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. 23èmes journées de l'Association Française d'Informatique Graphique, Nov 2010, Dijon, France. pp.39–48. hal-00598672

HAL Id: hal-00598672

https://hal.science/hal-00598672v1

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.

AFIG 2010 / Dijon
LE2I Presse

Analyse en simulation de projection immersive par l'avant

Julien Dehos[1], Eric Zéghers[1], Laurent Sarry[1], François Rousselle[2] et Christophe Renaud[2]

[1]Université d'Auvergne
[2]Université du Littoral Cote d'Opale

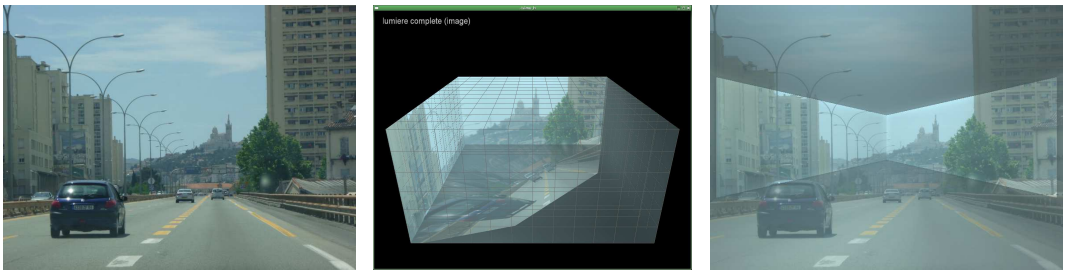


Figure 1: *Gauche : image à projeter. Milieu : simulation de la projection. Droite : image visible.*

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.

Mots-clés : 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 perturbations radiométriques 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 réfléchie dans la pièce, de surface en surface, jusqu'à atteindre la caméra ou l'utilisateur.

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 2 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

© Laboratoire Electronique Informatique Image 2010.

Figure 2: *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.*

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. 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 radiosité [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.

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 radiosité. 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 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 projectée 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

© LE2I 2010.

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 [YCC10]. Cependant, ils appliquent leur méthode sur des maquettes de scène sans plafond, ce qui réduit, ici encore, l'influence des réflexions multiples.

3. Rappels sur la méthode de radiosité

L'équation générale de luminance décrit comment la lumière se propage dans une scène [Gla94] :

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

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 θ_i l'angle entre $\vec{\omega}_i$ et la normale à la surface en x (voir Figure 3).

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

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

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

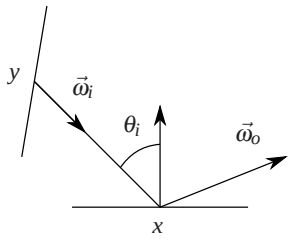


Figure 3: *Notations pour l'équation de luminance.*

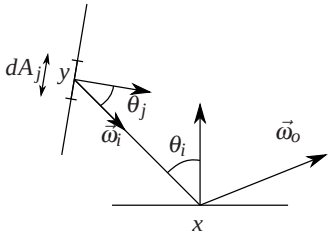


Figure 4: *Notations pour l'équation de radiosité.*

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

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

où θ_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 4).

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

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

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 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

© LE2I 2010.

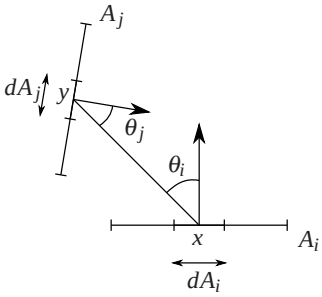


Figure 5: *Notations pour l'équation de radiosité constante discrète.*

Figure 5) :

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

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 programme de simulation de videoprojection 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. Enfin, nous considérons que le projecteur et la caméra sont identiques (mêmes caractéristiques géométriques et optiques : position, directions, focale...) et photo-électriquement uniformes. Ceci nous permet de considérer directement la valeur des pixels projecteur ou caméra comme des valeurs de luminance comparables.

4.2. Simulation de la projection

4.2.1. Calcul de la 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 projecteur L_p^k émise par un pixel projecteur k atteigne uniquement un carreau i. Après réflexion, la luminance ré-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 du pixel k auto-émise† par le carreau i est donc :

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

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

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

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 ρ_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.

† Les surfaces composant la scène ne disposent pas d'énergie propre. Par abus de langage, l'énergie auto-émise correspondra à la part de leur radiosité qui est due exclusivement à l'éclairage direct du vidéo-projecteur

© LE2I 2010.

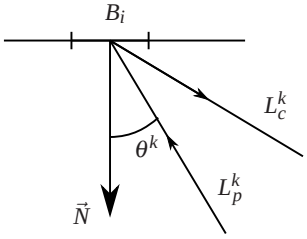


Figure 6: *Notations pour le calcul de l'image caméra.*

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, ce qui nous permet de simuler la projection de différentes images dans une même scène en calculant :

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

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 $L_p^k \cos\theta^k$ où θ^k est l'angle entre la normale et la direction d'incidence (voir Figure 6).

Enfin, la luminance réfléchie par la surface (lambertienne de réflectivité ρ_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 π, 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 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

© LE2I 2010.

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, ρ_i la réflectivité du carreau et θ^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 1).

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 ($(I-G)^{-1}$). 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

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 7. 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 créée par les réflexions multiples est de 43 à 153 (71 en moyenne).

Le passage de la radiosité auto-émise à la luminance que

© LE2I 2010.

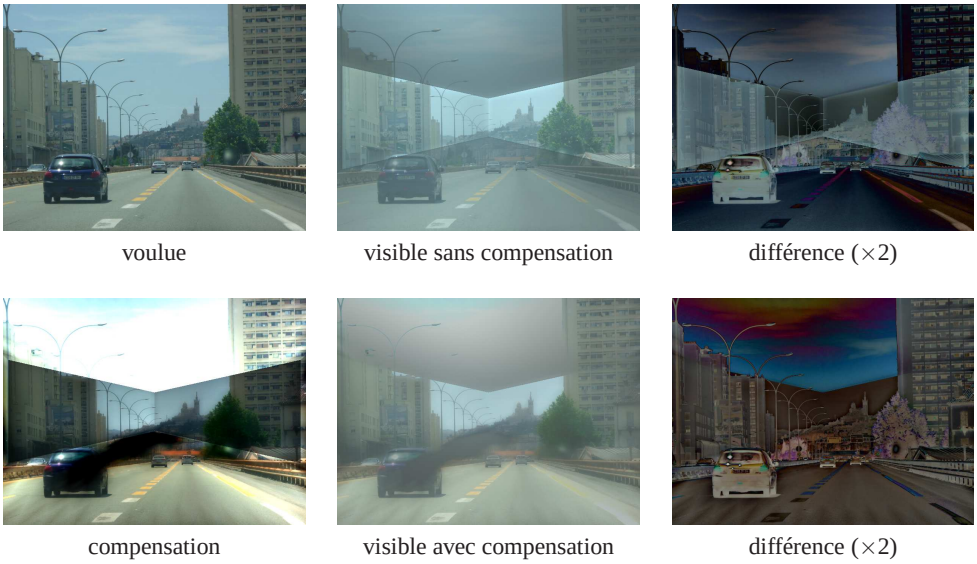


Figure 7: *Résultat de la projection et de la compensation dans le cas nominal.*

	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.*

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 8).

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

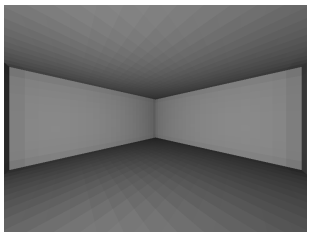


Figure 8: *Proportion d'éclairage réfléchi directement relativement à l'éclairage total, sous un éclairage uniforme.*

© LE2I 2010.

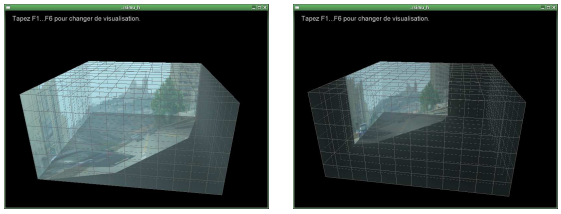


Figure 10: *Gauche : projection sur 50% de la pièce. Droite : projection sur 25% de la pièce.*

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 7), 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.

5.3.2. Influence de l'image projetée

Nous réalisons une simulation avec une image grise (niveau moyen 70, écart-type 0) (voir Figure 9). 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 10 et Figure 11). 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 [YCC10], une projection est réalisée sur une

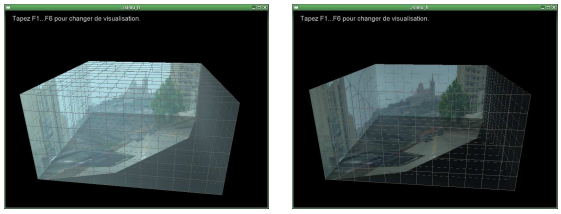


Figure 12: *Gauche : projection dans une pièce avec plafond. Droite : projection dans une pièce sans plafond.*

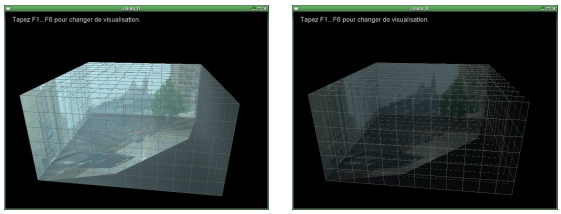


Figure 14: *Gauche : projection avec $\rho = 0,7$. Droite : projection avec $\rho = 0,4$.*

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 12 et Figure 13).

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).

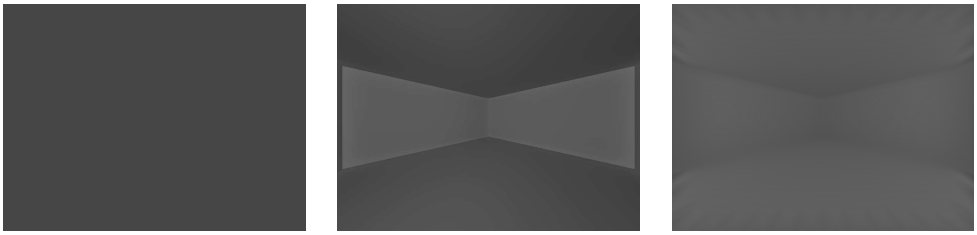
5.3.5. Influence de la réflectivité

Enfin, le dernier paramètre étudié est la réflectivité des matériaux, fixé ici à $\rho = 0,4$ (voir Figure 14 et Figure 15). 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).

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

© LE2I 2010.

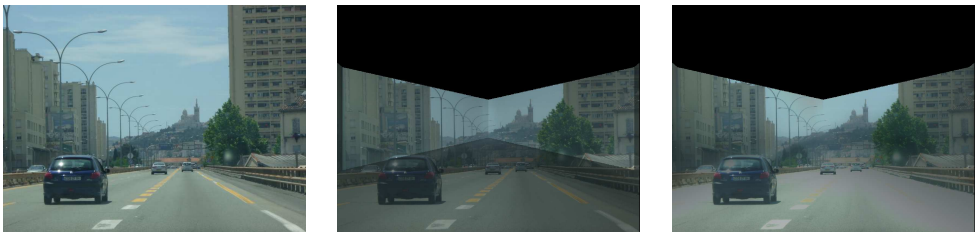


voulue visible sans compensation visible avec compensation

Figure 9: *Résultat de la projection et de la compensation d'une image grise.*

voulue visible sans compensation visible avec compensation

Figure 11: *Résultat de la projection et de la compensation sur une surface plus petite de la pièce.*



voulue visible sans compensation visible avec compensation

Figure 13: *Résultat de la projection et de la compensation dans une pièce sans plafond.*

voulue visible sans compensation visible avec compensation

Figure 15: *Résultat de la projection et de la compensation avec* $\rho = 0,4$.

© LE2I 2010.

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 d'étendre cette étude à des matériaux non lambertiens et de considérer des méthodes de compensation par optimisation (dépendant du contenu des images à projeter).

References

[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., RAMAMOORTHI 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., GRUNDHÖFER 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 3*, 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., BATTAILE B. : Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. *SIGGRAPH Comput. Graph. 18*, 3 (1984), 213–222.

[HSM07] HABE H., SAEKI N., MATSUYAMA T. : Interreflection 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 3* (1972), 465–491.

[Lan01] LANGER M. S. : A model of how interreflections can affect color appearance. *Color Research & Application 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 (PROCAMS2006)* (2006).

[NIK91] NAYAR S. K., IKEUCHI K., KANADE T. : Shape from interreflections. *International Journal of Computer Vision 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 25*, 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.

[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.

[YCC10] YU S., C. Y. T., CUTLER B. : Global illumination compensation for spatially augmented reality. *Computer Graphics Forum 29*, 2 (2010), 387–396.

[YT08] YUEN N. P. Y., THIBAULT 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 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 21*, 8 (1999), 690–706.

© LE2I 2010.