



HAL
open science

Simulation rapide de l'éclairage global

Xavier Granier, George Drettakis, Bruce Walter

► **To cite this version:**

Xavier Granier, George Drettakis, Bruce Walter. Simulation rapide de l'éclairage global. Journées de l'AFIG 2000, Association Française d'Informatique Graphique, 2000, Grenoble, France. inria-00510062

HAL Id: inria-00510062

<https://inria.hal.science/inria-00510062>

Submitted on 17 Aug 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Simulation rapide de l'éclairage global

Xavier Granier⁺, George Drettakis⁺ et Bruce Walter^{*}

iMAGIS¹-GRAVIR/IMAG-INRIA

INRIA Sophia Antipolis

2004, Route des Lucioles BP 93

06902 Sophia Antipolis Cedex

⁺[Xavier.Granier|George.Drettakis]@sophia.inria.fr

^{*}bjw@graphics.cornell.edu

Résumé : *Pouvoir calculer rapidement une solution d'éclairage global, en prenant en compte les types de réflexions, est un grand défi. Si les approches par éléments finis ou de radiosité peuvent permettre une simulation interactive pour certains types de scènes, les méthodes probabilistes sont actuellement trop lentes ou trop bruitées pour ce genre d'utilisation.*

Nous présentons ici une nouvelle méthode, qui, en intégrant un tracé de particules (pour les réflexions non diffuses)   l'étape de transfert d'énergie d'un algorithme de radiosité hiérarchique (pour les réflexions diffuses), permet de traiter efficacement tous types de propagation lumineuse. Cette approche permet un calcul rapide et une simulation de bonne qualité visuelle. Les transferts diffus sont ainsi non bruités, grâce à la radiosité hiérarchique, mais l'on peut aussi obtenir rapidement des effets non diffus comme des caustiques.

Gr ce à un tel système, un utilisateur peut visualiser et manipuler interactivement des scènes de petite taille en tenant compte de tous les effets lumineux. Mais cette simulation globale et générale est applicable aussi à des scènes plus complexes, avec bien sûr un temps de calcul plus long. Ce système peut aussi efficacement traiter le problème de l'éclairage indirect. Enfin, il permet une transition douce d'une solution rapide mais de faible qualité vers une solution de grande qualité mais plus lente.

Mots-clés :  clairage global, caustiques, effets spéculaires, scènes dynamique, contrôle de qualité, radiosité, tracé de particules, ...

1 Motivations

Pour pouvoir obtenir une visualisation réaliste d'un environnement virtuel, il est essentiel de simuler l'éclairage global. La prise en compte de l'éclairage indirect peut être très important pour certaines scènes. Pour celles purement diffuses, des méthodes récentes permettent un calcul interactif pour le déplacement des objets. Cependant, les environnements réels sont rarement purement diffuse, et en utilisant ces algorithmes, de nombreux effets lumineux non-diffus sont ignorés. Les algorithmes qui peuvent les prendre en compte sont actuellement trop lents et trop bruités pour une application interactive qui demande une bonne qualité visuelle. De plus, les échanges lumineux non diffus étant directionnels, une discrétisation se révèle rapidement trop coûteuse pour des scènes complexes. C'est pourquoi ils sont généralement traités par (i) des méthodes stochastiques ou (ii) en plusieurs étapes ("multi-pass"), qui combinent des solutions par éléments finis et stochastiques. Les deux sont en général trop lentes pour un rendu interactif. Les premières (i) souffrent du bruit inhérent à de telles méthodes, alors que les autres (ii) sont soit limités par les effets lumineux possibles ou par la complexité des scènes, soit demandent des traitements complexes pour prendre en compte tous les chemins lumineux possibles.

Le but de notre travail est de fournir une simulation rapide et de grande qualité pour l'éclairage global, prenant en compte tous les types de réflexions. Pour y arriver, nous intégrons un tracé de particules (pour les échanges non diffus) dans une méthode de radiosité hiérarchique avec groupes ("clusters") qui nous permet un traitement efficace les échanges purement diffus. Cette intégration est simple et utilise l'information sur les chemins lumineux dus aux liens pour guider et accélérer l'émission de particules. La méthode qui en résulte est rapide et simule tous les chemins lumineux possibles.

Pour des scènes dynamiques simples, notre algorithme permet une visualisation interactive de l'éclairage global (aux alentours de deux images par seconde), que cela soit de la composante diffuse ou non diffuse (voir Fig. 1). Il peut aussi traiter des scènes plus complexes, avec un temps de calcul

¹iMAGIS est une projet commun CNRS/INPG/INRIA/UJF

plus long. Le problème de l'éclairage indirect est aussi pris en compte par l'algorithme tel quel. Enfin, il possède par nature un mécanisme de contrôle de qualité, qui permet une transition progressive d'une solution rapide mais de basse qualité, vers une solution de grande qualité, mais requérant plus de temps de simulation, ceci en changeant le niveau de la hiérarchie auxquels se font les échanges lumineux.

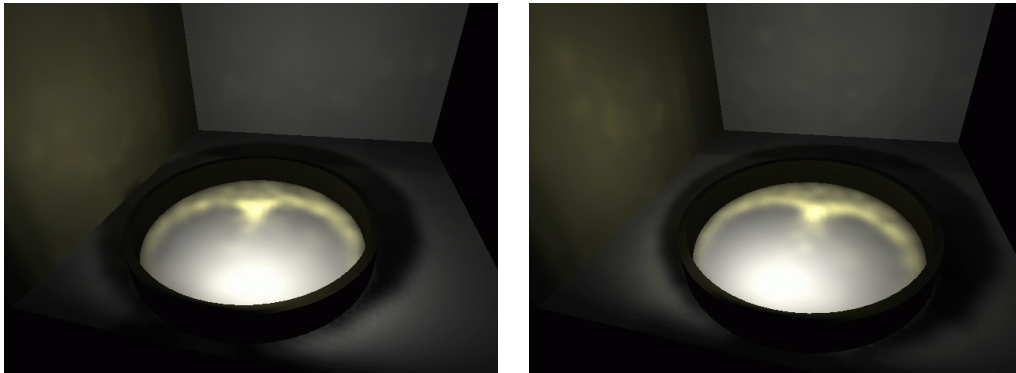


FIG. 1 – Deux images extraites d'une session interactive (deux images par seconde sur une SGI R10000) avec notre algorithme. Seul l'anneau se déplace. Notez la présence de la caustique en forme de cardioïde

1.1 Travaux antérieurs

Dans toute cette section, nous allons utiliser la notation des chemins lumineux par une expression régulière de Heckbert [10]. L représente les sources lumineuses, E l'oeil, S une réflexion non diffuse, et D une réflexion diffuse, "*" zéro ou plusieurs réflexions, "+" une ou plusieurs réflexions, et enfin, "|", l'opérateur "ou". Un système de radiosité classique simule les chemins lumineux LD^*E , c'est à dire zéro ou plusieurs réflexions diffuses, alors que tous les chemins possibles sont décrits par $L(D|S)^*E$.

De nombreuses recherches ont été menées sur l'illumination globale et la prise en compte de tous les types de réflexions. Par exemple, de nombreuses méthodes de Monte-Carlo ont été proposées (voir [28] pour une synthèse). Mais celles-ci restent trop lentes ou trop bruitées pour arriver à ce que l'interactivité requiert.

Pour les environnements diffus, les méthodes de radiosité (voir [8, 4]) peuvent produire des images de grande qualité. En particulier, la méthode de radiosité hiérarchique avec groupes (HRC pour "Hierarchical Radiosity with Clustering") [23, 20] peut simuler rapidement la propagation lumineuse pour des scènes complexes. Un des grands avantages de la radiosité, comme de toute solution $L(D|S)^*DE$, est que le résultat peut être visualisé directement en utilisant les accélérations graphiques matérielles, et dans certain cas, des modifications interactives peuvent être faites [6]. Nous nous attarderons plus sur l'HRC, dont les principales étapes sont décrites dans la Fig. 2.

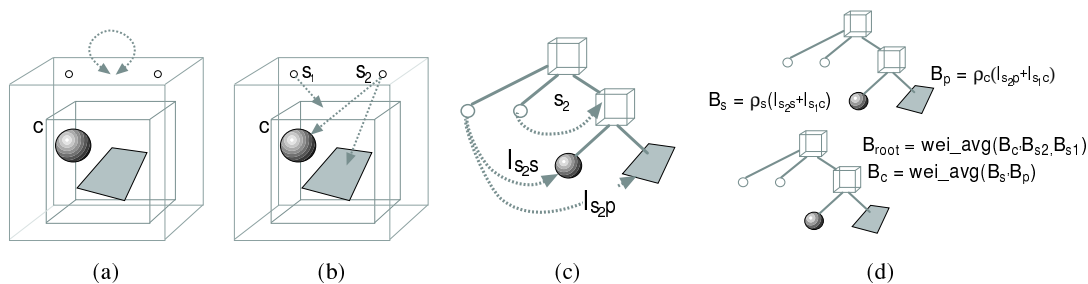


FIG. 2 – Les trois étapes principales de l'algorithme de radiosité hiérarchique avec groupes : *Initialisation* : la scène, constitué d'une sphère et d'un polygone, contenue dans le groupe c , et deux sources de lumière. Au départ, un lien du groupe père vers lui-même est créé. Chaque itération se fait en trois étapes. (a) *Raffinement* : un lien est créé entre la source s_1 et c , et s_2 est liée à la sphère s et au polygone p . (b) *Transfert* : l'irradiance est calculée sur chaque lien (les valeurs I_{s_2s} (de s_2 vers s) et I_{s_2p} (de s_2 vers p)) dans notre arbre représentant la hiérarchie. (c) *Push-pull* : Les valeurs d'irradiance sont descendues aux feuilles, où les valeurs de radiosité sont calculées en réfléchissant l'irradiance par la réflectance ρ (en haut). Celles-ci sont remontées en les moyennant (en bas).

Depuis l'apparition des méthodes de radiosité, plusieurs approches ont été proposées pour prendre en compte les transferts non diffus. La première est de stocker la représentation directionnelle de l'énergie sortante sur chaque élément de discrétisation de la solution. Des premières approches [11] aux

plus récentes [24] utilisant le groupe et les ondelettes, le coût de stockage nécessaire rend ces méthodes inutilisables pour des scènes complexes contenant des effets fortement directionnels. Les représentations continues (voir [21]) nécessitent aussi beaucoup de coefficients de base, d'où le même problème. Pour résoudre celui-ci, les méthodes en trois points [1] ont été proposées. Cependant, celles-ci ont une complexité de stockage en k^3 liens où k est le nombre d'éléments de la scène. Ainsi, elles sont limitées à des scènes relativement simples. Dumont et al. [7] ont réduit la mémoire nécessaire en un coût quadratique par un algorithme progressif basé sur l'utilisation de la hiérarchie de liens et la suppression des liens inutiles pour les itérations suivantes. Mais cela a pour effet d'accroître le temps de calcul. Une autre approche récente, le "Three Point Clustering" [25], dont la place mémoire requise est modeste comparé à l'HRC, nécessite une subdivision très fine pour avoir des effets lumineux de hautes fréquences comme des caustiques. Toutes ces méthodes sont coûteuses en temps comme en place mémoire.

Les facteurs de forme étendus ont été introduits pour prendre en compte des transferts spéculaires dans le contexte des algorithmes en plusieurs étapes basés sur la radiativité. Mais souvent ceux-ci sont limités à des miroirs plans [29] ou à des surfaces spéculaires [22].

Wann Jensen a introduit le "Photon Map" (voir [12]), qui utilise des particules (ou un tracé de photons) pour tous les types de chemins lumineux. Cette méthode peut calculer rapidement des caustiques directes (LS^+D), mais nécessite une étape de "gather" coûteuse pour calculer les autres chemins lumineux. Malgré l'accélération possible avec l'utilisation du gradient d'irradiance [33], cette étape est trop longue pour devenir interactive.

L'estimation de densité [31] est une approche très similaire. Comme pour le "Photon Map", tous les chemins lumineux sont simulés par un tracé de particules. De plus, le rendu peut être fait en utilisant l'accélération graphique matérielle après une phase de compression de maillage, ou par un tracé de rayons pour prendre en compte les autres chemins ($(L|D)S^+E$). Nous choisirons une approche similaire pour la visualisation.

Plusieurs méthodes en plusieurs étapes, combinant radiativité et Monte-Carlo ont déjà été proposées (voir [19, 2, 13, 18, 16]), mais sans s'aider des informations générées par des étapes précédentes, pour guider et accélérer la suivante. Des recherches ont aussi été menées pour visualiser interactivement l'éclairage global des environnements virtuels [27, 30].

Enfin, il faut aussi citer des méthodes spécifiques pour créer des caustiques [5, 34], sans pour autant traiter l'ensemble des chemins lumineux.

2 Aperçu général de la méthode

Avant toute chose, dans notre algorithme, nous construisons la hiérarchie avec groupes comme pour l'HRC. Le raffinement se fait en examinant chacun des liens en décidant s'il doit être raffiner suivant le critère choisit (voir Fig. 2). Pendant l'étape de transfert d'énergie d'une itération, pour chacun des liens arrivant sur une surface non purement diffuse, des particules sont envoyées pour simuler l'échange diffus vers non diffus. Cette utilisation des liens permet de réduire l'espace vers lequel il faut envoyer des particules. Celles-ci sont alors propagées dans l'environnement par des réflexions non diffuses. Une itération se termine par la mise à jour de la représentation hiérarchique : Les particules sont placées au juste niveau hiérarchique et leur énergie est ajoutée à l'irradiance diffuse. Cette intégration est particulièrement efficace pour simuler tous les chemins $L(D|S)^*D$.

Pour l'affichage, une étape de lissage de la solution de radiativité est nécessaire. Ensuite, la solution peut être rendue interactivement en utilisant l'accélération graphique matérielle (solution $L(D|S)^*DE$), ou par une trace de rayon (solution $L(D|S)^*E$).

La principale contribution de notre approche est cette forte intégration des deux algorithmes, la radiativité hiérarchique avec groupes (HRC) et tracé de particules. Elle est simple et prend en compte par essence tous les chemins lumineux. Comparé aux méthodes précédentes, l'utilisation de l'HRC permet d'obtenir une simulation de l'éclairage diffuse efficacement et sans bruit, tout en permettant de détecter tout types de transferts comme les caustiques indirectes. Cette approche offre un calcul rapide de tous les chemins lumineux, une modification interactive pour les scènes dynamiques simples avec la prise en compte de tous les effets lumineux. Nous pouvons aussi simuler l'éclairage global pour des scènes complexes dans un temps plus long, mais raisonnable, et les cas difficiles comme un éclairage principalement indirect sont pris en compte sans traitements spécifiques. De plus, de par le fait qu'il soit hiérarchique, notre algorithme permet une transition progressive entre une solution rapide mais de faible qualité et une solution de grande qualité mais plus lente.

3 Intégration HRC/Tracé de particules

Pour pouvoir lancer des particules afin de simuler des transferts non diffus, nous allons introduire une étape modifiée de transfert, dans laquelle les particules sont émises et propagées dans l'environnement, suivie d'une étape modifiée de "Push/Pull", dans laquelle les particules sont positionnées au juste niveau hiérarchique. Comme les particules sont émises dans un espace restreint définis par un lien, il faut aussi pouvoir déterminer le nombre de particules à envoyer, ainsi que leur énergie propre. L'initialisation de l'algorithme est identique à l'HRC : la hiérarchie avec groupes est tout d'abord construite utilisant l'approche présentée dans [3], puis un lien est créé du sommet de la hiérarchie vers lui-même [20]. Pour pouvoir tenir compte des transferts non diffus, une fonction de réflexions généralisée (BSDF pour "bidirectionnal scattering distribution function" [28]) est stockée sur chaque élément hiérarchique. Nous utilisons la représentation mixte diffuse/non diffuse du modèle [15], qui permet de choisir stochastiquement si une réflexion sera diffuse ou pas. Ce choix se fait sur le pourcentage diffus/non-diffus définie par la propriété du matériau. Un groupe ("cluster") contenant des éléments non purement diffus est considéré comme non purement diffus.

3.1 Une itération

Raffinement : Notre critère de raffinement est basé sur l'énergie transportée au travers d'un lien, BFA , où B est la radiosité de l'émetteur, F le facteur de Forme (avec visibilité) et A le facteur d'aire [20] du récepteur. Si cette énergie est supérieure à une quantité donnée, le lien doit être subdivisé.

Transfert d'énergie : Tous les liens sont parcourus pour transmettre l'énergie. Dans tous les cas, l'irradiance du lien est ajouté au récepteur. Si ce dernier est non purement diffus, des particules sont émises pour simuler le transfert non diffus 3.2.

Ces particules sont immédiatement réfléchies sur le récepteur. Pour un groupe, la réflexion ce fait sur le premier objet ou élément rencontré par celles-ci. Les particules sont alors propagées dans l'environnement jusqu'à ce quelles soient absorbées, réfléchis diffusément (car ce type de réflexion est pris en compte par la radiosité) ou qu'elles sortent de l'environnement. Chacun des impacts est stocké sur les objets, en excluant le premier récepteur (car cet échange est déjà pris en compte dans la radiosité).

"Push/Pull" et placement des particules : Après la propagation, les particules sont toutes stockées au plus haut niveau des objets intersectés (ex : sphères, polygones, etc.). Comme nous voulons utiliser les particules pour reconstruire l'irradiance non diffuse, et ceci de façon hiérarchique, il faut pouvoir décider à quel niveau il faut les placer.

Les effets spéculaires correspondent souvent à des hautes fréquences dans la solution d'éclairage. Intuitivement, cela correspond à des zones de forte concentration de particules. Pour les détecter, nous utilisons un "critère d'étalement" : si la concentration énergétique des particules représente une surface petite par rapport au facteur d'aire de l'élément les supportant, alors il faut descendre les particules dans la hiérarchie.

Lors de la traversé de la hiérarchie, pour un élément nous avons n particules, chacune d'énergie ϕ_i et à la position \mathbf{x}_i . Nous définissons un centre c comme la position moyenne pondérée par l'énergie des particules. Nous définissons aussi un "critère d'étalement" CE comme suit :

$$c = \frac{\sum_n \phi_i \mathbf{x}_i}{\sum_n \phi_i}, \quad CE = \frac{\sum_n \phi_i |c - \mathbf{x}_i|^2}{\sum_n \phi_i} \quad (1)$$

Si A est le facteur d'aire [20] de l'élément courant, on teste si $\pi CE \leq \zeta A$ et $\sum_{i=1..n} \phi_i \geq \epsilon$, où ζ marque la concentration que l'on veut atteindre. En général, nous utilisons $\zeta = 0.5$. Intuitivement, cette condition est atteinte lorsqu'il y a une forte concentration de particules de haute énergie comparée a la taille de l'élément traité. Dans le cas contraire, les particules restent à ce niveau, sinon, elles sont descendues dans la hiérarchie. Une subdivision plus fine peut alors se faire, adaptant automatiquement le maillage aux détails fins des effets spéculaires. Les liens restant à leur niveau, il n'en résulte pas un surcoût de calcul pour la radiosité.

Chaque élément possède une irradiance I_d due au transfert diffus à travers les liens, et n particules ayant chacune une énergie ϕ_i . À chaque niveau de la hiérarchie, de facteur d'aire A , l'irradiance I devient $I = I_d + \frac{\sum_n \phi_i}{A}$. Cela peut être vu grossièrement comme une reconstruction hiérarchique de l'irradiance due aux particules. Sur les feuilles de la hiérarchie, la valeur de radiosité devient alors

$B = \rho I$, comme pour une radiosité diffuse pure. On obtient ainsi une radiosité diffuse constante sur les feuilles de la hiérarchie. La représentation hiérarchique est alors mise à jour en remontant les valeurs de radiosité et en les moyennant.

Notez que l'on peut accumuler l'irradiance due aux particules en faisant une moyenne sur les itérations. Nous avons trouvé que cette approche améliorait la qualité finale et réduisait le bruit.

3.2 Émission de particules

Une grande partie de l'algorithme décrit ci-dessus, réside dans l'émission et la réflexion des particules. Nous allons maintenant décrire comment prendre en compte l'énergie qui passe à travers un lien à l'aide des particules.

En général, le flux quittant un élément S est décrit par l'intégrale :

$$\Phi_S = \int_S \int_{\Omega_s} L(s, \omega) \langle \omega \cdot n_s \rangle d\omega ds, \quad (2)$$

où S est l'émetteur, Φ_S le flux sortant de S , s un point sur S , Ω_s l'ensemble des directions possible en s , ω une direction, n_s la normale en s , $L(s, \omega)$ l'énergie quittant s dans la direction ω , et $\langle \cdot \rangle$ un produit scalaire. Pour estimer stochastiquement cette intégrale par n_p particules émises selon une loi de probabilité (*pdf*), $p(s, \omega)$, chacune doit avoir une énergie de [28, 32] :

$$\phi(s, \omega) = \frac{L(s, \omega) \langle \omega \cdot n_s \rangle}{n_p p(s, \omega)} \quad (3)$$

Considérons maintenant l'énergie $L(s, r)$ quittant le point s de S et passant au point r d'un récepteur R . En utilisant la notation de Sillion [20], dans le cadre d'une hiérarchie générale, le flux entre deux éléments hiérarchiques est :

$$\Phi_{RS} = S_R S_S \int_S \int_R L(s, r) \frac{\tau R_r E_s}{\|s - r\|^2} dr ds \quad (4)$$

où R_r est 1 pour les groupes et $\cos\theta_i$ pour les surfaces, E_r est 1 pour les groupes et $\cos\theta_o$ pour les surfaces, S_S , S_R sont des facteurs d'échelles pour tenir compte des cas volumiques, valant 1 pour les surfaces et $\frac{1}{4}$ pour les groupes. Enfin, τ est l'absorption pour des milieux participatifs. Les valeurs $\cos\theta_i$ et $\cos\theta_o$ sont les cosinus de l'angle entre la direction de propagation et la normale respectivement de l'émetteur et du récepteur.

Dans le cadre de la radiosité, $L(s, r) = \frac{B_s}{\pi}$, et l'équation (4) devient $\Phi_{RS} = B_S F_{RS} A_R$ où B_S est la radiosité de S et F_{RS} , le facteur de forme (sans la visibilité) entre S et R . A_R est le facteur d'aire définie dans [20]. Si nous voulons estimer le flux avec n_{RS} particules d'énergie constante ϕ_{ct} , le flux total est $\Phi_{RS} = n_{RS} \phi_{ct}$, et ainsi :

$$n_{RS} = \frac{B_S A_R F_{RS}}{\phi_{ct}} \quad (5)$$

Pour un lien donné, le facteur de forme, le facteur d'aire, et la radiosité de la source sont des données connues.

Pour chacune des n_{RS} particules, un point s et un point r sont déterminés par une loi uniforme sur respectivement S et R , $p(r) = \frac{1}{\mu(R)}$ et $p(s) = \frac{1}{\mu(S)}$ où $\mu(\cdot)$ est l'aire pour une surface et le volume pour un groupe. Leur énergie est alors :

$$\phi_{rs} = \frac{L(s, r) S_R S_S \mu(R) \mu(S) \tau R_r E_r}{\|s - r\|^2 n_{RS}} \quad (6)$$

Toutes les particules peuvent être absorbées ou réfléchies de manière diffuse, si le récepteur possède une composante diffuse et non diffuse dans sa BSDF. Ces transferts étant pris en compte par la radiosité, ces propagations ne sont pas effectuées. Nous propageons et stockons que les particules qui sont réfléchies non diffusément.

3.3 Accélération de la simulation

Le processus de raffinement nous fournit les informations de visibilité qui seront utilisées pour accélérer le lancer de particules. De plus, l'utilisation d'une représentation par objet nous permet de réduire le coût et d'accroître la qualité. Enfin, pour les scènes dynamiques, le recalcul nécessaire est limité. Nous discuterons de cela dans les paragraphes qui suivent.

Accélération de la visibilité : Nous utilisons le "shaft culling" [9] pour accélérer le calcul de visibilité. Pour un lien donné, une liste d'obstacles possibles est maintenue. Les groupes dont la boîte englobante intersecte le "shaft" sont ouverts. Les éléments qui sont complètement à l'intérieur sont gardés, tandis que ceux qui sont à l'extérieur sont enlevés. La visibilité totale correspond à une liste vide. Cette liste est gardée pendant le processus récursif de raffinement pour accélérer ce traitement. Lorsque qu'une particule est envoyée par un lien dont la visibilité est totale, aucun test n'est fait pour déterminer s'il atteint bien le récepteur. Dans le cas où la liste n'est pas vide, la visibilité est calculée par tracé de rayons.

Représentation par objets : Pour pouvoir prendre en compte des objets comme des sphères, des cônes, etc, nous avons une représentation par objet dans notre système de radiosité. Celle-ci est similaire, par l'approche, à [26, 17], dans le sens où pour la simulation, ces objets ne sont pas pré-subdivisés, mais cela est fait à la demande. Le nombre de primitives d'une scène est donc réduit. De plus, les calculs d'intersections sont effectués avec les objets non-subdivisés, réduisant le temps de calcul et améliorant la qualité des ombres et des caustiques.

Scènes dynamiques : Lorsqu'un objet quelconque se déplace, aucune subdivision n'est détruite. Une fois que le mouvement est effectué, la hiérarchie est traversée pour recalculer la visibilité pour tous les liens. Seuls les facteurs de forme (sans la visibilité) des liens atteignant ou partant de l'objet en mouvement sont recalculés. Les particules sont alors émises de nouveau (l'irradiance non-diffuse n'est pas accumulée). Pour une meilleure interactivité, le nombre de rayon lancé pour le calcul de la visibilité est réduit.

4 Reconstruction et rendu

Notre algorithme calcule une valeur de radiosité constante par élément. Pour afficher une solution continue, une étape de reconstruction est nécessaire. Cette solution lissée peut être alors rendue directement grâce au matériel graphique. Pour avoir les chemins $(L|D)S^+E$ manquants, un tracé de rayons est utilisé.

Comme première approche, nous reconstruisons une "grille" séparément des objets de la hiérarchie. Elle représente un ensemble de polygones à afficher, correspondant à un maillage complet pour la subdivision maximale atteinte. Pour un quadrilatère par exemple, une grille régulière est créée, et chacun de ses polygones a la taille du plus petit objet de la subdivision de ce quadrilatère.

Le lissage se fait itérativement sur cette grille. Pour chaque feuille de la hiérarchie, sa valeur de radiosité constante est affectée à chacun des polygones de la grille qu'elles contiennent. Sur chacun des points de la grille, la moyenne des valeurs des polygones adjacents est alors affectée. Si un lissage plus fort est souhaité, il est possible d'affecter itérativement au polygone la moyenne des valeurs de ses sommets, et de recalculer la valeur des sommets comme la moyenne des valeurs des polygones adjacents. Bien sûr, des reconstructions plus performantes [14] peuvent être adaptées à nos besoins (voir section 6).

Une fois calculée, cette grille peut être rendue directement par le matériel graphique. Les seuls chemins manquants sont les chemins $(L|D)S^+E$.

Pour tenir compte de ces chemins, nous utilisons le tracé de rayons pour ajouter au rendu par le matériel graphique (composante diffuse de l'image), la composante $(L|D)S^+E$ manquante. A chaque intersection, l'objet intersecté est interrogé pour récupérer la valeur diffuse au point d'intersection. Cette valeur est une interpolation des valeurs aux sommets du polygone de grille concerné. Ce tracé de rayons peut être fait interactivement en utilisant le "Render Cache".

5 Résultats

Tous les résultats ont été obtenus sur une Origin 2000 (SGI) sur un processeur R10000 à 200 Mhz.

Rendu interactif pour les scènes simples : Un exemple a déjà été montré dans la figure 1. L'absence de reflets est due à un rendu matériel seulement. La figure 4 en montre un autre exemple.

Un film au format Quicktime d'une session interactive peut être trouvé à :

<http://www-imagis.imag.fr/Publications/xgranier/EGWR00>.

Contrôle de qualité : La simulation est dirigée par trois paramètres : (i) un seuil ϵ pour le critère de raffinement BFA qui contrôle le niveau où se trouve les liens dans la hiérarchie, et donc la qualité de l'éclairage diffus. (ii) l'aire minimum : elle détermine la finesse du résultat par la taille minimale d'un élément de la hiérarchie. (iii) le paramètre ϕ_{ct} contrôle le nombre de particules à envoyer, et donc la qualité de l'éclairage non-diffus (voir figure 3). Plus ϕ_{ct} est petit, et plus le nombre de particules à envoyer à travers un lien est grand (voir l'équation (5)).

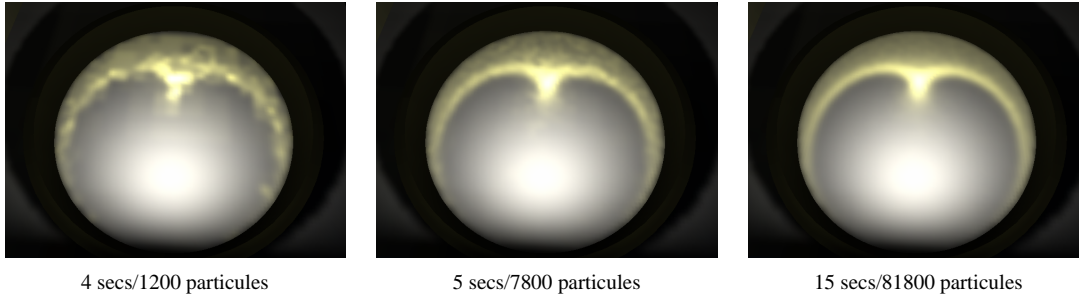


FIG. 3 – Variation du paramètre ϕ_{ct} . Le nombre de particules et le temps nécessaire à deux itérations sont indiqués. L'aire minimum reste constante. L'image est rendue par le matériel graphique.

Scènes complexes et éclairage indirect : Pour la figure 5, nous avons modifié la scène “Soda Shoppe” (aussi au format mgf) en réduisant la taille des sources et en ajoutant des sphères en verre bleu pour mieux visualiser la présence de caustiques. Cette scène contient 1779 primitives (soit environ 80,000 polygones pour une subdivision de niveau 5). Notez que, dans un temps raisonnable (17 minutes 22 sec), des caustiques ont été obtenues. Un tracé de rayons a été fait pour obtenir les figures 5 et 6 en environ 4 minutes (image 1980x980).

Dans la figure 6 (à gauche), nous avons la même scène, mais avec un éclairage indirect. Une telle scène serait très difficile à traiter pour une méthode nécessitant le reclassement des sources secondaires. Notre algorithme l'a simulé en 9 minutes 2 sec, ce qui est de l'ordre de grandeur que pour le cas direct (Fig. 5).

Comparaison informelle avec le tracé de particules : Cette dernière scène permet aussi une comparaison informelle entre le tracé de particules standard [32] et notre méthode. Pour un temps de calcul équivalent, et avec la même méthode de reconstruction, le tracé de particules reste très bruité.

Visualisation interactive et “Render Cache” : Nous avons intégré notre méthode avec le “Render Cache” pour une visualisation interactive des composantes non-diffuses de l'image. Notre algorithme s'adapte bien à cette approche, car une surface diffuse est rendue directement. Un exemple est montré dans la figure 7 et dans le film sur la page Web.

6 Conclusion

Nous avons présenté un nouvel algorithme pour l'éclairage global, qui prend en compte les effets diffus comme non-diffus, d'une manière simple et intégrée.

Cela a été possible par l'intégration d'un tracé de particules pour les échanges non-diffus, dans l'étape de transfert d'énergie d'un algorithme de radiosité hiérarchique. La radiosité permet de simuler efficacement les interactions diffuses. De plus, les liens créés contiennent de nombreuses informations sur le flux lumineux à travers la scène. Nous avons exploité ces informations pour guider et accélérer l'émission de particules qui simule les interactions non-diffuses. Cela permet une simulation de tous les chemins lumineux, comprenant les réflexions spéculaires (créant des caustiques) sans le coût et le bruit d'un tracé de particules pour toutes les interactions.

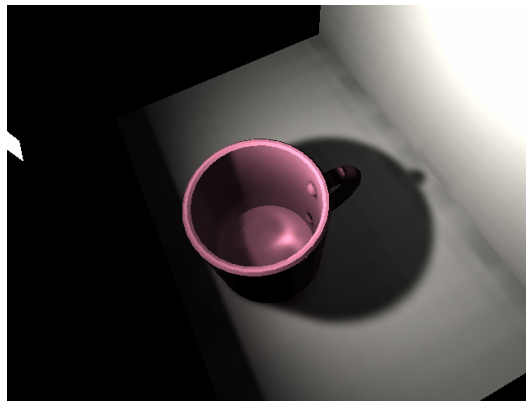


FIG. 4 – Ballade interactive en utilisant le matériel graphique (transparence simple, pas de réfraction). (à gauche) “Soda Shoppe” (à droite) scène avec une tasse : la source lumineuse peut être déplacée à ~ 2 secs/image.

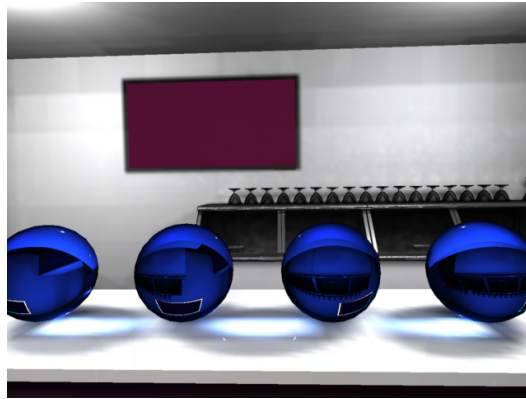


FIG. 5 – Deux vues d’une même scène. La simulation a pris 17 m 22 s.



FIG. 6 – La scène Soda Shoppe scène avec un éclairage indirect (les sources sont face aux murs) : (à gauche) Simulation en 9 minutes 2 sec avec notre méthode; (à droite) Tracé de particules en 8 minutes 2 sec.



FIG. 7 – Deux images d’une session interactive à 3.5 Hz (SGI R12000 400Mhz) avec le “Render Cache”. Dans un déplacement vers la droite, des défauts apparaissent là où les échantillons ne sont plus valides.

Notre méthode intégrée peut traiter efficacement les cas d'éclairage indirect (diffus comme non-diffus). Il permet aussi une transition progressive entre une solution rapide mais de faible qualité, vers une solution plus lente mais de grande qualité, sans jamais sacrifier des chemins lumineux.

Une étape de reconstruction efficace permet de visualiser interactivement la lumière diffuse avec les réflexions spéculaires créant des caustiques. Cela peut être simulé interactivement pour les scènes dynamiques simples. Pour les scènes plus complexes, le temps de calcul reste raisonnable.

Pour un rendu de plus grande qualité, un tracé de rayons permet de visualiser correctement les surfaces non-diffuses. Cela peut être fait interactivement en utilisant le "Render Cache".

Travaux en cours et futurs

Une des limitations de notre méthode est le besoin d'un maillage très fin pour visualiser correctement les hautes fréquences souvent présentes dans les phénomènes non-diffus. Le nombre d'éléments de maillage a tendance à exploser. Une solution serait de reconstruire séparément les hautes fréquences (principalement spéculaires) et les basses fréquences (principalement diffus). Nous sommes en train de développer un algorithme de reconstruction hiérarchique pour les composantes basses fréquences, avec le traitement des hautes fréquences comme des textures ou "cartes de caustiques". Les "cartes de caustiques" ne seraient utilisées que pour l'affichage de la scène.

Pour la mise à jour interactive, nous nous intéressons à des méthodes similaires à celle de [6]. Un des points essentiels, est comment émettre des particules localement pour mettre à jour les changements intervenus. Notre but est de pouvoir faire des modifications interactives dans des scènes plus complexes.

Remerciements

Ce travail a été effectué en grande partie dans le cadre d'un projet ESPRIT européen #35772 SIMULGEN 2. Merci beaucoup à Pierre Poulin pour les nombreuses discussions et les nombreux conseils.

Références

- [1] L. Aupperle and P. Hanrahan. A hierarchical illumination algorithm for surfaces with glossy reflection. In *Proc. SIGGRAPH'93*, Annual Conference Series, pages 155–162, 1993.
- [2] S. E. Chen, Holly E. Rushmeier, G. Miller, and D. Turner. A progressive multi-pass method for global illumination. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '91)*, volume 25, pages 165–174, July 1991.
- [3] P. H. Christensen, D. Lischinski, E. J. Stollnitz, and D. H. Salesin. Clustering for glossy global illumination. *ACM Trans. on Graphics*, 16(1) :3–33, January 1997.
- [4] M. F. Cohen, S. E. Chen, J. R. Wallace, and D. P. Greenberg. A progressive refinement approach to fast radiosity image generation. In *Computer Graphics (SIGGRAPH 88)*, volume 22(4), pages 75–84, August 1988.
- [5] S. Collins. Adaptive splatting for specular to diffuse light transport. *5th EG Workshop on Rendering*, pages 119–135, June 1994. Darmstadt, Germany.
- [6] G. Drettakis and F. Sillion. Interactive update of global illumination using a line-space hierarchy. In *Proc. SIGGRAPH'97*, Annual Conference Series, pages 57–64, August 1997.
- [7] R. Dumont, K. Bouatouch, and P. Gosselin. A progressive algorithm for three point transport. *Computer Graphics Forum*, 18(1) :41–56, March 1999.
- [8] C. M. Goral, K. K. Torrance, D. P. Greenberg, and B. Battaile. Modelling the interaction of light between diffuse surfaces. In *Computer Graphics (SIGGRAPH'84)*, volume 18(3), pages 213–222, July 1984.
- [9] E. A. Haines and J. R. Wallace. Shaft culling for efficient ray-traced radiosity. *2nd EG Workshop on Rendering (Photorealistic Rendering in Computer Graphics)*, 1994.
- [10] P. S. Heckbert. Adaptive radiosity textures for bidirectional ray tracing. In *Computer Graphics (SIGGRAPH'90)*, volume 24, pages 145–154, August 1990.
- [11] D. S. Immel, M. F. Cohen, and D. P. Greenberg. A radiosity method for non-diffuse environments. *Computer Graphics (SIGGRAPH'86)*, 20(4) :133–142, August 1986.

- [12] H. Wann Jensen. Global illumination using photon maps. In *7th EG Rendering Workshop, "Rendering Techniques '96*, pages 21–30. EG, Springer Wien, June 1996.
- [13] A. Keller. Instant radiosity. In *Proc. SIGGRAPH'97, Annual Conference Series*, pages 49–56, August 1997.
- [14] L. Kobbelt, M. Stamminger, and H-P. Seidel. Using subdivision on hierarchical data to reconstruct radiosity distribution. *Computer Graphics Forum*, 16(3) :347–356, August 1997. Proc. of EG '97.
- [15] E. P. Lafortune and Y. D. Willems. Using the modified phong reflectance model for physically based rendering. Technical Report CW 197, Dept. of Computing Science, K.U. Leuven, November 1994.
- [16] L. Neumann. Monte Carlo Radiosity. *Computing*, 55(1) :23–42, 1995.
- [17] S. Schäfer. Hierarchical radiosity on curved surfaces. In *EG Workshop on Rendering 1998, "Rendering Techniques '98"*, pages 187–192. EG, Springer Wien, June 1997.
- [18] P. Shirley. Radiosity via Ray Tracing. In *Graphics Gems II*, pages 306–310. Academic Press Professional, Boston, MA, 1991.
- [19] P. Shirley. A ray tracing method for illumination calculation in diffuse-specular scenes. *Graphics Interface '90*, pages 205–212, May 1990.
- [20] F. X. Sillion. A unified hierarchical algorithm for global illumination with scattering volumes and object clusters. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 1(3) :240–254, September 1995.
- [21] F. X. Sillion, J. R. Arvo, S. H. Westin, and D. P. Greenberg. A global illumination solution for general reflectance distributions. In *Computer Graphics (SIGGRAPH'91)*, volume 25(4), pages 187–196, July 1991.
- [22] F. X. Sillion and C. Puech. A general two-pass method integrating specular and diffuse reflection. In *Computer Graphics (SIGGRAPH'89)*, volume 23, pages 335–344, July 1989.
- [23] B. Smits, J. Arvo, and D. P. Greenberg. A clustering algorithm for radiosity in complex environments. In *Proc. SIGGRAPH'94, Annual Conference Series*, pages 435–442, July 1994.
- [24] M. Stamminger, Annette Scheel, X. Granier, F. Perez-Cazorla, G. Drettakis, and F. X. Sillion. Efficient glossy global illumination with interactive viewing. *Graphics Interface '99*, pages 50–57, June 1999.
- [25] M. Stamminger, P. Slusallek, and H-P. Seidel. Three point clustering for radiance computations. In *9th EG Workshop on Rendering, "Rendering Techniques '98"*, pages 211–222. Springer Wien, 1998.
- [26] M. Stamminger, P. Slusallek, and H-P. Seidel. Bounded radiosity - illumination on general surfaces and clusters. *Computer Graphics Forum*, 16(3) :309–318, August 1997.
- [27] W. Stürzlinger and R. Bastos. Interactive rendering of globally illuminated glossy scenes. In *8th EG Workshop on Rendering, "Rendering Techniques '97"*, pages 93–102. Springer Wien, June 1997.
- [28] E. Veach. *Robust Monte-Carlo Methods for Light Transport Simulation*. PhD thesis, Stanford University, 1997. http://graphics.stanford.EDU/papers/veach_thesis/.
- [29] J. R. Wallace, M. F. Cohen, and D. P. Greenberg. A two-pass solution to the rendering equation : A synthesis of ray tracing and radiosity methods. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '87)*, volume 21, pages 311–320, July 1987.
- [30] B. Walter, G. Drettakis, and S. Parker. Interactive rendering using the render cache. In *10th EG Workshop on Rendering, "Rendering Techniques'99"*. Springer Wien, June 1999. Granada, Spain.
- [31] B. Walter, P. M. Hubbard, P. Shirley, and D. P. Greenberg. Global illumination using local linear density estimation. *ACM Trans. on Graphics*, 16(3) :217–259, July 1997.
- [32] B. J. Walter. *Density estimation techniques for global illumination*. PhD thesis, Cornell University, 1998. <http://www.graphics.cornell.edu/pubs/1998/Wal98.html>.
- [33] G. J. Ward and P. Heckbert. Irradiance gradients. *3rd EG Workshop on Rendering*, pages 85–98, May 1992.
- [34] M. Watt. Light-water interaction using backward beam tracing. In *Computer Graphics (SIGGRAPH 90)*, volume 24(4), pages 377–385, August 1990.