Accélération du calcul des vecteurs d'éclairement indirects

Xavier Serpaggi* — Bernard Péroche**

* *LISSE, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne*
158, cours Fauriel
42023 Saint-Etienne Cedex 2

xserpagg@emse.fr

** *LIGIM, bât. 710, université Claude Bernard, Lyon 1*
43, Boulevard du 11 novembre 1918
69622 Villeurbanne Cedex

bperoche@ligim.univ-lyon1.fr

RÉSUMÉ. *Pour qu'une image de synthèse puisse être qualifiée de photoréaliste, il est nécessaire de prendre en compte de nombreux phénomènes. L'un des plus importants est certainement la notion d'éclairement global et, plus précisément, indirect. En effet, le lancer de rayons « classique » considère qu'il n'existe que deux états possibles par rapport à la lumière : soit le point y est exposé, soit le point est dans l'ombre. De nombreux travaux basés sur le lancer de rayons ont tenté de proposer des solutions pour « éclairer les zones d'ombre ». Ils ont tous les mêmes faiblesses : des temps de calcul élevés et la nécessité de bien comprendre l'algorithme utilisé pour régler ses nombreux paramètres. Nous proposons, dans cet article, une méthode générique de calcul de l'éclairement indirect, basée sur le principe de Monte Carlo et s'aidant des méthodes d'analyse séquentielle, qui se veut rapide et quasi automatique.*

ABSTRACT. *In computer graphics, several phenomema need to be taken into account when it comes to the field of photo-realism. One of the most relevant is obviously the notion of global, and more precisely indirect, illumination. In "classical" ray-tracing if you are not under the light, then you are in a shadow. A great amount of work has been carried out which proposes ray-tracing based solutions to take into account the fact that "there is a certain amount of light in shadows". All of these methods carry the same weaknesses: high computation time and a lot of parameters you need to manage to get something out of the method. This paper proposes a generic computation method of indirect illumination based on Monte Carlo sampling and on the sequential analysis theory, which is faster and more automatic than classical methods.*

MOTS-CLÉS : *lancer de rayons, éclairement global, méthode de Monte Carlo, vecteurs lumineux, analyse séquentielle, photoréalisme.*

KEYWORDS: *Ray tracing, global illumination, Monte Carlo methods, light vectors, sequential analysis, photo-realism.*

1. Introduction

Depuis son apparition, la synthèse d'images s'est efforcée de reproduire le monde environnant aussi fidèlement que possible. Un cap décisif a été franchi avec l'avènement des algorithmes d'éclairement global qui permettent de simuler la grande majorité des phénomènes physiques liés à la lumière. Ces algorithmes sont principalement de deux types et les plus anciens sont basés sur la radiosité. Ce dernier principe, emprunté au domaine du transfert thermique et présenté pour la première fois dans [GOR 84], a pour but de trouver un état d'équilibre des interactions lumineuses entre les différentes parties d'une scène. Ces premiers types d'algorithmes étaient capables de calculer des images ne contenant que des surfaces lambertiennes et nécessitaient une phase de précalcul très importante. En 1986, pour la première fois, fut proposé un second type d'algorithmes, utilisant la technique du lancer de rayons – qui ne se limitait donc pas aux surfaces diffuses – capable de résoudre des problèmes d'éclairement global. C'est Kajiya [KAJ 86] qui présenta l'équation de rendu ainsi qu'une méthode de résolution numérique nommée *path-tracing* basée sur la technique d'échantillonnage de Monte Carlo. Le principe est de collecter la luminance incidente à un pixel grâce à des chemins lancés aléatoirement dans la scène. Bien que permettant de prendre en compte la totalité des chemins lumineux possibles, cette méthode pose d'autres problèmes tels que les temps importants nécessaires au calcul des images et le caractère fortement bruité de ces dernières.

Des méthodes hybrides multipasses ont été mises au point pour lesquelles la radiosité est utilisée pour calculer les réflexions purement diffuses de l'éclairement et le lancer de rayons pour soit calculer les contributions spéculaires [CHE 91, SIL 89], soit guider le processus de radiosité à trouver plus rapidement la distribution de l'éclairement [WAL 89]. D'autres méthodes, uniquement basées sur la radiosité, tentent de trouver plus rapidement une solution, soit en calculant en priorité et plus précisement les zones à forte importance [SMI 94], soit en construisant une représentation hiérarchique des facteurs de forme et en garantissant qu'ils sont calculés avec une erreur ne dépassant pas un seuil fourni par l'utilisateur [HAN 91]. Jensen, dans [JEN 96], propose également une méthode multipasse qui allie la simplicité du comportement corpusculaire de la lumière aux techniques de Monte Carlo, mais qui utilise uniquement le lancer de rayons. La *photon-map* est créée en distribuant dans la scène des photons émanant des sources de lumière. Ensuite, l'éclairement indirect est évalué en considérant la densité locale de photons autour d'un point, ainsi que leur énergie respective. Cette méthode s'avère très efficace pour les problèmes d'éclairement indirect, mais également pour les caustiques.

D'autres solutions génériques basées sur le lancer de rayons et physiquement plausibles ont été proposées ; parmi les plus célèbres, nous trouvons le *bi-directional path-tracing* présenté par Lafortune *et al.* [LAF 93, LAF 94] et par Veach *et al.* [VEA 94, VEA 95]. Cette méthode complète la méthode originale proposée par Kajiya en suivant des chemins lumineux qui partent à la fois de la position d'observation et des sources lumineuses, pour ensuite forcer les échanges énergétiques entre les deux. Ceci permet, à temps de calcul équivalent, d'obtenir des images moins bruitées. Néanmoins, un nombre très élevé de rayons par pixel est nécessaire pour obtenir des images d'une qualité acceptable. Plus récemment, Veach *et al.* proposent une nouvelle déclinaison de la méthode de Monte Carlo : *Métropolis* [VEA 97]. Chaque chemin lumineux entre la position d'observation et les sources de lumière est muté en plusieurs autres chemins selon différentes stratégies. Chaque mutation est alors acceptée ou rejetée en fonction de la contribution des chemins à l'image finale. Plus sa contribution sera importante, plus une mutation aura de chances d'être conservée. Par rapport aux méthodes classiques de Monte Carlo, cette solution a l'avantage d'être non biaisée et de pouvoir prendre en compte une plus grande variété de phénomènes physiques.

Certaines méthodes utilisent à la fois les limitations et les avancées des ordinateurs. Keller propose d'allier les techniques de quasi Monte Carlo [KEL 96] qui n'échantillonnent une fonction qu'en des coordonnées discrètes, aux accélérateurs graphiques qui permettent de calculer des images texturées en temps réel. Ceci permet de calculer des images, prenant en compte l'éclairement global, en temps interactif [KEL 97].

Enfin, une technique originale présentée par Zaninetti *et al.* dans [ZAN 98] et basée sur les travaux de Ward [WAR 88, WAR 92], les *vecteurs d'éclairement*, permet de tirer partie des avantages des méthodes de Monte Carlo, en évitant d'avoir des temps de calcul prohibitifs. Pour cela, les différents types d'éclairement sont remplacés par autant de catégories de vecteurs lumineux dont il est possible d'interpoler les valeurs au lieu de les recalculer. Bien qu'il soit plus rapide que les méthodes classiques de Monte Carlo, cet algorithme s'avère encore trop lent pour obtenir un rendu interactif, ce vers quoi nous aimerions le faire évoluer.

Nous proposons dans cet article une méthode générique permettant, en une seule passe, d'accélérer de manière significative le calcul des *vecteurs d'éclairement* en nous basant sur les principes de l'analyse séquentielle tels qu'ils furent introduits par Wald dans [WAL 47]. Pour cela, nous commencerons par décrire, dans la section 2, la méthode originale de calcul des *vecteurs d'éclairement indirects* proposée par Zaninetti *et al.* Nous présenterons ensuite, dans la section 3, les notions d'analyse séquentielle nécessaires à la compréhension de notre méthode et nous expliquerons, dans la section 4, comment elles peuvent servir au calcul des *vecteurs d'éclairement*, calcul que nous développerons dans la section 5. Nous fournirons quelques résultats dans la section 6, avant de conclure dans la section 7.

2. Les vecteurs d'éclairement indirects

Le principe des *vecteurs d'éclairement* (VE) consiste à remplacer l'éclairement d'une scène par une source de lumière virtuelle en chaque point où ils sont calculés et d'interpoler les vecteurs ainsi obtenus quand cela est possible ; ceci a pour principal effet de réduire les temps de calcul. Nous pouvons distinguer trois types de VE, qui représentent les trois types d'éclairement auxquels nous sommes susceptibles d'être confrontés :

– les *vecteurs d'éclairement directs* (VED), pour l'éclairement qui arrive directement des sources de lumière sur les objets de la scène,

– les *vecteurs d'éclairement indirects* (VEI), pour l'éclairement qui arrive sur les objets de la scène après au moins une réflexion sur un objet non spéculaire,

– les *vecteurs d'éclairement caustiques* (VEC), pour l'éclairement qui arrive sur les objets non spéculaires de la scène, après avoir été réfléchi ou réfracté par des surfaces non lambertiennes.

Cette méthode de lancer de rayons, bien que basée sur le principe de Monte Carlo, est beaucoup moins coûteuse et permet des résultats visuellement équivalents en des temps bien plus raisonnables.

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons plus particulièrement à la notion de *vecteur d'éclairement indirect*. Chaque vecteur, agissant comme une source de lumière virtuelle, permet d'obtenir une estimation de l'éclairement indirect dans la scène.

2.1. *Principe de calcul des VEI*

L'équation de rendu (équation 1), exprimée ici en termes de luminance, indique que la luminance émise par un point x de la scène dans une direction $\vec{\omega}_r$ dépend de la luminance propre L_e émise par ce point, des luminances incidentes L_i atteignant ce point depuis toutes les directions $\vec{\omega}_i$ du demi-espace Ω et de la *fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle* ρ, fonction qui est un modèle représentant la façon dont un matériau réfléchit la lumière. Dans le reste de cet article, nous utiliserons, pour cette fonction, l'acronyme anglais consacré BRDF (*bidirectional reflectance distribution function*).

$$L_r(x,\vec{\omega}_r) = L_e(x,\vec{\omega}_r) + \int_\Omega \rho(x,\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r) L_i(x,\vec{\omega}_i) cos\theta_i d\omega_i \qquad [1]$$

Si nous décomposons cette équation dans le but de faire apparaître les différents types d'éclairement, nous obtenons :

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

où $L_{dir}(x,\vec{\omega}_r)$ est la composante directe de l'éclairement, $L_{spec}(x,\vec{\omega}_r)$ correspond au pic spéculaire et $L_{ind}(x,\vec{\omega}_r)$ à la composante indirecte, celle qui nous intéresse ici.

Si nous discrétisons l'équation de rendu, une approximation de la partie correspondant à l'éclairement indirect peut s'écrire sous la forme :

$$L_{ind}(x,\vec{\omega}_r) \approx \frac{2\pi}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} \rho_d(x,\vec{\omega}_{j,k} \rightarrow \vec{\omega}_r) L_i(x,\theta_j,\phi_k) cos\theta_j \qquad [2]$$

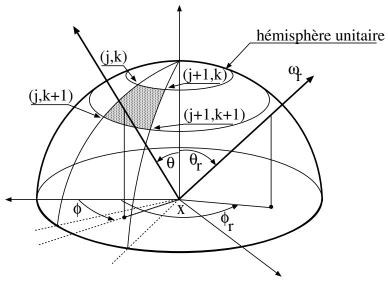


Figure 1. *Echantillonnage de l'hémisphère*

avec M et N correspondant au nombre de découpages, à angle solide constant, d'un hémisphère centré en x, selon les angles azimutal et zénithal respectivement. Dans l'équation 2, ρ_d représente la partie non purement spéculaire de la BRDF .

Comme illustré sur la figure 1, chaque cellule (j, k) ainsi créée sert de support à un rayon qui donnera des informations sur l'énergie incidente en x selon la direction (θ_i, ϕ_k) ayant subi au moins une réflexion sur une surface diffuse.

Une fois les informations énergétiques récoltées pour l'ensemble des cellules, il est possible de déduire une luminance moyenne P_0 de l'éclairage émis par le point x. Cette information va, à son tour, permettre de déduire l'éclairement P et la direction $\vec{D}$ d'une source virtuelle, qui après passage dans la BRDF au point x, produira un éclairement P_0. Les deux grandeurs P et $\vec{D}$ forment le VEI comme décrit dans l'équation 3.

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = P f_r(x, \vec{D} \rightarrow \vec{\omega}_r) \qquad [3]$$

2.2. *Commentaires sur la méthode*

La méthode originale de calcul des VEI est très performante comparée aux méthodes classiques de Monte Carlo. Non seulement elle produit des images moins bruitées, mais elle permet également des gains de temps significatifs. Cependant, nous pensons que ces deux points peuvent encore être améliorés, notamment sur les aspects suivants :

– calcul du germe pour permettre l'interpolation,

– critères d'interpolation de l'éclairement,

– nombre de rayons nécessaires au calcul d'un VEI.

C'est à ce dernier aspect que la méthode présentée ici est consacrée. Nous allons tenter d'apporter des solutions qui vont nous permettre de lancer moins de rayons et de ce fait, de gagner du temps. Bien entendu, il ne suffit pas de lancer moins de rayons, encore faut-il que l'information qui en ressort soit pertinente et exploitable par le reste de la méthode. C'est pourquoi nous avons basé notre optimisation sur la notion d'homogénéité, en faisant l'hypothèse que certaines zones présentent un éclairement indirect plus régulier que d'autres. Pour confirmer cela, nous emploierons des méthodes statistiques, regroupées sous l'appellation d'*analyse séquentielle*, qui permettent de déterminer, de manière incrémentale, si une zone correspond ou non à certains critères d'homogénéité.

3. Analyse séquentielle

L'*analyse séquentielle* est un ensemble de méthodes statistiques dont une des principales particularités est que le nombre d'observations nécessaires à l'obtention du résultat n'est pas fixé à l'avance. La décision qui mettra fin à l'expérience dépend, à chaque étape, des observations effectuées précédemment. De ce fait, cette méthode nécessite, en moyenne, moins d'observations que des méthodes équivalentes pour pouvoir arriver à un résultat. La technique exposée ici est une branche particulière de l'analyse séquentielle qui a été développée par Wald [WAL 47] : le *test séquentiel du rapport de vraisemblance* (TSRV par la suite). Ce test, si nous le comparons aux meilleures méthodes basées sur un nombre d'échantillons constant, peut économiser jusqu'à 50 % d'observations pour parvenir à vérifier une hypothèse.

3.1. *Test séquentiel du rapport de vraisemblance*

Dans son ouvrage, Wald présentait ce test comme « le test séquentiel du rapport de vraisemblance pour tester une simple hypothèse H_0 contre une unique alternative H_1 ». En développant, cela peut s'exprimer comme suit : soit une population donnée P, dont nous savons qu'elle ne comporte que deux types distincts d'individus T_0 et T_1 ; nous appelons p le pourcentage, inconnu, d'individus du type T_1 et notre objectif est de savoir si la population est plutôt de ce type ou du type T_0. Pour cela, nous choisissons deux probabilités significatives p_0 et p_1, telles que $0 < p_0 < p_1 < 1$ et qui nous permettent de trancher sur la nature de la population : elle sera de type T_0 si $p = p_0$ et de type T_1 si $p = p_1$. Nous appelons H_0 l'hypothèse que $p = p_0$ et H_1 l'hypothèse que $p = p_1$.

Soit x un individu tiré au hasard dans la population. Nous notons $f(x, p)$ la fonction décrivant sa probabilité d'apparition au sein de P. $f(x, p_0)$ représente donc cette probabilité quand H_0 est vraie et $f(x, p_1)$ quand H_1 est vraie.

La probabilité qu'un échantillon $(x_1, \cdots, x_m)$ soit choisi au hasard, les tirages $x_1, \cdots, x_m$ étant indépendants, est donc égale à :

$$p_{0m} = f(x_1, p_0) \cdots f(x_m, p_0)$$

quand H_0 est vraie et à :

$$p_{1m} = f(x_1, p_1) \cdots f(x_m, p_1)$$

quand H_1 est vraie, m étant un entier non nul.

Le TSRV est alors défini comme ceci (A et B étant deux constantes positives telles que $B < A$) :

– si $\frac{p_{1m}}{p_{0m}} \geq A$, le test se termine par rejet de l'hypothèse H_0 (et donc acceptation de l'hypothèse H_1) ; la population est de type T_1,

– si $\frac{p_{1m}}{p_{0m}} \leq B$, le test se termine par acceptation de l'hypothèse H_0 ; la population est de type T_0,

– sinon, le test continue en effectuant un nouveau tirage.

Le principe est donc de réévaluer à chaque fois le rapport $\frac{p_{1m}}{p_{0m}}$ puis de faire les comparaisons avec les constantes A et B. Wald a démontré dans son ouvrage que, pour les risques α et β présentés dans le paragraphe suivant, la probabilité que le test se termine est de 1.

3.2. *Notion de risques*

Les deux constantes A et B ne sont pas choisies au hasard. Elles sont liées aux hypothèses H_0 et H_1, plus précisément aux risques α et β que l'on est prêt à associer à ces hypothèses. En effet, nous tentons de déterminer la nature d'une population à partir de simples observations. En ce sens, nous devons être conscients que nous pouvons commettre une erreur d'appréciation. Dans le cas du TSRV, les limites que nous nous fixons vis-à-vis de cette erreur sont représentées par α et β. La probabilité de rejeter H_0 quand cette hypothèse est vraie est représentée par α, alors que β correspond à la probabilité d'accepter H_0 alors que H_1 est vraie. Wald a montré que si l'on désire que le test se termine avec ces risques, les grandeurs A, B, α et β doivent être liées par les relations suivantes : $A = \frac{1-\beta}{\alpha}$ et $B = \frac{\beta}{1-\alpha}$.

4. Méthode proposée

La méthode proposée ici a pour but d'améliorer la *qualité* de calcul d'un VEI. Il est important de remarquer que cette méthode est aussi générique que possible, compte tenu du contexte dans lequel nous évoluons. En ce sens, aucune optimisation n'est faite pour favoriser telle ou telle représentation de scène, ou telle ou telle BRDF (qu'elle soit analytique ou bien mesurée).

Le terme *qualité*, employé plus haut, est à prendre au sens large. Nous allons tenter de calculer plus rapidement chaque VEI et, en même temps, faire que ce calcul soit plus pertinent. En fait, ces deux buts peuvent être intimement liés, puisqu'une solution pour que le calcul soit plus représentatif est de répartir les échantillons de la luminance incidente de manière telle que leur contribution soit la plus importante possible. Si ce but est atteint, à nombre d'échantillons égal, le résultat sera meilleur.

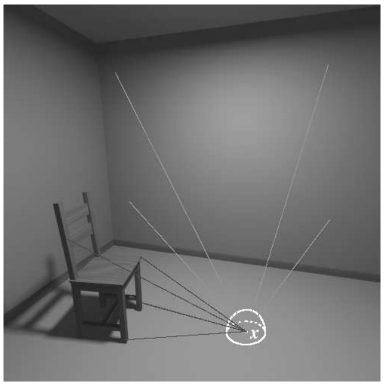


Figure 2. *Les zones « vues » par un VEI ne sont pas toutes homogènes. L'éclairement arrivant en x au travers de la zone délimitée par les traits gris foncés est beaucoup plus irrégulier que celui y arrivant par la zone que délimitent les traits gris clairs*

4.1. *Calculer moins ou calculer mieux ?*

En lancer de rayons, une manière évidente d'accélérer les calculs est d'en faire moins. Pour cela, ils doivent être faits uniquement aux endroits présentant des singularités, sans s'attarder sur les zones moins intéressantes. Cette dernière notion est à son tour très subjective et nous avons opté pour l'homogénéité. Notre notion d'homogénéité doit être simple pour qu'il y ait peu de calculs nécessaires à son évaluation, mais elle doit néanmoins être représentative du phénomène que nous tentons de simuler. C'est pourquoi nous avons choisi de déclarer une zone homogène si un pourcentage P_h des échantillons qui y sont tirés a une luminance L_x appartenant à $[L_m - \epsilon, L_m + \epsilon]$, où L_m représente la luminance moyenne de la zone et ϵ une constante arbitraire. Plus précisément, nous ne considérons pas la luminance incidente au point x, mais celle réfléchie en ce point, c'est-à-dire après filtrage par la BRDF du matériau. Ceci permet de s'affranchir des problèmes liés aux matériaux à lobe spéculaire : « devons-nous privilégier le peu d'énergie qui arrive dans la direction du lobe ou plutôt la forte énergie qui arrive dans une autre direction ? » Après atténuation par la BRDF , toute l'énergie est sur un même pied d'égalité puisque nous ne nous intéressons qu'à une unique direction de réflexion.

Par exemple, sur la figure 2, nous remarquons que la luminance indirecte arrivant en x n'est globalement pas homogène. En effet, les traits clairs délimitent une zone d'où l'éclairement parvient en x peu perturbé, alors que les traits foncés présentent un secteur beaucoup plus chaotique, la chaise perturbant le champs lumineux. L'idée, pour cet exemple, est donc de parvenir le plus rapidement possible à déterminer que la première zone est peu perturbée pour axer les efforts sur la seconde. Pour cela, nous allons utiliser le TSRV comme un outil qui permettra de différencier ces deux zones.

Pour pouvoir appliquer ce test, il est nécessaire de disposer d'une population et de deux hypothèses :

– notre population sera l'ensemble des luminances réfléchies au point x dans la direction d'observation par chaque rayon utilisé pour l'échantillonnage de l'hémisphère ;

– nos hypothèses seront les suivantes :

- H_0 : la zone échantillonnée est homogène (dans le sens défini précédemment), elle est classée avec le type T_0,

- H_1 : la zone échantillonnée n'est pas homogène, elle est classée avec le type T_1.

L'hémisphère centré en x est découpé, *a priori*, en cellules ayant toutes le même angle solide. Chacune de ces cellules sera une zone dans laquelle nous appliquerons le TSRV.

– Si une zone est déclarée homogène, il n'est plus nécessaire, pour elle, de lancer d'autres rayons et nous pouvons traiter la suivante ;

– si nous ne parvenons pas à déterminer de quel type est la zone, nous tirons d'autres échantillons jusqu'à ce que nous soyons capables de le faire ;

– si la zone est déclarée comme étant non homogène, nous la subdivisons en quatre sous-régions puis nous relançons le test dans chacune d'elles.

Chacune des sous-zones va donc être à son tour évaluée et, à chaque fois, le but est de déterminer si elle est homogène ou non.

Une fois toutes les zones classées dans la catégorie T_0, le calcul du VEI peut avoir lieu en déterminant la puissance et la direction de la source virtuelle qui va remplacer l'éclairement indirect en ce point.

4.2. *Cohérence des grandeurs physiques*

Si nous revenons sur la méthode de calcul des VEI telle qu'elle a été introduite (cf. paragraphe 2.1), nous remarquons qu'à chaque cellule obtenue après le découpage à angle solide constant de l'hémisphére est associé un rayon et un seul. De ce fait, la luminance transportée par chacun de ces rayons peut être calculée simplement, puisque l'angle solide d'une cellule est égal à l'angle solide de la demi-sphère divisé par le nombre de cellules. Ceci correspond à un échantillonnage stratifié de l'hémisphère où toutes les strates ont la même taille. Ce n'est plus le cas de notre méthode où le nombre de cellules n'est pas fixé à l'avance et où chacune d'elles sert de support à plusieurs rayons. L'objectif de ce paragraphe est d'expliquer comment, à partir de la distribution de rayons obtenue après le découpage de l'hémisphère par la méthode d'analyse séquentielle, nous construisons des strates contenant chacune un rayon et un seul. Chaque rayon se verra attribuer un angle solide correspondant à la surface de la strate à laquelle il appartient et ainsi, le calcul des différentes luminances incidentes pourra être effectué correctement.

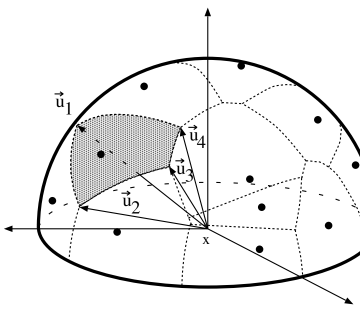


Figure 3. *Diagramme de Voronoï sur l'hémisphère et calcul de l'angle solide associé*

La méthode d'analyse séquentielle employée plus haut a permis de déterminer les zones de l'hémisphère où l'éclairement incident est homogène. Le résultat est donc une structure, assimilable à un *quad-tree*, dont chaque feuille contient plusieurs rayons. A ce stade, nous ne sommes plus intéressés que par la répartition des rayons et nous ne conservons aucune autre information sur le *quad-tree*. Il faut donc, à partir de ces rayons, construire une nouvelle structure qui découpera l'hémisphère de telle façon que sa surface soit entièrement occupée et que chaque nouvelle cellule ainsi créée ne contienne qu'un seul rayon. Ces conditions sont parfaitement remplies par un diagramme de Voronoï dont les sites correspondent aux intersections des rayons avec l'hémisphère unitaire centré en x. La projection d'un hémisphère sur un plan ne conservant si les distances ni les angles, il est nécessaire de construire ce diagramme directement sur l'hémisphère, comme exposé dans [AUG 85]. Ceci nous permet donc de réaliser, *a posteriori*, un échantillonage stratifié de l'hémisphère. La stratification est simplement adaptée à la nature de la BRDF de par le découpage initial dû à la méthode d'analyse séquentielle. De ce fait, l'utilisation de BRDF complexes, comme par exemple des BRDF mesurées, devient relativement aisée.

Il est à présent nécessaire de calculer la valeur de l'angle solide associé à chaque cellule du diagramme de Voronoï. En utilisant les notations de la figure 3, cet angle solide nous est donné par la formule suivante, extraite du livre de Berger [BER 77, p. 50–67] :

$$\omega_s = \sum_{i=1}^{N} cos^{-1}\left(\frac{(\vec{u_i} \wedge \vec{u}_{i+1}) \cdot (\vec{u}_i \wedge \vec{u}_{i-1})}{\| \vec{u}_i \wedge \vec{u}_{i+1} \| \| \vec{u}_i \wedge \vec{u}_{i-1} \|}\right) - (N-2)\pi$$

Grâce à cela, à chaque rayon est associé un angle solide correct et il est possible d'obtenir une valeur de luminance qui ne soit pas faussée.

Ainsi, de la même manière que pour la méthode originale, un VEI et un seul est calculé pour chaque hémisphère. Grâce à notre méthode, ses composantes (P et $\vec{D}$) sont évaluées de manière plus précise.

5. Détails de la mise en œuvre

Pour pouvoir appliquer le TSRV au calcul des VEI , nous avons dû procéder aux quelques adaptations que nous détaillons ici.

Initialisation du test

Notre définition de l'homogénéité fait appel à la valeur moyenne L_m de la luminance de la zone, mais également à la valeur de la luminance maximale L_{Max} présente dans cette zone. En fait, ϵ représente un pourcentage de la luminance maximale. Ceci permet d'adapter le critère à chaque zone et, de ce fait, de rendre le test plus souple.

A chaque nouvel échantillon, la valeur de L_{Max} devrait être remise en cause et celle de L_m recalculée. Ceci ne semble pas très approprié à notre cas. Nous voulions disposer d'une méthode incrémentale, nous avons donc décidé de déterminer la valeur maximale L_{Max} et de calculer une valeur moyenne L_m de la luminance de la zone à partir d'un nombre fixe d'échantillons. Ce sont dix valeurs par cellule qui servent de références. Par la suite, si le type de la zone ne peut être déterminé directement, les futurs échantillons ne modifieront pas les valeurs L_{Max} et L_m.

Si une cellule doit être divisée, les échantillons précédemment tirés sont répartis en fonction de leur position géographique dans cette cellule. Bien sûr, après avoir réparti les rayons, il se peut que chaque sous-zone en ait obtenu moins de dix. C'est pourquoi, avant de recalculer L_{Max} et L_m dans une de ces sous-zone, nous relançons, si nécessaire, des rayons, pour arriver à dix. Cette répartition, complétée si nécessaire, permet de ne pas tirer systématiquement dix nouveaux échantillons.

Dans le cas où nous ne savons pas déterminer le type de la zone, nous tirons non pas un, mais deux échantillons supplémentaires. En faisant cela, nous évitons de recalculer les valeurs de p_{0m} et p_{1m} à chaque nouvel échantillon. Ces grandeurs ne sont réévaluées que tous les deux tirages. Nous aurions pu retarder encore plus leur calcul, mais c'était prendre le risque de lancer plus de rayons que nécessaire à la détermination du type de la zone.

Etalonnage

Nous avons ensuite fixé les valeurs de α, β, A, B et ϵ. Ceci a été fait en utilisant une scène composée d'une pièce vide éclairée par une source plane, cette dernière étant positionnée au centre du plafond. Ce choix a été fait en considérant que, si pour un cas aussi simple la méthode se comporte correctement, alors les valeurs obtenues seront un bon point de départ pour des cas plus élaborés.

Après de nombreux essais, nous avons obtenu pour les deux premières constantes les valeurs $\alpha = 0.44$ et $\beta = 0.55$. Les valeurs de A et de B découlent des valeurs de α et β, comme indiqué à la section 3 et sont fixées à $A = 1.0227$ et $B = 0.9821$. Les valeurs proposées pour α et β décrivent une zone d'incertitude très fortement restreinte. Ceci permet d'obtenir un résultat plus rapidement en satisfaisant l'une ou l'autre des hypothèses avec peu d'échantillons.

La valeur retenue pour ϵ est $0,25$, soit 25 % de L_{Max} de part et d'autre de L_m. Nous pensons que cette valeur, bien qu'apparemment élevée, se justifie par l'hypothèse couramment admise en synthèse d'images qui est que *l'éclairement indirect varie lentement*.

Ces cinq constantes, trouvées de manière expérimentale, se sont avérées tout à fait adaptées à l'ensemble des cas que nous avons pu rencontrer jusqu'alors. Notre but est de trouver un compromis qui puisse fonctionner avec toutes les scènes, ce qui permet de réduire le nombre de paramètres à fournir à l'algorithme.

Limite de la récursion

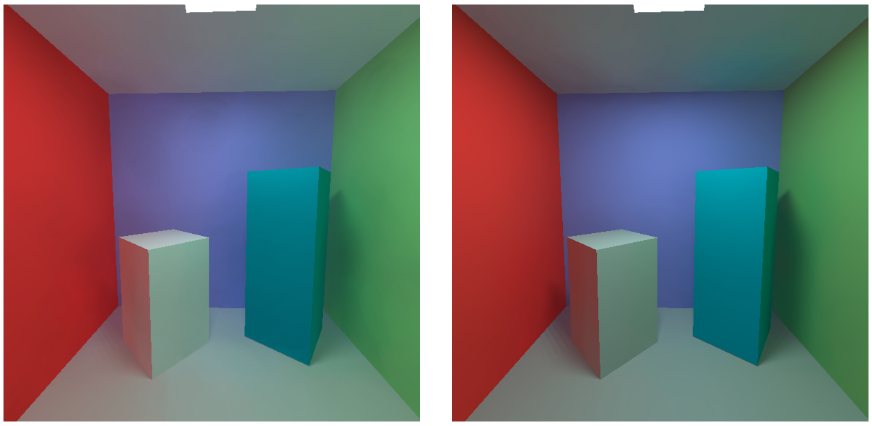
Dans le cas où une zone est déclarée non homogène, nous avons vu qu'elle est divisée en quatre sous-zones dans lesquelles le processus du TSRV est relancé. Ce mécanisme de récursion est limité dans notre mise en œuvre pour éviter que les calculs ne s'allongent inutilement. Il ne semble pas nécessaire de diviser une cellule de l'hémisphère plus de trois fois, soit 64 sous-cellules. Les tests que nous avons réalisés ont montré qu'au-delà, les temps de calculs deviennent trop importants pour le bénéfice apporté. Bien sûr, le seul moyen de comparaison à notre disposition est notre œil. La notion de *qualité* est hautement subjective et nous ne possédons pas encore d'algorithme capable de discernement objectif. L'hémisphère, dans le pire des cas, sera donc découpé en $3 \times 4 \times 64 = 768$ cellules, soit au minimum $7\ 680$ rayons. Ceci est largement supérieur à ce que proposait la méthode originale de calcul des VEI et permet d'isoler les zones présentant des singularités.

6. Résultats

Les résultats que nous présentons ici ont été obtenus à l'aide d'un *processeur MIPS R12000* à 270 MHz disposant de 512 Mo de mémoire. Chacune des images a été calculée avec une résolution de 600 $\times$ 600 pixels.

Les deux premières images (figure 4) permettent de se rendre compte que, pour une impression visuelle équivalente, notre algorithme permet d'obtenir un temps de calcul moins élevé qu'avec la méthode originale. Les deux suivantes (figure 5) permettent de souligner le fait que, si l'accélération n'est pas présente, la qualité semble tout de même améliorée. Enfin, les deux dernières (figure 6) permettent de se rendre compte que notre méthode supporte la présence de nombreux types d'éclairement dans un environnement complexe.

Sur la série d'images de la figure 4, la classique *Cornell Box* profite assez largement de la méthode : il y a peu d'objets et ils sont relativement volumineux ; de ce fait, les zones homogènes sont rapidement détectées et le calcul des VEI avec notre algorithme est plus rapide que celui de la méthode originale. Pour obtenir une image de qualité équivalente, c'est-à-dire indiscernable à l'œil, avec la méthode originale, il est nécessaire de lancer $1\ 024$ rayons par hémisphère. Dans le cas de cette scène présentant de relativement fortes variations de l'éclairement indirect, notre algorithme



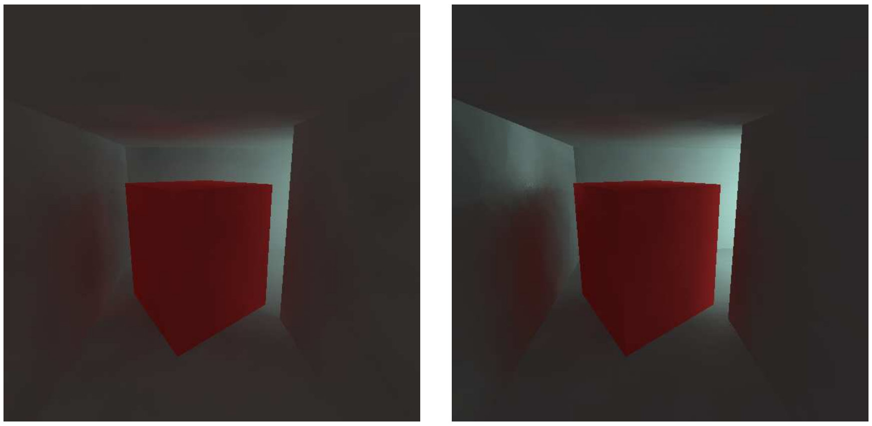
(a) (b)

Figure 4. *Comparaison de la méthode originale de calcul des VEI et de notre méthode sur la scène classique de la Cornell Box. (a) : image calculée avec la méthode originale utilisant 1 024 rayons par hémisphère en 866 secondes. Le nombre de VEI calculés est de 900 ; (b) : image calculée avec notre méthode en 351 secondes avec, en moyenne, 207 rayons par hémisphère. Le nombre de VEI calculés est de 1 580*

génère un nombre total de VEI plus important. Ceci est dû au fait que les critères d'interpolation ne sont pas satisfaits. De ce fait, il sera plus souvent nécessaire de procéder à une évaluation complète de l'éclairement indirect. Nous expliquons cela par le fait que notre méthode décrit plus précisément que la méthode originale l'éclairement indirect dans la scène, accentuant ainsi les différences entre les zones où il présente des discontinuités. Ce phénomène peut être observé plus particulièrement dans les zones d'ombre, beaucoup plus contrastées. Nous pouvons également remarquer que sur le plafond de l'image *(b)* de la figure 4, la lumière réfléchie par les sommets des cubes est mieux rendue. Cela ne semble pourtant pas justifier une telle différence de VEI calculés et c'est pourquoi nous pensons que les mécanismes mis en jeu pour l'interpolation ne sont plus tout à fait adaptés à notre méthode.

Sur les images de la figure 5, nous pouvons voir un couloir obstrué par un cube rouge, avec un éclairement en majeure partie indirect. La difficulté sur une telle image pour un algorithme d'éclairement indirect, est de bien retracer l'ombre du cube dans la partie du couloir qui n'est pas éclairée directement. Nous pouvons remarquer que la méthode originale n'y parvient pas tout à fait et que le cube semble *flotter* au-dessus du sol. Avec notre méthode, le problème est en grande partie résolu, même si le résultat est encore perfectible. L'échantillonnage adaptatif de l'éclairement indirect parvenant en un point nous permet de délimiter la transition due à la présence du cube.

La figure 6 présente un exemple plus complexe contenant 198 primitives CSG et mettant en jeu une large palette de problèmes d'éclairement global. Dans ce cas, notre méthode a su s'adapter à l'environnement (1 047 rayons par VEI en moyenne) et la



(a) (b)

Figure 5. *Cas où l'éclairement est en majorité indirect et où le gain est réalisé sur la qualité de l'image plutôt que sur le temps de calcul. (a) : image calculée avec la méthode originale en 567 secondes. Le nombre de rayons par VEI est de 1 024. Le nombre de VEI calculés est de 2 405. (b) : image calculée avec notre méthode en 592 secondes. Le nombre moyen de rayons par VEI est de 174. Le nombre de VEI calculés est de 2 636*

description de l'éclairement qui en résulte est meilleure puisque le nombre total de VEI est moindre.

Remarques sur le gain de temps

Comme nous pouvons le remarquer, le gain de temps n'est pas une fonction linéaire du gain en nombre de rayons lancés. Ceci peut être expliqué aisément si l'on remarque que le processus d'évaluation de la nature de la zone est relativement coûteux. C'est pour cette raison que le choix du critère d'homogénéité s'est porté sur une simple notion d'appartenance à un intervalle plutôt que sur la valeur de la variance de la zone, grandeur souvent employée en synthèse d'images, mais dont le coût est trop élevé en regard du nombre de fois où elle doit être évaluée. De plus, il peut sembler que les temps obtenus pour des scènes si simples sont élevés comparé à ce que certaines méthodes actuelles pourraient accomplir. Nous rappelons que la mise en œuvre de cette méthode ne se base sur aucun *a priori* comme précisé à la section 4. De plus, aucun matériel spécialisé n'est utilisé pour accélérer l'affichage et donc le calcul des images. De ce fait, cette méthode peut être utilisée pour tout type de géométrie et de modèle de matériau, mais est également facile à adapter sur n'importe quelle plateforme matérielle, puisqu'elle est purement logicielle.

(a) (b)

Figure 6. *Cas complexe mettant en œuvre de nombreux phénomènes d'éclairement global. (a) : image calculée avec la méthode originale en 3 heures 52 min. Le nombre de rayons par VEI est de 1 024. Le nombre de VEI calculés est de 4 728. (b) : image calculée avec notre méthode en 3 heures 50 min. Le nombre moyen de rayons par VEI est de 1 047. Le nombre de VEI calculés est de 4 513*

7. Conclusion

Nous avons développé une méthode permettant d'accélerer le calcul des *vecteurs d'éclairement indirects* en mettant en évidence les zones qui nécessitent plus de calculs et en y concentrant nos efforts. Ceci a également permis d'obtenir des images moins bruitées. La méthode *d'analyse séquentielle* que nous utilisons ici peut être utilisée pour les deux autres phases importantes du calcul d'éclairement indirect. En effet, nous envisageons de l'utiliser, premièrement, pour améliorer le calcul du germe de VEI nécessaire à l'interpolation ultérieure et deuxièmement, pour améliorer le processus d'interpolation par lui-même, puisque nous avons vu précédemment qu'il n'est plus tout à fait adapté à notre méthode. Chacune de ces étapes bénéficiera donc d'une méthode adaptative, ce qui réduira le nombre de paramètres qui lui sont propres.

8. Bibliographie

[AUG 85] AUGENBAUM J. M., PESKIN C. S., « On the Construction of the Voronoï Mesh on a Sphere », *J. Computational Physics*, vol. 59, 1985, p. 177–192.

[BER 77] BERGER M., *Géométrie 5/La sphère pour elle-même, géométrie hyperbolique, l'espace des sphères.*, Cedic/Fernand Nathan, 1977, vol. 5.

[CHE 91] CHEN S. E., RUSHMEIER H. E., MILLER G., TURNER D., « A progressive multipass method for global illumination », *Computer Graphics (SIGGRAPH '91 Proceedings)*, vol. 25, n° 4, 1991, p. 165–174.

[GOR 84] GORAL C. M., TORRANCE K. K., GREENBERG D. P., BATTAILE B., « Modelling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces », *Computer Graphics (SIGGRAPH '84 Proceedings)*, vol. 18, n° 3, 1984, p. 213–222.

[HAN 91] HANRAHAN P., SALZMAN D., AUPPERLE L., « A Rapid Hierarchical Radiosity Algorithm », *Computer Graphics (SIGGRAPH '91 Proceedings)*, vol. 25, n° 4, 1991, p. 197–206.

[JEN 96] JENSEN H. W., « Global Illumination using Photon Maps », *Eurographics Rendering Workshop 1996*, june 1996, p. 21–30.

[KAJ 86] KAJIYA J. T., « The Rendering Equation », *Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings)*, vol. 20, aug. 1986, p. 143–150.

[KEL 96] KELLER A., « Quasi-Monte Carlo Radiosity », *Eurographics Rendering Workshop 1996*, june 1996, p. 101–110.

[KEL 97] KELLER A., « Instant Radiosity », *Computer Graphics (SIGGRAPH '97 Proceedings), Annual Conference Series*, aug. 1997, p. 49–56.

[LAF 93] LAFORTUNE E. P., WILLEMS Y. D., « Bi-directional Path Tracing », *Compugraphics '93*, dec. 1993, p. 145–153.

[LAF 94] LAFORTUNE E. P., WILLEMS Y. D., « A Theoretical Framework for Physically Based Rendering », *Computer Graphics Forum*, vol. 13, n° 2, 1994, p. 97–107.

[SIL 89] SILLION F., PUECH C., « A General Two-Pass Method Integrating Specular and Diffuse Reflection », *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)*, vol. 23, n° 3, 1989, p. 335–344.

[SMI 94] SMITS B., ARVO J., GREENBERG D., « A Clustering Algorithm for Radiosity in Complex Environments », *Computer Graphics (SIGGRAPH '94 Proceedings), Annual Conference Series*, jul. 1994, p. 435–442.

[VEA 94] VEACH E., GUIBAS L., « Bidirectional Estimators for Light Transport », *Fifth Eurographics Workshop on Rendering*, june 1994, p. 147–162.

[VEA 95] VEACH E., GUIBAS L. J., « Optimally Combining Sampling Techniques for Monte Carlo Rendering », *Computer Graphics (SIGGRAPH '95 Proceedings), Annual Conference Series*, 1995, p. 419–428.

[VEA 97] VEACH E., GUIBAS L. J., « Metropolis Light Transport », *Computer Graphics (SIGGRAPH '97 Conference Proceedings), Annual Conference Series*, aug. 1997, p. 65–76.

[WAL 47] WALD A., *Sequential Analysis*, Wiley Publications in Statistics, 1947.

[WAL 89] WALLACE J. R., ELMQUIST K. A., HAINES E. A., « A Ray Tracing Algorithm for Progressive Radiosity », *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)*, vol. 23, n° 3, 1989, p. 315–324.

[WAR 88] WARD G. J., RUBINSTEIN F. M., CLEAR R. D., « A Ray Tracing Solution for Diffuse Interreflection », *Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, vol. 22, n° 4, 1988, p. 85–92.

[WAR 92] WARD G. J., HECKBERT P., « Irradiance Gradients », *Third Eurographics Workshop on Rendering*, may 1992, p. 85–98.

[ZAN 98] ZANINETTI J., SERPAGGI X., PÉROCHE B., « A Vector Approach for Global Illumination in Ray Tracing », *Computer Graphics Forum (Eurographics '98 Proceedings)*, vol. 17, n° 3, 1998, p. 149–158.