équation de réflectance A.4, la luminance réfléchiée dans la direction $\vec{\omega}_r$ est :

$$L_r(\vec{\omega}_r) = L_i(\vec{\omega}_i)C_d \cos \theta_i$$

où $\vec{\omega}_i$ est la direction vers la source (ponctuelle), θ_i l'angle entre $\vec{\omega}_i$ et la normale à la surface et L_i la luminance incidente.

Dans la réalité, aucun matériau est purement diffus. Il s'agit d'un cas idéal uniquement théorique.

Modèle de Phong

Le modèle de Phong [Pho75] permet de décrire un matériau isotrope ayant un comportement à la fois diffus et spéculaire (voir Fig. A.27). C'est un modèle empirique encore beaucoup utilisé aujourd'hui. En reprenant l'hypothèse de la source de lumière ponctuelle, la luminance réfléchie est, d'après le modèle de Phong :

$$L_r(\vec{\omega}_r) = L_i(\vec{\omega}_i)(C_d \cos \theta_i + C_s \cos^{n_i} \alpha_i)$$

où C_s (resp. n_i) est le coefficient (resp. l'indice) de réflexion spéculaire caractérisant la composante spéculaire du matériau et α_i l'angle entre $\vec{\omega}_r$ et la réflexion de $\vec{\omega}_i$ par rapport à la normale à la surface (les autres notations sont identiques au cas du modèle de Lambert).

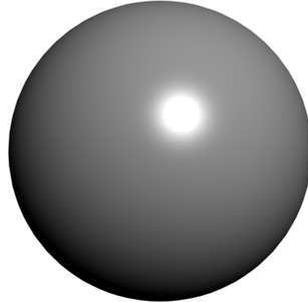


FIG. A.27 – Simulation d'un matériau par le modèle de Phong.

Modèle de Cook-Torrance

Le modèle de Cook-Torrance [CT82] est inspiré de la théorie des microfacettes, notamment des travaux de Torrance-Sparrow [TS67] et de Beckmann-Spizzichino [BS63]. Il décompose la réflectance en une composante diffuse et une composante spéculaire. La composante diffuse suit la définition de Lambert. La composante spéculaire fait intervenir le facteur de Fresnel pour décrire le comportement des microfacettes, un facteur d'atténuation géométrique pour modéliser les phénomènes d'ombrage et de masquage entre facettes et une fonction de distribution des microfacettes.

Modèle de He-Torrance-Sillion-Greenberg

Le modèle de He-Torrance-Sillion-Greenberg [HTSG91] est un modèle complet prenant en compte de nombreux phénomènes physiques comme la diffraction, les interférences et la polarisation. Il est basé sur l'optique ondulatoire et la théorie de la diffraction de Kihchhoff. Il décompose la réflectance en une composante diffuse, une composante spéculaire et une composante diffuse directionnelle. Il permet ainsi de modéliser de nombreux types de matériaux mais au prix d'une grande complexité.

Modèle de Schlick

Le modèle de Schlick [Sch94a] est le résultat d'une démarche intéressante à plus d'un titre. Tout d'abord, ce modèle répond à un véritable cahier des charges pré-établi. Celui-ci précise notamment la cohérence physique à atteindre, que le modèle doit gérer des matériaux isotropes et anisotropes, être paramétrable simplement et intuitivement, être peu coûteux à évaluer et facilement intégrable à un algorithme de rendu de type Monte-Carlo. Enfin, le modèle de Schlick est issu d'une étude critique des modèles existants. À partir de ces modèles, il a déterminé certains points à améliorer ainsi que des approximations permettant de simplifier les calculs sans négliger la précision du modèle final.

A.4 Équation de rendu

A.4.1 Définition

L'équation de rendu est une simplification de l'équation de luminance qui est plus complète mais aussi plus complexe. La construction de l'équation de luminance ainsi que différentes simplifications sont détaillées dans [Gla94]. L'équation de rendu a été définie par Kajiya dans [Kaj86]. C'est l'équation fondamentale de la synthèse d'images, faisant le lien entre la radiométrie et le transport de la lumière. Il s'agit d'une équation implicite c'est-à-dire qu'elle décrit les conditions que la solution doit satisfaire sans

donner explicitement cette solution. L'objectif du rendu est de déterminer cette solution. Cette section présente une construction simple de l'équation de rendu.

La luminance totale réfléchie dans la direction $\vec{\omega}_r$ s'obtient d'après les luminances réfléchies dans la direction $\vec{\omega}_r$ depuis les directions incidentes $\vec{\omega}_i$:

$$L_r(\vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega_i} L_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) d\vec{\omega}_i \quad [\text{W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}]$$

Or, d'après la définition de la BRDF donnée la l'équation A.3,

$$dL_r(d\vec{\omega}_i, d\vec{\omega}_r) = f_r(d\vec{\omega}_i \rightarrow d\vec{\omega}_r) L_i(d\vec{\omega}_i) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i \quad [\text{W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}]$$

Donc, la luminance totale réfléchie dans la direction $\vec{\omega}_r$ peut s'écrire :

$$L_r(\vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega_i} f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r) L_i(\vec{\omega}_i) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i \quad [\text{W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}] \quad (\text{A.4})$$

L'équation A.4 est appelée équation de réflectance. Elle donne la luminance totale réfléchie dans une direction. Pour modéliser des sources de lumières, on doit permettre d'émettre de la lumière. Pour cela, on ajoute un terme modélisant la luminance émise dans la direction considérée, ce qui donne enfin l'équation de rendu :

$$L(R, \vec{\omega}_r) = L_e(Q, \vec{\omega}_r) + \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega_i} f_r(Q, \vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r) L(Q, \vec{\omega}_i) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i \quad [\text{W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}] \quad (\text{A.5})$$

L'équation A.5 considère la réflexion au point Q vers le point R , d'où $\vec{\omega}_r = \frac{\vec{QR}}{||\vec{QR}||}$. Dans [Gla94], cette équation est appelée VTIGRE (vacuum, time invariant, gray radiance equation) c'est-à-dire l'équation de luminance dans le vide, pour une longueur d'onde et indépendamment du temps.

A.4.2 Résolution

L'objectif de la synthèse d'images est de déterminer une fonction L pour une surface image (espace image) placée dans une scène (espace objets) et telle que L satisfait l'équation de rendu A.5.

Deux approches permettent de résoudre l'équation de rendu. La première consiste à déterminer explicitement L pour toute la scène puis à en déduire L pour la surface image. C'est l'approche utilisée par les algorithmes de type radiosité. La seconde approche consiste à déterminer directement L uniquement pour les points de la surface image, ce qui implique généralement tout de même de calculer L pour une grande partie de la scène. C'est l'approche utilisée par les algorithmes de type lancer de rayons.

Annexe B

Géométrie appliquée aux rayons

Ce chapitre présente quelques problèmes classiques concernant les rayons ainsi que des solutions simples pour les résoudre. Il existe généralement des solutions plus optimisées, notamment pour le calcul d'intersection rayon/triangle qui a fait l'objet de nombreux travaux [MT97, SSK07, HH10]. Ces méthodes, plus complexes, ne sont pas abordées ici.

B.1 Notations

$\angle(\vec{u}, \vec{v})$	angle entre le vecteur \vec{u} et le vecteur \vec{v}
$\vec{u} \cdot \vec{v}$	produit scalaire de \vec{u} par \vec{v}
$\vec{u} \wedge \vec{v}$	produit vectoriel de \vec{u} par \vec{v}
$[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}]$	produit mixte de $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}$ ($[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = \vec{u} \cdot (\vec{v} \wedge \vec{w})$)
u^T	transposée de u (matrice ou vecteur)

B.2 Définition d'un rayon

Le point P appartient au rayon r s'il vérifie l'équation B.1.

$$\begin{cases} \vec{OP} = O\vec{O}_r + t\vec{D}_r \\ t > 0 \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

O	origine du repère ($O = (0, 0, 0)^T$)
O_r	origine du rayon r
\vec{D}_r	direction unitaire du rayon r

B.3 Intersection rayon/plan

Le plan est défini par une normale unitaire \vec{N} et une distance à l'origine d . Le point P appartient au plan s'il vérifie l'équation B.2.

$$\vec{N} \cdot \vec{OP} = d \quad (\text{B.2})$$

Si P est le point d'intersection, il appartient également au rayon r . Le problème revient alors à résoudre l'équation suivante pour t .

$$\vec{N} \cdot (O\vec{O}_r + t\vec{D}_r) = d \quad (\text{B.3})$$

D'où

$$t = \frac{d - \vec{N} \cdot O\vec{O}_r}{\vec{N} \cdot \vec{D}_r} \quad (\text{B.4})$$

Si $t \leq 0$, le rayon ne traverse pas le plan.

B.4 Intersection rayon/sphère

La sphère est définie par un centre C et un rayon R . Le point P appartient à la sphère s'il vérifie l'équation B.5.

$$C\vec{P}^2 = R^2 \quad (\text{B.5})$$

Ce qui équivaut à

$$(C\vec{O} + O\vec{P})^2 = R^2 \quad (\text{B.6})$$

Si P est le point d'intersection, il appartient également au rayon r . Le problème revient alors à résoudre l'équation suivante pour t .

$$(C\vec{O} + O\vec{O}_r + t\vec{D}_r)^2 = R^2 \quad (\text{B.7})$$

$$(C\vec{O}_r + t\vec{D}_r)^2 = R^2 \quad (\text{B.8})$$

$$t^2\vec{D}_r^2 + 2tC\vec{O}_r \cdot \vec{D}_r + C\vec{O}_r^2 - R^2 = 0 \quad (\text{B.9})$$

Comme la direction du rayon est unitaire, $\vec{D}_r^2 = 1$. On pose

$$b = 2C\vec{O}_r \cdot \vec{D}_r$$

$$c = C\vec{O}_r^2 - R^2$$

$$\Delta = b^2 - 4c$$

$$S = \begin{cases} \emptyset & \text{si } \Delta \leq 0 \\ \{x > 0 \mid x \in \{\frac{-b-\sqrt{\Delta}}{2}, \frac{-b+\sqrt{\Delta}}{2}\}\} & \text{sinon} \end{cases}$$

Il y a intersection si et seulement si $S \neq \emptyset$. L'intersection est alors le point du rayon r à $t = \min S$.

B.5 Intersection rayon/triangle

Le triangle est défini par trois points A , B et C . Le point P appartient au triangle s'il vérifie l'équation B.10.

$$\begin{cases} \vec{A}\vec{P} = u\vec{A}\vec{B} + v\vec{A}\vec{C} \\ 0 < u < 1 \\ 0 < v < 1 \\ u + v < 1 \end{cases} \quad (\text{B.10})$$

Si P est le point d'intersection, il appartient également au rayon r .

$$\vec{A}\vec{P} = \vec{A}\vec{O} + O\vec{P} = \vec{A}\vec{O} + O\vec{O}_r + t\vec{D}_r = \vec{A}\vec{O}_r + t\vec{D} \quad (\text{B.11})$$

Le problème revient donc à résoudre l'équation suivante.

$$\begin{cases} \vec{A}\vec{O}_r = u\vec{A}\vec{B} + v\vec{A}\vec{C} - t\vec{D}_r \\ 0 < u < 1 \\ 0 < v < 1 \\ u + v < 1 \\ t > 0 \end{cases} \quad (\text{B.12})$$

C'est à dire à trouver le vecteur $(u \ v \ t)^T$, s'il existe, tel que

$$\begin{cases} \vec{A}\vec{O}_r = (\vec{A}\vec{B} \ \vec{A}\vec{C} \ -\vec{D}_r) \begin{pmatrix} u \\ v \\ t \end{pmatrix} \\ 0 < u < 1 \\ 0 < v < 1 \\ u + v < 1 \\ t > 0 \end{cases} \quad (\text{B.13})$$

D'après la règle de Cramer, si $\det(\vec{A}\vec{B}, \vec{A}\vec{C}, -\vec{D}_r) \neq 0$,

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ t \end{pmatrix} = \frac{1}{\det(\vec{A}\vec{B}, \vec{A}\vec{C}, -\vec{D}_r)} \begin{pmatrix} \det(\vec{A}\vec{O}_r, \vec{A}\vec{C}, -\vec{D}_r) \\ \det(\vec{A}\vec{B}, \vec{A}\vec{O}_r, -\vec{D}_r) \\ \det(\vec{A}\vec{B}, \vec{A}\vec{C}, \vec{A}\vec{O}_r) \end{pmatrix} \quad (\text{B.14})$$

B.6 Distance rayon/point

Soit d la distance d'un point A à un rayon $r = (O_r, \vec{D}_r)$ (voir Fig. B.1).

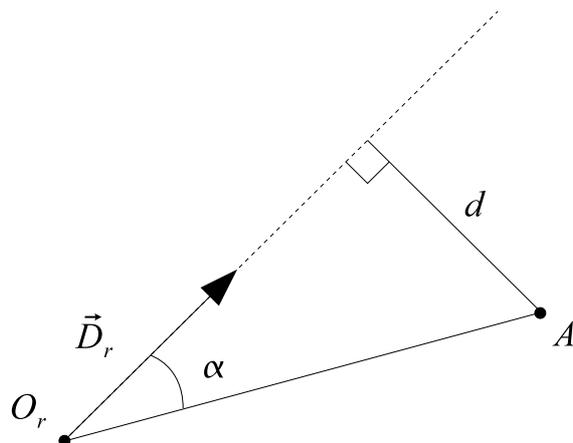


FIG. B.1 – Distance d'un point à un rayon.

Première formulation : on considère $\alpha = \widehat{(O_r \vec{A}, \vec{D}_r)}$ et on remarque que $\|\vec{D}_r\| = 1$.

$$d = \|\vec{O}_r \vec{A}\| \times \sin \alpha = \|\vec{D}_r\| \times \|\vec{O}_r \vec{A}\| \times \sin \alpha = \|\vec{D}_r \wedge \vec{O}_r \vec{A}\| \quad (\text{B.15})$$

Seconde formulation : la projection orthogonale de A sur r est $\vec{O}_r \vec{A} \cdot \vec{D}_r$. Donc, d'après le théorème de Pythagore,

$$d = \sqrt{\vec{O}_r \vec{A}^2 - (\vec{O}_r \vec{A} \cdot \vec{D}_r)^2} \quad (\text{B.16})$$

B.7 Distance rayon/rayon

Soit d la distance entre deux rayons $r_1 = (O_{r_1}, \vec{D}_{r_1})$ et $r_2 = (O_{r_2}, \vec{D}_{r_2})$. d est la longueur du segment perpendiculaire à r_1 et à r_2 , donc de vecteur directeur unitaire

$$\vec{N} = \frac{\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{D}_{r_2}}{\|\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{D}_{r_2}\|} \quad (\text{B.17})$$

Comme $O_{r_1} \in r_1$ et $O_{r_2} \in r_2$, d est la projection de $O_{r_1} \vec{O}_{r_2}$ sur \vec{N} (voir Fig. B.2). Donc

$$d = |O_{r_1} \vec{O}_{r_2} \cdot \vec{N}| \quad (\text{B.18})$$

Ce résultat peut se retrouver en remarquant que d est également la distance d'un point de r_2 au plan passant par un point de r_1 et parallèle à r_1 et à r_2 (voir Fig. B.3).

D'après l'équation B.18,

$$d = \left| O_{r_1} \vec{O}_{r_2} \cdot \frac{\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{D}_{r_2}}{\|\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{D}_{r_2}\|} \right| = \frac{|O_{r_1} \vec{O}_{r_2} \cdot (\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{D}_{r_2})|}{\|\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{D}_{r_2}\|} = \frac{|[O_{r_1} \vec{O}_{r_2}, \vec{D}_{r_1}, \vec{D}_{r_2}]|}{\|\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{D}_{r_2}\|} \quad (\text{B.19})$$

Comme $\forall (u, v, w) \in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3, [u, v, w] = \det(u, v, w)$,

$$d = \frac{|\det(O_{r_1} \vec{O}_{r_2}, \vec{D}_{r_1}, \vec{D}_{r_2})|}{\|\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{D}_{r_2}\|} \quad (\text{B.20})$$

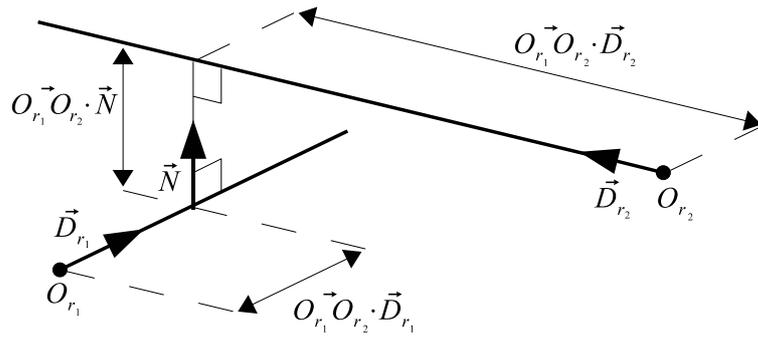


FIG. B.2 – Distance entre un rayon (O_{r_1}, \vec{D}_{r_1}) et un rayon (O_{r_2}, \vec{D}_{r_2}) calculée en exprimant $O_{r_1}\vec{O}_{r_2}$ dans la base normée $(\vec{D}_{r_1}, \vec{D}_{r_2}, \vec{N})$ où $\vec{N} = \frac{\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{D}_{r_2}}{\|\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{D}_{r_2}\|}$.

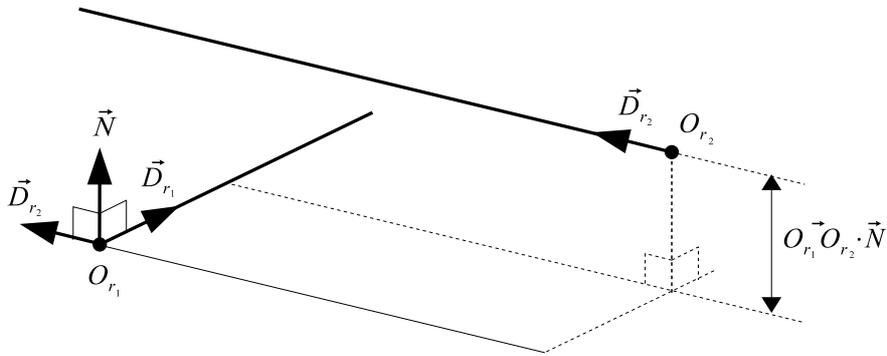


FIG. B.3 – Distance entre un rayon (O_{r_1}, \vec{D}_{r_1}) et un rayon (O_{r_2}, \vec{D}_{r_2}) calculée comme la distance du point O_{r_2} au plan $(\vec{D}_{r_1}, \vec{D}_{r_2})$ passant par le point O_{r_1} .

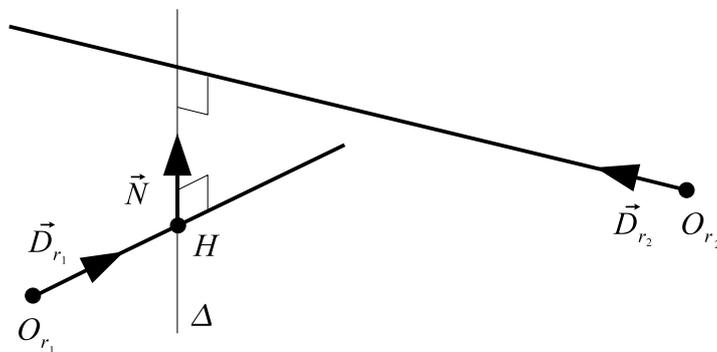


FIG. B.4 – Perpendiculaire Δ commune à deux rayons r_1 et r_2 .

B.8 Perpendiculaire commune à deux rayons

Soit Δ la perpendiculaire commune à deux rayons $r_1 = (O_{r_1}, \vec{D}_{r_1})$ et $r_2 = (O_{r_2}, \vec{D}_{r_2})$ (Δ permet de trouver la distance entre r_1 et r_2). On cherche le point d'intersection H de Δ et r_1 (voir Fig. B.4).

$$H = \Delta \cap r_1 \quad (\text{B.21})$$

On pose

$$\vec{N} = \frac{\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{D}_{r_2}}{\|\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{D}_{r_2}\|}. \quad (\text{B.22})$$

Alors \vec{N} est perpendiculaire à r_1 et à r_2 . Donc \vec{N} est un vecteur directeur de Δ .

On note $\mathcal{P}(P, \vec{u}, \vec{v})$ le plan passant par le point P et défini par les vecteurs \vec{u} et \vec{v} . On note $\mathcal{P}(P, \vec{n})$ le plan passant par le point P et de vecteur normal \vec{n} . On a donc

$$M \in \Delta \iff \begin{cases} M \in \mathcal{P}(O_{r_1}, \vec{D}_{r_1}, \vec{N}) \\ M \in \mathcal{P}(O_{r_2}, \vec{D}_{r_2}, \vec{N}) \end{cases} \quad (\text{B.23})$$

Ce qui équivaut à

$$M \in \Delta \iff \begin{cases} M \in \mathcal{P}(O_{r_1}, \vec{D}_{r_1} \wedge \vec{N}) \\ M \in \mathcal{P}(O_{r_2}, \vec{D}_{r_2} \wedge \vec{N}) \end{cases} \quad (\text{B.24})$$

Or

$$P \in \mathcal{P}(O, \vec{n}) \iff \vec{OP} \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{B.25})$$

Donc

$$M \in \Delta \iff \begin{cases} O_{r_1} \vec{M} \cdot (\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{N}) = 0 \\ O_{r_2} \vec{M} \cdot (\vec{D}_{r_2} \wedge \vec{N}) = 0 \end{cases} \quad (\text{B.26})$$

Or, en dimension trois,

$$\vec{u} \cdot (\vec{v} \wedge \vec{w}) = [\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = \det(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}) \quad (\text{B.27})$$

Ce qui donne finalement

$$M \in \Delta \iff \begin{cases} \det(O_{r_1} \vec{M}, \vec{D}_{r_1}, \vec{N}) = 0 \\ \det(O_{r_2} \vec{M}, \vec{D}_{r_2}, \vec{N}) = 0 \end{cases} \quad (\text{B.28})$$

De plus

$$M \in r_1 \iff \exists t, \begin{cases} O_{r_1} \vec{M} = t \vec{D}_{r_1} \\ O_{r_2} \vec{M} = O_{r_2} \vec{O}_{r_1} + O_{r_1} \vec{M} = O_{r_2} \vec{O}_{r_1} + t \vec{D}_{r_1} \end{cases} \quad (\text{B.29})$$

D'après B.21

$$\begin{cases} H \in \Delta \\ H \in r_1 \end{cases} \quad (\text{B.30})$$

Soit t_H la position de H sur r_1 . Le problème revient donc à trouver t_H . On a

$$\begin{cases} O_{r_1} \vec{H} = t_H \vec{D}_{r_1} \\ O_{r_2} \vec{H} = O_{r_2} \vec{O}_{r_1} + t_H \vec{D}_{r_1} \end{cases} \quad (\text{B.31})$$

Donc en substituant B.28 et B.31 dans B.30, on a

$$\begin{cases} \det(t_H \vec{D}_{r_1}, \vec{D}_{r_1}, \vec{N}) = 0 \\ \det(O_{r_2} \vec{O}_{r_1} + t_H \vec{D}_{r_1}, \vec{D}_{r_2}, \vec{N}) = 0 \end{cases} \quad (\text{B.32})$$

Or

$$\forall t, \det(t \vec{D}_{r_1}, \vec{D}_{r_1}, \vec{N}) = 0 \quad (\text{B.33})$$

Donc t_H est défini par

$$\det(O_{r_2} \vec{O}_{r_1} + t_H \vec{D}_{r_1}, \vec{D}_{r_2}, \vec{N}) = 0 \quad (\text{B.34})$$

Comme le déterminant est une forme linéaire,

$$\det(O_{r_2} \vec{O}_{r_1}, \vec{D}_{r_2}, \vec{N}) + t_H \det(\vec{D}_{r_1}, \vec{D}_{r_2}, \vec{N}) = 0 \quad (\text{B.35})$$

Ce qui donne finalement

$$t_H = - \frac{\det(O_{r_2} \vec{O}_{r_1}, \vec{D}_{r_2}, \vec{N})}{\det(\vec{D}_{r_1}, \vec{D}_{r_2}, \vec{N})} \quad (\text{B.36})$$

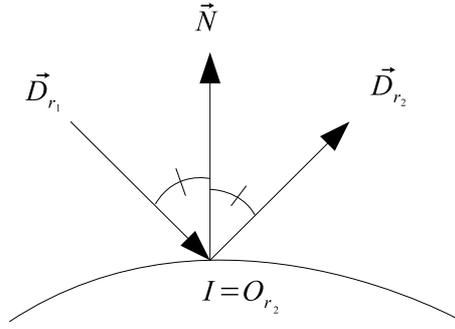


FIG. B.5 – Réflexion d'un rayon r_1 en un rayon r_2 .

B.9 Réflexion d'un rayon

Le rayon $r_1 = (O_{r_1}, \vec{D}_{r_1})$ rencontre un objet au point I de normale unitaire \vec{N} (voir Fig. B.5). Alors r_1 est réfléchi en un rayon $r_2 = (O_{r_2}, \vec{D}_{r_2})$ défini par :

$$\begin{cases} O_{r_2} = I \\ \vec{D}_{r_2} = \vec{D}_{r_1} - 2(\vec{N} \cdot \vec{D}_{r_1})\vec{N} \end{cases} \quad (\text{B.37})$$

Propriété : Soit $R_{\vec{N}}$ la fonction qui, à un vecteur \vec{V} , associe son vecteur réfléchi $R_{\vec{N}}(\vec{V})$ selon la normale (unitaire) \vec{N} . Soit $R_{\vec{N}}^{-1}$ sa fonction réciproque. Alors, $R_{\vec{N}}^{-1} = R_{\vec{N}}$. Ce résultat se démontre en considérant la loi de Snell-Descartes ou l'égalité suivante.

$$\begin{aligned} R_{\vec{N}}(R_{\vec{N}}(\vec{V})) &= R_{\vec{N}}(\vec{V}) - 2(\vec{N} \cdot R_{\vec{N}}(\vec{V}))\vec{N} \\ &= \vec{V} - 2(\vec{N} \cdot \vec{V})\vec{N} - 2(\vec{N} \cdot (\vec{V} - 2(\vec{N} \cdot \vec{V})\vec{N}))\vec{N} \\ &= \vec{V} - 2(\vec{N} \cdot \vec{V})\vec{N} - 2(\vec{N} \cdot \vec{V})\vec{N} + 4(\vec{N} \cdot \vec{V})(\vec{N} \cdot \vec{N})\vec{N} \\ &= \vec{V} - 4(\vec{N} \cdot \vec{V})\vec{N} + 4(\vec{N} \cdot \vec{V})(\vec{N} \cdot \vec{N})\vec{N} \end{aligned} \quad (\text{B.38})$$

Comme \vec{N} est unitaire, $(\vec{N} \cdot \vec{N}) = 1$ et

$$\begin{aligned} R_{\vec{N}}(R_{\vec{N}}(\vec{V})) &= \vec{V} - 4(\vec{N} \cdot \vec{V})\vec{N} + 4(\vec{N} \cdot \vec{V})\vec{N} \\ &= \vec{V} \end{aligned} \quad (\text{B.39})$$

B.10 Réfraction d'un rayon

Le rayon $r_1 = (O_{r_1}, \vec{D}_{r_1})$ se propage dans un milieu d'indice n_1 (voir Fig. B.6). Il rencontre un objet d'indice n_2 au point I de normale unitaire \vec{N} . Il est réfracté en un rayon $r_2 = (O_{r_2}, \vec{D}_{r_2})$. Soit $\theta_1 = \angle(\vec{N}, -\vec{D}_{r_1})$ et $\theta_2 = \angle(-\vec{N}, \vec{D}_{r_2})$. Soit (\vec{x}, \vec{y}) un repère orthonormé direct dans le plan (\vec{D}_{r_1}, \vec{N}) tel que $\vec{y} = \vec{N}$. Alors $\vec{x} = \vec{N} \wedge (\vec{D}_{r_1} \wedge \vec{N})$.

Alors r_2 est défini par :

$$\begin{cases} O_{r_2} = I \\ \vec{D}_{r_2} = n\vec{D}_{r_1} + (n \cos \theta_1 - \cos \theta_2)\vec{N} \\ \cos \theta_1 = -\vec{N} \cdot \vec{D}_{r_1} \\ \cos \theta_2 = \sqrt{1 - n^2(1 - \cos^2 \theta_1)} \\ n = \frac{n_1}{n_2} \end{cases} \quad (\text{B.40})$$

Démonstration : $\cos \theta_1 = -\vec{N} \cdot \vec{D}_{r_1}$

Les vecteurs \vec{N} et \vec{D}_{r_1} sont unitaires. Donc, par définition du produit scalaire,

$$\cos \theta_1 = \vec{N} \cdot (-\vec{D}_{r_1}) \quad (\text{B.41})$$

Ce qui équivaut à

$$\cos \theta_1 = -\vec{N} \cdot \vec{D}_{r_1} \quad (\text{B.42})$$

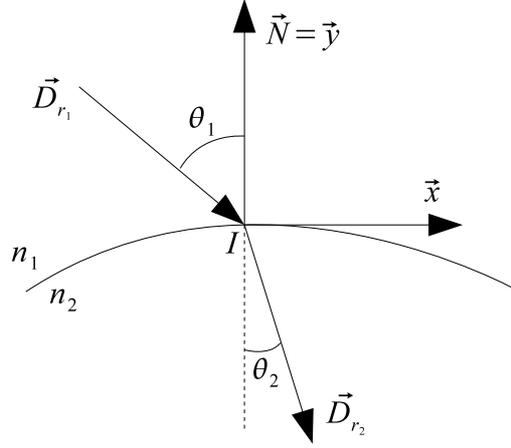


FIG. B.6 – Réfraction d'un rayon r_1 en un rayon r_2 .

Démonstration : $\cos \theta_2 = \sqrt{1 - n^2(1 - \cos^2 \theta_1)}$

D'après la loi de Snell-Descartes,

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{B.43})$$

Donc

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 = n \sin \theta_1 \quad (\text{B.44})$$

$$\sin^2 \theta_2 = n^2 \sin^2 \theta_1 \quad (\text{B.45})$$

Par définition,

$$\forall \theta, \sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad (\text{B.46})$$

D'où

$$\sin^2 \theta_1 = 1 - \cos^2 \theta_1 \quad (\text{B.47})$$

Par substitution dans B.45,

$$\sin^2 \theta_2 = n^2 (1 - \cos^2 \theta_1) \quad (\text{B.48})$$

D'après B.46,

$$\cos^2 \theta_2 = 1 - \sin^2 \theta_2 \quad (\text{B.49})$$

En substituant par B.48,

$$\cos^2 \theta_2 = 1 - n^2 (1 - \cos^2 \theta_1) \quad (\text{B.50})$$

D'où,

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - n^2 (1 - \cos^2 \theta_1)} \quad (\text{B.51})$$

Démonstration : $\vec{D}_{r_2} = n\vec{D}_{r_1} + (n \cos \theta_1 - \cos \theta_2) \vec{N}$

Soit $P_{\vec{x}}(\vec{V})$ (resp. $P_{\vec{y}}(\vec{V})$) la projection orthogonale de \vec{V} sur \vec{x} (resp. \vec{y}). Alors,

$$\vec{D}_{r_2} = P_{\vec{x}}(\vec{D}_{r_2}) + P_{\vec{y}}(\vec{D}_{r_2}) \quad (\text{B.52})$$

Calculons $P_{\vec{y}}(\vec{D}_{r_2})$. Par définition,

$$P_{\vec{y}}(\vec{D}_{r_2}) = -\cos \theta_2 \vec{y} = -\cos \theta_2 \vec{N} \quad (\text{B.53})$$

Calculons $P_{\vec{x}}(\vec{D}_{r_2})$. Par définition,

$$\begin{cases} P_{\vec{x}}(\vec{D}_{r_2}) = \sin \theta_2 \vec{x} \\ P_{\vec{x}}(-\vec{D}_{r_1}) = -\sin \theta_1 \vec{x} \end{cases} \quad (\text{B.54})$$

Or, d'après la loi de Snell-Descartes (B.44),

$$\sin \theta_2 = n \sin \theta_1 \quad (\text{B.55})$$

Donc

$$P_{\vec{x}}(\vec{D}_{r_2}) = -nP_{\vec{x}}(-\vec{D}_{r_1}) \quad (\text{B.56})$$

De plus, par définition,

$$-\vec{D}_{r_1} = P_{\vec{x}}(-\vec{D}_{r_1}) + P_{\vec{y}}(-\vec{D}_{r_1}) \quad (\text{B.57})$$

D'où

$$P_{\vec{x}}(-\vec{D}_{r_1}) = -\vec{D}_{r_1} - P_{\vec{y}}(-\vec{D}_{r_1}) \quad (\text{B.58})$$

Comme $P_{\vec{y}}(-\vec{D}_{r_1}) = \cos \theta_1 \vec{y} = \cos \theta_1 \vec{N}$,

$$P_{\vec{x}}(-\vec{D}_{r_1}) = -\vec{D}_{r_1} - \cos \theta_1 \vec{N} \quad (\text{B.59})$$

En substituant dans B.56,

$$P_{\vec{x}}(\vec{D}_{r_2}) = -n(-\vec{D}_{r_1} - \cos \theta_1 \vec{N}) = n\vec{D}_{r_1} + n \cos \theta_1 \vec{N} \quad (\text{B.60})$$

Finalement, on calcule \vec{D}_{r_2} en substituant $P_{\vec{x}}(\vec{D}_{r_2})$ et $P_{\vec{y}}(\vec{D}_{r_2})$ dans B.52. Ce qui donne bien

$$\vec{D}_{r_2} = n\vec{D}_{r_1} + n \cos \theta_1 \vec{N} - \cos \theta_2 \vec{N} = n\vec{D}_{r_1} + (n \cos \theta_1 - \cos \theta_2) \vec{N} \quad (\text{B.61})$$

Annexe C

Espaces de couleurs

C.1 Généralités

Un espace de couleurs (également appelé système colorimétrique) est un modèle mathématique de la notion de couleur. Il permet de coder toute couleur de son domaine par un n -uplet. Il existe de nombreux espaces de couleurs définies par différents organismes pour différentes applications (informatique, télévision, imprimerie, industrie textile...).

Le système de vision de l'homme perçoit la couleur grâce à trois types de photorécepteurs. Chaque type de photorécepteurs possède sa propre réponse spectrale. Ainsi, une couleur est représentée, au niveau du système nerveux, comme une combinaison de l'information fournie par chacun des trois types de photorécepteurs. Théoriquement, il est donc possible de coder toutes les couleurs visibles par combinaison de trois couleurs primaires. Ces trois couleurs constituent alors une base d'un espace de couleurs.

C.2 Espace CIE 1931 XYZ

La CIE a défini un observateur standard par les trois fonctions spectrales $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$ où λ est la longueur d'onde (voir Fig. A.10). Ces fonctions décrivent la sensibilité spectrale de trois photodétecteurs linéaires au tristimulus CIE-XYZ en donnant des valeurs X , Y et Z . Ces valeurs décrivent comment est vue une couleur par l'observateur standard. Si la couleur a une densité spectrale de puissance $I(\lambda)$, les valeurs du tristimulus correspondant sont :

$$X = \int I(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda$$

$$Y = \int I(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda$$

$$Z = \int I(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda$$

On remarquera que $\bar{y} = V$ et donc que Y traduit la luminance en vision photopique de l'observateur standard.

C.3 Espace sRGB

Les espaces de couleurs RGB sont beaucoup utilisés en informatique et en imagerie numérique. Ils sont basés sur trois couleurs primaires : une rouge, une verte et une bleue. Il existe différents espaces RGB. L'espace sRGB est un standard défini par HP® et Microsoft® et a vocation à être utilisé pour les écrans et imprimantes. Il est défini à partir des trois couleurs primaires recommandées par l'ITU pour la télévision haute-définition (HDTV) et d'une fonction modélisant la réponse type d'un écran cathodique.

C.3.1 Conversion de CIE-XYZ vers sRGB

Soit une couleur représentée par $[X \ Y \ Z]^T$ dans l'espace CIE-XYZ et par $[R \ G \ B]^T$ dans l'espace sRGB. Alors,

$$\begin{bmatrix} R_l \\ G_l \\ B_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & 0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

et

$$C = \begin{cases} 12.92 C_l, & \text{si } C_l \leq 0.0031308 \\ (1 + 0.055) C_l^{1/2.4} - 0.055, & \text{sinon} \end{cases}$$

où (C, C_l) est (R, R_l) , (G, G_l) ou (B, B_l) .

C.3.2 Conversion de sRGB vers CIE-XYZ

$$C_l = \begin{cases} \frac{C}{12.92}, & \text{si } C \leq 0.04045 \\ \left(\frac{C+0.055}{1+0.055} \right)^{2.4}, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_l \\ G_l \\ B_l \end{bmatrix}$$

C.4 Espace CIE 1976 L*u*v*

Cet espace est également appelé CIE-LUV. Il a été défini par la CIE à partir de l'espace CIE-XYZ. Il a pour objectif d'être perceptuellement uniforme c'est-à-dire que la distance euclidienne $\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta u^{*2} + \Delta v^{*2}}$ donne la même sensation visuelle en tout point de l'espace de couleurs.

C.4.1 Conversion de CIE-XYZ vers CIE-LUV

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$

$$L^* = \begin{cases} \left(\frac{29}{3} \right)^3 \frac{Y}{Y_n}, & \text{si } \frac{Y}{Y_n} \leq \left(\frac{6}{29} \right)^3 \\ 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n)$$

où (u'_n, v'_n) correspond aux coordonnées du blanc de référence dans (u', v') . Par exemple, pour l'observateur 2° et l'illuminant D65, $u'_n = 0,1978$ et $v'_n = 0,4683$. Y_n est la luminance du blanc de référence. Si les valeurs X , Y et Z sont normalisées dans $[0, 1]$, on peut prendre $Y_n = 1$ et on aura $L^* \in [0, 100]$.

C.4.2 Conversion de CIE-LUV vers CIE-XYZ

$$u' = \frac{u^*}{13L^*} + u'_n$$

$$v' = \frac{v^*}{13L^*} + v'_n$$

$$Y = \begin{cases} Y_n L^* \left(\frac{3}{29} \right)^3, & \text{si } L^* \leq 8 \\ Y_n \left(\frac{L^*+16}{116} \right)^3, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$X = Y \frac{9u'}{4v'}$$

$$Z = Y \frac{12 - 3u' - 20v'}{4v'}$$

Bibliographie

- [AA01] Manoj Aggarwal and Narendra Ahuja. On cosine-fourth and vignetting effects in real lenses. *Computer Vision, IEEE International Conference on*, 1 :472, 2001.
- [AFR⁺07] Ahmet Oğuz Akyüz, Roland Fleming, Bernhard E. Riecke, Erik Reinhard, and Heinrich H. Bühlhoff. Do hdr displays support ldr content? : a psychophysical evaluation. In *ACM Transactions on Graphics*, volume 26, page 38, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [AOSS06] Mark Ashdown, Takahiro Okabe, Imari Sato, and Yoichi Sato. Robust content-dependent photometric projector compensation. In *CVPRW '06 : Proceedings of the 2006 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, page 6, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society. compensation radiometrique.
- [ASLZ08] Benjamin Astre, Laurent Sarry, Christophe Lohou, and Eric Zeghers. Automatic calibration of a single-projector catadioptric display system. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2008.
- [BCF05] Behnam Bastani, Bill Cressman, and Brian Funt. Calibrated color mapping between lcd and crt displays : A case study. *Color Research & Application*, 30(6) :438–447, 2005.
- [BCM05] A. Buades, B. Coll, and J. M. Morel. A review of image denoising algorithms, with a new one. *Multiscale Modeling & Simulation*, 4(2) :490–530, 2005.
- [BCNR10] Jiamin Bai, Manmohan Chandraker, Tian-Tsong Ng, and Ravi Ramamoorthi. A dual theory of inverse and forward light transport. In *European Conference on Computer Vision*, pages 1–8, 2010.
- [BDKH98] D. Brydges, F. Deppner, K. Kuenzli, H. andHeuberge, and R. D. Hersc. Application of a 3-ccd color camera for colorimetric and densitometric measurements. In G. B. Beretta and R. Eschbach, editors, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 3300 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 292–301, January 1998.
- [BE03] Marshall Bern and David Eppstein. Optimized color gamuts for tiled displays. In *SCG '03 : Proceedings of the nineteenth annual symposium on Computational geometry*, pages 274–281, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [Ben75] Jon Louis Bentley. Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Commun. ACM*, 18(9) :509–517, 1975.
- [Ber96] Roy S. Berns. Methods for characterizing crt displays. *Displays*, 16(4) :173 – 182, 1996. To Achieve WYSIWYG Colour.
- [BFG05] B. Bastani, B. Funt, and R. Ghaffari. End-user dlp projector colour calibration. In *Tenth Congress of the International Colour Association AIC Colour 2005*, 2005.
- [BG01] Samuel Boivin and Andre Gagalowicz. Image-based rendering of diffuse, specular and glossy surfaces from a single image. In *SIGGRAPH '01 : Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 107–116, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [BGZ⁺06] Oliver Bimber, Anselm Grundhofer, Thomas Zeidler, Daniel Danch, and Pedro Kapakos. Compensating indirect scattering for immersive and semi-immersive projection displays. In *VR '06 : Proceedings of the IEEE conference on Virtual Reality*, pages 151–158, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- [BIWG07] Oliver Bimber, Daisuke Iwai, Gordon Wetzstein, and Anselm Grundhöfer. The visual computing of projector-camera systems. In *EuroGraphics (STAR)*, 2007.
- [BLD⁺07] Francesco Banterle, Patrick Ledda, Kurt Debattista, Alan Chalmers, and Marina Bloj. A framework for inverse tone mapping. *Vis. Comput.*, 23(7) :467–478, 2007.

- [BMY05] Michael Brown, Aditi Majumder, and Ruigang Yang. Camera-based calibration techniques for seamless multiprojector displays. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 11(2) :193–206, 2005.
- [Bou08] Paul Bourke. Low cost projection environment for immersive gaming. *Journal of Multimedia*, 3(1) :41–46, 2008.
- [BS63] Petr. Beckmann and Andre. Spizzichino. *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*, by Petr Beckmann and Andre Spizzichino. Pergamon Press; [distributed in the Western Hemisphere by Macmillan, New York] goford, New York,, 1963.
- [Cat] Catopsys. Site de présentation du projet. <http://iutweb-lepuy.u-clermont1.fr/catopsys/>.
- [CG85] Michael F. Cohen and Donald P. Greenberg. The hemi-cube : a radiosity solution for complex environments. In *SIGGRAPH '85 : Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 31–40, New York, NY, USA, 1985. ACM.
- [CLE00] P. B. Catrysse, X. Liu, and A. El Gamal. QE reduction due to pixel vignetting in CMOS image sensors. In M. M. Blouke, N. Sampat, G. M. Williams, and T. Yeh, editors, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 3965 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 420–430, May 2000.
- [CNSD93] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin, and Thomas A. DeFanti. Surround-screen projection-based virtual reality : the design and implementation of the CAVE. In *SIGGRAPH '93 : Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 135–142, New York, NY, USA, 1993. ACM.
- [Cow83] William B. Cowan. An inexpensive scheme for calibration of a colour monitor in terms of cie standard coordinates. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 17(3) :315–321, 1983.
- [CPC84] Robert L. Cook, Thomas Porter, and Loren Carpenter. Distributed ray tracing. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 18(3) :137–145, 1984.
- [CT82] R. L. Cook and K. E. Torrance. A reflectance model for computer graphics. *ACM Trans. Graph.*, 1(1) :7–24, January 1982.
- [DAK⁺04] Kirill Dmitriev, Thomas Annen, Grzegorz Krawczyk, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel. A cave system for interactive modeling of global illumination in car interior. In *VRST '04 : Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 137–145, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [DDS⁺09] Thomas A. DeFanti, Gregory Dawe, Daniel J. Sandin, Jurgen P. Schulze, Peter Otto, Javier Girado, Falko Kuester, Larry Smarr, and Ramesh Rao. The StarCAVE, a third-generation CAVE and virtual reality OptiPortal. *Future Gener. Comput. Syst.*, 25(2) :169–178, 2009.
- [DGNK97] K.J. Dana, B.V. Ginneken, S.K. Nayar, and J.J. Koenderink. Reflectance and Texture of Real World Surfaces. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 151–157, Jun 1997.
- [DM97] Paul E. Debevec and Jitendra Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In *SIGGRAPH '97 : Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 369–378, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [DTB04] Ellen A. Day, Lawrence Taplin, and Roy S. Berns. Colorimetric characterization of a computer-controlled liquid crystal display. *Color Research & Application*, 29(5) :365–373, 2004.
- [DTM96] Paul E. Debevec, Camillo J. Taylor, and Jitendra Malik. Modeling and rendering architecture from photographs : a hybrid geometry- and image-based approach. In *SIGGRAPH '96 : Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 11–20, New York, NY, USA, 1996. ACM.
- [Dut03] Philip Dutré. Global illumination compendium, september 2003.
- [DZR⁺08a] Julien Dehos, Eric Zeghers, Christophe Renaud, François Rousselle, and Laurent Sarry. Radiometric compensation for a low-cost immersive projection system. In *VRST '08 : Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 130–133, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [DZR⁺08b] Julien Dehos, Eric Zeghers, François Rousselle, Christophe Renaud, and Laurent Sarry. Compensation radiométrique d'un système de projection immersive grand-public. In *21èmes journées de l'AFIG*, 2008.

- [DZR⁺09] Julien Dehos, Eric Zeghers, François Rousselle, Christophe Renaud, and Laurent Sarry. Compensation radiométrique d'un système de projection immersive grand-public. *Revue Electronique Francophone d'Informatique Graphique (REFIG)*, 3(3) :11–21, 2009.
- [Far02] Faroudja. Faroudja dila projector package. calibration overview. Technical report, FA-ROUDJA, 2002.
- [FKN80] Henry Fuchs, Zvi M. Kedem, and Bruce F. Naylor. On visible surface generation by a priori tree structures. In *SIGGRAPH '80 : Proceedings of the 7th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 124–133, New York, NY, USA, 1980. ACM.
- [FW98] Mark D. Fairchild and David R. Wyble. Colorimetric characterization of the apple studio display (flat panel lcd). Technical report, Munsell Color Science Laboratory, 1998.
- [GC05] Dan B. Goldman and Jiun-Hung Chen. Vignette and exposure calibration and compensation. In *ICCV '05 : Proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1*, pages 899–906, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [GF00] Jason Gibson and Mark Fairchild. Colorimetric characterization of three computer displays (lcd and crt). Technical report, Munsell Color Science Laboratory, 2000.
- [Gla89] Andrew S. Glassner, editor. *An introduction to ray tracing*. Academic Press Ltd., London, UK, 1989.
- [Gla94] Andrew S. Glassner. *Principles of Digital Image Synthesis*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1994.
- [GN02] M.D. Grossberg and S.K. Nayar. What can be Known about the Radiometric Response Function from Images? In *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, volume IV, pages 189–205, May 2002.
- [GN03a] M.D. Grossberg and S.K. Nayar. Determining the Camera Response from Images : What is Knowable? *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(11) :1455–1467, Nov 2003.
- [GN03b] M.D. Grossberg and S.K. Nayar. What is the Space of Camera Response Functions? In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, volume II, pages 602–609, Jun 2003.
- [Gou71] H. Gouraud. *Continuous Shading of Curved Surfaces*, volume 20, pages 623–629. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 1971.
- [GTGB84] Cindy M. Goral, Kenneth E. Torrance, Donald P. Greenberg, and Bennett Battaile. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 18(3) :213–222, 1984.
- [HF06] Rodney L. Heckaman and Mark D. Fairchild. Effect of dlp projector white channel on perceptual gamut. *Journal of the Society for Information Display*, 14(9) :755–761, 2006.
- [HH10] Jifi Havel and Adam Herout. Yet faster ray-triangle intersection (using sse4). *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16 :434–438, 2010.
- [HNI03] Kenji Hara, Ko Nishino, and Katsushi Ikeuchi. Determining reflectance and light position from a single image without distant illumination assumption. In *ICCV '03 : Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision*, page 560, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society.
- [HS04] David Hasler and Sabine Susstrunk. Mapping colour in image stitching applications. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 15(12) :65–90, 2004.
- [HTSG91] Xiao D. He, Kenneth E. Torrance, François X. Sillion, and Donald P. Greenberg. A comprehensive physical model for light reflection. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 25(4) :175–186, 1991.
- [Huf03] Tom Huffman. Basic guide to color calibration using a cms. AV Science Forum, 2003.
- [IES86] IES. Standard nomenclature and definitions for illuminating engineering,. ANSI/IES RP-16-1986, Illuminating Engineering Society, 345 East 47th Street, New York, NY 10017, June 1986.
- [Ike72] Yasuhiko Ikebe. The galerkin method for the numerical solution of fredholm integral equations of the second kind. *SIAM Review*, 3 :465–491, 1972.
- [JM07] Ray Juang and Aditi Majumder. Photometric self-calibration of a projector-camera system. *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on*, 0 :1–8, 2007.

- [KAC88] David Kirk, James Arvo, and Apollo Computer. The ray tracing kernel. In *In Proceedings of Ausgraph*, pages 75–82, 1988.
- [Kaj86] James T. Kajiya. The rendering equation. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 20(4) :143–150, 1986.
- [KK08] Min H. Kim and Jan Kautz. Characterization for high dynamic range imaging. *Computer Graphics Forum (Proc. EUROGRAPHICS 2008)*, 27(2) :691–697, 2008.
- [KM00] Y. Kwak and L. MacDonald. Characterisation of a desktop lcd projector. *Displays*, 21(5) :179–194, 2000.
- [KM06] Min H. Kim and Lindsay W. MacDonald. Rendering high dynamic range images. In *Proc. EVA 2006 London Conference (EVA 2006)*, pages 22.1–11, Middlesex, England, July 2006. EVA Conferences International (ECI).
- [KP08] Seon Joo Kim and Member-Marc Pollefeys. Robust radiometric calibration and vignetting correction. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 30(4) :562–576, 2008. Student Member-Seon Joo Kim and Member-Marc Pollefeys.
- [KW00] Sing Bing Kang and Richard S. Weiss. Can we calibrate a camera using an image of a flat, textureless lambertian surface? In *ECCV '00 : Proceedings of the 6th European Conference on Computer Vision-Part II*, volume 2, pages 640–653, London, UK, 2000. Springer-Verlag.
- [LBB99] J. M. Loomis, J. J. Blascovich, and A. C. Beall. Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavior research methods, instruments, & computers : a journal of the Psychonomic Society, Inc*, 31(4) :557–564, November 1999.
- [LGYS04] Stephen Lin, Jinwei Gu, Shuntaro Yamazaki, and Heung-yeung Shum. Radiometric calibration from a single image. In *In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 938–945, 2004.
- [LIWL03] Kok-Lim Low, Adrian Ilie, Greg Welch, and Anselmo Lastra. Combining head-mounted and projector-based displays for surgical training. In *in Proceedings of IEEE Virtual Reality 2003. Los*, pages 110–117, 2003.
- [LS05a] A. Litvinov and Y. Y. Schechner. Radiometric framework for image mosaicking. *Journal of the Optical Society of America A*, 22 :839–848, May 2005.
- [LS05b] Anatoly Litvinov and Yoav Y. Schechner. Addressing radiometric nonidealities : A unified framework. In *CVPR '05 : Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) - Volume 2*, pages 52–59, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [LW95] Eric Lafortune and Yves Willems. A 5D tree to reduce the variance of monte carlo ray tracing. In *Rendering Techniques '95 (Proceedings of the Sixth Eurographics Workshop on Rendering)*, pages 11–20. Springer-Verlag, 1995.
- [Man00] Steve Mann. Comparametric equations with practical applications in quantigraphic image processing. *IEEE Transactions on Image Processing*, 9(8) :1389–1406, 2000.
- [Mar63] D. W. Marquardt. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11 :431–441, 1963.
- [Mar97] A. Marion. *Acquisition & visualisation des images*. Eyrolles, 1997.
- [MGMH04] Mukesh Motwani, Mukesh Gadiya, Rakhi Motwani, and Frederick C. Harris, Jr. A survey of image denoising techniques. In *GSPx*, 2004.
- [MHTW00] Aditi Majumder, Zhu He, Herman Towles, and Greg Welch. Achieving color uniformity across multi-projector displays. In *VIS '00 : Proceedings of the conference on Visualization '00*, pages 117–124, Los Alamitos, CA, USA, 2000. IEEE Computer Society Press.
- [MKS03] G Madar, B Kranicz, and J Schanda. Colour reproduction with different types of projectors. In *CORM 2003 : Optics in the 21st Century*, 2003.
- [MN99] T. Mitsunaga and S.K. Nayar. Radiometric Self Calibration. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, volume 1, pages 374–380. IEEE Computer Society, Jun 1999.
- [MP95] S. Mann and R. W. Picard. On being 'undigital' with digital cameras : Extending dynamic range by combining different exposed pictures. In *Proceedings of IS&T*, pages 442–448, 1995.
- [MP04] Branislav Micusik and Tomas Pajdla. Autocalibration & 3D reconstruction with non-central catadioptric cameras. *CVPR*, 01 :58–65, 2004.

- [MPBM03] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Matt Brand, and Leonard McMillan. A data-driven reflectance model. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3) :759–769, July 2003.
- [MS04] Aditi Majumder and Rick Stevens. Color nonuniformity in projection-based displays : Analysis and solutions. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10(2) :177–188, 2004.
- [MS05] Aditi Majumder and Rick Stevens. Perceptual photometric seamlessness in projection-based tiled displays. *ACM Trans. Graph.*, 24(1) :118–139, 2005.
- [MT97] Tomas Möller and Ben Trumbore. Fast, minimum storage ray-triangle intersection. *Journal of Graphics Tools*, 2 :21–28, 1997.
- [NB03] Shree K. Nayar and Vlad Branzoi. Adaptive dynamic range imaging : Optical control of pixel exposures over space and time. In *ICCV '03 : Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision*, page 1168, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society.
- [NKGR06] Shree K. Nayar, Gurunandan Krishnan, Michael D. Grossberg, and Ramesh Raskar. Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination. *ACM Transactions on Graphics*, 25(3) :935–944, 2006.
- [NPGB03] S.K. Nayar, H. Peri, M.D. Grossberg, and P.N. Belhumeur. A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections. In *ICCV Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS)*, Oct 2003.
- [NRH⁺77] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsberg, and T. Limperis. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. Technical report, National Bureau of Standards, October 1977.
- [PDV⁺01] Orin Packer, Lisa C. Diller, Jan Verweij, Barry B. Lee, Joel Pokorny, David R. Williams, Dennis M. Dacey, and David H. Brainard. Characterization and use of a digital light projector for vision research. *Vision Research*, 41(4) :427 – 439, 2001.
- [PH10] Matt Pharr and Greg Humphreys. *Physically Based Rendering, From Theory To Implementation*. Elsevier, 2nd edition edition, 2010.
- [Pho75] Bui Tuong Phong. Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*, 18(6) :311–317, 1975.
- [PML⁺09] Pieter Peers, Dhruv K. Mahajan, Bruce Lamond, Abhijeet Ghosh, Wojciech Matusik, Ravi Ramamoorthi, and Paul Debevec. Compressive light transport sensing. *ACM Trans. Graph.*, 28(1) :1–18, 2009.
- [PTVF92] William Press, Saul Teukolsky, William Vetterling, and Brian Flannery. *Numerical Recipes in C*. Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, UK, second edition, 1992.
- [RBS99] Mark A. Robertson, Sean Borman, and Robert L. Stevenson. Dynamic range improvement through multiple exposures. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*, volume 3, pages 159–163, Kobe, Japan, October 1999. IEEE.
- [RBS03] M. A. Robertson, S. Borman, and R. L. Stevenson. Estimation-theoretic approach to dynamic range enhancement using multiple exposures. *Journal of Electronic Imaging*, 12 :219–228, April 2003.
- [RH01] Ravi Ramamoorthi and Pat Hanrahan. A signal-processing framework for inverse rendering. In *SIGGRAPH '01 : Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 117–128, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [RTS⁺07] Allan G. Rempel, Matthew Trentacoste, Helge Seetzen, H. David Young, Wolfgang Heidrich, Lorne Whitehead, and Greg Ward. Ldr2hdr : on-the-fly reverse tone mapping of legacy video and photographs. In *SIGGRAPH '07 : ACM SIGGRAPH 2007 papers*, page 39, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [RWC⁺98] Ramesh Raskar, Greg Welch, Matt Cutts, Adam Lake, Lev Stesin, and Henry Fuchs. The office of the future : a unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays. In *SIGGRAPH '98 : Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 179–188, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [SC05] Peng Song and Tat-Jen Cham. A theory for photometric self-calibration of multiple overlapping projectors and cameras. In *CVPR '05 : Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) - Workshops*, page 97, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.

- [SCG⁺05] Pradeep Sen, Billy Chen, Gaurav Garg, Stephen R. Marschner, Mark Horowitz, Marc Levoy, and Hendrik P. A. Lensch. Dual photography. *ACM Trans. Graph.*, 24(3) :745–755, 2005.
- [Sch94a] Christophe Schlick. An inexpensive brdf model for physically-based rendering. *Computer Graphics Forum*, 13 :233–246, 1994.
- [Sch94b] Christophe Schlick. A survey of shading and reflectance models. *Comput. Graph. Forum*, 13(2) :121–131, 1994.
- [SD09] Pradeep Sen and Soheil Darabi. Compressive Dual Photography. *Computer Graphics Forum*, 28(2) :609 – 618, 2009.
- [SMK05] Steven M. Seitz, Yasuyuki Matsushita, and Kiriakos N. Kutulakos. A theory of inverse light transport. In *ICCV '05 : Proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 1440–1447, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [SSK07] Maxim Shevtsov, Alexei Soupikov, and Alexander Kapustin. Ray-triangle intersection algorithm for modern cpu architectures. In *Proc. GraphiCon '07*, pages 33–39, 2007.
- [Sto01a] Maureen Stone. Color balancing experimental projection displays. In *Ninth Color Imaging Conference : Color Science and Engineering : Systems, Technologies, and Applications*, volume 9, pages 342–347, 2001.
- [Sto01b] Maureen C. Stone. Color and brightness appearance issues in tiled displays. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 21(5) :58–66, 2001.
- [Sut68] Ivan E. Sutherland. A head-mounted three dimensional display. In *AFIPS '68 (Fall, part I) : Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I*, pages 757–764, New York, NY, USA, 1968. ACM.
- [Tar95] Jean-Philippe Tarel. Calibration radiométrique de caméra. research report 2509, INRIA, march 1995.
- [TS67] K. E. Torrance and E. M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of the Optical Society of America*, 57 :1105–1114, 1967.
- [TTM02] Nobuhiko Tamura, Norimichi Tsumura, and Yoichi Miyake. Masking model for accurate colorimetric characterization of lcd. In *Color Imaging Conference*, pages 312–316, 2002.
- [VA84] Jerry Van Aken. An efficient ellipse-drawing algorithm. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 4(9) :24–35, 1984.
- [Vea97] Eric Veach. *ROBUST MONTE CARLO METHODS FOR LIGHT TRANSPORT SIMULATION*. PhD thesis, STANFORD UNIVERSITY, 1997.
- [War92] Gregory J. Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection. In *SIGGRAPH '92 : Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 265–272, New York, NY, USA, 1992. ACM Press.
- [WB07] Gordon Wetzstein and Oliver Bimber. Radiometric compensation through inverse light transport. In *PG '07 : Proceedings of the 15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pages 391–399, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society.
- [WCL03] Grant Wallace, Han Chen, and Kai Li. Color gamut matching for tiled display walls. In *EGVE '03 : Proceedings of the workshop on Virtual environments 2003*, pages 293–302, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [Whi80] Turner Whitted. An improved illumination model for shaded display. *Commun. ACM*, 23(6) :343–349, 1980.
- [WLL⁺09] Tim Weyrich, Jason Lawrence, Hendrik P. A. Lensch, Szymon Rusinkiewicz, and Todd Zickler. Principles of appearance acquisition and representation. *Computer Graphics and Vision*, 4(2) :75–191, 2009.
- [WMC⁺05] Tsung-Yi Wu, Wan-Chun Ma, Yung-Yu Chuang, Bing-Yu Chen, and Ming Ouhyoung. Image-based brdf acquisition for non-spherical objects. In *Proceedings of 2005 Workshop on Computer Vision & Graphic Image Processing*, 2005.
- [WS01] Ingo Wald and Philipp Slusallek. State of the art in interactive ray tracing. In *State of the Art Reports, EUROGRAPHICS 2001*, pages 21–42. EUROGRAPHICS, Manchester, United Kingdom, 2001.
- [WSOS05] Dong Wang, Imari Sato, Takahiro Okabe, and Yoichi Sato. Radiometric compensation in a projector-camera system based properties of human vision system. In *CVPR '05 : Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '05) - Workshops*, page 100, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.

- [YCC10] Sheng Yu, Yapo Theodore C., and Barbara Cutler. Global illumination compensation for spatially augmented reality. *Computer Graphics Forum*, 29(2) :387–396, 2010.
- [YCS04] Wonpil Yu, Yunkoo Chung, and Jung Soh. Vignetting distortion correction method for high quality digital imaging. In *ICPR '04 : Proceedings of the Pattern Recognition, 17th International Conference on (ICPR '04) Volume 3*, pages 666–669, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [YDMH99] Yizhou Yu, Paul Debevec, Jitendra Malik, and Tim Hawkins. Inverse global illumination : recovering reflectance models of real scenes from photographs. In *SIGGRAPH '99 : Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 215–224, New York, NY, USA, 1999. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [YT08] Nancy P. Y. Yuen and William C. Thibault. Inexpensive immersive projection. In *VR*, pages 237–240, 2008.
- [Zeg97] Eric Zeghers. *Radiosité spectrale et sources directionnelles : application à l'éclairage des tunnels routiers*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 1997.
- [ZLK06] Yuanjie Zheng, Stephen Lin, and Sing Bing Kang. Single-image vignetting correction. In *CVPR '06 : Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 461–468, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- [ZLK⁺08] Yuanjie Zheng, Stephen Lin, Chandra Kambhamettu, Jingyi Yu, and Sing Bing Kang. Single-image vignetting correction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 99(1) :461–468, 2008.
- [ZTCS99] Ruo Zhang, Ping-Sing Tsai, James Cryer, and Mubarak Shah. Shape from shading ; a survey. *IEEE PAMI*, 21(8) :609–706, 1999.