Accélération du calcul des vecteurs d'éclairement indirects

Xavier Serpaggi[†] **et Bernard Péroche**[‡]

[†]LISSE, École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne
158, cours Fauriel
42023 Saint-Étienne Cedex 2

[‡]LIGIM, bât. 710. UFR d'informatique Claude Bernard, Lyon 1
43, Bd du 11 novembre 1918
69622 Villeurbanne Cedex

xserpagg@emse.fr, bperoche@ligim.univ-lyon1.fr

Résumé : *Plusieurs aspects sont à considérer pour que l'on puisse qualifier une image de synthèse de réaliste. L'un des plus importants est certainement la notion d'éclairement global ou 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 une méthode 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. Cet article présente un état d'avancement de nos travaux.*

Mots-clés : Lancer de rayons, éclairement global, méthode de Monte Carlo, vecteurs lumineux, analyse séquentielle, photo-réalisme.

1 Introduction

Les premiers travaux portant sur l'éclairement global sont dus à Goral et al. et ont été présentés en 1984 dans [GTGB84]. C'est un principe emprunté au domaine du transfert thermique qui était alors utilisé : la radiosité. Le but était de trouver un état d'équilibre des interactions lumineuses entre les différentes parties d'une scène. Ces premiers algorithmes étaient capables de calculer des images ne contenant que des surfaces lambertiennes et nécessitaient une phase de pré-calcul très importante.

En 1986, pour la première fois, fut proposé un algorithme 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 qui présenta son équation de rendu dans [Kaj86] et proposa par la même occasion une méthode de résolution nommée *path-tracing* basée sur la technique de Monte Carlo. Le principe était 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 posait d'autres problèmes tels que les temps importants nécessaires au calcul des images et le caractère fortement bruité de ces dernières.

D'autres solutions, physiquement plausibles, ont donc vu le jour et parmi les plus célèbres nous trouvons le *bi-directional path-tracing* présenté par Lafortune et al. dans [LW93] et [LW94], et par Veach et al. dans [VG94] et [VG95]. 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 a permis, à temps de calcul équivalent, d'obtenir des images moins bruitées. Néanmoins, un nombre très élevé de rayons par pixel était nécessaire pour obtenir des images d'une qualité acceptable.

Plus récemment, Veach, dans [VG97], propose une nouvelle déclinaison de la méthode de Monte Carlo : *Métropolis*. Chaque chemin lumineux entre la position d'observation et les sources de lumières 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. Cette méthode présente, par rapport aux méthodes classiques de Monte Carlo, l'avantage d'être non biaisée et de pouvoir prendre en compte une plus grande variété de phénomènes physiques.

Mais n'était-il pas plus simple de tenter de se rapprocher des phénomènes physiques? Nous savons depuis longtemps que la nature corpusculaire de la lumière nous permet de la considérer comme un ensemble de photons qui se déplacent et interagissent avec l'environnement. Cela aurait simplifié grandement les algorithmes et aurait permis d'obtenir des résultats qui, sans aucun doute, auraient été physiquement plausibles. Malheureusement, cette solution ne fut pas retenue à cause du manque de puissance des ordinateurs utilisés alors. De nos jours, nous voyons apparaître des algorithmes qui commencent à avoir un tel comportement. Jensen, dans [Jen96], propose une méthode qui allie le comportement corpusculaire de la lumière aux techniques de Monte Carlo. Les résultats sont très prometteurs mais également très demandeurs de ressources.

Enfin, une technique originale basée sur les travaux de Ward ([WRC88], [WH92]) et présentée dans [ZSP98] par Zaninetti, les *vecteurs d'éclairement*, permet de tirer partie des avantages des méthodes de Monte Carlo tout 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 être applicable dans un contexte de rendu interactif, environnement dans lequel nous aimerions l'utiliser.

Nous proposons donc dans cet article une méthode permettant d'accélérer de manière significative le calcul de ces *vecteurs d'éclairement* en nous basant sur les principes de l'analyse séquentielle tels qu'ils furent introduits par Wald dans [Wal47]. Pour cela, nous commencerons par décrire, dans le paragraphe 2, la méthode originale de calcul des *vecteurs d'éclairement indirects* proposée par Zaninetti et al. Nous présenterons ensuite, dans le paragraphe 3, les notions d'analyse séquentielle nécessaires à la compréhension de notre méthode et nous expliquerons, dans le paragraphe 4, comment elles peuvent servir au calcul des *vecteurs d'éclairement*, calcul que nous développerons dans le paragraphe 5. Nous fournirons quelques résultats dans le paragraphe 6 avant de conclure dans le paragraphe 7.

2 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 vectoriellement les résultats 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 aux *vecteurs d'éclairement indirects* qui, comme leur nom l'indique, donnent une estimation de l'éclairement indirect dans la scène, en agissant comme autant de sources virtuelles.

2.1 Principe de calcul des *VEI*

L'équation de rendu, exprimée ici en terme de luminance, indique que la luminance émise par un point x de la scène dans une direction $\vec{\omega}_r$ dépend des luminances incidentes L_i atteignant ce point depuis toutes les directions $\vec{\omega}_i$ du domaine Ω, et de la *fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle* ρ (dans le reste de cet article nous utiliserons l'acronyme anglais consacré *BRDF* : *bidirectional reflectance distribution function*) :

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

Si nous décomposons cette équation pour 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 $L_{ind}(x,\vec{\omega}_r)$ est la composante indirecte, celle qui nous intéresse ici.

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

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

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.ρ_d représente la partie purement diffuse de la *BRDF* .

Comme illustré en 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.

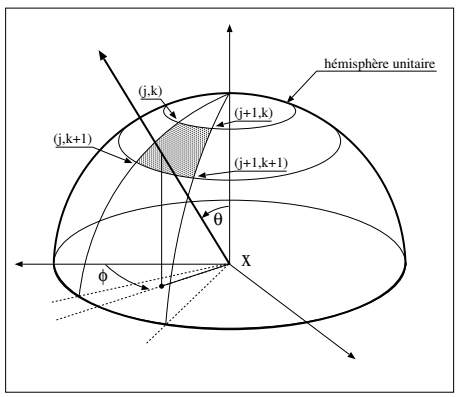

FIG. 1 – *Échantillonnage de l'hémisphère*

Une fois les informations énergétiques récoltées pour l'ensemble des cellules, il est possible de déduire une puissance moyenne P_0 de l'éclairement émis par le point x. Cette information va, à son tour, permettre de déduire la puissance 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* .

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 éga-

lement des gains de temps significatifs. Cependant, nous pensons que ces deux points peuvent être encore 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 : 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.

Dans une population donnée, nous pouvons distinguer deux types distincts d'individus. Certains sont du type T_0 et d'autres du type 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. $f(x, p_0)$ représente 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, avec $x_1, \cdots, x_m$ 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 (avec A et B 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 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, tout cela étant probabiliste, il est possible qu'au moment d'affirmer que la population est de tel ou tel type, nous fassions erreur. Les limites que nous nous fixons vis-à-vis de cette erreur sont représentées par α et β :

α correspond à la probabilité de rejeter H_0 alors que cette hypothèse est vraie et

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 :

$$A = \frac{1-\beta}{\alpha} \quad \text{et} \quad B = \frac{\beta}{1-\alpha}.$$

4 Méthode proposée

La méthode proposée ici a pour but d'améliorer la *qualité* de calcul d'un *VEI* . Le terme qualité 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 des solutions pour que le calcul soit plus pertinent est d'avoir des échantillons de la luminance incidente plus représentatifs. Si ce but est atteint, à nombre d'échantillons égal, le résultat sera meilleur.

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, néanmoins, elle doit 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 ont une luminance L_x telle que $L_x \in [L_m - \epsilon, L_m + \epsilon]$, où L_m représente la luminance moyenne de la zone et ϵ est une constante arbitraire.

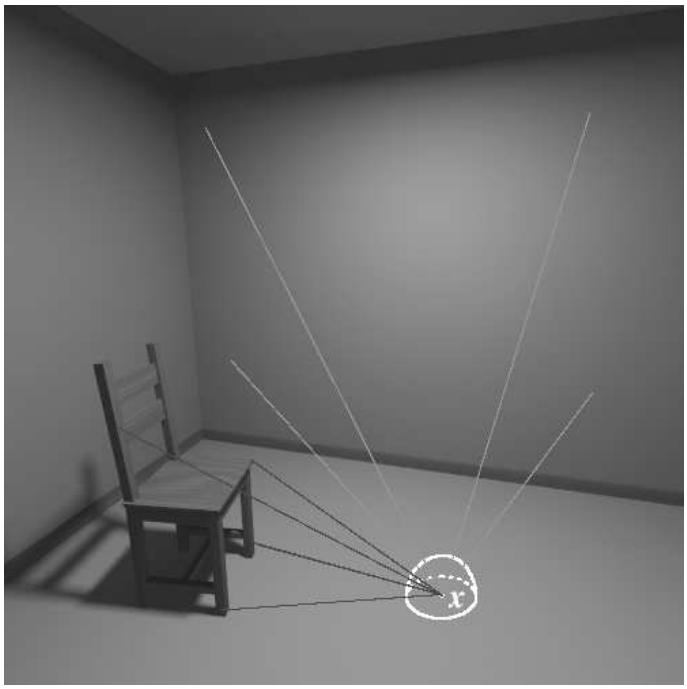

FIG. 2 – *Les zones « vues » par un* VEI *ne sont pas toutes homogènes. L'éclairement arrivant en x au travers de la zone délimitée par les traits gris foncés est beaucoup plus irrégulier que celui y arrivant par la zone que délimitent les traits gris clairs.*

Plus précisément, nous ne considérons pas la luminance incidente au point x mais la luminance qui est réfléchie en ce point, c'est-à-dire après atténuation 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 la direction de réflexion est unique.

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) et elle est donc classée avec le type T_0,

  H_1 : La zone échantillonnée n'est pas homogène et elle 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 pas.

Une fois que toutes les zones sont classées dans le 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, nous remarquons qu'à chaque cellule obtenue après le découpage à angle solide constant de l'hémisphère est associé un rayon et un seul. De ce fait, la luminance 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.

Dans le cas de notre méthode, le nombre de cellules n'est pas fixé à l'avance ; elles ne divisent pas toutes l'hémisphère de la même manière et chacune sert de support à plusieurs rayons. L'angle solide associé nécessaire au calcul de la luminance est donc différent pour chaque rayon. Il faut donc un moyen pour obtenir l'angle solide associé à chacun.

Nous décidons donc d'associer à chaque rayon l'angle solide maximal dont il peut disposer sans empiéter sur le domaine de ses voisins. Étant donné que les échantillons dans les cellules sont choisis au hasard, nous ne pouvons nous aider d'aucune hypothèse simplificatrice et nous devons avoir recours à une solution générique. Voilà pourquoi nous avons décidé de construire un diagramme de Voronoï sur le semis de points que constituent les intersections des rayons avec l'hémisphère unitaire centrée en x. Par définition, cette méthode construit des cellules autours des sites dont la taille est maximisée. Ceci correspond donc parfaitement à notre objectif.

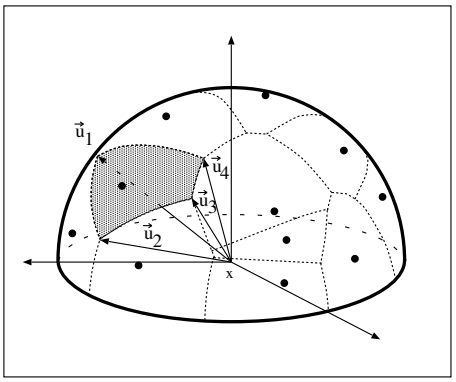

FIG. 3 – *Diagramme de Voronoï sur l'hémisphère et calcul de l'angle solide associé.*

Cela est fait une fois que tous les rayons du *VEI* ont été lancés, ce qui permet de ne construire le diagramme qu'une seule fois. De plus, il est ainsi possible de s'affranchir des limites imposées par le découpage de l'hémisphère, c'est à dire que l'espace est partagé entre tous les rayons, même s'ils n'appartiennent pas aux mêmes cellules.

En utilisant les notations de la figure 3, l'angle solide correspondant à une cellule nous est donné par la formule suivante, extraite du livre de Berger [Ber77] :

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

Grâce à cette formule, nous pouvons associer à chaque rayon un angle solide correct et obtenir une valeur de luminance qui ne soit pas faussée.

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.

À chaque nouvel échantillon, la valeur de L_{Max} devrait être remise en cause et celle de L_m recalculée. Ceci ne semble pas très aproprié à notre cas. Nous voulions disposer d'une méthode incrémentale, donc nous avons 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 cellules qui servent de références. Ensuite, si le type de la zone ne peut pas être déterminé directement, les futurs échantillons ne viendont pas modifier 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.

Étalonnage

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. Après de nombreux essais, nous avons obtenu pour les deux premières constantes les valeurs : $\alpha = 0.44$ et $\beta = 0.55$. Bien entendu, les valeurs de A et de B découlent des valeurs de α et de β comme indiqué au chapitre 3. Leurs valeurs obtenues sont donc : $A = 1.0227273$ et $B = 0.9821428$.

Pour ϵ, nous avons obtenu une valeur de $0,25$, soit 25% de L_{Max} de chaque côté 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 de dire que l'éclairement indirect varie lentement.

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 3 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 oeil. 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 7680 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

La figure 4 présente une image qui a été calculée avec un *processeur MIPS R12000* à 270 MHz diposant de 512 Mo de mémoire. Sur cette série d'images, la classique *Cornell Box* profite assez largement de la méthode. En effet, 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'oeil, avec la méthode originale, il faut lancer 1024 rayons par hémisphère.

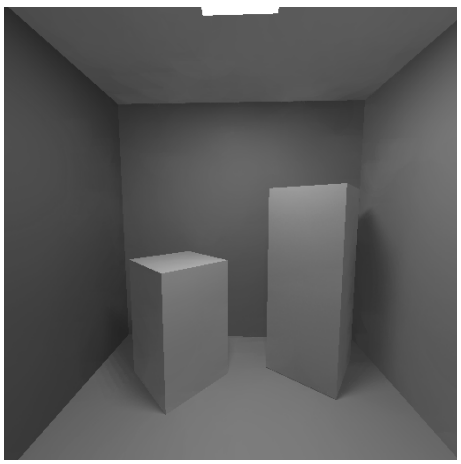

Image calculée avec la méthode originale utilisant 1024 rayons par hémisphère en 866 secondes. Le nombre de *VEI* calculés est de 900.

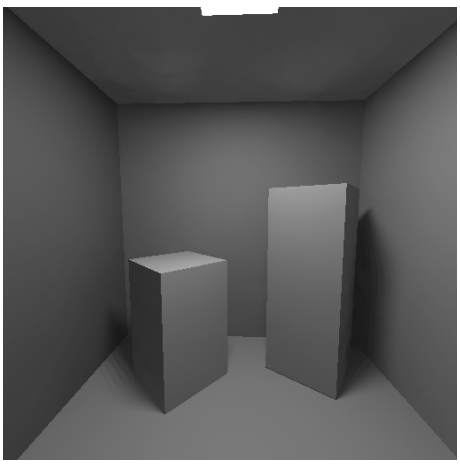

Image calculée avec notre méthode en 351 secondes avec, en moyenne, 207 rayons par hémisphère. Le nombre de *VEI* calculés est de 1580.

FIG. 4 – *Comparaison de la méthode originale de calcul des* VEI *et de notre méthode sur la scène classique de la Cornell Box.*

Nous remarquons cependant qu'avec notre algorithme, le nombre de *VEI* calculés est plus élevé. Ceci est dû aux critères d'interpolation qui ne sont pas satisfaits. De ce fait, d'autres *VEI* sont calculés. Cela souligne le fait que notre méthode décrit plus précisement la nature de l'éclairement indirect en un point de la scène que la méthode originale. Ce phénomène peut être observé plus particulièrement dans les zones d'ombre. Ces dernières sont plus contrastées. Nous pouvons également remarquer que sur le plafond, 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.

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 qui pourra alléger les très nombreux paramètres qui lui est propre.

Références

[Ber77] Marcel Berger. *Géométrie 5/La sphère pour elle-même, géométrie hyperbolique, l'espace des sphères.* CEDIC/FERNAND NATHAN, 1977. ISBN 2-7124-0705-9 (volume 5).

[GTGB84] C. M. Goral, K. E. Torrance, D. P. Greenberg, and B. Battaile. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. In H. Christiansen, editor, *SIGGRAPH '84 Conference Proceedings (Minneapolis, MN, July 23-27, 1984)*, pages 213–222. ACM, July 1984.

[Jen96] Henrik Wann Jensen. Global illumination using photon maps. In Xavier Pueyo and Peter Schröder, editors, *Eurographics Rendering Workshop 1996*, pages 21–30, New York City, NY, June 1996. Eurographics, Springer Wien. ISBN 3-211-82883-4.

[Kaj86] J. T. Kajiya. The rendering equation. In David C. Evans and Rusell J. Athay, editors, *Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings)*, volume 20, pages 143–150, aug 1986.

[LW93] Eric P. Lafortune and Yves D. Willems. Bi-directional Path Tracing. In H. P. Santo, editor, *Proceedings of Third International Conference on Computational Graphics and Visualization Techniques (Compugraphics '93)*, pages 145–153, Alvor, Portugal, December 1993.

[LW94] E. P. Lafortune and Y. D. Willems. A theoretical framework for physically based rendering. *Computer Graphics Forum*, 13(2):97–107, June 1994.

[VG94] Eric Veach and Leonidas Guibas. Bidirectional Estimators for Light Transport. In *Fifth Eurographics Workshop on Rendering*, pages 147–162, Darmstadt, Germany, June 1994.

[VG95] Eric Veach and Leonidas J. Guibas. Optimally Combining Sampling Techniques for Monte Carlo Rendering. In *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 1995 (ACM SIGGRAPH '95 Proceedings)*, pages 419–428, 1995.

[VG97] Eric Veach and Leonidas J. Guibas. Metropolis light transport. In Turner Whitted, editor, *SIGGRAPH 97 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 65–76. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August 1997. ISBN 0-89791-896-7.

[Wal47] Abraham Wald. *Sequential Analysis.* Wiley Publications in Statistics, 1947.

[WH92] Gregory J. Ward and Paul Heckbert. Irradiance gradients. *Third Eurographics Workshop on Rendering*, pages 85–98, May 1992.

[WRC88] Gregory J. Ward, Francis M. Rubinstein, and Robert D. Clear. A ray tracing solution for diffuse interreflection. *Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings) held in Atlanta, Georgia; 1-5 August 1988*, 22(4):85–92, August 1988.

[ZSP98] Jacques Zaninetti, Xavier Serpaggi, and Bernard Péroche. A vector approach for global illumination in ray tracing. *Computer Graphics Forum*, 17(3):149–158, 1998. ISSN 1067-7055.