

Nouvelle représentation directionnelle pour l'éclairage global

Romain Pacanowski, Xavier Granier, Christophe Schlick

► **To cite this version:**

Romain Pacanowski, Xavier Granier, Christophe Schlick. Nouvelle représentation directionnelle pour l'éclairage global. 18ièmes Journées de l'Association Française d'Informatique Graphique (AFIG), Nov 2005, Strasbourg, France. inria-00000860

HAL Id: inria-00000860

<https://hal.inria.fr/inria-00000860>

Submitted on 28 Nov 2005

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.

Nouvelle représentation directionnelle pour l'éclairage global

Romain Pacanowski, Xavier Granier et Christophe Schlick

pacanows | granier | schlick@labri.fr

LaBRI - INRIA Futurs / Université Bordeaux 1

Résumé : *Dans cet article, nous introduisons une nouvelle représentation de la fonction d'éclairage première étape pour en obtenir une reconstruction volumique et multirésolution. Notre représentation se veut robuste aux variations locales de la géométrie et de ses propriétés matérielles afin de permettre le plongement d'un objet dans une solution d'éclairage. Nous montrons comment notre représentation peut être utilisée comme structure de cache pour l'éclairage indirect diffus dans le cadre de l'algorithme du tracé de rayon.*

Mots-clés : Éclairage global, modes de représentation, tampon d'irradiance (*Irradiance Caching*)

1 Introduction

En Infographie, les algorithmes d'éclairage global ont pour but de recréer la réponse d'un environnement à des sources de lumière. Deux approches existent pour modéliser les phénomènes d'éclairage. La première approche, quantitative, se base sur une simulation physique dans laquelle l'erreur est mesurable. La seconde est une approche qualitative qui prend en compte la perception de l'utilisateur et dont le but n'est plus de fournir une image « exacte » mais une image « plausible ».

L'approche quantitative [SP94, DBB02] a permis le développement d'un certain nombre de techniques qui restent coûteuses et peu intuitives. Cependant, elles trouvent leur utilité dans certains domaines comme l'architecture d'intérieur, et en général tout domaine nécessitant une simulation physique du phénomène.

L'article de Tabellion et al. [TL04] illustre le besoin d'une approche qualitative : les auteurs fournissent un outil d'éclairage global simplifié afin de permettre aux artistes d'inclure les phénomènes d'éclairage indirect diffus. Leur approche, très pragmatique, force l'utilisateur à placer d'autres sources lumineuses que celles de la scène afin de simuler les indirections de la lumière. Dans un souci d'interactivité, l'outil développé permet un aperçu rapide du résultat grâce à l'utilisation d'une géométrie simplifiée de la scène lors du travail de l'utilisateur.

Dans cet article, nous introduisons une nouvelle représentation pour reconstruire la fonction d'éclairage avec les propriétés suivantes :

- robustesse aux variations locales de la géométrie ;
- robustesse aux variations locales des propriétés matérielles ;
- évolutivité vers une représentation volumique et multirésolution.

Ces propriétés permettent un plongement de géométrie dans une solution d'éclairage existante. A terme, il s'agit d'obtenir une représentation simple, cohérente et intuitive afin de permettre à l'utilisateur, dans le même esprit que Tabellion et al., de manipuler l'éclairage aussi simplement qu'il modélise un objet. Nous montrons un exemple d'utilisation de notre représentation afin d'ajouter les effets d'éclairage indirect diffus à une image obtenue à l'aide de l'algorithme du tracé de rayons.

2 Travaux antérieurs

La problématique de l'éclairage global a été formalisée par l'équation du rendu [Kaj86] qui exprime la luminance énergétique (*radiance*) d'un objet en fonction de sa radiance émise et de sa radiance réfléchie.

Les algorithmes d'éclairage global sont en général divisés en 2 grandes catégories : déterministes et stochastiques. Les méthodes déterministes [GTGB84, HSA91, SAG94, SDS95] font généralement l'hypothèse que les échanges lumineux dans la scène sont uniquement de type diffus et résolvent donc une version simplifiée de l'équation du rendu. La fonction d'éclairage est reconstruite sur le maillage de la scène à l'aide d'un calcul indépendant du point de vue. Très efficace pour l'éclairage diffus, les difficultés pour les mettre en œuvre constituent leur principale limitation.

D'un autre côté, les algorithmes stochastiques utilisent les techniques de Monte Carlo pour approximer une solution de l'équation du rendu en générant de manière aléatoire les différents chemins lumineux. Certaines méthodes telles que le tracé de chemins [Kaj86], le tracé de rayons bi-directionnels [LW93] ou encore les algorithmes de Metropolis [VG97] sont dépendantes du point de vue et évaluent la fonction d'éclairage sans la stocker. Les images ainsi obtenues sont de très grande qualité mais les temps de calcul restent élevés. A contrario, les techniques d'estimation de densité [WHS97] distribuent sous la forme de particules (assimilées à un échantillon probabiliste) l'énergie lumineuse sur le maillage de la scène afin de reconstruire la fonction d'éclairage.

Récemment, le *Photon Map* [Jen01] est devenu une méthode stochastique populaire. Elle utilise également les techniques d'estimation de densité mais stocke les particules (des photons) dans un *kd-tree* décorrélié de la géométrie de la scène. Une recherche de photons est effectuée dans le *kd-tree* lors de la passe de rendu afin de reconstruire la radiance réfléchie au point considéré. La recherche de photons est l'étape la plus coûteuse et certaines structures de données ont été développées/utilisées afin de l'accélérer.

Partant du constat que l'éclairage indirect diffus varie de manière faible [WRC88], il peut être interpolé à partir de valeurs pré-calculées. L'Irradiance Caching [WRC88] sauvegarde l'irradiance dans une structure à part, à différents endroits dépendant du point d'observation de la scène. Christensen et al. [Chr00, CB04] effectuent de même mais en prenant des positions dépendantes de la distribution des photons dans la scène. La structure ainsi construite lors d'une première passe est utilisée dans la passe de rendu en effectuant une interpolation de l'irradiance dans le voisinage du point considéré. Lorsque la structure contient un nombre insuffisant d'échantillons, une nouvelle valeur est calculée et insérée. La technique de Ward est une reconstruction de la fonction d'éclairage indirect diffus en espace image tandis que celle de Christensen s'effectue en espace objet. Avec les Vecteurs Lumineux ("Light Vector"), Zaninetti et al. [ZSP98] reconstruisent sur un ensemble de points de la scène une quantité vectorielle, introduisant ainsi une certaine robustesse aux variations locales de géométrie. Cependant, dans le cas général, cette représentation n'est pas indépendante aux variations locales de propriétés matérielles, car celles-ci entrent en jeu dans son calcul.

Afin de stocker les diverses quantités radiométriques complexes comme la radiance (de dimension 5 - 3 pour la position et 2 pour la direction), plusieurs techniques ont été explorées pour la représenter de manière efficace et notamment en utilisant les harmoniques sphériques ou encore les ondelettes.

Les harmoniques sphériques constituent une base orthonormale et multirésolution de l'espace des directions. Peu de coefficients suffisent pour approximer une fonction variant peu alors que de nombreux coefficients sont nécessaires pour les fonctions représentant des phénomènes de hautes fréquences. Dans le cas d'utilisation de cartes d'environnement et de pré-calculs d'éclairage, Ramamoorthi et al. [RH01] projettent la radiance incidente et l'irradiance dans la base des harmoniques sphériques dans le cadre d'objets uniquement diffus. De nombreuses améliorations ont été proposées, par exemple par Kautz et al. [KSS02], Sloan et al. [SKS02, SHHS03] ou encore Kristensen et al. [KAMJ05]. Récemment, dans le cadre d'éclairage global avec tracé de rayons, Arkan et al. [AFO05] utilisent les harmoniques pour approximer l'irradiance due aux objets distants tandis que Gautron et al. [GKPB04] les utilisent pour approximer la radiance.

D'autres approches se basent sur l'utilisation des ondelettes. Ng et al. [NRH03, NRH04] tout comme Wang et al. [WTL04] les utilisent pour encoder la radiance incidente dans le cadre de rendu interactif avec des cartes d'environnement. Différentes bases d'ondelettes ont aussi été utilisées pour stocker la radiance [CSSD94, SH94, SSG⁺99] mais elles restent coûteuses en place mémoire pour des effets directionnels.

Les solutions présentées ci-dessus ne permettent pas de répondre complètement à nos objectifs. Nous voulons donc développer une nouvelle représentation, alternative aux approches précédentes. Elle doit être moins coûteuse en place mémoire et d'une qualité visuelle similaire pour inclure les effets d'éclairage indirect. De plus, notre structure de données, grâce à un stockage et une représentation simplifiée de la radiance incidente, doit être plus robuste au changement de géométrie que les structures ne stockant qu'un scalaire représentant l'irradiance ou la radiance. Enfin, la forme choisie doit rester simple et efficace à calculer, comparée à une représentation utilisant les harmoniques sphériques ou les ondelettes.

3 Méthode proposée

Notre méthode pour reconstruire et stocker une fonction d'éclairage incident est indépendante du point de vue et des propriétés matérielles. Nous reconstruisons une quantité directionnelle (la radiance incidente, décrite dans la

section 5) sous la forme de 3 directions et de 3 intensités.

Notre technique se décompose en 2 étapes :

- Des photons sont émis depuis les sources lumineuses afin de distribuer l'énergie lumineuse dans la scène. La densité de photons constitue une approximation de la fonction d'éclairage. Cette première passe est très similaire à celle utilisée dans la technique du Photon Map mais, contrairement à cette dernière, les impacts des photons sont stockés sur tous les objets (et pas seulement les diffus), afin de n'ignorer aucun phénomène lumineux.
- Un arbre octal (*octree*) est construit pour chacune des cartes de photons (section 4). Une reconstruction de la fonction d'éclairage par estimation de densité sous la forme de radiance incidente est effectuée pour chaque cellule de l'arbre obtenue (section 5).

L'information contenue dans l'octree est utilisée dans cet article pour accélérer le rendu de la scène à base de tracé de rayons (section 6).

4 Construction de l'octree

Une fois les photons émis, nous construisons à partir de leurs impacts un octree qui sera le support de notre fonction d'éclairage. La structure d'octree, et non celle de kd-tree traditionnellement utilisée dans le Photon Map, a été choisie afin de conserver une information volumique sur la répartition des photons dans la scène et de pouvoir obtenir, dans le futur, une représentation multirésolution.

La construction de l'octree répond à plusieurs critères :

- La profondeur maximale est fixée par l'utilisateur afin de limiter en taille la structure stockée en mémoire. Plus l'octree obtenu est profond, plus les variations locales d'éclairage pourront être restituées.
- L'utilisateur définit aussi un intervalle $[n_{min}, n_{max}]$ pour le nombre de photons par cellule-feuille. Ce paramètre permet d'obtenir un octree plus ou moins profond dans la limite du critère précédent. Le paramètre n_{max} permet aussi une réduction du temps de calcul de la radiance incidente au sein de chaque cellule-feuille, en réduisant le nombre d'impacts à prendre en compte dans le cadre de l'estimation de densité. n_{min} permet de s'assurer d'un nombre minimum de photons au sein de la cellule pour le calcul de la reconstruction de la radiance incidente. Dans certains cas, telles des zones d'ombre ou de pénombre, le nombre de photons contenus dans la cellule sera inférieur à n_{min} .
- Un paramètre ε permet d'augmenter de manière virtuelle la taille de la cellule afin de prendre en compte plus de photons lorsque la densité est trop faible. Il permet ainsi de réduire le bruit de reconstruction bien que le biais soit alors augmenté.

D'une manière générale, l'octree ainsi obtenu contient des cellules de grande taille qui représentent une variation douce de l'éclairage incident tandis que les cellules de taille faible représentent une variation rapide. De plus, l'octree contient des cellules particulières, sans géométrie (ni photon donc), qui sont appelées cellules atmosphériques.

5 Radiance incidente

5.1 Reconstruction

Pour chaque feuille de l'octree qui contient de la géométrie, une quantité vectorielle que l'on nomme radiance incidente (notée \mathcal{M}) est estimée et stockée. Elle a été introduite par Arvo [Arv94] et s'exprime ainsi :

$$\mathcal{M}(x) = \int_{\Omega} L(x, \omega) \omega d\omega \quad (5.1)$$

où $L(x, \omega)$ est la radiance au point x de direction ω , Ω l'hémisphère centré en x et $d\omega$ l'angle solide différentiel. Puisque x appartient à une surface donnée, la radiance incidente est reconstruite pour une certaine normale. Dans le cas diffus, cette quantité est similaire aux Vecteurs Lumineux décrits dans [ZSP98]. Notons que l'irradiance $E(x)$ est obtenue à partir de la radiance incidente et de la normale de la surface en x , $N(x)$, selon l'équation

$$E(x) = \langle \mathcal{M}(x) \cdot N(x) \rangle = (\mathcal{M}(x))^T N(x) \quad . \quad (5.2)$$

Ce calcul peut donc tenir compte des variations locales de la normale.

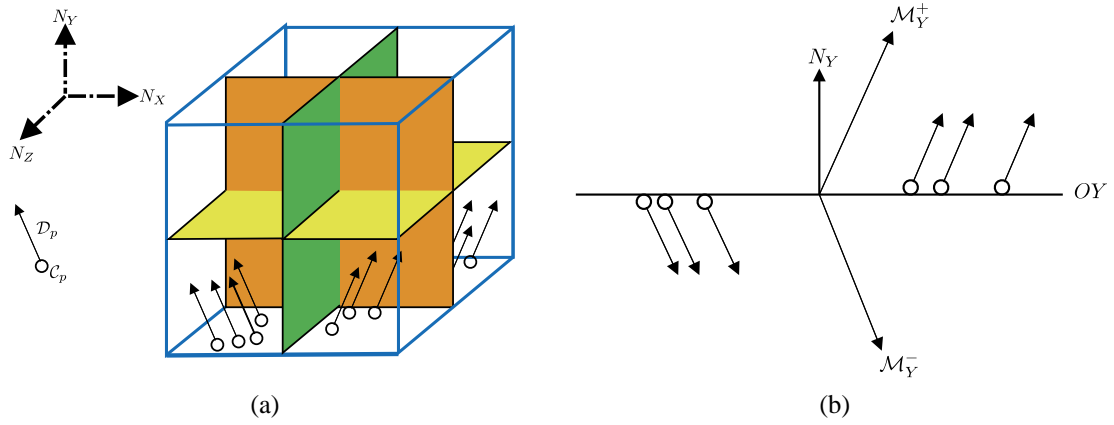


FIG. 1 – (a) Répartitions des photons au sein d'une cellule de l'octree en fonction des 6 normales définissant 3 plans. (b) Exemple de valeurs de radiances incidentes reconstruites dans le cas du plan OY .

Dans notre octree, la radiance incidente est représentée et stockée sous la forme d'une matrice 3×3 . En effet, chaque photon p transporte une fraction d'énergie lumineuse Φ_p ainsi qu'une direction incidente ω_p . Si l'espace RGB est utilisé pour représenter l'énergie lumineuse Φ_p à l'aide d'un vecteur C_p de trois scalaires r_p, g_p et b_p , nous pouvons représenter le photon par le produit d'une direction D_p telle que $D_p = \omega_p$ et d'un vecteur C_p tel que $(C_p)^T = [r_p, g_p, b_p]$:

$$\mathcal{M}_p = D_p (C_p)^T \quad . \quad (5.3)$$

\mathcal{M}_p est une matrice formée de 3 vecteurs colonnes M_r, M_g et M_b tels que $\frac{M_i}{\|M_i\|}$ représente la direction incidente pour la i ème composante ($\|M_i\| = i_p$ tel que $i = \{r, g, b\}$). A partir des n photons contenus dans la cellule-feuille, la radiance incidente \mathcal{M} est reconstruite à l'aide des différentes matrices \mathcal{M}_p des photons :

$$\mathcal{M} = \frac{1}{\Delta A} \sum_{p=1}^{p=n} \mathcal{M}_p \quad (5.4)$$

avec ΔA aire d'une face de la cellule. Le choix de ΔA est une approximation du même ordre que celle effectuée avec la sphère englobante du Photon Map.

En pratique, nous reconstruisons les 6 radiances incidentes $\mathcal{M}_X^+, \mathcal{M}_X^-, \mathcal{M}_Y^+, \mathcal{M}_Y^-, \mathcal{M}_Z^+, \mathcal{M}_Z^-$ pour les 6 normales $+N_X, -N_X, +N_Y, -N_Y, +N_Z$ et $-N_Z$ avec $N_X = (1, 0, 0), N_Y = (0, 1, 0)$ et $N_Z = (0, 0, 1)$ (cf. figure 1a).

On note ω_p la direction incidente du p ème photon et $\omega_{p_x}, \omega_{p_y}$ et ω_{p_z} ses coordonnées cartésiennes. Pour calculer les 6 valeurs de radiance, on trie les photons en fonction de leur direction d'incidence ω_p et de la normale considérée. Par exemple (cf. figure 1 b), l'ensemble des photons participant au calcul de \mathcal{M}_Y^- sont ceux tels que : $\omega_p \cdot -N_Y > 0$. Puisque $-N_Y$ est une normale unité, le test précédent se réduit simplement à : $\omega_{p_y} < 0$.

5.2 Interpolation

Pour calculer une valeur de radiance incidente $\mathcal{M}(P)$ d'un point P , nous effectuons une interpolation des différentes directions d'incidence de la radiance sur la sphère unité. Cette interpolation utilise les valeurs de radiance incidente précédemment calculées et stockées selon la formulation suivante :

$$\mathcal{M}(P) = \mathcal{M}_X^{+|-} N_x^2 + \mathcal{M}_Y^{+|-} N_y^2 + \mathcal{M}_Z^{+|-} N_z^2$$

avec N_x, N_y et N_z les coordonnées cartésiennes de la normale N au point P . La sélection de \mathcal{M}_X^+ ou de \mathcal{M}_X^- s'effectue en testant le signe du produit scalaire entre N et M_X . Ce test se réduit simplement aux deux tests suivants : si $N_x > 0$ alors \mathcal{M}_X^+ est actif et si $N_x < 0$ alors \mathcal{M}_X^- est actif. On procède de même pour sélectionner $\mathcal{M}_Y^{+|-}$ et $\mathcal{M}_Z^{+|-}$. Il y a donc uniquement 3 matrices (sur les 6 stockées) qui sont utilisées au même moment lors de la passe de rendu pour une cellule donnée.

5.3 Compression

Sans compression, chaque matrice de radiance incidente occuperait une place mémoire de 9 flottants. Il peut être nécessaire de les compresser afin de garder une structure compacte. Pour ce faire, \mathcal{M} est redécomposée sous la forme $\mathcal{M} = \mathcal{D}(\mathcal{C})^T$ que nous avons au départ pour chaque photon (cf. équation 5.3). Pour trouver \mathcal{D} et \mathcal{C} à partir de \mathcal{M} on minimise l'expression $|\mathcal{M} - \mathcal{D}(\mathcal{C})^T|^2$ sous la contrainte $|\mathcal{D}| = 1$ et $\mathcal{C} = \left[|M_r| = r, |M_g| = g, |M_b| = b \right]$. La direction \mathcal{D} est alors :

$$\mathcal{D} = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3] \frac{1}{\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2}}$$

avec

$$\alpha_1 = r m_{11} + g m_{12} + b m_{13} \quad \alpha_2 = r m_{21} + g m_{22} + b m_{23} \quad \alpha_3 = r m_{31} + g m_{32} + b m_{33}$$

et où les m_{ij} sont les éléments de \mathcal{M} .

Une fois les vecteurs \mathcal{D} et \mathcal{C} obtenus sous la forme de 6 flottants, \mathcal{D} est compressé en le quantifiant sur 2 octets, comme cela est fait dans le Photon Map, et \mathcal{C} est quantifié sur 4 octets grâce au format RGBE [War91] de Ward.

Chaque matrice est donc compressée par un facteur 6 (36 octets vers 6 octets) et l'ensemble des 6 matrices compressées occupent un total de 36 octets en mémoire, soit 3 fois moins que Ramamoorthi et al. qui utilisent 27 coefficients (soient 108 octets) pour stocker l'irradiance représentée à l'aide d'harmoniques sphériques.

6 Utilisation de l'octree

L'algorithme de rendu que nous utilisons est un tracé de rayon modifié qui tire profit de l'octree précédemment construit pour inclure l'éclairage indirect diffus. Pour chaque rayon lancé depuis le dispositif d'observation vers un point P appartenant à la géométrie de la scène, nous devons interroger l'octree pour calculer sa radiance incidente $\mathcal{M}(P)$. Pour ce faire, nous construisons un volume d'interrogation V autour du point P et effectuons une interpolation :

$$\mathcal{M}(P) = \frac{\sum_{k \in I} \gamma_k \mathcal{M}_k(P)}{\sum_{k \in I} \gamma_k},$$

avec I l'ensemble des cellules de l'octree intersecté par le volume d'interrogation V . Les poids γ_k sont donnés par le volume d'intersection entre V et chacune des cellules de l'ensemble I . Le volume V est défini de manière fixe, en prenant la plus petite taille de la cellule contenue dans l'octree multipliée par un coefficient α afin de lisser la solution (et donc augmenter le biais). Ce volume garantit une continuité C^0 sur le bord des cellules.

7 Résultats

Nous présentons les différentes cartes d'irradiance obtenues avec notre technique ainsi que celles de Ward et al. [WRC88] et de Christensen [Chr00]. Afin de nous comparer à la méthode originale introduite par Ward, nous l'adaptions afin que les échantillons d'irradiance soient calculés à partir des photons. La table 1 présente les différentes notations utilisées pour caractériser la structure de l'octree tandis que la table 2 présente les notations pour les structures de cache.

Pour comparer notre technique avec celle de Ward, nous avons fixé le nombre maximum de photons au nombre moyen de photons obtenus dans notre octree et le rayon maximum de recherche à la taille moyenne des cellules. Le nombre d'échantillons m_e pour la structure de cache de Ward, $m_e + m_a$ pour celle de Christensen, est du même ordre de grandeur que le nombre de cellules-feuilles non atmosphériques, m_v , dans notre octree.

Les images de la figure 2 montrent les différentes cartes d'irradiance obtenues pour les techniques de Ward, Christensen et la nôtre. L'image (d) de la même figure montre une solution complète obtenue avec notre technique en utilisant un octree pour l'éclairage indirect diffus et un octree pour les caustiques. Notons que seulement 10 %

Notation	Signification	Configuration
h_{MAX}	Profondeur maximale de l'octree	6
F_m	Place occupée par l'octree en mémoire (machine 32 bits)	269ko
m_v	Nombre de cellule-feuilles avec une valeur de radiance valide	1834
\bar{n}_p	Nombre moyen de photons (impacts) par cellule	205
\bar{s}	Taille moyenne d'une cellule (unité scène)	30.69
t_c	Temps de construction de la structure	1.18s
t_v	Temps de visualisation de la structure	14.87s

TAB. 1 – Configuration de notre octree.

Notation	Signification	Ward	Christensen
m_e	Nombre d'échantillons pré-calculés	1824	378
m_a	Nombre d'échantillons supplémentaires	N.A.	1300
q_{min}	Distance minimale entre deux échantillons du cache	1.0	N.A.
r_{max}	Rayon maximum de recherche	31	31
n_{max}	Nombre maximum de photons	205	205

TAB. 2 – Configuration des caches de Ward et de Christensen.

Technique	t_c	t_v	F_m
Notre technique ($\alpha = 1.5$)	1.18s	14.87s	269ko
Ward (configuration A)	14.42s	19.83s	9244ko
Ward-Christensen (configuration C)	3.89s	22.84s	9242ko

TAB. 3 – Résumé des différents temps de construction et de visualisation obtenus ainsi que l'occupation mémoire pour les trois techniques.

du temps total de rendu est utilisé pour interroger nos octrees. Enfin, la table 3 résume les différents temps de construction et de visualisation obtenus ainsi que l'occupation mémoire pour les trois techniques.

Les images de la figure 3 illustrent l'effet du paramètre ε sur la reconstruction de la fonction d'éclairage. Elles ont été obtenues à partir de la même distribution de photons que celle de la figure 2a. Les zones noires présentes sur le devant de la sphère proviennent d'une sous-estimation de la radiance incidente due à une surestimation de ΔA . En effet, dans un cas où la géométrie occupe un faible volume dans une cellule comparée au volume de cette dernière, utiliser l'aire de la face de la cellule conduit à surestimer l'aire où se trouvent les photons.

Pour illustrer la robustesse de notre technique aux variations locales de la géométrie, nous construisons notre octree sur une géométrie simplifiée et nous effectuons le rendu sur la géométrie détaillée. L'image 4a présente la carte d'irradiance obtenue avec une géométrie simplifiée tandis que l'image 4b présente le rendu final obtenu avec une géométrie détaillée.

8 Conclusion

A travers cet article, nous vous avons présenté un nouveau mode de représentation pour le calcul d'une solution d'éclairage global. Nous avons aussi montré son application pour l'accélération du rendu final dans le Photon Map. Elle est volumique car la reconstruction de la quantité radiométrique est basée sur une octree. De plus, par l'interpolation des données sur l'octree, elle garantit une reconstruction C^0 sur l'ensemble du volume. C'est aussi une valeur directionnelle, combinant intensité reçue et direction moyenne de réception de la lumière.

La première qualité de notre approche est son indépendance aux variations locales de géométrie grâce à la reconstruction volumique de l'information de direction qu'elle contient. Nous avons pu donc effectuer le calcul sur une géométrie simplifiée, et n'utiliser que la géométrie complète pour le rendu final. Cette représentation est aussi robuste aux variations locales des propriétés matérielles, car elle n'entre pas en compte dans son calcul.

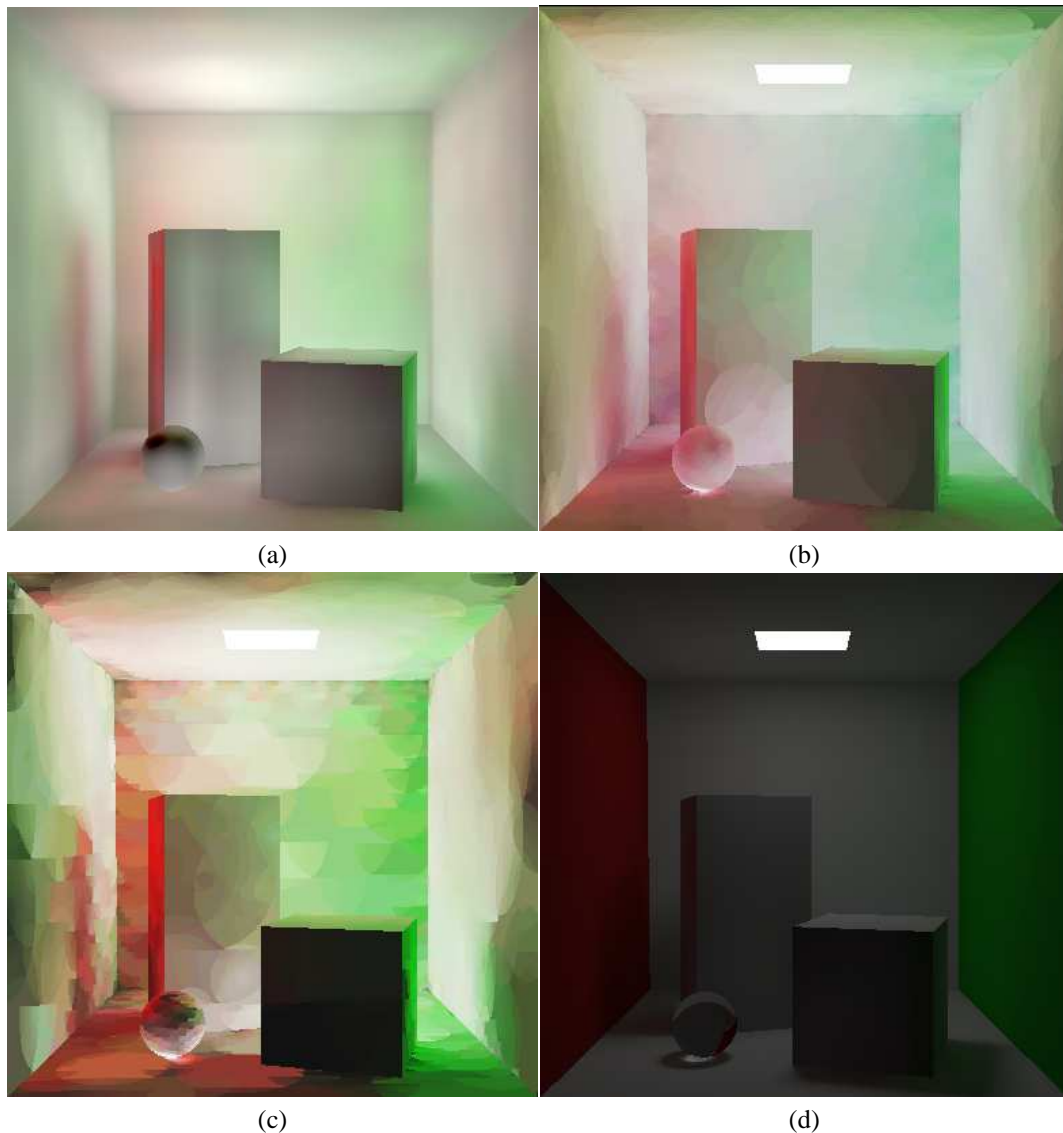


FIG. 2 – Les différentes cartes d'irradiance obtenues avec notre technique (a), celle de Ward (b) et celle de Christensen (c). (d) Une reconstruction finale à l'aide de notre technique qui inclut l'éclairage indirect diffus et une caustique.

Enfin, grâce à l'algorithme de compression que nous avons développé, cette représentation est aussi très compacte. L'application au Photon Map a montré des gains substantiels en place mémoire.

Limitations et travaux futurs

Notre représentation souffre encore de quelques limitations. Ainsi, comme dans le Photon Map, lorsque que la géométrie contenue dans une cellule est trop petite par rapport à son contenant, l'énergie sera sous-évaluée. Cela pourrait être corrigé par une estimation de l'occupation d'une cellule, ou par une modification du critère de subdivision de l'octree.

De plus, la reconstruction n'est pas encore complètement volumique, car les cellules sans géométrie sont sans valeur. Une diffusion des valeurs de radiance incidente devrait permettre de corriger ce problème.

Enfin, notre représentation est vite limitée, en termes de qualité, lorsqu'il s'agit de reconstruire des phénomènes avec de fortes variations. Elle n'est bien adaptée que pour l'éclairage indirect et pour les surfaces diffuses et/ou

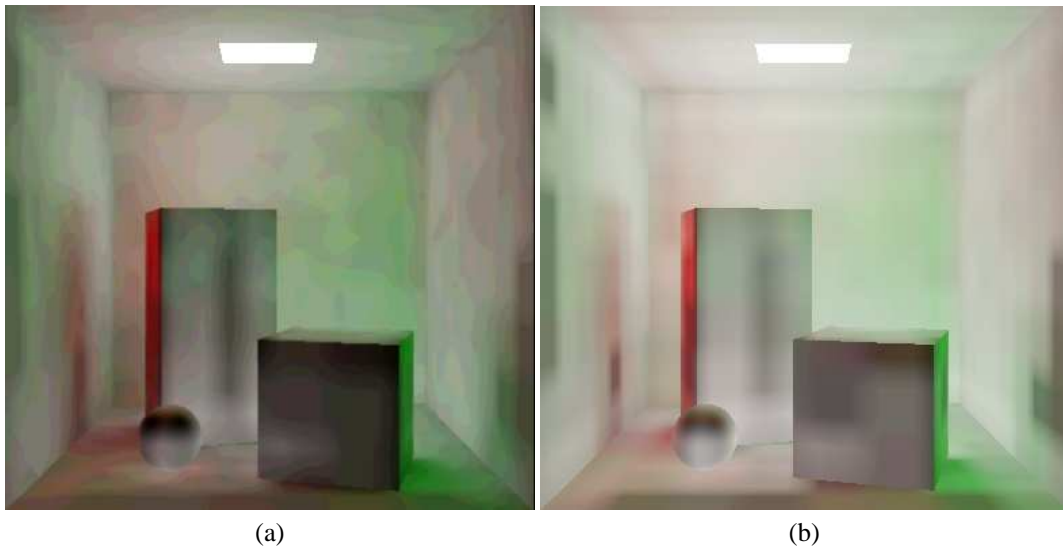


FIG. 3 – *Effet du paramètre ε sur la reconstruction. (a) $\varepsilon = 0.2$, (b) $\varepsilon = 0.6$.*



FIG. 4 – (a) *Carte d'irradiance obtenue sur la géométrie simplifiée. (b) Rendu à l'aide de la carte d'irradiance sur une géométrie détaillée.*

brillantes (*glossy*).

Néanmoins, une fois la diffusion effectuée, elle offre un certain nombre de potentiels. De par la multi-résolution naturelle de l'octree, une transmission progressive de l'éclairage serait possible, autorisant ainsi une approche client-serveur dans la simulation de l'éclairage global.

Une implémentation sur carte graphique serait aussi possible pour le calcul de l'éclairage indirect, car cette évaluation fait appel à un simple produit scalaire. Cela permettrait de plonger une géométrie et son déplacement dans une scène en conservant une apparence lumineuse cohérente.

Enfin, dans l'esprit de Tabellion et al. [TL04], il serait possible de modifier localement l'intensité et la direction des radiances incidentes, la cohérence étant maintenue par la phase de diffusion.

Références

- [AFO05] Okan Arıkan, David A. Forsyth, and James F. O'Brien. Fast and detailed approximate global illumination by irradiance decomposition. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005*. ACM Press, July 2005.
- [Arv94] James Arvo. The irradiance jacobian for partially occluded polyhedral sources. In *SIGGRAPH '94 : Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 343–350. ACM Press, 1994.
- [CB04] Per H. Christensen and Dana Batali. An irradiance atlas for global illumination in complex production scenes. In *Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering 2004*, pages 133–141, June 2004.
- [Chr00] Per H. Christensen. Faster global photon map global illumination. *Journal of Graphics Tools*, April 2000.
- [CSSD94] Per H. Christensen, Eric J. Stollnitz, David H. Salesin, and Tony D. DeRose. Wavelet Radiance. In *Fifth Eurographics Workshop on Rendering*, pages 287–302, Darmstadt, Germany, 1994.
- [DBB02] Philip Dutré, Kavita Bala, and Philippe Bekaert. *Advanced Global Illumination*. A. K. Peters, Ltd., 2002.
- [GKPB04] Pascal Gautron, Jaroslav Křivánek, Sumanta N. Pattanaik, and Kadi Bouatouch. A novel hemispherical basis for accurate and efficient rendering. In Henrik Wann Jensen and Alexander Keller, editors, *Rendering Techniques 2004, Eurographics Symposium on Rendering*, pages 321–330. Eurographics Association, Eurographics Association, June 2004.
- [GTGB84] Cindy M. Goral, Kenneth E. Torrance, Donald P. Greenberg, and Bennett Battaile. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. In *SIGGRAPH '84 : Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 213–222. ACM Press, 1984.
- [Hec90] Frank Heckbert. Adaptive radiosity textures for bidirectional ray tracing. In *ACM SIGGRAPH Proceedings*, volume 24, pages 145–154, August 1990.
- [HSA91] P. Hanrahan, D. Salzman, and L. Aupperle. A rapid hierarchical radiosity algorithm. In *Computer Graphics Proceedings*, volume 25, pages 197–206, July 1991.
- [Jen01] Henrik Wann Jensen. *Realistic image synthesis using photon mapping*. A. K. Peters, Ltd., 2001.
- [Kaj86] James T. Kajiya. The rendering equation. In *SIGGRAPH '86 : Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 143–150. ACM Press, 1986.
- [KAMJ05] Anders Wang Kristensen, Tomas Akenine-Möller, and Henrik Wann Jensen. Precomputed local radiance transfer for real-time lighting design. *ACM Trans. Graph.*, 24(3) :1208–1215, 2005.
- [KSS02] Jan Kautz, Peter-Pike Sloan, and John Snyder. Fast, arbitrary brdf shading for low-frequency lighting using spherical harmonics. In *EGRW '02 : Proceedings of the 13th Eurographics workshop on Rendering*, pages 291–296. Eurographics Association, 2002.
- [LW93] Eric P. Lafortune and Yves D. Willems. Bi-directional path tracing. In H. P. Santo, editor, *Proceedings of Third International Conference on Computational Graphics and Visualization Techniques (Compugraphics '93)*, pages 145–153, Alvor, Portugal, 1993.
- [NRH03] Ren Ng, Ravi Ramamoorthi, and Pat Hanrahan. All-frequency shadows using non-linear wavelet lighting approximation. *ACM Trans. Graph.*, 22(3) :376–381, 2003.
- [NRH04] Ren Ng, Ravi Ramamoorthi, and Pat Hanrahan. Triple product wavelet integrals for all-frequency relighting. *ACM Trans. Graph.*, 23(3) :477–487, 2004.
- [RH01] Ravi Ramamoorthi and Pat Hanrahan. An efficient representation for irradiance environment maps. In *SIGGRAPH '01 : Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 497–500, New York, NY, USA, 2001. ACM Press.
- [SAG94] Brian Smits, James Arvo, and Donald Greenberg. A clustering algorithm for radiosity in complex environments. In *SIGGRAPH '94 : Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 435–442. ACM Press, 1994.
- [SDS95] François Xavier Sillion, George Drettakis, and Cyril Soler. A clustering algorithm for radiance calculation in general environments. In *Rendering Techniques*, number 6 in Proceedings of Eurographics Rendering Techniques, June 1995.

- [SH94] P. Schröder and P. Hanrahan. Wavelet methods for radiance computations. In *Eurographics '94 : Proceedings of the 5th Eurographics Workshop on Rendering*, June 1994.
- [SHHS03] Peter-Pike Sloan, Jesse Hall, John Hart, and John Snyder. Clustered principal components for pre-computed radiance transfer. *ACM Trans. Graph.*, 22(3) :382–391, 2003.
- [SKS02] Peter-Pike Sloan, Jan Kautz, and John Snyder. Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments. *ACM Trans. Graph.*, 21(3) :527–536, 2002.
- [SP94] François Xavier Sillion and Claude Puech. *Radiosity and Global Illumination*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1994.
- [SSG⁺99] Marc Stamminger, Annette Scheel, Xavier Granier, Frédéric Perez-Carzorla, George Drettakis, and François Sillion. Efficient glossy global illumination with interactive viewing. In *Graphics Interface (GI'99) Proceedings*, pages 50–57, jun 1999.
- [TL04] Eric Tabellion and Arnauld Lamorlette. An approximate global illumination system for computer generated films. *ACM Trans. Graph.*, 23(3) :469–476, 2004.
- [VG97] Eric Veach and Leonidas J. Guibas. Metropolis light transport. In *SIGGRAPH '97 : Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 65–76, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [War91] Gregory Ward. *Real Pixels*. Academic Press 1991, 1991.
- [WHSG97] Bruce Walter, Philip M. Hubbard, Peter Shirley, and Donald P. Greenberg. Global illumination using local linear density estimation. *ACM Trans. Graph.*, 16(3) :217–259, 1997.
- [WRC88] Gregory J. Ward, Francis M. Rubinstein, and Robert D. Clear. A ray tracing solution for diffuse interreflection. In *SIGGRAPH '88 : Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 85–92. ACM Press, 1988.
- [WTL04] Rui Wang, John Tran, and David Luebke. All-frequency relighting of non-diffuse objects using separable brdf approximation. In *Rendering Techniques 2004, Eurographics Symposium on Rendering*, pages 321–330, June 2004.
- [ZSP98] Jacques Zaninetti, Xavier Serpaggi, and Bernard Péroche. A vector approach for global illumination in ray tracing. In *Computer Graphics Forum*, volume 17, September 1998.