



Chef d'oeuvre - Méthodes et algorithmes
Approximation d'éclairage indirect en temps réel

Blaise Cardonne Gauthier Bouyjou Valentin Camus
Rihab Elrifai Sylvain Durand

Encadrant/Client : François Desrichard

Novembre
2019

Contents

1	Introduction	3
1.1	Contexte	3
1.1.1	Lancer de rayons	3
1.1.2	Rastérisation	3
1.2	Objectif	5
2	Reflective Shadow Maps	5
3	Imperfect Shadow Maps	7
4	Gaussiennes sphériques	10

1 Introduction

Lorsque l'on synthétise des images en 3D, afin de déterminer la contribution d'une source lumineuse sur un objet, deux facteurs sont à prendre en compte. Le premier est le chemin pris par la lumière en partant directement de la source lumineuse, aussi appelé illumination direct. Le deuxième est l'illumination indirecte, où celui-ci représente la contribution des rayons reflétés par les autres surfaces 3D de la scène. Le cumul de ces deux techniques s'appelle l'illumination globale. Dans le contexte du rendu d'image, deux techniques permettent de faire de la synthèse d'images en 3D: le lancer de rayon et la rasterisation.

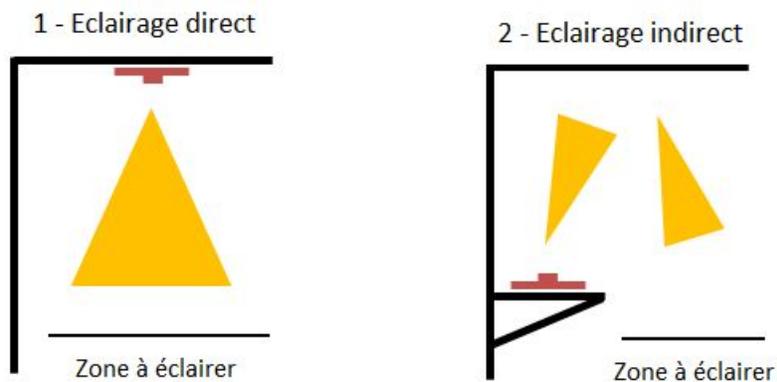


Figure 1: Représentation d'une illumination directe (image de gauche) et d'une illumination indirecte (image de droite) avec un seul rebond (soit deux rebonds avant de toucher la source lumineuse). Source: <https://www.ledsgo.fr/blog/rubans-led/installer-des-rubans-de-led>.

1.1 Contexte

1.1.1 Lancer de rayons

Dans le cas du lancer de rayon, la scène est rendue en simulant le parcours inverse de la lumière : on calcule les éclairages de la caméra vers les objets puis vers les lumières, alors que dans la réalité la lumière va de la scène vers l'œil. Cette technique, semblable à la perception humaine, permet de simuler très facilement l'éclairage global d'une scène. Cependant, elle est très lourde en calcul et ne permet pas un rendu en temps réel ¹.

1.1.2 Rasterisation

A la différence du lancer de rayon, la rasterisation permet un rendu en temps réel. Elle consiste à projeter les objets 3D (la scène) dans un repère 2D (l'image résultante).

¹Dans notre cas, temps réel signifie: synthèse d'une image en moins de 4ms

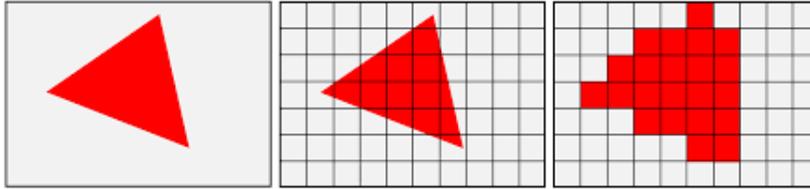


Figure 2: Discretisation d'un triangle (image de gauche) en fragments (image de droite), notamment utilisé par la rasterisation pour projeter l'objet 3D dans un repère 2D. Source: <https://www.techspot.com/article/1888-how-to-3d-rendering-rasterization-ray-tracing>

L'éclairage direct est simulé de manière intuitive via le système des cartes de profondeurs. Pour cela, avant la passe de rendu, des cartes de profondeur du point de vue de chaque lumière sont générées. Elles sont appelées cartes d'ombrage (shadow map en anglais). Par la suite, afin de déterminer si un fragment est éclairé par une source de lumière, il suffit de regarder s'il appartient à la carte de d'ombrage générée pour cette source de lumière. Si c'est le cas, il est visible, sinon, il est dans l'ombre.

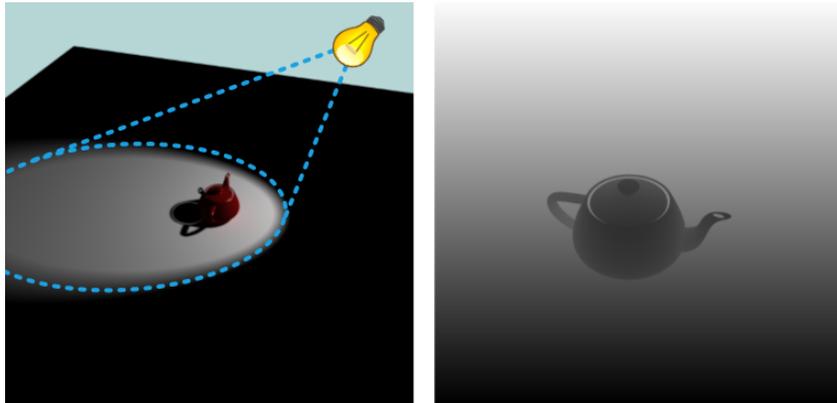


Figure 3: Représentation d'une scène éclairée par une lumière de type projecteur (image de gauche), avec sa carte d'ombrage (image de droite). Source: http://www.redway3d.com/downloads/public/documentation/shadow_map_principle.png

Cependant, ce système ne permet pas de simuler l'éclairage indirect en temps réel, notamment pour des raisons de temps de calculs.

1.2 Objectif

L'objectif du projet est d'implémenter une solution rapide et robuste permettant de simuler au moins un rebond de lumière dans le cadre du rendu temps réel. Pour cela, on nous propose d'essayer de s'approcher de la solution de Square Enix présentée par Yusuke Tokuyoshi dans l'article *Virtual spherical gaussian lights for real-time glossy global illumination* [1]. Leur solution se base sur la méthode des *Reflective Shadow Maps* pour répondre au problème de la visibilité [2] ainsi que sur des *gaussiennes sphériques* pour simuler l'éclairage indirect [3]. Un autre type de cartes de profondeurs, les *Imperfect Shadow Maps* permettent également de calculer l'éclairage indirect mais en faisant moins d'approximations au niveau de la visibilité [4]. C'est donc ces méthodes et les fonctions Gaussiennes Sphériques que nous allons utiliser pour développer notre chef d'oeuvre et que nous allons décrire dans la suite de ce rapport.

Toutes ces solutions se basent sur la méthode des VPLs (Virtual Point Lights) décrite par Alexander Keller en 1997 dans *Instant radiosity* [5]. Nous ne rentrerons cependant pas dans le détail de ce papier dans ce rapport, étant donné que l'idée a été reprise par toutes les méthodes que nous allons aborder.

2 Reflective Shadow Maps

La méthode des *Reflective Shadow Maps* (RSM) [2] a pour point de départ les cartes de profondeurs classiques et les étendent pour calculer un éclairage indirect plausible. Cette méthode s'appuie sur le principe de Huygens qui suggère que chaque point atteint par une source de lumière devient une source de lumière indirecte. L'idée est donc de considérer chaque pixel d'une carte de profondeur comme une source de lumière indirecte.

Afin de pouvoir utiliser ces sources de lumières indirectes, les RSM contiennent plus d'information qu'une carte de profondeur standard. On va donc stocker en plus de la profondeur : la position dans la scène, la normale et la radiance du point de la surface (Fig. 4). Ces informations sont stockées dans différents buffers et permettent de représenter des lumières virtuelles éclairant dans l'hémisphère orientée dans la direction de la normale en la surface.

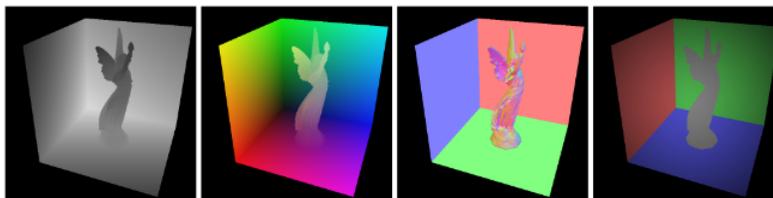


Figure 4: Composition d'une RSM avec de gauche à droite : la profondeur, les coordonnées dans l'espace monde, la normale et la radiance. Dachsbacher et Stamminger [2]

Évaluer naïvement l'éclairage indirect en un point de la scène consisterait donc à faire la somme des contributions de toutes ces lumières en ce point. Cependant, les cartes de profondeur comprennent un nombre important de pixel et comme on a une lumière par pixel de la carte, évaluer la contribution de toutes ces lumières prendrait trop de temps. On va donc pré-calculer un modèle d'échantillonnage basé sur l'approximation que les lumières indirectes qui sont le plus proche dans la scène proviennent des pixels les plus proches de la RSM. Ces lumières indirectes les plus proches sont considérées comme les plus influentes sur le calcul de l'éclairage indirect du fragment et donc les plus importantes. Le modèle d'échantillonnage est calculé en utilisant les coordonnées polaires relatives à la position de la projection du fragment sur la RSM. De plus, on ne prendra pas en compte l'occlusion pour ces sources de lumière indirecte car elles sont trop nombreuses. C'est une approximation qui peut entraîner de très mauvais résultats dans certaines scènes mais qui, en général, offre des résultats acceptables, bien que imprécis.

Échantillonner les lumières indirectes peut cependant ne pas être suffisant pour arriver à atteindre du temps interactif, et pour accélérer le rendu on peut utiliser une méthode d'interpolation en espace écran. Le principe de cette méthode est de calculer l'éclairage indirect de la scène en basse résolution dans un premier temps. On regardera ensuite pour chaque fragment de l'image final si l'éclairage indirect peut être calculé en interpolant les 4 échantillons environnants de l'image basse résolution obtenue. Si au moins 3 des 4 échantillons sont considérés comme adaptés pour l'interpolation alors on interpole les échantillons adaptés, sinon, on calcule l'éclairage indirect pour le pixel en utilisant les lumières indirectes dans une dernière passe de rendu. Les échantillons sont considérés comme adaptés si leur normale est similaire à celle du fragment et si ils sont proches du fragment dans l'espace monde.

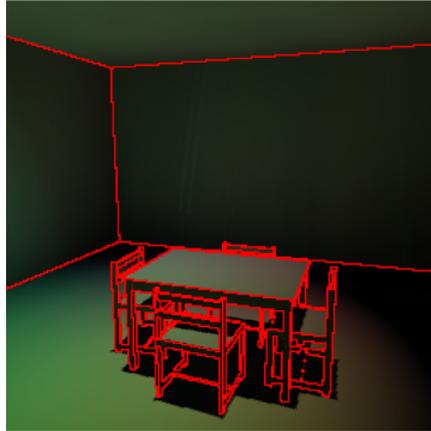


Figure 5: Efficacité de l'interpolation en espace écran : seuls les pixels rouges n'ont pas été calculés par interpolation. Dachsbacher et Stamminger [2]

3 Imperfect Shadow Maps

Les *Imperfect Shadow Maps* (ISMs)[4] sont des cartes de profondeurs basses résolutions proposées pour répondre au problème du nombre conséquent de VPLs à considérer dans une scène. Contrairement aux *Reflective Shadow Maps*[2], la méthode ne néglige pas la visibilité entre un point de la scène et une VPL. Cependant, le nombre conséquent de VPLs pour obtenir une bonne estimation de l'éclairage indirect impose des sacrifices au niveau de la qualité et de la précision des cartes de profondeurs (la méthode utilise d'ailleurs des cartes de profondeurs paraboliques [6], ce qui induit une légère déformation mais permet d'éviter d'utiliser une cubemap par VPL).

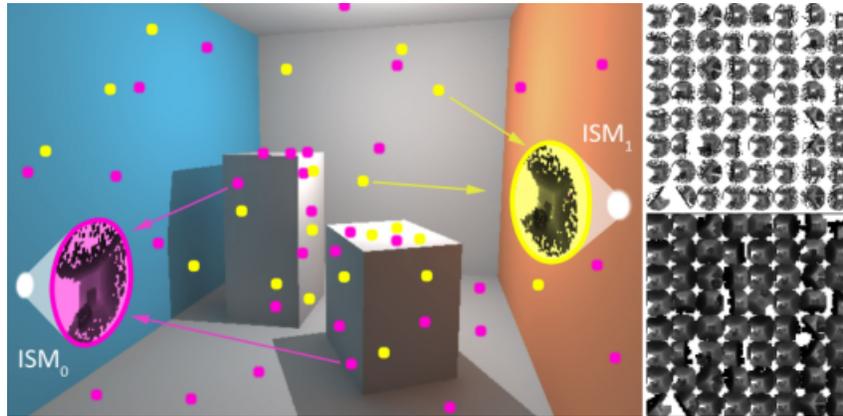


Figure 6: Démonstration du principe d'illumination globale avec les ISM. Ritschel et al. [4]

Dans une phase de pré-calcul, on va venir créer, à partir d'une densité fixée, un nuage de points de la scène. Chaque point est créé en sélectionnant aléatoirement un triangle avec une probabilité proportionnelle à son aire, un grand triangle sera donc naturellement représenté par plus de points qu'un petit (dans le cas où il est effectivement représenté). La distribution des points sur une face suit également une loi uniforme.

A partir de cette représentation, on peut créer une ISM par VPL qu'on viendra stocker dans une seule et même texture de grandes dimensions pour des raisons de performances (Fig. 6, coin supérieur/inferieur droit). En pratique, on utilise seulement un sous ensemble du nuage de points de la scène pour créer une ISM (Fig. 6 : deux sous ensembles de points mauves et jaunes sont utilisés pour respectivement les ISM 0 et 1). Un point donné occupe d'autant plus de place sur une carte de profondeurs qu'il est proche d'une VPL.

Il est évident que les cartes de profondeurs générées à partir de nuages de points contiennent des défauts sous forme de trous. On va donc avoir recours à une étape de correction des ISMs, appelée *pull & push* par les auteurs.

Cette méthode de correction fonctionne en deux étapes. Dans un premier temps (phase de *pull*), on vient sous dimensionner la carte de profondeurs en n'utilisant que les pixels valides (i.e. ceux qui ont une valeur) pour l'interpolation lors du sous dimensionnement. Dans un second temps (phase de *push*), on remonte cette hiérarchie de cartes de la plus petite à la plus grande pour attribuer une valeur aux pixels qui n'en ont pas. Dans les deux phases de correction, une méthode de rejet des valeurs aberrantes est mise en place (via un seuil à déterminer): on ne souhaite pas reconstruire les cartes à partir de valeurs de profondeurs qui ne correspondent pas (i.e. qui n'appartiennent pas au même plan).

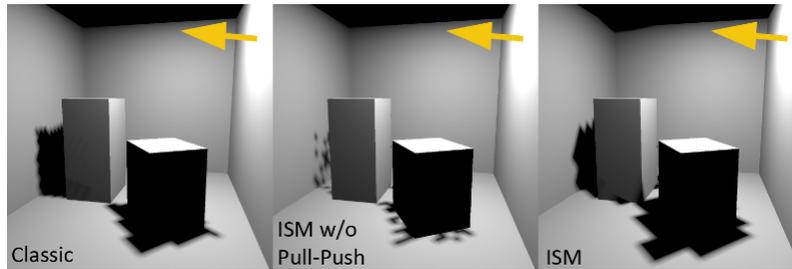


Figure 7: Démonstration de la nécessité de l'étape pull & push. Ritschel et al. [4]

Comme on peut le voir sur la figure 7, l'étape de correction est absolument cruciale pour obtenir un résultat acceptable. On obtient au final des ISMs relativement proches des cartes d'ombres traditionnelles (modulo les distorsions liées au fait que les cartes soient paraboliques) mais à bien moindre coût (un facteur 20 sur certaines scènes en fonction du nombre de VPLs considérées). Dans tous les cas, l'influence d'une seule VPL sur l'ensemble du résultat final est tellement faible qu'on peut se permettre de telles différences: en sommant suffisamment de contributions, on a un effet de lissage naturel qui apparaît et qui rend la méthode tout à fait viable et visuellement plausible (Fig. 8).



Figure 8: Comparaison de résultats entre ISM et cartes de profondeurs standards. Ritschel et al. [4]

4 Gaussiennes sphériques

Les gaussiennes sphériques sont un type de *Spherical Radial Basis Function* (SRBF). Elles permettent d’approximer la radiance sortante en un point de la scène. Cette représentation des sources est relativement commune pour plusieurs raisons. Première chose relativement rare, elles permettent de conserver à la fois l’information diffuse et spéculaire. De plus, comme leur nom l’indique, ces fonctions sphériques sont représentées par des gaussiennes. On a donc un certain nombre de propriétés intéressantes qui découlent de cette représentation, notamment que le produit de gaussiennes est une gaussienne et qu’on a une solution analytique pour l’intégrale d’une gaussienne [3]. Ces deux propriétés viennent directement du fait qu’une gaussienne n’est en soit qu’une exponentielle. Pour profiter de ces propriétés et limiter certains des problèmes des VPLs (notamment les fameux “plotch”), le papier *Virtual Spherical Gaussian Lights for Real-time Glossy Indirect Illumination* [1] propose d’approximer un ensemble de VPLs par une unique gaussienne sphérique et une distribution gaussienne (Fig. 9).

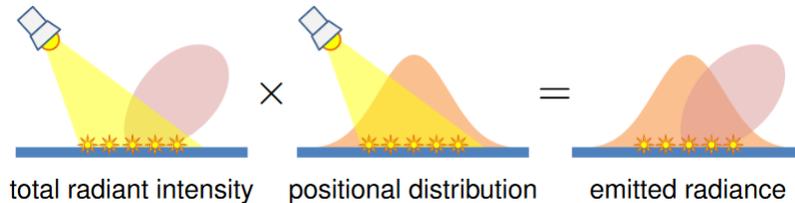


Figure 9: Représentation du produit entre un groupe de VPLs et la distribution spatiale associée pour le calcul de la radiance émise. Yusuke Tokuyoshi [1]

L’article propose justement une approximation de ce terme de radiance totale adaptée à l’évaluation en temps réel. A partir de ce terme et de la distribution correspondante, on a une forme analytique pour la radiance émise par une *Virtual Spherical Gaussian Light* (VSGL):

$$I_e(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}) \approx \frac{I_v(\boldsymbol{\omega})}{2\pi\sigma_v^2|\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n}|} g(\|\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_v\|, \sigma_v^2)$$

Figure 10: Formule pour l’approximation de la radiance émise. Yusuke Tokuyoshi [1]

avec I_v la radiance totale pour l’ensemble de VPLs, et σ_v^2 et $\boldsymbol{\mu}_v$ respectivement la variance et la moyenne de la distribution spatiale.

Toutes ces approximations sont évidemment faites pour des raisons de temps de calculs, sans toutefois remettre en question la qualité des résultats (Fig. 11)

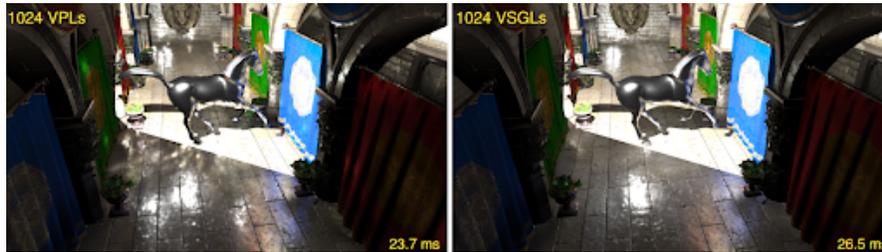


Figure 11: Comparaison VPLs/VSGLs sur la scène *Sponza*. Yusuke Tokuyoshi [1]

Au niveau de l'implantation, cet article de Tokuyoshi [1] se base sur les *Reflective Shadow Maps* pour le problème de la visibilité. On a donc un lien direct entre ce papier et celui de Dachsbacher et Stamminger[2], on va donc la aussi retrouver un ensemble de buffers pour stocker les informations complémentaires à la carte de profondeurs (Fig. 12).

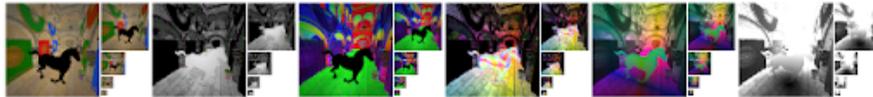


Figure 12: Contenus des buffers de la *Reflective Shadow Map* [2] utilisée. Yusuke Tokuyoshi [1]

Vous noterez la présence de plusieurs niveaux de *mipmap* sur ces buffers. Comme beaucoup de méthodes qui fonctionnent en temps réel, ce mécanisme de *mipmapping* est exploité autant que possible, dans ce cas précis, pour accélérer l'étape de groupement des VPLs évoquée précédemment.

References

- [1] Yusuke Tokuyoshi. Virtual spherical gaussian lights for real-time glossy indirect illumination. *Computer Graphics Forum*, 34(7):89–98, 2015.
- [2] Carsten Dachsbacher and Marc Stamminger. Reflective shadow maps. In *Proceedings of the 2005 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, I3D '05*, pages 203–231, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [3] MJP The Danger Zone. SG series, 2016.
- [4] T. Ritschel, T. Grosch, M. H. Kim, H.-P. Seidel, C. Dachsbacher, and J. Kautz. Imperfect shadow maps for efficient computation of indirect illumination. *ACM Trans. Graph.*, 27(5):129:1–129:8, December 2008.
- [5] Alexander Keller. Instant radiosity. Technical Report 287, Fachbereich Informatik, 1997.
- [6] Stefan Brabec, Thomas Annen, and Hans-Peter Seidel. Shadow mapping for hemispherical and omnidirectional light sources. In John Vince and Rae Earnshaw, editors, *Advances in Modelling, Animation and Rendering*, pages 397–407, London, 2002. Springer London.