# Modélisation Vectorielle des Eclairements Indirects en Lancer de Rayons sur Arbre CSG

Jacques ZANINETTI Bernard PEROCHE

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

**Résumé**

Nous présentons ici 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, aidée par 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.

**Mots clés**
lancer de rayons, rendu réaliste, éclairement global, brdf, Monte-Carlo

## 1 Introduction

Le *lancer de rayons* est une méthode de calcul d'images de synthèse "réalistes" offrant de nombreux avantages, notamment la prise en compte naturelle des phénomènes de réflexion et de réfraction spéculaires. Il s'adapte à toutes les modélisations de scènes, sans contrainte géométrique particulière et aucune facétisation n'est nécessaire. Il a cependant le défaut de résoudre le problème de répartition de l'énergie lumineuse au niveau local seulement. Un terme ambiant de valeur totalement arbitraire compense l'absence de prise en compte des échanges énergétiques globaux, mais sans aucune garantie quant au respect de l'équilibre énergétique global de la scène. De plus le calcul des images est très long.

La *radiosité* est une méthode complémentaire, donnant elle aussi des résultats très intéressants, avec des temps de calcul au moins aussi longs. Elle résoud le problème globalement, mais au prix de simplifications ne permettant pas la prise en compte de tous les phénomènes lumineux locaux. Le principal inconvénient est que les matériaux sont supposés parfaitement diffus. La prise en compte de fonctions de distribution de réflectances bidirectionnelles (notées brdf, suivant la terminologie habituelle) plus complètes oblige à des manipulations très complexes, et fait encore l'objet de nombreuses recherches. De plus la facétisation de la scènes est nécessaire, ce qui peut introduire des imprécisions géométriques.

Les *méthodes de Monte Carlo* permettent de combler ces lacunes, mais au prix de temps de calculs prohibitifs, sous peine d'obtenir un résultat excessivement bruité.

Nous proposons ici une méthode de calcul des éclairements indirects utilisant avec parcimonie une méthode de Monte Carlo, dans un environnement de lancer de rayons. Les travaux de Ward [War94], à l'origine du développement du logiciel de lancer de rayons *Radiance*, ont été notre principal point de départ. 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.

# 2 Notions générales

Cette section présente brièvement les principaux concepts manipulés, et les notations utilisées.

## 2.1 Luminance

La luminance $L(x, \vec{\omega})$ représente, pour une position $x$ donnée (*Figure 1*), la puissance lumineuse transportée par unité de surface et par unité d'angle solide projeté dans la direction $\vec{\omega}$ , exprimée en $W/m^2/sr$ . Elle possède deux propriétés utiles en synthèse d'images :

- En l'absence d'absorption ou de déviation par le milieu, la luminance reste constante le long d'un rayon.
- La sensation visuelle est fortement liée à la luminance de la surface observée.

## 2.2 Fonction de Distribution de Réflectance Bidirectionnelle (brdf)

Pour modéliser les réflexions, qu'elles soient uniformes ou directionnelles, il est commode d'introduire la notion de brdf (de l'anglais *bidirectional reflectance distribution function*) :

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

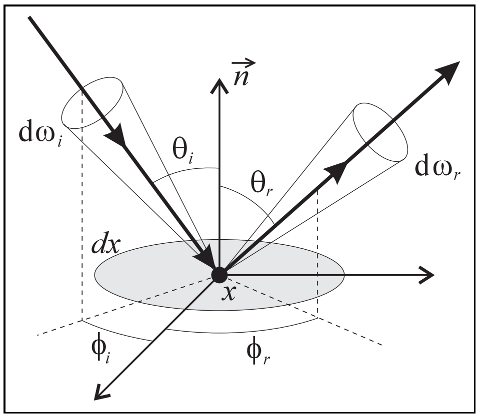


FIG. 1 - *Géométrie de la réflexion*

La brdf $\rho(x, \vec{\omega_i} \rightarrow \vec{\omega_r})$ définit la relation entre la luminance réfléchie selon la direction $\vec{\omega_r}$ et l'éclairement incident selon la direction $\vec{\omega_i}$ en un point $x$ de la surface. La brdf varie aussi avec la longueur d'onde de la lumière incidente. Ainsi la longueur d'onde est un paramètre supplémentaire de la brdf, qui n'apparaît explicitement que rarement, par simple commodité d'écriture.

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

$$\rho(x, \vec{\omega_i} \rightarrow \vec{\omega_r}) = \rho_s(x, \vec{\omega_i} \rightarrow \vec{\omega_r}) + \rho_d(x, \vec{\omega_i} \rightarrow \vec{\omega_r})$$

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 être utilisée sans modification.

## 2.3 Intégrale de rendu

Cette équation intégrale, maintenant classique en synthèse d'images, est dérivée de la formulation de Kajiya [Kaj86], modifiée afin de s'exprimer en terme de luminance . Elle indique que la luminance issue d'un point $x$ de la scène dans une direction $\vec{\omega_r}$ dépend des luminances incidentes $L_i$ selon toutes les directions possibles $\vec{\omega_i}$ de l'espace $\Omega$ . La récursivité de cette expression assure une prise en compte globale des répartitions énergétiques.

$$L_r(x,\vec{\omega_r}) = \int_\Omega \rho(x,\vec{\omega_i}\rightarrow\vec{\omega_r})\, L_i(x,\vec{\omega_i})\, \cos\theta_i\, d\omega_i \tag{1}$$

L'apparente simplicité de cette formulation masque en fait la grande compléxité des phénomènes simulés. La récursivité, le fait de devoir évaluer l'intégrale en chaque point de la scène, et la connaissance seulement partielle des principaux termes interdisent en pratique toute résolution analytique, même pour les scènes simples.

Nous décomposons cette expression de la luminance réfléchie 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 "parfaite".
$L_{ind}(x,\vec{\omega_r})$ = 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 en lancer de rayons. Ainsi notre méthode est compatible avec les optimisations classiques du lancer de rayons et la prise en compte éventuelle de milieux participatifs.

## 2.4 Composante indirecte de la luminance réfléchie

La composante indirecte de la luminance réfléchie est évaluée par une méthode de Monte Carlo, en échantillonnant un hémisphère centré sur le point courant. Le découpage choisi est à angle solide constant, contrairement à celui de Ward 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.

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 complète. De même, nous excluons la composante spéculaire "parfaite", calculée avec $L_{spec}$ et le terme spéculaire $\rho_s$ de la brdf.

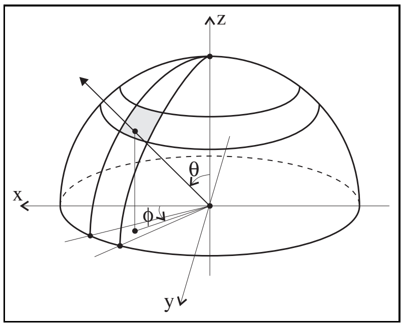


FIG. 2 - *Hémisphère échantillonné*

Après discrétisation, l'équation de rendu (1) devient :

$$L_{ind}(x,\vec{\omega_r}) \approx \frac{2\,\pi}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} \rho_d(x,\vec{\omega_{j,k}}\rightarrow\vec{\omega_r})\, L_i(x,\theta_j,\phi_k)\, \cos\theta_j \tag{2}$$

$M$ est le nombre de découpages selon l'angle polaire et $N$ est le nombre de découpages selon l'angle azimutal. Les angles $\theta_j$ et $\phi_k$ sont choisis de façon à définir une direction aléatoire à l'intérieur de chaque cellule $(j,k)$ de l'hémisphère.

L'angle solide engendré par une cellule est $\omega_{j,k} = \int_{\phi_k}^{\phi_{k+1}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} \sin\theta d\theta d\phi$ . L'angle solide de l'hémisphère complet étant $2\pi$ sr, $\omega_{j,k} = \frac{2\pi}{MN}$ pour toutes les cellules. Si $X$ et $Y$ sont des variables aléatoires uniformes dans $[0, 1[$ , on obtient :

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

Du fait de la formulation récursive, et du grand nombre de rayons à générer pour réduire la variance, les temps de calculs sont très longs. En pratique, cela rend presque inutilisable tout algorithme brutal d'évaluation.

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

### 2.5 Eclairement

Une autre grandeur importante est l'éclairement, exprimé en $W/m^2$ , qui regroupe toute l'énergie incidente en un point, en tenant compte de l'angle d'incidence mais pas de la brdf.

$$E(x) = \int_\Omega L_i(x, \vec{\omega_i}) \cos\theta_i \, d\omega_i \approx \frac{2\pi}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} L_i(\theta_j, \phi_k) \cos\theta_j \qquad (3)$$

La connaissance de l'éclairement ne permet pas de reconstituer les informations directionnelles utilisées lors de son calcul. Cette grandeur n'est donc pas suffisante pour calculer une luminance réfléchie dans une certaine direction, sauf lorsque le matériau est purement lambertien. En effet, dans ce cas purement théorique, la brdf est constante et peut donc être mise en facteur dans l'équation de rendu (1), afin d'obtenir une relation entre l'éclairement et la luminance réfléchie.

Ward utilise cette approximation pour calculer les interréflexions *diffuses* [WRC88], en évaluant et mémorisant l'éclairement indirect. Malgré cette simplification, son approche reste infiniment préférable à l'utilisation classique d'un terme ambiant arbitraire. Il conserve de plus toutes les qualités du lancer de rayons pour les composantes directe et spéculaire.

## 3 Calcul de la composante indirecte

### 3.1 Hypothèse fondamentale

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

Cette hypothèse est couramment admise en synthèse d'images. Elle est justifiée en général, 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 n'est plus valable avec une scène composée uniquement de matériaux parfaitement spéculaires. Il peut dans ce cas se produire de nombreuses discontinuités de l'éclairement indirect, les brdf étant réduites à des fonctions de Dirac. Ce cas extême semble toutefois peu probable dans le cadre de la synthèse d'images "réalistes", 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.

### 3.2 Principe général

Le calcul de la composante indirecte avec l'équation (2) 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 simplement d'après les valeurs de quelques points "proches", 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 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 utile 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 avec 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, le calcul de Monte Carlo est effectué et la valeur est stockée pour être éventuellement réutilisée à moindres frais.

## 3.3 Vecteur d'Eclairement Indirect (VEI)

### 3.3.1 Direction d'incidence moyenne VI

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

$$\overrightarrow{VI}\,(x) = \int_{S^2} L_i(x, \vec{\omega_i})\ \vec{\omega_i}\ d\sigma(\vec{\omega_i}) \tag{4}$$

$S^2$ est la sphère unitaire centrée en $x$ et $\sigma(\vec{\omega_i})$ la mesure canonique sur cette sphère.

Ce calcul s'effectue durant le même parcours de boucle que (2), 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.

### 3.3.2 Représentation de la scène

Il n'est pas envisageable de mémoriser toutes les informations obtenues par chacun des rayons lors du calcul de l'intégrale de rendu (2). Notre solution est d'imaginer, pour chaque point de la scène, une source de lumière ponctuelle simulant seule toutes les interactions indirectes. Les données capitales à mémoriser se réduisent alors à la position de cette source virtuelle et à sa puissance.

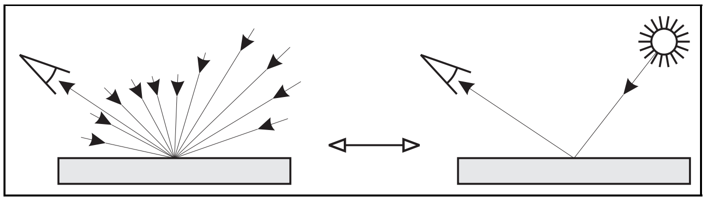

FIG. 3 - *Le $\overrightarrow{VEI}$ simule la scène complète avec une unique source ponctuelle*

Nous introduisons ici le *Vecteur d'Eclairement Indirect* $\overrightarrow{VEI}$ , qui est essentiellement composé de la position de cette source (dimension 3) et sa puissance (dimension 3 en rvb, beaucoup plus avec un modèle spectral). Ces données sont suffisantes pour déduire correctement en un point $x$ quelconque la composante $L_{ind}(x, \vec{\omega_r})$ de la seule connaissance du $\overrightarrow{VEI}(x)$.

$$\overrightarrow{VEI}(x) = \begin{pmatrix} \overrightarrow{VI}\,(x) \\ P_{\lambda 1}, P_{\lambda 2}, \cdots, P_{\lambda n} \end{pmatrix} \tag{5}$$

La scène entière est donc plongée dans un champ vectoriel associant à chaque point de l'espace un $\overrightarrow{VEI}(x)$. 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, les numéros de l'objet et de la surface contenant $x$, et le repère orthonormé local tangent à la surface.

On considère, pour un point $x$ donné, que le reste du monde est assimilable à une source ponctuelle, située à une *distance unitaire* dans la direction d'incidence moyenne $\overrightarrow{VI}(x)$, et de puissance $P$ telle que la luminance réfléchie dans la direction $\vec{\omega_r}$ soit égale à la luminance $L_{ind}(x, \vec{\omega_r})$ calculée avec (2) :

$$L_{ind}(x, \vec{\omega_r}) = \rho_d(x, \overrightarrow{VI}(x) \rightarrow \vec{\omega_r})\ P \tag{6}$$

### 3.3.3 Gradient d'éclairement

Un calcul de gradient est effectué lors de l'évaluation de l'intégrale de rendu (2). 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 [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 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 une zone de validité associée a chaque $VEI$, à l'intérieur de laquelle l'interpolation est possible.

Il est obtenu par dérivation de l'expression de l'éclairement (3) selon des déplacement dans un repère $(x, y, z)$ tangent à la surface.

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

Cependant le terme $\frac{\partial L_i(\theta_j, \phi_k)}{\partial a}$ n'est pas accessible. Il nous faut donc supposer que les déplacement dans le voisinage du point $x$ soient suffisamment petits pour admettre $\frac{\partial L_i(\theta_j, \phi_k)}{\partial a} = 0$ . Cette sévère approximation explique probablement le manque de précision du gradient.

$$\frac{\partial E}{\partial a} \approx \frac{2\pi}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} -L_i(\theta_j, \phi_k) \sin\theta_j \frac{\partial \theta_j}{\partial a} \tag{7}$$

Le terme $\frac{\partial \theta_j}{\partial a}$ s'obtient en étudiant les variations de l'angle d'incidence pour des *petits déplacements* du centre de l'hémisphère (figure 4).

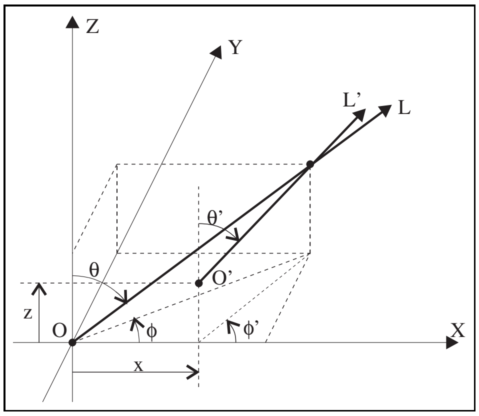


FIG. 4 - *Variation de l'angle d'incidence lorsque O se déplace en O'*

De simples considérations géométriques nous donnent alors :

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial x} = \frac{-\cos\theta_j \cos\phi_k}{R} \qquad \frac{\partial \theta_j}{\partial y} = \frac{-\cos\theta_j \sin\phi_k}{R} \qquad \frac{\partial \theta_j}{\partial z} = \frac{\sin\theta_j}{R} \tag{8}$$

où $R$ est la distance entre le point $O$ et le premier objet dans la direction $(\theta_j, \phi_k)$.

## 3.4 Interpolation pondérée

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

- Recherche des $n$ $VEI$ déjà calculés valides.
- Si $n$ n'est pas convenable, lancer un calcul complet, sinon attribuer à chaque $VEI$ valide un poids inversement proportionnel à l'erreur estimée qu'il risque d'introduire.
- Interpoler entre les $n$ $VEI$ valides.
- Calculer la luminance réfléchie avec l'équation (6).

### 3.4.1 Zone de validité

Un $VEI$ calculé en un point $A$ doit répondre à plusieurs critères pour être admis comme valide en un point $B$:

- Les points $A$ et $B$ doivent appartenir à la même surface du même objet.
- La distance $\| \overrightarrow{AB} \|$ doit être inférieure à la distance moyenne entre $A$ et le reste de la scène.
- La variation relative d'éclairement due au gradient doit être inférieure à un seuil 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 : $\cos(\overrightarrow{N_A}, \overrightarrow{N_B}) \geq S_{courb}$

### 3.4.2 Nombre de VEI pour interpoler

Le nombre $n$ de $VEI$ 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.

### 3.4.3 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 $VEI$, de valeur 1 lorsqu'un critère est parfaitement rempli, de valeur plus faible sinon :

$$w_i = \frac{1}{1 + \frac{\|\overrightarrow{AB}\|}{dmoy_i}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\overrightarrow{AB}.\overrightarrow{\Delta E}}{E_A}} \cdot \frac{\cos(\overrightarrow{N_A}, \overrightarrow{N_B}) - S_{courb}}{1 - S_{courb}} \tag{9}$$

### 3.4.4 Interpolation

$$\overrightarrow{VEI}(B) = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \, \overrightarrow{VEI}(A_i)}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{10}$$

C'est une interpolation classique, utilisant les poids calculés plus haut. Comme le nombre maximal d'échantillons acceptés est faible, cette opération est rapide. Le plus pénalisant est la recherche des $VEI$ valides, car il faut parcourir systématiquement des listes de grande taille. Des structures de données et des algorithmes mieux adaptés devraient améliorer cette recherche multi-critères.

# 4 Génération de l'image

Une première étape consiste à générer un germe de $VEI$ répartis aléatoirement dans la scène. Cette étape permet d'obtenir une répartition spaciale relativement homogène des $VEI$ 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 (6).

Il est à noter que l'ensemble des $VEI$ est mémorisé dans un fichier. Les informations sont indépendantes du point de vue et peuvent donc être réutilisées pour générer beaucoup plus rapidement d'autres images de la même scène. Bien que l'on soit toujours loin du temps réel, on peut envisager facilement la réalisation d'animations où seule la caméra se déplace. Cette méthode reste encore utilisable si quelques petits objets se déplacent, à la condition de tolérer quelques erreurs à leur proximité. L'ensemble des $VEI$ peut ainsi ne pas être recalculé pour toutes les images, d'où un important gain de temps.

# 5 Quelques résultats

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].

Les deux séries d'images suivantes illustrent l'utilisation de notre méthode avec une scène composée d'objets en matériau mat (une piece fermée, une table avec des pieds cylindriques, une lampes simplifiée dirigée vers le plafond), et d'une sphère placée sous la table, mate (simili-platre) dans le cas de la figure (5) et brillante (simili-acier) dans le cas figure (6).


Monte Carlo : 1 h 31 mn


1140 VEI : 5 mn


4950 VEI : 15 mn

FIG. 5 - *Sphère "mate" sous la table*

Bien qu'elle semble très simple, cette scène de test ne peut pas être traitée correctement en lancer de rayons "classique". En effet, les éléments intéressants sont situés sur le sol, alors que seule une faible zone du plafond est éclairée directement. La plus grande partie de l'image serait alors rendue visible par le terme ambiant, sans aucune justification physique.

La radiosité "classique" ne serait pas capable non plus de calculer correctement cette image, à cause de la présence d'objets courbes qui nécessitent une facétisation dans le cas de la figure (5), et à cause de la sphère réfléchissante dans le cas de la figure (6).

Seule la méthode de Monte Carlo n'est pas affectée par ces obstacles, mais les temps de calcul sont vraiment excessifs : plus de 90 minutes pour une taille de seulement 200x200 pixels, sur une machine Silicon Graphics Indigo, et avec un résultat très bruité (seulement 96 rayons par hémisphère). Une méthode de Monte Carlo moins naïve pourait améliorer ces temps et réduire le bruit, mais sans toutefois les ramener à des valeurs exploitables pour des scène plus complètes.

La méthode des VEI permet d'obtenir dans les deux cas une images visuellement acceptable en 15 minutes dans le cas mat et en 16 minutes dans le cas brillant. Les plus grande différences proviennent du lissage induit pas l'interpolation. Seule une notion cohérente de distance entre images permettrait de les comparer avec plus de précision.


FIG. 6 - *Sphère "brillante" sous la table*

Une première image peut être générée en 5 minutes environ, avec une tolérance plus grande. Bien que de nombreux détails soient faux (pied de la lampe trop clair et légères "fuites" de lumière sous la sphère), l'image donne de bonnes indications sur la répartition globale des éclairements.

La figure (7) représente une scène beaucoup plus complète, avec des objets texturés et des surfaces réfléchissantes plus nombreuses. Afin de valider notre méthode dans un cas difficile, une seule source volumique est située dans le lustre, et n'éclaire pas directement toute la pièce. Elle est simulée par un amas dense de 30 sources ponctuelles. Cette image a demandé environ 3 heures de calculs, pour près de 300 objets élémentaires. Avec une source ponctuelle unique de puissance équivalente, les calculs s'effectuent en 40 minutes environ pour une précision similaire, mais les ombres sont trop nettes.

D'autres images, en couleurs, sont disponibles à l'URL: `http://www.emse.fr/~jzaninet`

## 6 Evolutions prévues

- Amélioration de la méthode de Monte Carlo implémentée (échantillonnage d'importance) pour réduire la variance des calculs de $VEI$ et donc diminuer le nombre de rayons nécessaires.
- 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.
- Prise en compte optimisée de sources surfaciques.

## 7 Conclusion

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 d'erreur.

## Références

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

FIG. 7 - *Exemple de scène plus complète*


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

[Jen96] Henrik Wann Jensen, *Global illumination using photon maps*, Seventh Eurographics Workshop on Rendering, Porto (1996), 22–31.

[Kaj86] James T. Kajiya, *The rendering equation*, Siggraph **20** (1986), no. 4, 143–150.

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

[Mai96] Jean-Luc Maillot, *Pseudo-réalisme et progressivité pour le tracé de rayons*, Ph.D. thesis, Ecole des Mines de Saint-Etienne, September 1996.

[Roe93] Marc 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] Christophe Schlick, *An inexpensive brdf model for physically-based rendering*, Computer Graphics Forum **13** (1994), no. 3, 149–162.

[War94] Gregory J. Ward, *The radiance lighting simulation and rendering system*, Siggraph 94 (1994), 459–472.

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

[WRC88] Gregory J. Ward, Francis M. Rubinstein, and Robert D. Clear, *A ray tracing solution for diffuse interreflection*, Computer Graphics **22** (1988), no. 4, 85–92.