



**HAL**  
open science

## Analyse en simulation de projection immersive par l'avant

Julien Dehos, Eric Zéghers, Laurent Sarry, François Rousselle, Christophe  
Renaud

► **To cite this version:**

Julien Dehos, Eric Zéghers, Laurent Sarry, François Rousselle, Christophe Renaud. Analyse en simulation de projection immersive par l'avant. *Revue Electronique Francophone d'Informatique Graphique*, 2011, 5 (2), pp. 15-26. hal-00659921

**HAL Id: hal-00659921**

**<https://hal.science/hal-00659921v1>**

Submitted on 14 Jan 2012

**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.

# Analyse en simulation de projection immersive par l'avant

Julien Dehos<sup>1</sup>, Eric Zéghers<sup>2</sup>, Laurent Sarry<sup>2</sup>, François Rousselle<sup>1</sup> et Christophe Renaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Informatique Signal et Image de la Côte d'opale, Université du Littoral Cote d'Opale

<sup>2</sup> Image Science for Interventional Techniques, Université d'Auvergne

---

## Résumé

Depuis quelques années des systèmes caméra-projecteur sont utilisés, dans le cadre de la réalité mixte, pour éclairer des environnements non dédiés comme les murs d'une pièce d'habitation. L'objectif de ce travail est de caractériser le potentiel d'un tel système. Pour cela, nous proposons une étude en simulation des échanges énergétiques, depuis le projecteur jusqu'à la caméra. Nous considérons également l'efficacité de la compensation. Enfin, nous analysons, d'après les résultats obtenus, l'influence de différents facteurs.

## Abstract

Videoprojectors are designed to project onto white lambertian planar screens. Since several years, projector-camera systems are used, in virtual reality or mixed reality applications, to light non-specific environments such as the walls of a room. The underlying projection process undergoes several radiometric perturbations which affect the visible images. In immersive environments, light inter-reflections between surfaces greatly impact the projection process. Several radiometric compensation methods have been proposed to reduce the perturbation caused by inter-reflections. However, nothing has been proposed to evaluate the phenomenon and the effectiveness of compensation methods.

In this paper, we deal with projection in immersive environments. We propose a radiosity-based method to simulate light transfert, from a projector to a camera, in such environments. This enables us to evaluate the perturbation resulting from inter-reflections. We also consider the efficiency of inter-reflection compensation. Finally, we study the influence of several parameters. Our results shows that radiometric compensation can reduce inter-reflection influence but is severely limited by the amount of immersion.

---

**Mots clé :** projection immersive, radiosité, compensation radiométrique, simulation d'éclairage

## 1. Introduction

### 1.1. Motivation

Initialement, les vidéoprojecteurs ont été conçus pour projeter une image sur un écran de projection. Conséquence du développement de la réalité virtuelle et de la démocratisation du matériel d'imagerie numérique, ils sont désormais couramment utilisés, couplés à des caméras, pour projeter sur des surfaces non dédiées comme les murs d'une pièce d'habitation. Au début, les surfaces utilisées étaient planes et des méthodes de compensation ont été développées pour annuler les différentes perturbations radiométriques (par exemple, les variations de couleurs d'un mur) et ainsi rendre réellement visible une image donnée [BIWG07]. Le principe a ensuite été généralisé à des environnements plus complexes, dans l'idée, notamment, de réaliser de la projection immersive [YT08, Bou08].

La difficulté de la projection immersive réside dans l'importance des réflexions multiples. En effet, dans de telles conditions, une grande partie de la lumière issue du projecteur est réfléchié dans la pièce, de surface en surface, jusqu'à atteindre la caméra ou l'utilisateur (ce qui perturbe le rendu voulu).

Pour illustrer l'importance du phénomène, nous avons appliqué la méthode décrite dans [NKGR06] à un système de projection immersive [ASLZ08, DZR\*08] pour séparer l'éclairage réfléchi directement, du projecteur vers la caméra, de l'éclairage réfléchi indirectement, après réflexions multiples. La Figure 1 montre la scène réelle, visible en projetant une image blanche, ainsi que l'éclairage réfléchi directement et l'éclairage réfléchi indirectement correspondant. L'éclairage réfléchi directement correspond à la lumière qui part du projecteur, atteint un mur puis se réfléchit vers la caméra. L'éclairage réfléchi indirectement correspond à la lumière qui part du projecteur, se réfléchit de surface en surface plusieurs fois puis atteint la caméra. Pour

une application de projection, l'idéal serait que l'éclairage réfléchi directement soit important et l'éclairage réfléchi indirectement faible. Malheureusement, nous constatons que le phénomène inverse se produit.

Pour pallier ce problème, différentes méthodes de compensation ont été mises au point [HSM07, MKO06, PLS\*06, WB07]. Théoriquement, il suffit de déterminer la matrice de transport de la lumière, du projecteur vers la caméra, puis de l'inverser, pour obtenir la compensation des réflexions multiples. En pratique, cette matrice est difficile à mesurer (taille importante, mesure d'un signal faible). Quant à l'image de compensation obtenue, elle n'est pas toujours synthétisable. Les méthodes proposées dans la littérature consistent donc essentiellement à résoudre ces difficultés.

## 1.2. Contribution

L'objectif de ce papier est de déterminer l'influence des réflexions multiples sur l'image finalement perçue par la caméra ou l'utilisateur, d'analyser les facteurs d'influence et de caractériser le potentiel théorique de la compensation (voir Figure 2). À notre connaissance, ce travail n'a pas encore été présenté, bien qu'à notre avis, de première importance car situé en amont des méthodes de compensation mises en pratique.

Nous proposons tout d'abord une méthode de simulation d'éclairage complète, du projecteur à la caméra. Nous utilisons la méthode très classique de radiativité [GTGB84] pour simuler les échanges énergétiques entre surfaces. En revanche, le calcul de la lumière projetée et de la lumière perçue par la caméra est lui rarement évoqué, c'est pourquoi nous le détaillons également dans ce papier.

Nous présentons ensuite une méthode de compensation théorique consistant principalement à inverser la méthode de projection précédente. Il s'agit donc du schéma classique de la compensation : à partir de l'image voulue, calculer l'image de compensation qui, une fois projetée, donne l'image visible, proche de l'image attendue.

Enfin, nous proposons une analyse de résultats basée sur cette méthode de simulation. À partir d'une scène de test type et d'un ensemble de critères de mesure, nous étudions l'influence de différents facteurs sur le résultat de la projection, sans ou avec compensation. Ceci permet de prévoir la qualité potentielle d'un système de projection avant immersive et les moyens de l'améliorer.

La chaîne de traitement réalisée ici est illustrée Figure 3. Chaque étape de cette chaîne peut être implémentée de différentes façons, avec les avantages et les inconvénients qui en découlent. L'objectif de ce papier n'est pas d'évaluer toutes les déclinaisons possibles mais d'utiliser une implémentation simple de cette chaîne pour évaluer l'importance des réflexions multiples lors d'une projection immersive. L'hypothèse principale retenue ici est que les matériaux sont

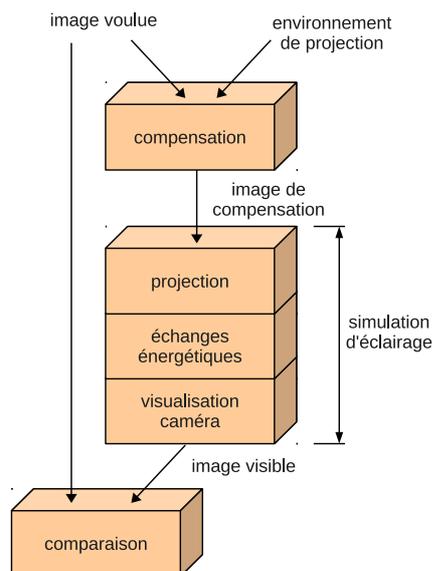


Figure 3: Chaîne de traitement générale.

diffus. Il s'agit donc d'un cas restreint et peu réaliste mais qui présente deux avantages indéniables. Premièrement, il permet d'implémenter la chaîne de traitement relativement simplement, en se basant sur la méthode de radiativité. Deuxièmement, il correspond à un cas avantageux de la projection immersive dans la mesure où il y a toujours une partie de la lumière qui est renvoyée du projecteur vers l'utilisateur, rendant ainsi possible la projection immersive. Ainsi, l'hypothèse des matériaux diffus donne une idée de la perturbation minimale, due aux réflexions multiples, qu'il faut prendre en compte.

## 1.3. Sommaire

Dans la Section 2, nous présentons l'état de l'art correspondant. Dans la Section 3, nous rappelons le principe de la méthode de radiativité. Ceci nous permet de proposer notre méthode de simulation, dans la Section 4. Enfin, nous présentons notre analyse, utilisant cette méthode de simulation, dans la Section 5, et nos conclusions, dans la section 6.

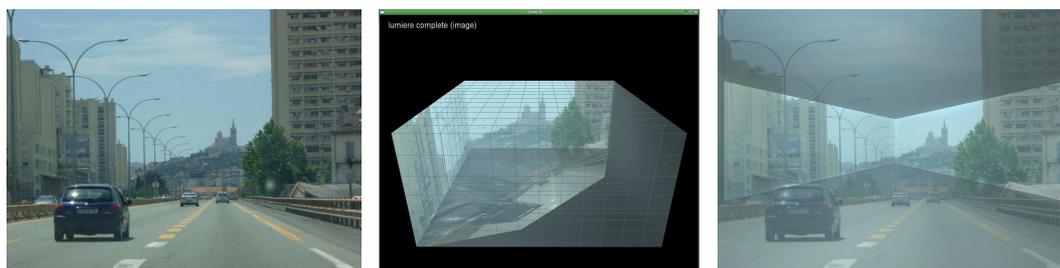
## 2. Travaux précédents

Le problème considéré dans ce papier n'a, à notre connaissance, jamais été traité explicitement mais certains travaux fournissent des éléments intéressants.

Concernant l'étude théorique des réflexions multiples, Langer propose d'analyser leur influence sur la couleur apparente [Lan01]. Cependant, ces travaux concernent uniquement les réflexions multiples dans une sphère coupée par un



**Figure 1:** Gauche : scène réelle visible lors de la projection immersive par l'avant d'une image blanche. Milieu : éclairage réfléchi directement, du projecteur vers la caméra, correspondant. Droite : éclairage réfléchi indirectement, après réflexions multiples, correspondant.



**Figure 2:** Gauche : image à projeter. Milieu : simulation de la projection. Droite : image visible.

plan et provenant d'une source de lumière uniforme diffuse, ce qui est trop restrictif pour répondre à notre problématique.

Concernant la simulation d'éclairage, la méthode de radiosité [GTGB84] ainsi que les méthodes de lancer de rayons [Gla94] permettent de simuler la lumière visible dans une scène donnée. Cependant, intégrer un vidéoprojecteur comme source de lumière n'est pas toujours immédiat. En effet, dans le cas d'un lancer de rayons, il faut généralement modifier l'algorithme pour gérer explicitement ce type de source et, dans le cas de la radiosité, il faut convertir la lumière projetée en radiosité auto-émise, au niveau des carreaux.

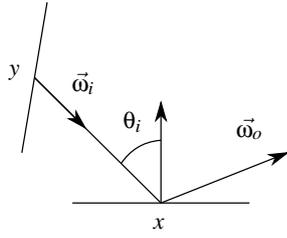
Dans le domaine du traitement d'images, les réflexions multiples sont parfois abordées par les méthodes de reconstruction basées image (*shape from shading* [ZTCS99], *shape from interreflections* [NIK91, YZOS97]). Par exemple, Nayar et al. proposent une méthode applicable sur les objets concaves et diffus [NIK91]. Notre problématique est cependant différente puisque nous connaissons la géométrie de l'environnement mais voulons connaître l'influence des réflexions multiples sur la projection d'une image et l'efficacité de leur compensation, ce qui n'est pas traité par cette méthode.

Enfin, un certain nombre de travaux, dans le domaine de la vision par ordinateur, traitent des réflexions multiples. Nayar et al. proposent une méthode pour séparer la composante directe et la composante indirecte d'une scène réelle, éclairée par un vidéoprojecteur [NKGR06]. Cependant, il s'agit d'une mesure sous éclairage uniforme et n'aborde pas le problème de la compensation.

Wetzstein et Bimber proposent une méthode de compensation radiométrique d'un système projecteur-caméra utilisable en présence de réflexions multiples [WB07]. Leur méthode consiste à mesurer puis à inverser la matrice de transport de la lumière, entre le projecteur et la caméra. Cependant, leurs scènes de test sont relativement ouvertes, ce qui limite les réflexions multiples à un cadre où la compensation reste efficace.

Bai et al. établissent une dualité entre le transport de la lumière et le transport inverse [BCNR10]. Ceci leur permet d'étendre au cadre du transport inverse, les méthodes de calcul classiquement utilisées dans le cadre du transport (et ainsi, de proposer, entre autres, une méthode de compensation). Ici aussi, le travail porte plus sur la méthode de calculs que sur l'efficacité de la compensation, et les tests sont réalisés sur des scènes ouvertes.

Enfin, Sheng et al. proposent une formalisation du problème de la compensation ainsi qu'une méthode de résolution par optimisation [SYC10]. Cependant, ils appliquent leur



**Figure 4:** Notations pour l'équation de luminance.

méthode sur des maquettes de scène sans plafond, ce qui réduit considérablement l'influence des réflexions multiples (voir nos résultats en Section 5.3.4).

### 3. Rappels sur la méthode de radiosité

L'équation générale de luminance décrit comment la lumière se propage dans une scène [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  $\vec{\omega}$ ,  $\vec{\omega}_i$  une direction d'incidence,  $\vec{\omega}_o$  la direction de réflexion,  $L_e$  la fonction d'auto-émission,  $f_r$  la BRDF, et  $\theta_i$  l'angle entre  $\vec{\omega}_i$  et la normale à la surface en  $x$  (voir Figure 4).

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

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

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 :

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

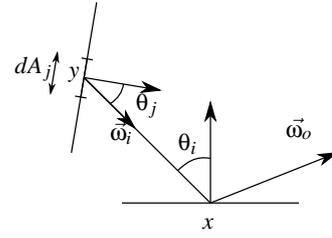
où  $\theta_y$  est l'angle entre la normale au point  $y$  et la direction vers le point  $x$  et  $A_j$  l'aire du carreau  $j$  (voir Figure 5).

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

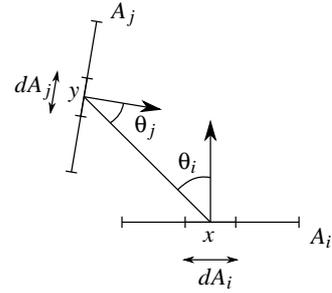
$$B(x) = E(x) + \rho(x) \int_{A_j} B(y) \frac{V(x, y) \cos \theta_i \cos \theta_y}{\pi \|\vec{x}\vec{y}\|^2} dA_j$$

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

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



**Figure 5:** Notations pour l'équation de radiosité.



**Figure 6:** Notations pour l'équation de radiosité constante discrète.

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  $i$ ,  $\rho_i$  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 Figure 6) :

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

Sous forme matricielle, nous obtenons :

$$B = E + GB$$

avec :

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

ce qui équivaut à :

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

### 4. Méthode de simulation

L'équation de radiosité constante discrète nous permet de simuler les réflexions multiples. Nous proposons ici un pro-

gramme de simulation de vidéoprojection basé sur la méthode 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.

#### 4.1. Hypothèses

Soit une scène virtuelle, type pièce d'habitation, dont la seule source de lumière est un vidéoprojecteur projetant une image sur différentes surfaces de la pièce. Pour appliquer la méthode de radiosité, nous considérons que les matériaux sont lambertiens et que la pièce est composée de carreaux suffisamment petits pour que la radiosité soit à peu près constante sur la surface du carreau. Cette hypothèse restreint la méthode à des matériaux diffus mais, comme expliqué Section 1.2, il s'agit d'un cas avantageux pour la projection immersive ce qui permet donc d'évaluer une perturbation minimale, due aux réflexions multiples, à prendre en compte.

Enfin, nous considérons que le projecteur et la caméra ont des caractéristiques géométriques, optiques et électroniques équivalentes (même position, orientation, focale, sensibilité...); et qu'ils sont correctement calibrés (réponse d'intensité neutre, pas de vignette...). Ceci nous permet de considérer que pour une valeur d'intensité donnée le projecteur émet une luminance donnée et que, réciproquement, une telle luminance sera mesurée par la caméra comme la valeur d'intensité initiale, ceci quels que soient les pixels projecteur et caméra considérés. Cette hypothèse permet de simplifier les calculs, comme expliqué dans la suite de la section.

#### 4.2. Simulation de la projection

##### 4.2.1. Calcul de la radiosité auto-émise $E$

Soient  $L_p^k$  la luminance émise par un pixel projecteur  $k$  et  $i$  le carreau atteint par la lumière correspondante. Après réflexion sur le carreau  $i$ , la luminance ré-émise est :

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

où  $\rho_i$  est la réflectivité du carreau,  $\theta^k$  l'angle entre la normale au carreau et la direction d'incidence, et  $d\omega_p^k$  l'angle solide correspondant au pixel projecteur.

D'après les hypothèses, le projecteur et la caméra sont calibrés et ont des caractéristiques équivalentes. Ceci nous permet de considérer que la lumière correspondant à un pixel dépend uniquement de l'intensité du pixel et que l'angle solide correspondant à un pixel est identique pour tous les pixels. Les calculs peuvent donc être effectués à une constante près, ce qui permet de simplifier l'équation précédente en :

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

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 du pixel  $k$  auto-émise par le carreau  $i$  est donc :

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

Les surfaces composant la scène ne disposent pas d'énergie propre. Par abus de langage, l'énergie auto-émise ( $E$ ) correspondra à la part de leur radiosité qui est due exclusivement à l'éclairage direct du vidéo-projecteur. La radiosité totale, visible dans la pièce ( $B$ ), comprend donc l'énergie due au projecteur et l'énergie due aux réflexions multiples.

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

$$E_i = \frac{\rho_i}{\#K} \sum_{k \in K} \cos \theta^k L_p^k \quad (2)$$

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 complètement recouvert par la lumière du projecteur ou au contraire pas du tout.

##### 4.2.2. Calcul de la matrice d'échange énergétique $G$

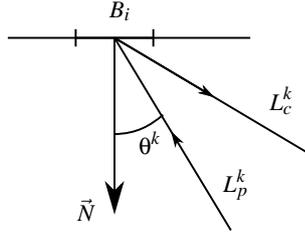
Comme  $G_{ij} = \rho_i F_{ij}$ , nous obtenons  $G$  en multipliant les coefficients de chaque ligne  $i$  de la matrice  $F$  par la réflectivité  $\rho_i$  du carreau  $i$  correspondant.

Les facteurs de forme s'obtiennent en calculant l'équation 1. Il existe de nombreuses formules, correspondant chacune à une configuration géométrique, pour effectuer ce calcul analytiquement. Cependant, hormis pour quelques configurations simples, ces formules sont assez complexes à implémenter et coûteuses à évaluer. C'est pourquoi il est souvent fait appel à des méthodes numériques. Dans notre implémentation, nous utilisons la méthode classique de quadrature.

##### 4.2.3. 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 inversible et à diagonale dominante. L'équation peut donc être résolue par une méthode itérative (Jacobi, Gauss-Seidel) ou par calcul de la matrice inverse. Dans notre implémentation, nous précalculons  $(I - G)^{-1}$  via une décomposition  $LU$ . Il existe des méthodes plus efficaces mais celle-ci a l'avantage de pouvoir stocker les précalculs correspondant à une scène puis de les réutiliser sur différentes projections d'images, en calculant :

$$B = (I - G)^{-1} E \quad (3)$$



**Figure 7:** Notations pour le calcul de l'image caméra. D'après nos hypothèses,  $L_p^k$  et  $L_c^k$  sont en fait de même direction (et de sens opposé).

#### 4.2.4. Calcul de l'image caméra

D'après nos hypothèses, la mesure de luminance est identique pour tous les pixels (pixels projecteur et pixels caméra). 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 caméra mesurée par le pixel caméra correspondant est donc :

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

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  $L_p^k$  la luminance venant du projecteur. La luminance reçue, après projection sur la surface, est (en prenant en compte la simplification de l'angle solide donnée Section 4.2.1)  $L_p^k \cos \theta^k$  où  $\theta^k$  est l'angle entre la normale et la direction d'incidence (voir Figure 7). 4.2.1

Enfin, la luminance réfléchiée par la surface (lambertienne de réflectivité  $\rho_i$ ) est  $L_p^k \cos \theta^k \rho_i / \pi$ . Finalement, la luminance mesurée par le pixel caméra est donc :

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

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. En fixant ce facteur à  $\pi$ , le calcul se simplifie en :

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

**Implémentation :** 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.  $L_p^k$  est obtenue 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.  $\cos \theta^k$  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.

#### 4.3. Compensation des réflexions multiples

La compensation des réflexions multiples a pour objectif de trouver l'image de compensation qui, une fois projetée, permet de voir l'image voulue initialement. Il s'agit donc du problème inverse de la projection : 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  $\pi$ . 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-émission  $E$  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 :

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

c'est-à-dire :

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

où  $L_p^k$  est la luminance fournie par le projecteur,  $E_i$  la radiosité auto-émise du carreau correspondant au pixel considéré,  $\rho_i$  la réflectivité du carreau et  $\theta^k$  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 :

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

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

## 5. Résultats et discussion

La méthode de simulation présentée permet d'étudier l'influence des réflexions multiples ainsi que la faisabilité de la compensation pour une pièce et une image données (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 ?

### 5.1. Scène de test

Pour notre simulation, nous utilisons une pièce 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 Figure 2).

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   9 échantillons par carreau par facteur de forme calculé) et à l'inversion de matrice  $((I - G)^{-1})$ . En comparaison, le temps consacré aux autres calculs est négligeable.

### 5.2. Critères d'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 par rapport à la radiosité visible i.e.  $E_i/B_i$ . Celle-ci donne une indication sur l'information utile (même principe que le rapport signal sur bruit) : un rapport élevé indique que les réflexions 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.

### 5.3. Analyse de projections immersives

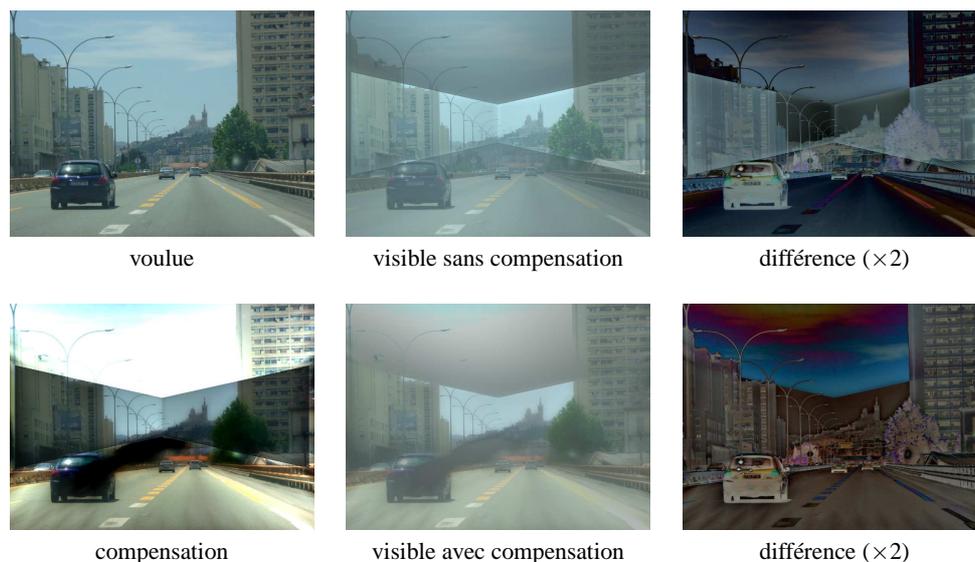
#### 5.3.1. Cas nominal

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 est donné Figure 8. Les valeurs des critères d'évaluation sont données Table 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 cr e e par les réflexions multiples est de 43 à 153 (71 en moyenne).

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 Figure 9).

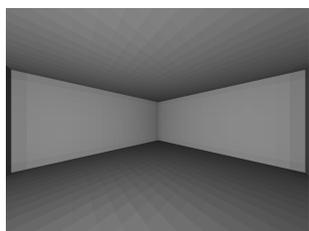
Nous constatons également que la compensation des



**Figure 8:** Résultat de la projection et de la compensation dans le cas nominal.

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

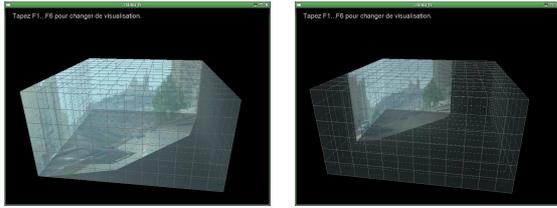
**Table 1:** Evaluation des différents résultats obtenus.  $B_i - E_i$  : radiosité apportée par les réflexions multiples sur le carreau  $i$ .  $E_i/B_i$  : part de la radiosité auto-émise sur la radiosité totale du carreau  $i$ .  $B_i$  compensation : radiosité que doit émettre le carreau  $i$  pour 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.



**Figure 9:** Proportion d'éclairage réfléchi directement relativement à l'éclairage total, sous un éclairage uniforme.

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.

Concernant l'erreur visible après projection sans ou avec compensation (images de différence Figure 8), sans compensation, nous obtenons une erreur moyenne de 32 et un écart-



**Figure 11:** Gauche : projection sur 50% de la pièce. Droite : projection sur 25% de la pièce.

type de 18. Avec compensation, l'erreur moyenne est de 27 et l'écart-type de 12, soit une amélioration.

### 5.3.2. Influence de l'image projetée

Nous réalisons une simulation avec une image grise (niveau moyen 70, écart-type 0) (voir Figure 10). 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 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.

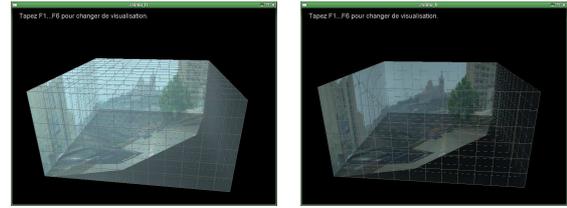
### 5.3.3. Influence de la projection immersive

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 Figure 11 et Figure 12). 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.

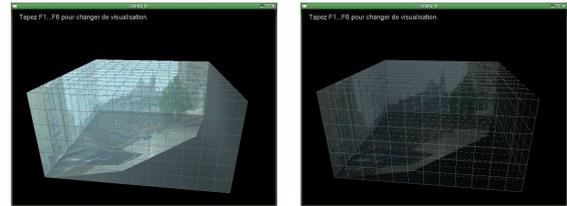
### 5.3.4. Influence de l'environnement immersif

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 [SYC10], 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. L'idée est donc ici d'évaluer l'influence du plafond en réalisant la simulation dans les mêmes conditions que le cas nominal mais avec une pièce sans plafond (voir Figure 13 et Figure 14).

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,



**Figure 13:** Gauche : projection dans une pièce avec plafond. Droite : projection dans une pièce sans plafond.



**Figure 15:** Gauche : projection avec  $\rho = 0,7$ . Droite : projection avec  $\rho = 0,4$ .

la compensation devient très efficace (erreur moyenne de 6 avec un écart-type de 9).

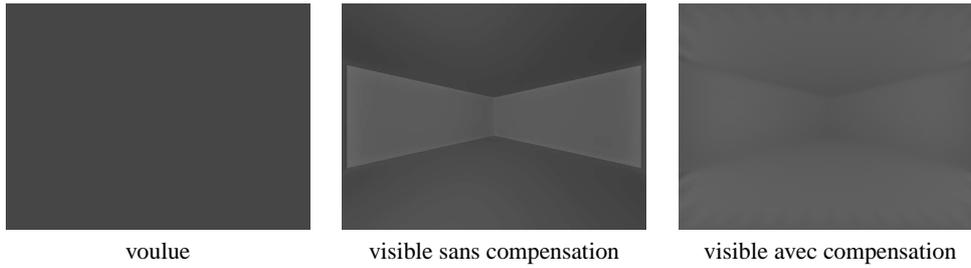
### 5.3.5. Influence de la réflectivité

Enfin, le dernier paramètre étudié est la réflectivité des matériaux, fixé ici à  $\rho = 0,4$  (voir Figure 15 et Figure 16). 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).

## 5.4. Analyse de la méthode

La chaîne de traitement proposée ici permet de simuler le résultat d'une projection immersive et d'évaluer le potentiel d'un algorithme de compensation. Une implémentation de cette chaîne est proposée pour le cas où les matériaux sont diffus. Comme expliqué précédemment, ce cas donne une idée des perturbations minimales à considérer et permet d'implémenter la chaîne de traitement relativement facilement. La suite de cette section détaille les avantages et inconvénients de cette implémentation et donne des pistes d'amélioration.

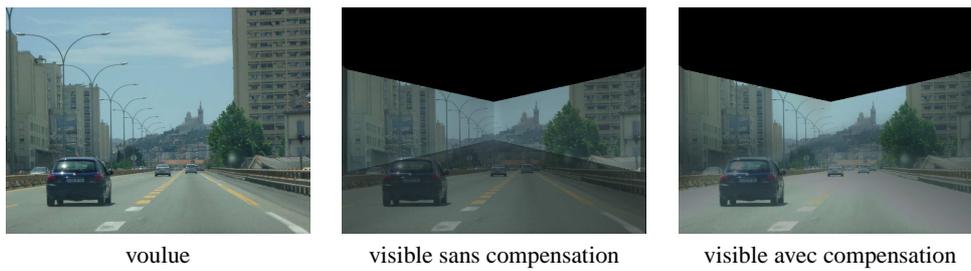
Tout d'abord, l'étape de simulation d'éclairage proposée ici est basée sur la méthode de radiosité. Ceci a l'avantage de permettre une simulation de l'éclairage global qui est à la fois réaliste et non bruitée. En revanche, cette méthode est limitée aux matériaux diffus, ce qui restreint l'application de la chaîne de traitement. Cette contrainte peut être



**Figure 10:** Résultat de la projection et de la compensation d'une image grise.



**Figure 12:** Résultat de la projection et de la compensation sur une surface plus petite de la pièce.



**Figure 14:** Résultat de la projection et de la compensation dans une pièce sans plafond.



**Figure 16:** Résultat de la projection et de la compensation avec  $\rho = 0,4$ .

levée en utilisant un algorithme de simulation d'éclairage plus complet comme le path tracing [Kaj86] ou Metropolis [VG97]. Notons cependant que ces algorithmes peuvent impliquer un coût de calculs important et introduire du bruit dans l'image résultat. De plus, ces algorithmes ne permettent pas de dériver une méthode de compensation aussi simplement qu'avec la méthode de radiosité.

Concernant l'étape de comparaison d'images, qui permet d'évaluer les perturbations lors de la projection immersive et l'efficacité de la compensation, la méthode proposée ici effectue simplement des comparaisons objectives d'intensité.  tant donné l'importance des perturbations, il serait intéressant d'utiliser des critères de comparaison adapté au système de perception visuelle [RPG99] (par exemple, pour évaluer l'évolution du contraste perçu...).

Enfin, l'étape de compensation de la projection proposée ici a pour objectif d'annuler complètement les perturbations causées par les réflexions multiples. Ceci est suffisant pour le cas des matériaux diffus étudié ici mais pourrait être généralisé à des scènes plus complexes en implémentant un algorithme de compensation plus générique [WB07]. La compensation pourrait également être améliorée en utilisant des méthodes plus subtiles dont le principe est d'optimiser la compensation en fonction des perturbations mais également de l'image projetée [WSOS05, AOSS06].

## 6. Conclusion

Dans ce papier, nous avons étudié l'influence des réflexions multiples au sein d'un système de projection avant immersive. Nous avons présenté une méthode, basée sur la méthode de radiosité, permettant de simuler la lumière projetée par un vidéoprojecteur, réfléchie dans l'environnement de projection puis acquise par la caméra. Nous avons également montré comment obtenir une méthode de compensation, en inversant ces calculs. Enfin, nous avons réalisé une série de tests et évalué quelques critères pour analyser l'influence de différents facteurs sur la qualité de la projection et de la compensation.

D'après les simulations réalisées, nous pouvons déduire que les réflexions multiples sont particulièrement importantes si la pièce est entièrement fermée et que la projection est réalisée sur une part importante de la pièce. 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 contrastée.

Parmi les perspectives, il serait intéressant de reprendre la chaîne de traitement proposée ici (voir Figure 3) en implémentant les variations présentées Section 5.4. Ceci permettrait, d'une part, d'étendre l'étude de la projection immersive à des situations plus réalistes et, d'autre part, d'évaluer des méthodes de compensation plus évoluées.

## Références

- [AOSS06] ASHDOWN M., OKABE T., SATO I., SATO Y. : Robust content-dependent photometric projector compensation. In *Proceedings of the 2006 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop* (Washington, DC, USA, 2006), CVPRW '06, IEEE Computer Society, pp. 6–.
- [ASLZ08] ASTRE B., SARRY L., LOHOU C., ZEGHERS E. : Automatic calibration of a single-projector catadioptric display system. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2008).
- [BCNR10] BAI J., CHANDRAKER M., NG T.-T., RAMAMOORTHY R. : A dual theory of inverse and forward light transport. In *European Conference on Computer Vision* (2010), pp. 1–8.
- [BIWG07] BIMBER O., IWAI D., WETZSTEIN G., GRUNDH FER A. : The visual computing of projector-camera systems. In *EuroGraphics (STAR)* (2007).
- [Bou08] BOURKE P. : Low cost projection environment for immersive gaming. *Journal of Multimedia*. Vol. 3, Num. 1 (2008), 41–46.
- [DZR\*08] DEHOS J., ZEGHERS E., RENAUD C., ROUSSELLE F., SARRY L. : Radiometric compensation for a low-cost immersive projection system. In *VRST '08 : Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology* (New York, NY, USA, 2008), ACM, pp. 130–133.
- [Gla94] GLASSNER A. S. : *Principles of Digital Image Synthesis*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1994.
- [GTGB84] GORAL C. M., TORRANCE K. E., GREENBERG D. P., BATAILE B. : Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. *SIGGRAPH Comput. Graph.* Vol. 18, Num. 3 (1984), 213–222.
- [HSM07] HABE H., SAEKI N., MATSUYAMA T. : Inter-reflection compensation for immersive projection display. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2007).
- [Ike72] IKEBE Y. : The galerkin method for the numerical solution of fredholm integral equations of the second kind. *SIAM Review*. Vol. 3 (1972), 465–491.
- [Kaj86] KAJIYA J. T. : The rendering equation. *SIGGRAPH Comput. Graph.* Vol. 20 (August 1986), 143–150.
- [Lan01] LANGER M. S. : A model of how interreflections can affect color appearance. *Color Research & Application*. Vol. 26 (2001), S218–S221.
- [MKO06] MUKAIGAWA Y., KAKINUMA T., OHTA Y. : A fast compensation method of inter-reflection for pattern projection onto a non-planar surface. In *IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PRO-CAMS2006)* (2006).

- [NIK91] NAYAR S. K., IKEUCHI K., KANADE T. : Shape from interreflections. *International Journal of Computer Vision*. Vol. 6 (1991), 173–195. 10.1007/BF00115695.
- [NKGR06] NAYAR S. K., KRISHNAN G., GROSSBERG M. D., RASKAR R. : Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination. *ACM Transactions on Graphics*. Vol. 25, Num. 3 (2006), 935–944.
- [PLS\*06] PARK H., LEE M.-H., SEO B.-K., SHIN H.-C., PARK J.-I. : Radiometrically-compensated projection onto non-lambertian surface using multiple overlapping projectors. In *PSIVT* (2006), pp. 534–544.
- [RPG99] RAMASUBRAMANIAN M., PATTANAİK S. N., GREENBERG D. P. : A perceptually based physical error metric for realistic image synthesis. In *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (New York, NY, USA, 1999), SIGGRAPH '99, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 73–82.
- [SYC10] SHENG Y., YAPO T. C., CUTLER B. : Global illumination compensation for spatially augmented reality. *Computer Graphics Forum*. Vol. 29, Num. 2 (2010), 387–396.
- [VG97] VEACH E., GUIBAS L. J. : Metropolis light transport. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (New York, NY, USA, 1997), SIGGRAPH '97, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 65–76.
- [WB07] WETZSTEIN G., BIMBER O. : Radiometric compensation through inverse light transport. In *PG '07 : Proceedings of the 15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications* (2007), pp. 391–399.
- [WSOS05] WANG D., SATO I., OKABE T., SATO Y. : Radiometric compensation in a projector-camera system based properties of human vision system. In *Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) - Workshops - Volume 03* (Washington, DC, USA, 2005), IEEE Computer Society, pp. 100–.
- [YT08] YUEN N. P. Y., THIBAUT W. C. : Inexpensive immersive projection. In *VR* (2008), pp. 237–240.
- [YZOS97] YANG J., ZHANG D., OHNISHI N., SUGIE N. : Determining a polyhedral shape using interreflections. *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on*. Vol. 0 (1997), 110.
- [ZTCS99] ZHANG R., TSAI P.-S., CRYER J. E., SHAH M. : Shape from shading : A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 21, Num. 8 (1999), 690–706.