Modélisation vectorielle des éclairements indirects en lancer de rayons.

Jacques Zaninetti
Bernard Péroche

Ecole des Mines de Saint-Etienne
Centre SIMADE, Laboratoire LISSE
158, Cours Fauriel
42023 Saint-Etienne Cedex 2 - France
Adresses électroniques : zaninetti@emse.fr *et* peroche@emse.fr.

RÉSUMÉ. *Cet article présente une méthode de prise en compte des éclairements indirects en lancer de rayons, afin de remplacer l'habituel terme ambiant arbitraire par une valeur calculée. La composante indirecte est estimée en un nombre réduit de points de la scène par une méthode de Monte Carlo, et une interpolation pondérée entre les valeurs connues permet de la reconstituer pour les autres points, avec l'aide d'un calcul de gradient. La principale innovation, par rapport à la méthode de Ward, est de ne pas se limiter à la seule composante diffuse de l'éclairement indirect. Une modélisation vectorielle permet de conserver des informations directionnelles utilisables avec des fonctions de réflectance complètes. Les images calculées sont ainsi plus précises, pour une faible augmentation des temps de calcul, et sans facétisation de la scène.*

ABSTRACT. *This paper presents a method taking into account indirect illumination in ray tracing, in order to replace the usual arbitrary ambient term by a computed value. The indirect component is estimated in a small number of points within the scene through a Monte Carlo method. A weighted interpolation between known values allows to reconstruct this component for the other points, with the help of a gradient computation. In relation to Ward's method, the main innovation of our work is that it is not restricted to the only diffuse component of indirect illumination. A vector model allows to keep directional information which can be used with complete reflectance functions. Computed images are thus more accurate, incur almost no additional cost, and no discretizing of the geometry of the scene is needed.*

MOTS-CLÉS : *lancer de rayons, rendu réaliste, ombrages, éclairement global, brdf, Monte Carlo.*

KEYWORDS: *ray tracing, rendering, realism, shading, global illumination, brdf, Monte Carlo.*

1. Introduction

De nombreuses techniques ont été proposées pour résoudre le problème de l'éclairement global en synthèse d'images. Elles se répartissent en trois catégories principales : le lancer de rayons, la radiosité, et les méthodes de Monte Carlo.

Le *Lancer de Rayons* classique [Whi80] suit la lumière en sens inverse depuis le point de vue. Basé sur l'optique géométrique, il permet de modéliser les réflexions et les réfractions des surfaces spéculaires, ainsi que les éclairements diffus et les ombres. Le traitement des inter-réflexions indirectes est cependant limité à un terme ambiant constant, qui ne respecte aucune loi physique. Des améliorations ont été apportées par Cook [CPC84], en ajoutant des techniques d'échantillonnage stochastique. Ward [WRC88] a proposé une méthode pour remplacer le terme ambiant constant par une composante diffuse indirecte calculée. Cette méthode est utilisée par le célèbre logiciel de calcul d'images de synthèse *Radiance* [War94].

La méthode de la *Radiosité*, introduite par Goral et al. [GTGB84], résout globalement le problème d'équilibre énergétique des radiations lumineuses, en admettant cependant certaines simplifications. Les algorithmes de radiosité imposent une discrétisation de l'environnement en petits éléments de surfaces plans, ce qui introduit des erreurs géométriques. Dans les premières versions, l'hypothèse était faite que la radiosité avait une valeur constante sur chaque élément de surface. Des méthodes d'éléments finis [SP94] repoussent cette limitation, en utilisant un ensemble de fonctions de base.

Les méthodes de *Monte Carlo* [Shi90a], [Lan91], [LW94] peuvent être appliquées sans limitation à des surfaces et des fonctions de réflexion quelconques. La nature stochastique de ces techniques introduit une incertitude dans les résultats, exprimée par la variance du procédé. De nombreuses recherches sur ces méthodes ont pour but de trouver des procédures d'échantillonnage limitant la variance de l'estimateur primaire. Les méthodes de Monte Carlo pures assurent une convergence statistique vers une solution correcte pour chaque pixel. Elles ont cependant l'inconvénient d'être très lentes, ce qui les rend peu utilisables en pratique. De plus les images produites sont très souvent bruitées.

Des approches hybrides, ou multi-passes, combinant les avantages de la radiosité et du lancer de rayons apparaissent dans un article de Wallace et al. [WCG87]. Dans ces méthodes, une passe de radiosité étendue est suivie par une passe de lancer de rayons qui calcule les réflexions directionnelles dépendantes du point de vue. Shirley [Shi90b] et Chen et al. [CMRT91] ont développé des méthodes multi-passes plus complètes, pour lesquelles la radiosité est utilisée pour déterminer les éclairements indirects, un tracé de chemins par une méthode de Monte Carlo pour les éclairements directs, et un lancer de rayons inverse depuis les sources pour les caustiques.

Nous proposons dans cet article une méthode de calcul des éclairements indirects dans un environnement de lancer de rayons, utilisant avec parcimonie une méthode de Monte Carlo. Les travaux de Ward [WRC88] sont à l'origine de nos développements. Une approche vectorielle des phénomènes modélisés nous permet une meilleure prise en compte des propriétés directionnelles des matériaux (brdf complètes), dans un cadre mathématique connu, les champs vectoriels. Ainsi, nous ne nous limitons pas à la seule composante diffuse de l'éclairement indirect, pour un coût raisonnable.

Le reste de ce document est organisé de la façon suivante. La section 2 présente les définitions de base utilisées dans le domaine de la simulation de l'éclairement. La section 3 traite de la composante indirecte de la lumière réfléchie. La section 4 introduit notre concept fondamental, le *Vecteur d'Eclairement Indirect*, et décrit les détails de calcul associés. Des informations sur la mise en œuvre pratique et quelques résultats sont présentés à la section 5. La section 6 propose une conclusion et quelques idées de développements futurs.

2. Notions générales d'éclairement

Cette section présente brièvement les principaux concepts manipulés dans nos travaux, et définit les notations.

La *Luminance* $L(x, \vec{\omega})$ [NRH+77] est, pour un point x donné (figure 1), la puissance par unité d'angle solide dans la direction $\vec{\omega}$ et par unité d'aire projetée perpendiculairement à $\vec{\omega}$, La luminance s'exprime en $Wm^{-2}sr^{-1}$.

L'*éclairement* est une autre notion importante, qui rassemble toute l'énergie incidente en un point donné, prenant en compte l'angle d'incidence mais pas les caractéristiques des matériaux. L'éclairement s'exprime en Wm^{-2}.

$$E(x) = \int_{\Omega} L_i(x, \vec{\omega_i}) \cos\theta_i \, d\omega_i \qquad [1]$$

La *fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle* (brdf) modélise les réflexions sur les matériaux. La brdf s'exprime en sr^{-1}.

$$f_r(x, \vec{\omega_i} \rightarrow \vec{\omega_r}) = \frac{dL(x, \vec{\omega_r})}{L(x, \vec{\omega_i}) \cos\theta_i \, d\omega_i}$$

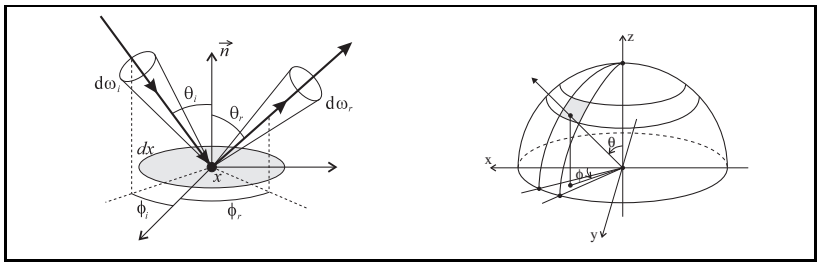


Figure 1. *Géométrie de la réflexion et hémisphère échantillonné*

La brdf dépend aussi de la longueur d'onde, bien que ce paramètre n'apparaisse pas explicitement, pour des raisons de commodité d'écriture.

Nous supposons de plus que la brdf peut être séparée en un terme spéculaire et en un terme diffus (directionnel et/ou uniforme) [HTSG91] :

$$f_r(x, \vec{\omega_i} \rightarrow \vec{\omega_r}) = f_{r,s}(x, \vec{\omega_i} \rightarrow \vec{\omega_r}) + f_{r,d}(x, \vec{\omega_i} \rightarrow \vec{\omega_r}) \qquad [2]$$

Nous avons implémenté le modèle de matériaux de Schlick [Sch94], car il est à la fois physiquement plausible et simple. Toute autre modélisation respectant les lois physiques de la réflexion peut aussi être utilisée sans modification.

L'*équation de rendu* est dérivée de la formulation de Kajiya [Kaj86], modifiée afin de s'exprimer en termes de luminance, au lieu d'un transfert d'énergie de point à point. La récursivité de cette expression assure une prise en compte globale des répartitions énergétiques.

$$L_r(x, \vec{\omega_r}) = \int_\Omega f_r(x, \vec{\omega_i} \rightarrow \vec{\omega_r})\ L_i(x, \vec{\omega_i})\ \cos\theta_i\, d\omega_i \qquad [3]$$

L'apparente simplicité de cette formulation masque en fait la grande complexité des phénomènes simulés. La récursivité et la connaissance seulement partielle des principaux termes apparaissant sous l'intégrale interdisent en pratique toute résolution analytique, même pour les scènes simples.

3. Composante indirecte de la lumière réfléchie

Nous décomposons l'expression de la luminance réfléchie [3] en trois composantes distinctes, qui seront traitées séparément :

$$L_r(x, \vec{\omega_r}) = L_{dir}(x, \vec{\omega_r}) + L_{spec}(x, \vec{\omega_r}) + L_{ind}(x, \vec{\omega_r})$$

avec :
$L_{dir}(x, \vec{\omega_r})$ = composante directe, due aux sources de lumière.
$L_{spec}(x, \vec{\omega_r})$ = composante spéculaire.
$L_{ind}(x, \vec{\omega_r})$ = composante indirecte, objet de cet article.

Les composantes $L_{dir}(x, \vec{\omega_r})$ et $L_{spec}(x, \vec{\omega_r})$ sont évaluées par la méthode habituelle du lancer de rayons. Ainsi notre méthode est compatible avec les optimisations classiques du lancer de rayons.

La composante indirecte de la luminance réfléchie est évaluée par une méthode de Monte Carlo, en échantillonnant un hémisphère centré sur le point courant. Chaque cellule $\omega_{j,k}$ de l'hémisphère sous-tend un angle solide constant, contrairement au découpage de Ward [WRC88] qui est à angle solide projeté constant. Nous accédons ainsi explicitement à des informations directionnelles nous permettant d'affiner l'interpolation par un calcul de gradient. L'angle solide sous-tendu par l'hémisphère est $2\pi\ sr$, donc $\omega_{j,k} = \frac{2\pi}{MN}\ sr$ pour chaque cellule.

Seule la lumière ayant subi au moins une réflexion sur une autre surface de la scène est prise en compte ici, à l'exclusion de l'énergie provenant directement des sources, puisque celle-ci est calculée avec L_{dir} et la brdf. De même, la composante spéculaire est calculée avec L_{spec} et le terme spéculaire $f_{r,s}(x, \vec{\omega_i} \rightarrow \vec{\omega_r})$ de la brdf [2].

Après discrétisation, l'équation de rendu [3] devient :

$$L_{ind}(x, \vec{\omega_r}) \approx \frac{2\,\pi}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} f_{r,d}(x, \vec{\omega_{j,k}} \rightarrow \vec{\omega_r})\ L_i(x, \theta_j, \phi_k)\ \cos\theta_j \qquad [4]$$

où $f_{r,d}(x, \vec{\omega_{j,k}} \rightarrow \vec{\omega_r})$ est la composante diffuse de la brdf, uniforme ou non, décomposée selon la formule [2]. L'équation de l'éclairement [1] devient alors :

$$E(x) \approx \frac{2\,\pi}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} L_i(\theta_j, \phi_k)\, \cos\theta_j \qquad [5]$$

M est le nombre de découpages selon l'angle polaire θ et N le nombre de découpages selon l'angle azimutal ϕ. Les angles θ_j et ϕ_k sont choisis de façon à définir une direction aléatoire à l'intérieur de chaque cellule (j, k) de l'hémisphère. Si X and Y sont des variables aléatoires uniformes dans $[0, 1]$, nous avons :

$$\theta_j = cos^{-1}\left(\frac{M - j - X}{M}\right) \qquad \text{et} \qquad \phi_k = \frac{2\pi}{N}\,(k + Y)$$

La formulation récursive de l'équation de rendu [3], et le grand nombre de rayons à générer pour réduire la variance induisent des temps de calculs très longs. Tout algorithme brutal d'évaluation est presque inutilisable en pratique.

Remarque. Cette méthode de Monte Carlo "naïve" n'est certainement pas optimale [Laf96]. Nos travaux actuels visent à adapter notre méthode à un échantillonnage d'importance en tracé de chemins [Mai96], qui converge en moyenne plus rapidement vers les résultats souhaités.

4. Calcul de la composante indirecte

Nous présentons dans cette section l'hypothèse fondamentale sur laquelle sont basés nos travaux. Nous introduisons ensuite l'importante notion de Vecteur d'Eclairement Indirect ($\overrightarrow{VEI}$), qui est le centre de notre méthode, avant de décrire l'interpolation utilisée pour éviter le calcul d'un $\overrightarrow{VEI}$ en chaque point de la scène.

4.1. *Hypothèse fondamentale*

L'éclairement indirect varie "lentement" à l'intérieur de la scène. *(H1)*

Cette hypothèse est couramment admise en synthèse d'images ([War94], page 462). Elle est en général justifiée, car la composante indirecte est due aux interréflexions entre les divers objets de la scène. Ils se comportent comme des sources surfaciques secondaires de tailles non nulles, chacune d'elles provoquant un passage progressif d'une zone de pénombre à une zone éclairée. L'éclairement indirect en chaque point est donc une fonction continue, puisqu'il est la somme d'un nombre fini de fonctions continues.

On peut cependant noter que ce raisonnement ne serait plus valable avec une scène composée uniquement de matériaux parfaitement spéculaires. Il pourrait dans ce cas se produire de nombreuses discontinuités de l'éclairement indirect, les brdf étant réduites à des fonctions de Dirac. Ce cas extrême semble toutefois peu probable dans le cadre de la synthèse d'images "réalistes", en simulation architecturale par exemple. En effet, les matériaux simulés ne sont pratiquement jamais des réflecteurs parfaits, et bien souvent ils ont un comportement diffus très marqué.

4.2. *Principe général*

Le calcul de la composante indirecte avec l'équation [4] est une opération très coûteuse, mais il n'est pas indispensable de l'effectuer partout. En effet, en admettant l'hypothèse *(H1)*, on peut considérer qu'il existe autour de chaque point de la scène un voisinage dans lequel les variations de l'éclairement indirect sont inférieures à un seuil donné. Il est alors possible de reconstituer la valeur en un point quelconque, simplement d'après les valeurs de quelques points "proches" connus, si leur voisinage de validité englobe le point courant.

Un gradient d'éclairement est évalué en même temps que la composante indirecte, pour un coût relativement faible. Il n'est pas assez précis pour être exploité explicitement en tant que gradient en dehors d'un voisinage extrêmement petit, à cause des trop nombreuses données inconnues. Il est cependant un très bon indicateur du degré de perturbation de la zone courante. Il est donc utilisé pour affiner le calcul de la taille de la zone de validité.

Avant de lancer un calcul complet, il faut vérifier s'il existe des valeurs déjà calculées valides. Dans ce cas, la valeur courante est estimée par une simple interpolation pondérée de ces valeurs connues, auxquelles sont attribués des poids inversement proportionnels aux erreurs qu'elles risquent d'introduire. Cette estimation d'erreur dépend principalement de la distance entre les échantillons, de la variation d'orientation de la surface, et du gradient. Dans le cas contraire, un calcul de Monte Carlo est effectué et la valeur est stockée pour être éventuellement réutilisée plus tard.

4.3. *Vecteur d'Eclairement Indirect (VEI)*

Il n'est pas envisageable de mémoriser toutes les informations obtenues par chacun des rayons lors du calcul de l'intégrale de rendu [4]. Nous proposons de définir, pour chaque point de la scène, un vecteur représentant toutes les interactions indirectes, et qui, après être passé au travers de la brdf au point x, permet de reproduire exactement la luminance réfléchie $L_{ind}(x, \vec{\omega_r})$ dans la direction $\vec{\omega_r}$. Il est alors suffisant de ne mémoriser que ce vecteur, dont les composantes seront explicitées dans cette partie.

4.3.1. *Direction d'incidence moyenne* $(\overrightarrow{VI})$

Cette notion est similaire au *Vecteur d'éclairement* étudié par Arvo [Arv94] pour modéliser des sources surfaciques planes partiellement obstruées, sauf que nous prenons en compte la scène complète. Le vecteur $\overrightarrow{VI}\ (x)$ indique la direction d'incidence moyenne en un point x :

$$\overrightarrow{VI}\ (x) \ = \ \int_{\Omega} \ L_i(x, \vec{\omega_i}) \ \vec{\omega_i} \ \cos\theta_i \, d\omega_i$$

Ce calcul s'effectue durant le même parcours de boucle que [4], pour un coût minime. Afin de faciliter l'interpolation, ce vecteur est normé avant d'être mémorisé, puisque seule la direction indiquée nous intéresse ici.

4.3.2. *Représentation de la scène*

Nous définissons le *Vecteur d'Eclairement Indirect* au point x, $\overrightarrow{VEI}(x)$, comme un vecteur de $\mathbb{R}^{3+p}$ avec une direction $\overrightarrow{VI}\ (x)$ (3 composantes) et une exitance P, exprimée en Wm^{-2} ($p = 3$ en ***RVB***, p est le nombre de points d'échantillonnage du spectre autrement):

$$\overrightarrow{VEI}(x) = \begin{pmatrix} \overrightarrow{VI}\ (x) \\ P_{\lambda 1}, P_{\lambda 2}, \cdots, P_{\lambda p} \end{pmatrix} \qquad [6]$$

La scène entière est plongée dans un champ vectoriel associant à chaque point x de l'espace un vecteur $\overrightarrow{VEI}(x)$. La valeur de la composante P de $\overrightarrow{VEI}(x)$ est définie de façon à pouvoir déduire $L_{ind}(x, \vec{\omega_r})$ de $\overrightarrow{VEI}(x)$ en tout point x avec la formule [7], où $f_{r,d}$ est la composante diffuse (uniforme ou non) de la brdf :

$$L_{ind}(x, \vec{\omega_r}) = f_{r,d}(x, \overrightarrow{VI}\ (x) \rightarrow \vec{\omega_r})\ P \qquad [7]$$

On peut noter que la valeur de la luminance réfléchie au point x calculée avec cette méthode est exactement la même que celle obtenue avec l'équation [4].

En pratique, nous conservons quelques informations complémentaires, qui seront utilisées pour améliorer les interpolations : l'éclairement, le gradient d'éclairement, la distance moyenne aux autres objets, la position du point x lui-même, une référence à la brdf de la surface contenant x, et le repère orthonormé local tangent à la surface. Les $\overrightarrow{VEI}$ sont stockés dans des listes chaînées liées aux objets de même brdf.

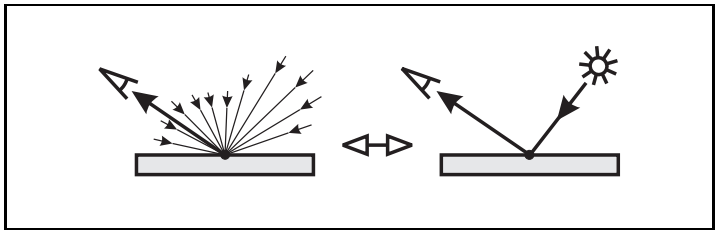


Figure 2. *Le $\overrightarrow{VEI}$ simule la scène complète avec une unique source de lumière ponctuelle*

Remarque. Le vecteur $\overrightarrow{VEI}(x)$ peut s'interpréter de la façon suivante (figure 2). Pour un point x donné, le reste du monde est assimilé à une source de lumière ponctuelle virtuelle, située à une distance unitaire dans la direction $\overrightarrow{VI}\ (x)$, et produisant l'exitance P au point x.

4.3.3. *Gradient d'éclairement*

Un calcul de gradient est effectué lors de l'évaluation de l'intégrale de rendu [4]. L'augmentation du temps d'exécution est faible car ces calculs s'effectuent durant le

même parcours de boucle. Le gradient présenté ici est différent de celui de Ward et Heckbert [WH92], car le découpage de l'hémisphère n'est pas le même.

Le gradient indique les variations de l'éclairement indirect dans un voisinage du point considéré. Sa valeur numérique n'a pas de signification précise en dehors d'un voisinage très petit, mais elle est une très bonne indicatrice du degré de perturbation de la zone considérée. Elle est utilisée pour déterminer la taille d'une zone de validité associée à chaque $\overrightarrow{VEI}$, à l'intérieur de laquelle il peut être utilisé lors de l'interpolation.

Il est obtenu par dérivation de l'expression de l'éclairement [1] selon des déplacements dans un repère (x, y, z) tangent à la surface.

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial a} &= \frac{2\,\pi}{MN}\sum_{j=0}^{M-1}\sum_{k=0}^{N-1}\frac{\partial(L_i(\theta_j,\phi_k)\,\cos\theta_j)}{\partial a} \qquad \text{avec } a \in \{x,y,z\} \\ &= \frac{2\,\pi}{MN}\sum_{j=0}^{M-1}\sum_{k=0}^{N-1}\left(\frac{\partial L_i(\theta_j,\phi_k)}{\partial a}\cos\theta_j + L_i(\theta_j,\phi_k)\frac{\partial\cos\theta_j}{\partial a}\right)\end{aligned}$$

Cependant le terme $\frac{\partial L_i(\theta_j,\phi_k)}{\partial a}$ n'est pas directement accessible. Il nous faut donc supposer que les déplacements dans le voisinage du point x soient suffisamment petits pour admettre $\frac{\partial L_i(\theta_j,\phi_k)}{\partial a} = 0$. Avec cette hypothèse,

$$\frac{\partial E}{\partial a} \approx \frac{2\,\pi}{MN}\sum_{j=0}^{M-1}\sum_{k=0}^{N-1} -L_i(\theta_j,\phi_k)\sin\theta_j\frac{\partial\theta_j}{\partial a}$$

Le terme $\frac{\partial\theta_j}{\partial a}$ s'obtient en étudiant les variations de l'angle d'incidence θ_j pour des petits déplacements du centre de l'hémisphère (figure 3). De simples considérations géométriques nous donnent alors :

$$\frac{\partial\theta_j}{\partial x} = \frac{-\cos\theta_j\cos\phi_k}{R} \qquad \frac{\partial\theta_j}{\partial y} = \frac{-\cos\theta_j\sin\phi_k}{R} \qquad \frac{\partial\theta_j}{\partial z} = \frac{\sin\theta_j}{R}$$

où R est la distance entre le point O et le premier objet dans la direction (θ_j, ϕ_k).

4.4. *Interpolation pondérée*

La reconstruction de l'éclairement indirect s'effectue en plusieurs étapes :

- recherche des n $\overrightarrow{VEI}$ déjà calculés valides ;
- si n n'est pas convenable (cf. section suivante), lancer un calcul complet, sinon attribuer à chaque $\overrightarrow{VEI}$ valide un poids inversement proportionnel à l'erreur estimée qu'il risque d'introduire ;
- interpoler entre les n $\overrightarrow{VEI}$ valides ;
- calculer la luminance réfléchie avec l'équation [7].

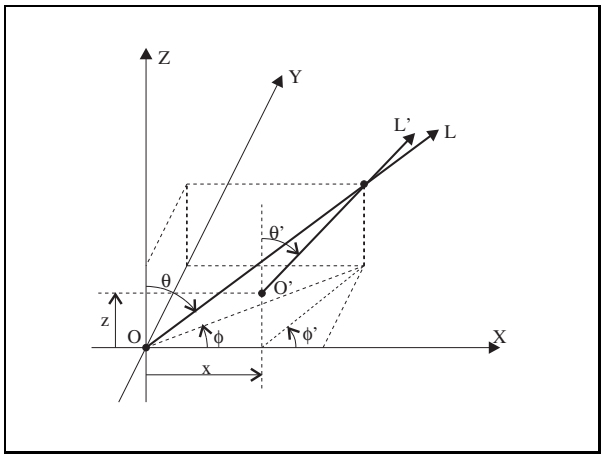


Figure 3. *Variation de l'angle d'incidence lorsque O se déplace en O'.*

4.4.1. *Zone de validité*

Un $\overrightarrow{VEI}$ calculé en un point A doit répondre à plusieurs critères pour être considéré comme valide en un point B :

- les points A et B doivent appartenir à des objets ayant la même brdf, car celle-ci est utilisée lors du calcul de la luminance réfléchie ;
- la distance $\| \overrightarrow{AB} \|$ doit être inférieure à la distance moyenne entre A et le reste de la scène. Cette condition limite le risque de *fuites de lumière* [Ved93] entre des objets proches ;
- la variation relative d'éclairement due au gradient doit être inférieure à un seuil S_E fixé par l'utilisateur : $\frac{\overrightarrow{AB}.\overrightarrow{\Delta E}}{E_A} \leq S_E$;
- la courbure de la surface doit être inférieure à un seuil prédéfini S_{courb} : $\cos(\overrightarrow{N_A}, \overrightarrow{N_B}) \geq S_{courb}$ En effet, le $\overrightarrow{VEI}$ est calculé suivant l'hémisphère seulement, et non pas suivant la sphère complète.

4.4.2. *Nombre de $\overrightarrow{VEI}$ pour interpoler*

Le nombre n de $\overrightarrow{VEI}$ admis pour l'interpolation doit être compris entre deux bornes prédéfinies, $nmin$ et $nmax$. Le choix de ces bornes influence le niveau de filtrage induit par l'interpolation. En pratique, $nmin = 3$ et $nmax = 16$ donnent de bons résultats.

4.4.3. *Fonction de pondération*

La fonction de pondération permet de donner moins d'importance aux échantillons risquant d'introduire la plus grande erreur, en fonction des critères définis plus haut.

Un poids w_i est associé à chaque $\overrightarrow{VEI}$, de valeur 1 lorsque les critères sont parfaitement remplis (ou que B coïncide avec A), de valeur plus faible sinon :

$$w_i = \frac{1}{1 + \frac{\|\overrightarrow{AB}\|}{dmoy_i}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\overrightarrow{AB}.\overrightarrow{\Delta E}}{E_A}} \cdot \frac{\cos(\vec{N_A}, \vec{N_B}) - S_{curv}}{1 - S_{curv}} \qquad [8]$$

4.4.4. *Interpolation*

Nous utilisons une interpolation pondérée classique, utilisant les poids calculés avec l'équation [8].

$$\overrightarrow{VEI}(B) = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \ \overrightarrow{VEI}(A_i)}{\sum_{i=1}^{n} w_i}$$

Comme le nombre maximal d'échantillons acceptés est faible, cette opération est rapide. Le plus pénalisant est la recherche des $\overrightarrow{VEI}$ valides, car il faut parcourir systématiquement des listes de grande taille. Des structures de données et des algorithmes mieux adaptés (octree ou kd-arbres) devraient améliorer cette recherche multi-critères.

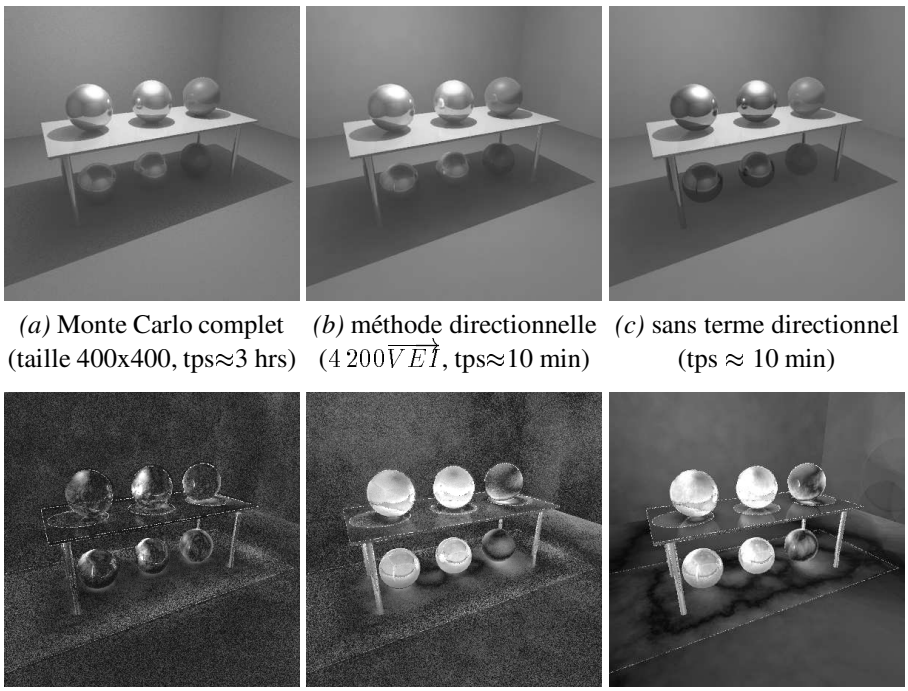
5. Implémentation et résultats

Une première étape consiste à générer un germe de $\overrightarrow{VEI}$ répartis aléatoirement dans la scène. Cette étape permet d'obtenir une répartition spatiale relativement homogène des $\overrightarrow{VEI}$ dans la scène, ce qui évite l'apparition de différences sensibles entre le début et la fin du parcours de l'image. La deuxième étape est un parcours habituel des pixels de l'image. La principale différence, par rapport au lancer de rayons classique, est le remplacement du terme ambiant arbitraire par le terme calculé avec la formule [7].

Cette méthode a été implémentée dans le logiciel de lancer de rayons modulaire *YART*, développé à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne par Marc Roelens [Roe93].

La série d'images (figure 4) illustre notre méthode. Les images *(a)* à *(c)* représentent une scène composée d'objets mats (une pièce fermée, une table avec des pieds cylindriques), deux séries de sphères identiques (en acier, en or et en plastique), et une source ponctuelle. La série de sphères placées sur la table est éclairée à la fois directement et indirectement, alors que celle placée sous la table ne reçoit que l'éclairement indirect. L'image *(a)*, qui nous sert de référence, a été calculée par une méthode de Monte Carlo complète, avec 128 rayons par hémisphère. L'image *(b)* a été obtenue avec notre méthode, en calculant 4200 $\overrightarrow{VEI}$. Finalement, l'image *(c)* a été calculée en remplaçant chaque vecteur $\overrightarrow{VEI}$ par la valeur numérique de l'éclairement, sans notion directionnelle.

Pour souligner les différences entre les images *(a)*, *(b)* et *(c)*, nous avons calculé les différences pixel à pixel dans l'espace de couleurs *Luv* entre chaque couple possible. Les résultats sont visibles sur les images *(d)* à *(f)*. Un pixel noir représente une erreur



(a) Monte Carlo complet (taille 400x400, tps≈3 hrs)

(b) méthode directionnelle ($4\,200\overrightarrow{VEI}$, tps≈10 min)

(c) sans terme directionnel (tps ≈ 10 min)

(d) différence (a)-(b) (moyenne ≈ 0.86)

(e) différence (a)-(c) (moyenne ≈ 1.6)

(f) différence (b)-(c) (moyenne ≈ 1.7)

Figure 4. *Comparaisons entre diverses méthodes pour une même scène.*

nulle, alors qu'un pixel blanc indique une erreur supérieure à 10 dans l'espace de couleurs *Luv*.

Finalement, les images de la figure (5) montrent deux scènes plus complexes, avec des objets texturés et des objets spéculaires. Ces deux scènes sont éclairées par des sources surfaciques polygonales, prises en compte par une méthode adaptative analytique.

6. Conclusion et évolutions prévues

Nous avons présenté une méthode de prise en compte des éclairements indirects dans un environnement de lancer de rayons, dont les avantages sont préservés. Aucune facétisation préalable de la scène n'est nécessaire, et toutes les composantes de la brdf sont traitées. Le surcoût en temps de calcul est acceptable, pour une application visant à obtenir des images physiquement plausibles, avec un contrôle adaptatif de l'erreur.

Les travaux présentés dans cet article ne sont qu'une première étape vers une résolution plus complète du problème, et nous envisageons plusieurs développements :

– amélioration de la méthode de Monte Carlo, (échantillonnage d'importance

(a) "Cornell Box" (512x512, tps≈8 min) *(b)* "Intérieur" (512x512, tps≈40 min)

Figure 5. *Exemples de scènes plus complexes.*

[Mai96]), afin de réduire la variance des calculs de $\overrightarrow{VEI}$ et donc diminuer le nombre de rayons nécessaires pour obtenir la précision désirée ;

– utilisation d'un modèle spectral de couleurs lorsque le modèle *RVB* est trop approximatif pour la précision désirée ;

– estimation de l'erreur commise, en tenant compte si nécessaire de données psycho-visuelles ;

– calcul *physique* de caustiques [Jen96] ;

– amélioration incrémentale de la précision, sans perte des données déjà calculées [MCP92].

7. Bibliographie

[Arv94] James Arvo, "The irradiance jacobien for partially occluded polyhedral sources", *Computer Graphics,* 28 (1994), 343–350.

[CMRT91] S. Chen, G. Miller, H. Rushmeier, and D. Turner, "A progressive multi-pass method for global illumination", *Computer Graphics,* 25 (1991), no. 4, 165–174.

[CPC84] R. L. Cook, T. Porter, and L. Carpenter, "Distributed ray tracing", *Computer Graphics,* 18 (1984), no. 3, 137–144.

[GTGB84] C. M. Goral, K. E. Torrance, D. P. Greenberg, and B. Battaile, "Modeling the interaction of light between diffuse surfaces", *Computers Graphics,* 18 (1984), no. 3, 213–222.

[HTSG91] X. D. He, K. E. Torrance, F. X. Sillion, and D. P. Greenberg, "A comprehensive physical model for light reflection", *Computer Graphics,* 25 (1991), no. 4, 175–186.

[Jen96] H. W. Jensen, “Global illumination using photon maps”, *Seventh Eurographics Workshop on Rendering,* (1996), 22–31, Porto, Portugal.

[Kaj86] J. T. Kajiya, “The rendering equation”, *Computer Graphics,* 20 (1986), no. 4, 143–150.

[Laf96] E. Lafortune, “Mathematical models and monte carlo algorithms for physically based rendering”, Ph.D. thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, February 1996.

[Lan91] B. Lange, “The simulation of radiant light transfer with stochastic ray-tracing”, *Second Eurographics Workshop on Rendering,* (1991), 9–19, Barcelona, Spain.

[LW94] E. P. Lafortune and Y. D. Willems, “A theorical framework for physically based rendering”, *Computer Graphics Forum,* 13 (1994), no. 2, 97–107.

[Mai96] J.-L. Maillot, “Pseudo-réalisme et progressivité pour le tracé de rayons”, Ph.D. thesis, Ecole des Mines de Saint-Etienne, September 1996.

[MCP92] J.-L. Maillot, L. Carraro, and B. Peroche, “Progressive ray tracing”, *Third Eurographics Workshop on Rendering,* (1992), 9–19, Bristol, England.

[NRH+77] F. Nicodemus, J. Richmond, J. Hsia, I. Ginsberg, and T. Limperis, “Geometric considerations and nomenclature for reflectance”, Monograph 160, National Bureau of Standards, 1977.

[Roe93] M. Roelens, “Un environnement pour le tracé de rayons utilisant une modélisation par arbre de construction”, Ph.D. thesis, Ecole des Mines de Saint-Etienne, February 1993.

[Sch94] C. Schlick, “An inexpensive brdf model for physically-based rendering”, *Computer Graphics Forum,* 13 (1994), no. 3, 149–162.

[Shi90a] P. Shirley, “Physically based lighting calculations for computer graphics”, Ph.D. thesis, Univ. of Illinois, November 1990.

[Shi90b] P. Shirley, “A ray tracing method for illumination calculation in diffuse-specular scenes”, *Proceedings of Graphics Interface’90,* (1990), 205–212.

[SP94] F. Sillion and C. Puech, “Radiosity and global illumination”, Morgan Kaufman Publishers, San Francisco, 1994.

[Ved93] Christophe Vedel, “Calcul de l’illumination par des sources étendues : Espace objet et espace image”, Ph.D. thesis, Ecole Polytechnique, September 1993.

[War94] G. J. Ward, “The radiance lighting simulation and rendering system”, *Computer Graphics,* (1994), 459–472.

[WCG87] J. R. Wallace, M. F. Cohen, and D. P. Greenberg, “A two-pass solution to the rendering equation : a synthesis of ray-tracing and radiosity methods”, *Computer Graphics,* 21 (1987), no. 4, 311–320.

[WH92] G. J. Ward and P. S. Heckbert, “Irradiance gradients”, *Third Eurographics Workshop on Rendering,* (1992), 85–98, Bristol, England.

[Whi80] T. Whitted, “An improved illumination model for shaded display”, *Communications of the ACM,* 23 (1980), 343–349.

[WRC88] G. J. Ward, F. M. Rubinstein, and R. D. Clear, “A ray tracing solution for diffuse interreflection”, *Computer Graphics,* 22 (1988), no. 4, 85–92.