



**HAL**  
open science

## Compensation radiométrique d'un système de projection immersif grand-public

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

► **To cite this version:**

Julien Dehos, Eric Zéghers, François Rousselle, Christophe Renaud, Laurent Sarry. Compensation radiométrique d'un système de projection immersif grand-public. 21èmes journées de l'Association Française d'Informatique Graphique, Nov 2008, Toulouse, France. pp.237–244. hal-00598661

**HAL Id: hal-00598661**

**<https://hal.science/hal-00598661v1>**

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.

# Compensation radiométrique d'un système de projection immersive grand-public

Julien DEHOS<sup>1</sup>, Eric ZEGHERS<sup>2</sup>, François ROUSSELLE<sup>1</sup>, Christophe RENAUD<sup>1</sup> et Laurent SARRY<sup>3</sup>

<sup>1</sup> LIL, Université du Littoral Côte d'Opale

<sup>2</sup> LAIC, Université d'Auvergne

<sup>3</sup> ERIM, Université d'Auvergne

## Abstract

*Catopsys est un système de projection immersive grand-public destiné à des applications de réalité mixte. Il est composé d'un vidéo-projecteur, d'un miroir convexe et d'une caméra, et peut être utilisé dans des salles qui n'ont pas été conçues spécifiquement pour la projection. Le système permet d'afficher un environnement immersif en projetant une image dans toute la salle. Cependant, l'environnement ainsi affiché est perturbé par la réponse du projecteur, les matériaux composant la salle et les réflexions multiples inhérentes à toute pièce partiellement close. La compensation radiométrique de la projection a pour but de réduire l'influence de ces perturbations.*

*Dans ce papier, nous présentons notre système de projection et en proposons un modèle radiométrique prenant en compte la réponse du projecteur, les matériaux de la salle et les réflexions multiples. Nous proposons également une méthode de compensation basée sur ce modèle. Au sein d'une application de réalité virtuelle ou mixte, cette méthode peut être utilisée comme un post-traitement corrigeant les perturbations radiométriques de la projection.*

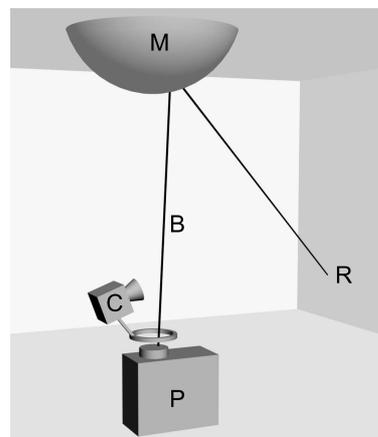
**Keywords:** Informatique Graphique, visualisation, réalité virtuelle, réalité mixte, compensation radiométrique

## 1. Introduction

### 1.1. Motivation

Dans le cadre de la réalité virtuelle, un environnement immersif est un environnement partiellement ou totalement artificiel, créé autour de l'utilisateur. Les environnements immersifs ont de nombreuses applications : simulateurs (de vol, de conduite...), prototypage, bureaux virtuels, environnements d'ambiance, jeux vidéo... Deux types de systèmes peuvent produire de tels environnements : les systèmes portables comme les casques de réalité virtuelle [Sut98] ; les systèmes grand écran comme les CAVEs [CNSD93].

La technologie actuelle permet d'envisager des systèmes de réalité mixte grand-public. Catopsys (CATadiOptric Projection SYStem) est un projet de recherche dont le but est de rendre la réalité mixte accessible au grand public grâce à un système de projection immersive grand-public autocalibrant. Ce système est composé d'un projecteur, d'un miroir convexe et d'une caméra en rotation (voir Figure 1). Une fois posé dans une salle, ce système détermine automatiquement la géométrie de ses divers éléments ainsi que de la salle [ASLZ08]. La projection immersive peut alors être réalisée, pour des applications de réalité virtuelle mais également de réalité mixte. [YT08] présente un système utilisant



**Figure 1:** Principe du système de projection Catopsys. Le projecteur (P) pointe vers le miroir (M). Ainsi, un rayon de lumière (B), émis par P, est réfléchi par M puis propagé dans la salle (R). La caméra (C) est en rotation autour de l'axe optique de P, ce qui permet de visualiser la salle pour calibrer le système.

les mêmes appareils. Cependant, celui-ci nécessite un écran de projection spécifique, ce qui le destine à des applications différentes.

Les images projetées par notre système sont radiométriquement perturbées au cours de la projection. Tout d'abord, la réponse du projecteur n'est pas neutre. De même, les matériaux de la salle ont peu de chance d'être adaptés à la projection (i.e. blanc lambertien). Enfin, les réflexions multiples entre les différentes surfaces qui composent la salle sont particulièrement importantes à l'intérieur d'un espace clos. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces phénomènes au niveau de l'image projetée afin que l'environnement visible après projection soit proche de l'environnement souhaité. Pour réaliser cette compensation radiométrique, le système dispose d'un point de vue panoramique (la caméra en rotation) et d'une source de lumière omnidirectionnelle contrôlable (l'association projecteur-miroir).

## 1.2. Contribution

Nous présentons ici un modèle radiométrique de notre système projecteur-caméra à partir duquel nous proposons une méthode de compensation autonome et automatisée, utilisable comme post-traitement d'applications de réalité mixte. Cette méthode prend en compte tous les aspects de notre système de projection : la réponse radiométrique de la caméra, le mapping géométrique entre la caméra et le projecteur et les perturbations radiométriques causées par la projection.

## 1.3. 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 (ce qui n'est pas le cas de notre application).

[BGZ\*06] propose une méthode de compensation prenant en compte les réflexions multiples grâce au concept de radiosité 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.

Enfin, une méthode de compensation par calibrage exhaustif est proposé dans [WB07]. Cette méthode consiste à mesurer la matrice du 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.

## 1.4. Sommaire

La section 2 présente le système de projection Catopsys. La section 3 propose un modèle radiométrique de ce système. Une méthode complète de calibrage et de compensation est proposée section 4. La section 5 présente quelques résultats et la section 6 conclut.

## 2. Système de projection

Le système de projection Catopsys vise à rendre la réalité mixte abordable. Pour cela, il doit être immersif, auto-calibrant et grand-public. La solution retenue est un système projecteur-caméra catadioptrique (voir Figure 1). Un miroir convexe (M) est fixé au plafond. Un vidéo-projecteur (P) est placé sous le miroir et pointe vers lui. Ainsi, un rayon de lumière (B) émis par P est réfléchi par M dans la salle. Enfin, une caméra grand-angle (C) est placée au-dessus du projecteur, en direction des murs de la salle. La caméra peut tourner autour de l'axe optique du projecteur grâce à un moteur pas-à-pas. Le projecteur, la caméra et le moteur sont contrôlés par un ordinateur.

Ce système répond aux trois critères désirés. Tout d'abord, la projection immersive est obtenue grâce à l'association du projecteur et du miroir convexe. Selon la configuration de ces éléments et de la salle, la projection peut être réalisée sur pratiquement toute la pièce ( $4\pi$  sr).

Ensuite, le système est capable de s'autocalibrer grâce au système 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 salle), optiquement (distorsions des optiques) et radiométriquement (propagation de la lumière, réponse des appareils).

Enfin, le système est composé uniquement d'appareils relativement peu coûteux. En effet, 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). A terme, un système produit industriellement serait encore moins coûteux.

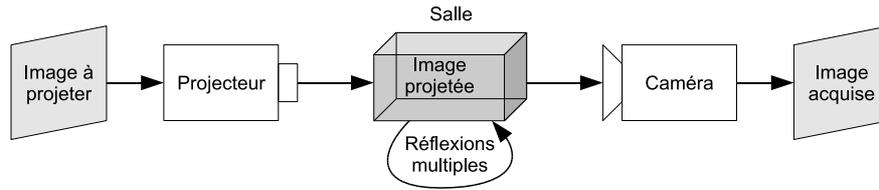


Figure 2: Processus radiométrique du système projecteur-caméra.

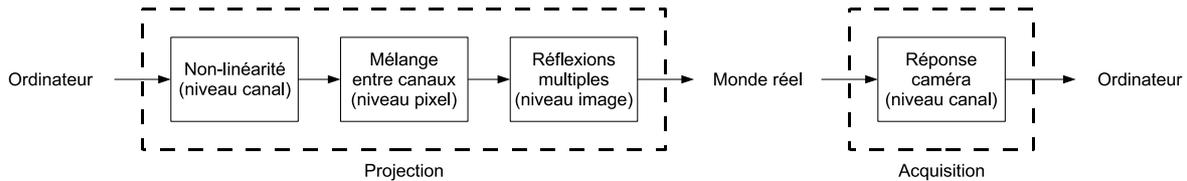


Figure 3: Modèle radiométrique du système projecteur-caméra.

### 3. Modèle radiométrique

La figure 2 illustre le processus de projection de notre système. Au niveau de l'ordinateur, l'image à projeter est codée dans une certaine base colorimétrique. Les couleurs sont ensuite converties par le projecteur, selon son système de couleur interne. Puis le projecteur émet la lumière correspondante. Cette lumière atteint les différentes surfaces de la salle et est réfléchiée de nombreuses fois de surface en surface (réflexions multiples). Enfin, la lumière est en partie capturée par la caméra puis transmise à l'ordinateur sous la forme d'une nouvelle image.

Notre modèle radiométrique de ce processus de projection (voir Figure 3) est dérivé du modèle proposé dans [NPGBO3]. Lors de la projection, chaque canal de chaque pixel de l'image subit une transformation non-linéaire. Puis les canaux de chaque pixel font l'objet d'une combinaison linéaire. Enfin, les réflexions multiples se traduisent par une combinaison linéaire des pixels. De même, l'acquisition par la caméra se traduit par une transformation non-linéaire (sa réponse). L'image capturée est alors codée selon le système colorimétrique utilisé par la caméra.

Considérons un pixel. Soit  $x$  sa couleur dans la base (linéarisée) du projecteur et soit  $y$  sa couleur dans la base (linéarisée) de la caméra. Soit  $t$  la matrice de passage de la base du projecteur à la base de la caméra. Alors  $y = tx$ . Soient  $u$  et  $v$  tels que

$$u_{ij} = \begin{cases} t_{ij} - 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}, v_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ t_{ij} & \text{sinon} \end{cases}$$

Donc  $t = u + v$  :  $u$  traduit les transformations linéaires intra-canales de la base du projecteur à celle de la caméra et  $v$  les transformations inter-canales.

Notons  $x_\lambda$  la valeur du canal  $\lambda$  de la couleur  $x$ . Soit  $a$  la couleur du pixel dans l'image à projeter. La fonction non-linéaire  $w_\lambda$  modélise, au niveau d'un canal d'un pixel, la non-linéarité de la réponse du projecteur, la réponse linéaire du matériau de la première surface atteinte et  $u_{ii}$  (où  $i$  est l'indice correspondant au canal  $\lambda$  dans  $u$ ). Soit  $b$  la lumière émise par le projecteur et réfléchiée par la première surface atteinte dans la salle.  $b$  est donné, dans la base linéarisée du projecteur, par

$$b_\lambda = w_\lambda(a_\lambda) \quad (1)$$

Soit  $c$  la lumière obtenue après la première réflexion, dans la base linéarisée de la caméra,

$$c = vb \quad (2)$$

Les réflexions multiples sont ensuite modélisées, dans la base de la caméra, par l'équation suivante.

$$D_\lambda = C_\lambda + H_\lambda C_\lambda \quad (3)$$

$C_\lambda$  est le vecteur contenant les valeurs  $c_\lambda$  des pixels (ou ensembles de pixels) vus par la caméra. Il représente la lumière émise initialement par les surfaces de la salle, plus exactement la lumière émise par le projecteur et réfléchiée une première fois.  $H_\lambda$  est la matrice des échanges de lumière entre les surfaces, tenant compte à la fois de leur géométrie et de leur radiométrie :  $H_{\lambda ij}$  est la proportion de lumière émise par la surface  $i$ , propagée dans la salle par réflexions multiples puis réfléchiée par la surface  $j$  dans la direction de la caméra. Donc,  $C_\lambda$  est la lumière allant directement vers la caméra et  $H_\lambda C_\lambda$  la lumière allant vers la caméra après réflexions multiples. Finalement,  $D_\lambda$  traduit toute la lumière vue par la caméra (lumière directe et lumière indirecte). Par conséquent, si les surfaces sont diffuses, la lumière est réfléchiée de

la même façon dans toutes les directions et l'équation 3 est vérifiée pour n'importe quel point de vue. En revanche, si la salle contient des matériaux spéculaires, cette équation n'est valable que pour le point de vue de la caméra.

Pour terminer, la réponse de la caméra est modélisée par une fonction non-linéaire  $g$ . Ainsi, pour un pixel projecteur donné, soient  $d$  la lumière provenant de la salle après projection et réflexions dans la direction de la caméra et  $e$  la couleur correspondante capturée par la caméra. Alors,

$$e_\lambda = g_\lambda(d_\lambda) \quad (4)$$

#### 4. Méthode de calibrage et de compensation radiométrique

Dans cette section, nous présentons une méthode de calibrage et de compensation radiométrique automatisée et autonome. L'unique pré-requis est une fonction projetant une image donnée et retournant l'image capturée par la caméra selon un temps d'exposition donné. Notre méthode se décompose en trois étapes. La première étape consiste à calibrer la caméra afin de déterminer ce qui est réellement perçu par l'observateur. La deuxième étape consiste à évaluer le modèle radiométrique de la projection, c'est à dire à trouver  $v$ ,  $w_\lambda$  et  $H_\lambda$  qui caractérise le système utilisé. La dernière étape consiste à inverser le modèle évalué précédemment pour calculer les images de compensation. En d'autres termes, on dispose d'une image telle qu'on veut la voir dans la salle et on calcule l'image qui, une fois projetée et donc modifiée par les perturbations radiométriques, fera apparaître l'image voulue dans la salle.

##### 4.1. Calibrage de la caméra

###### 4.1.1. Mapping géométrique

Calibrer et compenser la projection nécessitent de pouvoir connaître, pour chaque pixel projecteur, la couleur vue par la caméra. Pour cela, on réalise un mapping géométrique entre la caméra et le projecteur. Pour obtenir ce mapping, on projette un point (un pixel blanc sur fond noir) que l'on déplace de façon régulière sur l'image projecteur. A chaque pas, on réalise une acquisition caméra que l'on seuille : les pixels caméra au dessus du seuil correspondent au pixel projecteur. Les pixels non mesurés, entre deux pas, sont estimés par interpolation bilinéaire : un pixel projecteur non mesuré est situé entre quatre pixels projecteur mesurés, ce qui donne les deux paramètres de l'interpolation à réaliser entre les groupes de pixels caméra correspondants. En utilisant cette méthode, on peut calculer deux cartes caméra donnant, pour chaque pixel caméra, le pixel projecteur correspondant et le nombre de pixels caméra correspondant à ce pixel projecteur. Ainsi, à partir d'une acquisition caméra, on peut rapidement affecter aux pixels projecteur la couleur caméra moyenne correspondante (voir Figure 4).

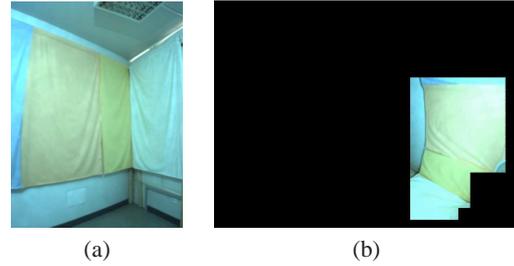


Figure 4: Image caméra (a) et image projecteur correspondante (b).

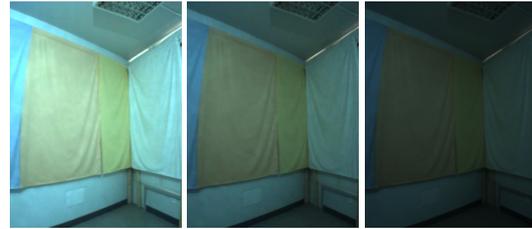


Figure 5: Image acquise avec différents temps d'exposition.

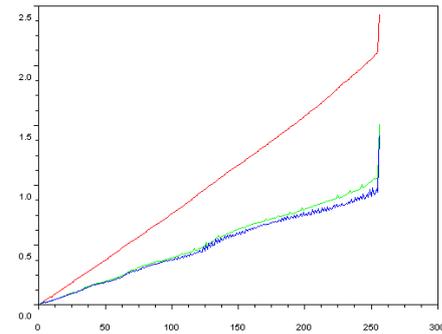


Figure 6: Réponse de la caméra. Notre caméra utilise un capteur CCD quasi-linéaire, ce qui n'est pas le cas de toutes les caméras.



Figure 7: Image HDR avec correction de la réponse de la caméra.

#### 4.1.2. Réponse radiométrique

Pour caractériser la réponse radiométrique de la caméra, on utilise la méthode de Robertson [RBS99]. Cette méthode permet, d'après une série d'acquisitions caméra de la même scène mais de temps d'exposition différents (voir Figure 5), de retrouver la réponse radiométrique de la caméra (voir Figure 6). Pour cela, le problème est résolu par une méthode d'optimisation itérative. Chaque canal de couleur est ainsi calibré indépendamment. On ajuste les canaux entre eux par une fonction affine déterminée d'après un blanc de référence. Une fois la réponse calculée, la méthode de Robertson permet, en faisant varier le temps d'exposition de la caméra, de calculer des images HDR (à grande dynamique) (voir Figure 7).

#### 4.2. Calibrage de la projection

Notre méthode de calibrage de la projection consiste à décorrélérer les réflexions multiples des autres perturbations radiométriques. Ainsi, on peut calibrer les mélanges de couleurs et les non-linéarités sans l'influence des réflexions multiples qui sont calibrées ensuite. Pour réaliser cette décorrélation, il suffit de capturer uniquement la lumière directe, c'est à dire la lumière émise par le projecteur et réfléchié par la première surface atteinte vers la caméra.

##### 4.2.1. Lumière directe

L'acquisition de la lumière directe est réalisée selon la méthode décrite dans [NKGR06]. Cette méthode utilise un système projecteur-caméra pour séparer la lumière vue par la caméra en une composante directe et une composante indirecte 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 indirecte. En déplaçant le damier, on obtient la lumière indirecte au niveau de chaque pixel. Finalement, on obtient la lumière directe d'après les carreaux colorés : ici, la lumière est la somme de la composante directe et de la composante indirecte. Comme la composante indirecte est connue, on retrouve la composante directe (voir Figure 8).

##### 4.2.2. Mélange entre canaux

Au niveau d'un pixel, le passage de la base de couleurs du projecteur à celle de la caméra est modélisé par la matrice  $v$ . Pour la déterminer, nous utilisons la méthode décrite dans [NPGB03], appliquée sur des captures de lumière directe. Supposons que les appareils utilisent trois canaux de couleurs ( $r$ ,  $g$  et  $b$ ) et considérons un pixel. Avec les notations de la section 3,

$$a = \begin{bmatrix} a_r \\ a_g \\ a_b \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_r \\ b_g \\ b_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_r(a_r) \\ w_g(a_g) \\ w_b(a_b) \end{bmatrix} \quad (5)$$

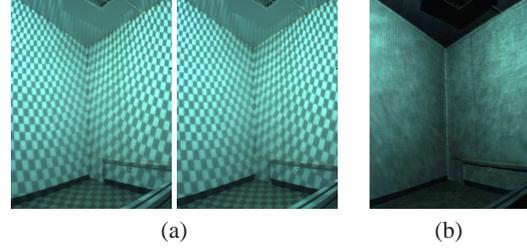


Figure 8: Acquisition de la lumière directe. Projection de damiers (a). Lumière directe (b).



Figure 9: Mesure des réflexions multiples. On éclaire un groupe de points et on mesure l'éclairement des autres groupes dû aux réflexions multiples.

$$v = \begin{bmatrix} 1 & v_{rg} & v_{rb} \\ v_{gr} & 1 & v_{gb} \\ v_{br} & v_{bg} & 1 \end{bmatrix}, c = \begin{bmatrix} c_r \\ c_g \\ c_b \end{bmatrix} = vb \quad (6)$$

Pour trouver les coefficients de  $v$ , par exemple  $v_{gr}$  et  $v_{br}$ , on projette deux images en faisant varier un seul canal. Par exemple, en faisant varier le canal rouge du pixel projecteur, on obtient

$$a^{(1)} = \begin{bmatrix} a_r^{(1)} \\ a_g^{(1)} \\ a_b^{(1)} \end{bmatrix}, a^{(2)} = \begin{bmatrix} a_r^{(2)} \\ a_g^{(1)} \\ a_b^{(1)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Le pixel caméra correspondant  $c$  vérifie

$$\begin{bmatrix} c_r^{(1)} \\ c_g^{(1)} \\ c_b^{(1)} \end{bmatrix} = v \begin{bmatrix} b_r^{(1)} \\ b_g^{(1)} \\ b_b^{(1)} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} c_r^{(2)} \\ c_g^{(2)} \\ c_b^{(2)} \end{bmatrix} = v \begin{bmatrix} b_r^{(2)} \\ b_g^{(1)} \\ b_b^{(1)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Ainsi,

$$\begin{aligned} \Delta c_r &= \Delta b_r \\ \Delta c_g &= v_{gr} \Delta b_r, v_{gr} = \frac{\Delta c_g}{\Delta c_r}, v_{br} = \frac{\Delta c_b}{\Delta c_r} \\ \Delta c_b &= v_{br} \Delta b_r \end{aligned} \quad (9)$$

Les autres coefficients de  $v$  sont calculés de façon similaire, en faisant varier le canal vert puis le canal bleu. Comme tous les pixels peuvent être traités en parallèle, toutes les matrices

$v$  peuvent être calculées en projetant quatre images de couleurs unies.

#### 4.2.3. Non-linéarité

Pour déterminer  $w$ , nous utilisons, là aussi, la méthode décrite dans [NPG03], appliquée sur des captures de lumière directe. La fonction  $w_\lambda$  peut être estimée en projetant toutes les valeurs de  $a_\lambda$ . En effet, si on projette  $a_\lambda$ , on peut capturer  $c_\lambda$  et calculer  $b = v^{-1}c$ . Comme  $b_\lambda = w_\lambda(a_\lambda)$ , on a bien caractérisé  $w_\lambda$  pour  $a_\lambda$ . En projetant des images grises, on peut obtenir  $w_r$ ,  $w_g$  et  $w_b$  d'après les mêmes images. Pour réduire le nombre de projection-acquisitions, on mesure  $w_\lambda$  pour quelques valeurs uniquement et on interpole pour les valeurs manquantes.

#### 4.2.4. Réflexions multiples

La dernière étape de calibrage consiste à déterminer  $H_\lambda$  où  $H_{\lambda ij}$  est la proportion de lumière (du canal  $\lambda$ ) qui part de  $i$ , est propagée dans la salle puis réfléchi par  $j$  vers la caméra. On obtient ainsi une matrice donnant l'influence de chaque pixel projecteur sur chaque pixel caméra. [SCG\*05] propose une méthode hiérarchique pour déterminer de telles matrices. Dans notre implémentation, nous nous contentons de diviser l'image en petits groupes de pixels. Ainsi, pour mesurer  $H_{\lambda ij}$ , on projette une image dont les pixels du groupe  $i$  sont blancs (et les autres pixels noirs). Avec la caméra, on capture ensuite la lumière complète (et non plus la lumière directe) et on retrouve  $H_{\lambda ij}$  d'après les pixels du groupe  $j$ . On peut bien sûr obtenir  $H_{\lambda ij}$  pour tous les  $j$  sur cette même image (voir Figure 9).

### 4.3. Compensation radiométrique

#### 4.3.1. Tone mapping inverse

Une fois calibrée (en fonction du système et de la salle), la projection peut être compensée. Cependant le modèle radiométrique est une transformation du domaine de définition  $[0, 255]^3$  dans le domaine de valeurs  $D_r \times D_g \times D_b$  où les  $D_i$  sont à valeurs réelles (images HDR). Avant de compenser une image il faut donc la convertir dans ce domaine de valeurs. Il s'agit du problème classique de tone mapping inverse, i.e. convertir une image LDR en image HDR. Si diverses solutions à ce problème ont été proposées [BLD\*07, RTS\*07], un simple redimensionnement linéaire de la dynamique semble donner de bons résultats [AFR\*07]. Cependant, avec notre modèle radiométrique chaque canal de chaque pixel possède son propre domaine de valeurs. Pour résoudre ce problème, on détermine un domaine commun en moyennant les bornes des domaines de chaque pixel. Ce compromis permet de limiter la saturation sans perdre trop de dynamique.

#### 4.3.2. Compensation

L'image désirée étant désormais dans le domaine de valeurs du modèle radiométrique, l'étape de compensation

peut être réalisée. Celle-ci consiste simplement à calculer l'image de compensation correspondante, c'est à dire la réciproque selon le modèle radiométrique.

Premièrement, il s'agit de compenser les réflexions multiples. L'équation 3 équivaut à

$$C_\lambda = F_\lambda D_\lambda \quad (10)$$

où

$$F_\lambda = (I + H_\lambda)^{-1} = I - H_\lambda + H_\lambda^2 - \dots \quad (11)$$

car, de par la conservation de l'énergie,  $\|H_\lambda\|_\infty < 1$ .

L'équation 10 donne la lumière que chaque groupe de pixels doit émettre pour compenser les réflexions multiples. Comme cette équation considère des groupes de pixels, il faut définir une relation entre un groupe et les pixels correspondants. On définit la valeur d'un groupe de  $D_\lambda$  par la somme des pixels correspondants. Ceci permet de calculer l'équation 10. On peut alors compenser les réflexions multiples en pondérant chaque pixel de l'image désirée par la valeur du groupe correspondant de  $C_\lambda$  moyennée par le nombre de pixels du groupe. Cependant, des discontinuités seront visibles aux frontières des groupes. Pour limiter ce phénomène, on utilise un classique lissage de Gouraud [Gou98].

Il ne reste alors qu'à inverser l'équations 2 puis l'équation 1 avec

$$b = v^{-1}c, \quad a_\lambda = w_\lambda^{-1}(b) \quad (12)$$

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, on peut pré-calculer  $v^{-1}$  et  $F$  pendant le calibrage. Si on utilise 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 un produit d'une matrice de taille  $3 \times 3$  par un vecteur de taille 3, pour chaque pixel (soit  $N$  produits). Enfin, compenser  $w_\lambda$  (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.

### 5. Résultats

Nous avons testé notre méthode sur notre implémentation du système de projection composée d'un projecteur DLP SXGA et d'une caméra XGA 3-CCD. Avec notre installation, un pixel projecteur couvre environ  $1 \text{ cm}^2$  de mur. Notre salle de test présente des murs de peinture blanche fortement spéculaire. Nous y avons placé quelques morceaux de tissu colorés. L'étape de calibrage nécessite environ 6 heures. Le



**Figure 10:** 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 des premières réflexions (c) (erreur = 0.019) et avec compensation complète (d) (erreur = 0.015).

temps est principalement consacré aux acquisitions caméra. En comparaison, le temps de calculs est négligeable. La compensation d'une image est rapide, environ 5 images par seconde.

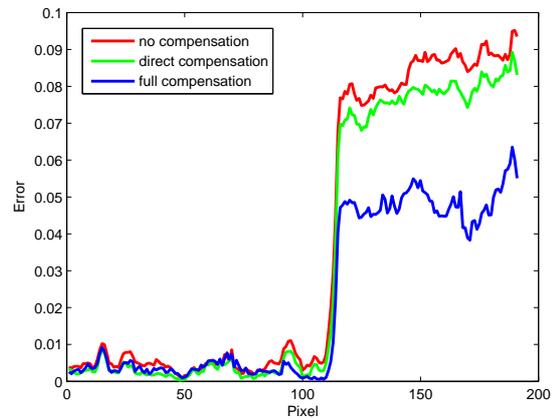
Soit  $\frac{1}{N} \sum_p \|c_p - \hat{c}_p\|_2^2$  l'erreur d'une image capturée, où  $N$  est le nombre de pixels et  $c_p$  (resp.  $\hat{c}_p$ ) la couleur, dans l'espace métrique  $L^*u^*v^*$ , du pixel  $p$  de l'image désirée (resp. de l'image capturée).

La figure 10 illustre le résultat de la compensation sur une scène de réalité virtuelle. L'image à projeter (a) est une vue panoramique d'un paysage de montagne. Nous avons fixé des pièces de tissus rose, jaune et blanche 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. On remarque sur cette dernière image, une légère perte de détails due au calibrage assez grossier des réflexions multiples. Utiliser des groupes de pixels plus restreints, lors de ce calibrage, devrait réduire le problème.

La figure 11 montre 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 morceau de tissu coloré à un autre, moins bien compensé. On constate 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.

## 6. Conclusion

Le système de projection Catopsys combine un vidéo-projecteur, un miroir et une caméra en rotation dans une salle non adaptée à la projection. Ce système est auto-calibrant, grand-public et permet de réaliser de la projection immersive. Dans ce papier, nous proposons un modèle radiométrique du processus de projection-acquisition. Ce modèle



**Figure 11:** Erreur de la projection sans compensation (rouge), avec compensation des premières réflexions (vert) et avec compensation complète (bleu) sur une ligne de l'image.

tient compte des réflexions multiples (niveau image), des mélanges de couleurs (niveau pixel) et des non-linéarités (niveau canal) de la projection ainsi que de la réponse de la caméra. A partir de ce modèle, nous proposons une méthode complète de calibrage et de compensation. Cette méthode consiste tout d'abord à calibrer la caméra géométriquement par un mapping entre la caméra et le projecteur, et radiométriquement par acquisition d'images HDR. L'étape suivante consiste à calibrer radiométriquement la projection. Une méthode d'acquisition de la lumière directe permet de calibrer les mélanges de couleurs et les non-linéarités en s'abstrayant des réflexions multiples, qui sont calibrées ensuite. Enfin, la projection ainsi calibrée peut alors être compensée. Pour cela, les images à projeter sont transformées en images HDR puis modifiées en inversant le modèle donné par le calibrage. Une fois projetée dans la salle, l'image de compensation donne un résultat proche de celui désiré. Cette méthode peut être utilisée comme post-traitement d'applications de réalité

mixte pour corriger automatiquement les perturbations de la projection.

## 7. Remerciements

Le projet Catopsys est financé par le programme Audiovisuel et Multimedia de l'Agence Nationale pour la Recherche (référence ANR-06-RIAM-001).

## References

- [AFR\*07] AKYÜZ A. O., FLEMING R., RIECKE B. E., REINHARD E., BÜLTHOFF H. H. : Do hdr displays support ldr content ? : a psychophysical evaluation. In *ACM Transactions on Graphics* (New York, NY, USA, 2007), vol. 26, ACM, p. 38.
- [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).
- [BGZ\*06] BIMBER O., GRUNDHOFER A., ZEIDLER T., DANCH D., KAPAKOS P. : Compensating indirect scattering for immersive and semi-immersive projection displays. In *VR '06 : Proceedings of the IEEE conference on Virtual Reality* (Washington, DC, USA, 2006), IEEE Computer Society, pp. 151–158.
- [BIWG07] BIMBER O., IWAI D., WETZSTEIN G., GRUNDHÖFER A. : The visual computing of projector-camera systems. In *EuroGraphics (STAR)* (2007).
- [BLD\*07] BANTERLE F., LEDDA P., DEBATTISTA K., CHALMERS A., BLOJ M. : A framework for inverse tone mapping. *Vis. Comput.* 23, 7 (2007), 467–478.
- [CNSD93] CRUZ-NEIRA C., SANDIN D. J., DEFANTI T. A. : 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* (New York, NY, USA, 1993), ACM, pp. 135–142.
- [Gou98] GOURAUD H. : *Seminal graphics : pioneering efforts that shaped the field*. ACM, New York, NY, USA, 1998, ch. Continuous shading of curved surfaces, pp. 87–93.
- [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.
- [NPGB03] NAYAR S., PERI H., GROSSBERG M., BELHUMEUR P. : A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections. In *ICCV Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS)* (Oct 2003).
- [RBS99] ROBERTSON M., BORMAN S., STEVENSON R. : Dynamic range improvement through multiple exposures. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing* (Kobe, Japan, Oct. 1999), vol. 3, IEEE, pp. 159–163.
- [RTS\*07] REMPEL A. G., TRENTACOSTE M., SEETZEN H., YOUNG H. D., HEIDRICH W., WHITEHEAD L., WARD G. : Ldr2hdr : on-the-fly reverse tone mapping of legacy video and photographs. In *SIGGRAPH '07 : ACM SIGGRAPH 2007 papers* (New York, NY, USA, 2007), ACM, p. 39.
- [SCG\*05] SEN P., CHEN B., GARG G., MARSCHNER S. R., HOROWITZ M., LEVOY M., LENSCH H. P. A. : Dual photography. *ACM Trans. Graph.* 24, 3 (2005), 745–755.
- [Sut98] SUTHERLAND I. E. : *Seminal graphics : pioneering efforts that shaped the field*. ACM, New York, NY, USA, 1998, ch. A head-mounted three dimensional display, pp. 295–302.
- [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* (Washington, DC, USA, 2007), IEEE Computer Society, pp. 391–399.
- [YT08] YUEN N. P. Y., THIBAUT W. C. : Inexpensive immersive projection. In *VR* (2008), pp. 237–240.