



## Sources directionnelles en tracé de rayons

Stéphane Albin, Pierre-Frédéric Villard, Bernard Péroche

► **To cite this version:**

Stéphane Albin, Pierre-Frédéric Villard, Bernard Péroche. Sources directionnelles en tracé de rayons. Journées AFIG 2001, 2001, Limoges, France. pp.225-234, 2001. <hal-00849343>

**HAL Id: hal-00849343**

**<https://hal.inria.fr/hal-00849343>**

Submitted on 20 Sep 2013

**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.

# Sources directionnelles en tracé de rayons

Stéphane ALBIN<sup>†</sup>, Pierre-Frédéric VILLARD<sup>‡</sup> et Bernard PÉROCHE<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>LISSE, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne  
158, cours Fauriel - 42023 Saint-Étienne Cedex 2

<sup>‡</sup>LIGIM, UFR d'Informatique, Université Claude Bernard Lyon 1  
Bâtiment Nautibus - 8, boulevard Niels Bohr - 69622 Villeurbanne Cedex  
salbin@emse.fr, pfvillar@emse.fr, bperoche@ligim.univ-lyon1.fr

**Résumé :** *Ce document traite de la prise en compte du caractère directionnel d'une source lumineuse. Après un bref résumé des travaux déjà existants, nous décrivons les sources uniformes habituellement utilisées en synthèse d'image. Nous présentons ensuite un nouveau modèle basé sur celui de Noé et al. [10]. L'utilisation des intégrales singulières sur des noyaux à support local, couplée à un processus hiérarchique, permet une recombinaison rapide et précise du solide photométrique d'une source de lumière. L'application aux sources ponctuelles et surfaciques est enfin développée.*

**Mots-clés :** Tracé de rayons, sources lumineuses, solide photométrique, champ proche, champ lointain

## 1 Introduction

Aujourd'hui, en urbanisme, la conception des bâtiments nécessite l'intégration de sources lumineuses de plus en plus complexes. Cette complexité peut être de nature colorimétrique avec l'emploi de lampes à distribution spectrale particulière. Mais la technicité peut être aussi de nature directionnelle. Ainsi, depuis quelques années, les constructeurs de luminaires mettent à disposition des informations sur la distribution directionnelle de leurs produits. Nous sommes donc à même de modéliser plus fidèlement l'éclairage dans une scène donnée.

En éclairagisme, il convient de différencier les notions de *champ proche* et de *champ lointain*. En champ lointain, nous pouvons considérer une source lumineuse comme ponctuelle. Dans ce cas, on associe à la source un *solide photométrique* qui n'est autre que la représentation angulaire en deux dimensions de l'information directionnelle. Au contraire, en champ proche, le volume de la source et plus généralement toute sa géométrie influent sur l'éclairage produit en un point. Le seul solide photométrique ne suffit plus. L'habitude veut de définir le champ lointain comme cinq fois la plus grande longueur d'une source de lumière [1].

Dans cet article, nous proposons une méthode pour recomposer un solide photométrique à partir d'un fichier de mesures. Outre le cas des sources ponctuelles, nous tentons d'appliquer notre méthode à des sources surfaciques.

Dans la section 2, nous exposons les principaux travaux déjà effectués sur le sujet. La section 3 sera consacrée aux sources uniformes existantes. Nous en profiterons pour proposer un modèle pour des sources cylindriques. Dans la section 4, nous discuterons de la représentation des données puis de notre modèle pour les recomposer.

Nous commencerons par le tester sur des sources ponctuelles dans la section 5. Et nous aborderons les sources surfaciques dans la section 6. Enfin, nous conclurons et donnerons quelques perspectives dans la section 7.

## 2 Travaux précédents

Lorsque le point éclairé est suffisamment éloigné de la source lumineuse, celle-ci peut être considérée comme étant ponctuelle. Nous disons alors que nous sommes en *champ lointain*.

Dans ce cadre, la prise en compte du caractère directionnel d'une source de lumière a déjà été abordée. Languéou et al. [7] ont proposé une méthode sommaire d'interpolation à partir de courbes situées dans deux plans perpendiculaires (*cf.* section 4.1).

Pour le calcul en champ proche, on doit une première tentative à Houle et al. [4] pour des sources surfaciques. Ils commencent par échantillonner la surface de la source. Chaque point possède alors un solide photométrique particulier. Et la contribution finale de la source est calculée en interpolant les valeurs entre ces points. Cependant, il est difficile de connaître la corrélation entre la position sur la surface et la variation du solide photométrique.

Les travaux d'Ashdown [1] montrent qu'en champ proche, la notion de solide photométrique n'est plus suffisante. Ashdown propose de mesurer l'énergie émise par une source au moyen d'un dispositif qu'il décrit. Ces mesures seront ensuite utilisées lors du calcul d'éclairement d'un point.

Dans une même optique, il est aussi possible de considérer une approche basée sur la simulation. Deville et al. [2] puis, plus tard, Heidrich et al. [3] ont voulu simuler les interactions dans le système constituant la source. Ils définissent un dispositif comprenant une source lambertienne et un jeu de réflecteurs. Une phase de simulation permet ensuite de calculer la distribution d'énergie sur une surface englobante virtuelle. C'est cette surface et sa distribution énergétique qui seront utilisées dans la phase de rendu. Précisons qu'Heidrich et al. proposent de stocker cette énergie dans un lumigraphie.

Si ces dernières méthodes font preuve d'une bonne précision, reste encore à connaître la géométrie interne de la source, ce qui semble a priori difficile avec la complexité grandissante de ces dispositifs. Il faut, de plus, avoir une connaissance des *BRDF* des réflecteurs internes. Enfin, la source lumineuse interne au système optique (par exemple une ampoule ou un néon) peut avoir elle-même une distribution spatiale et directionnelle complexe.

### 3 Sources uniformes

Les sources lumineuses historiquement employées en synthèse d'images sont les sources ponctuelles et les sources directionnelles ([8], [11]). Les premières, définies par un point de l'espace, émettent dans toutes les directions une énergie donnée par la formule :

$$E = \frac{I}{d^2} \tag{1}$$

Pour les sources directionnelles, cette même énergie est de plus atténuée selon un cône défini par un angle d'ouverture.

#### 3.1 Sources surfaciques

Ces dernières années, des modèles de sources avec une géométrie étendue ont été proposés. Ainsi, des sources sphériques ou surfaciques planes sont maintenant régulièrement utilisées en tracé de rayons. Zaninetti et al. [14] ont proposé un découpage adaptatif des sources surfaciques rectangulaires uniformes, au lieu de l'échantillonnage ponctuel habituel.

L'idée générale est que l'énergie reçue en un point est proportionnelle à l'angle solide sous lequel la source surfacique est «vue». Ainsi, on divise la source en éléments de surface tels que l'angle solide incident à chaque élément soit inférieur à un seuil fixé. Cette subdivision est effectuée suivant un *bintree* de manière à ce que les deux nouveaux éléments soient vus selon le même angle solide. Il est ensuite possible de poursuivre le raffinement en fonction des occlusions éventuelles mais cette fois-ci selon un *quadtree*.

Zaninetti et al. ont aussi étendu cet algorithme aux sources planes de forme quelconque. Il suffit d'associer un masque à la surface. Ainsi, les points intérieurs à la surface reçoivent la valeur 1 et les points extérieurs la valeur 0. Le raffinement est alors aussi conditionné par l'homogénéité de l'appartenance à une des deux zones (*cf.* figure 1).

---

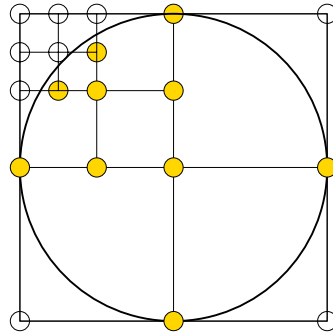


FIG. 1 – Découpage d'une source de type disque

### 3.2 Sources cylindriques

Nous proposons une nouvelle extension de cette méthode aux sources cylindriques. Nous partons du postulat que la forme cylindrique n'a qu'une faible influence sur l'énergie incidente. Nous pouvons alors approximer notre cylindre par une source surfacique perpendiculaire au plan formé par le point  $x$  et l'axe du cylindre (cf. figure 2).

Pendant, le calcul étant complètement dépendant de l'angle solide, l'énergie est donc nulle lorsque nous sommes dans l'axe du cylindre. Nous avons rajouté la possibilité de prendre en compte l'éclairement par les extrémités. Nous définissons donc celles-ci comme des sources de type disque telles qu'expliquées plus haut.

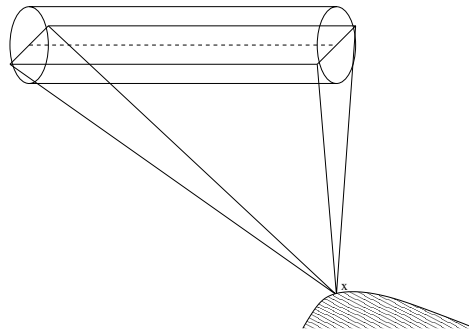


FIG. 2 – Source cylindrique

## 4 Représentation des sources lumineuses

Les différentes descriptions ainsi que la méthode de recomposition présentées sont basées sur des mesures en champ lointain.

### 4.1 Description

La distribution angulaire d'une source de lumière a longtemps été représentée par deux courbes orthogonales  $(\theta, \phi = 0)$  et  $(\theta = 0, \phi)$ . Si Languéno et al. [7] ont proposé une interpolation pour obtenir une valeur pour tout couple  $(\theta, \phi)$ , il est clair qu'il est difficile de garantir une grande précision.

Aujourd'hui, les constructeurs mettent de plus en plus les données à disposition sous forme de matrice. Nous avons donc là un véritable solide photométrique discrétisé. Le format le plus

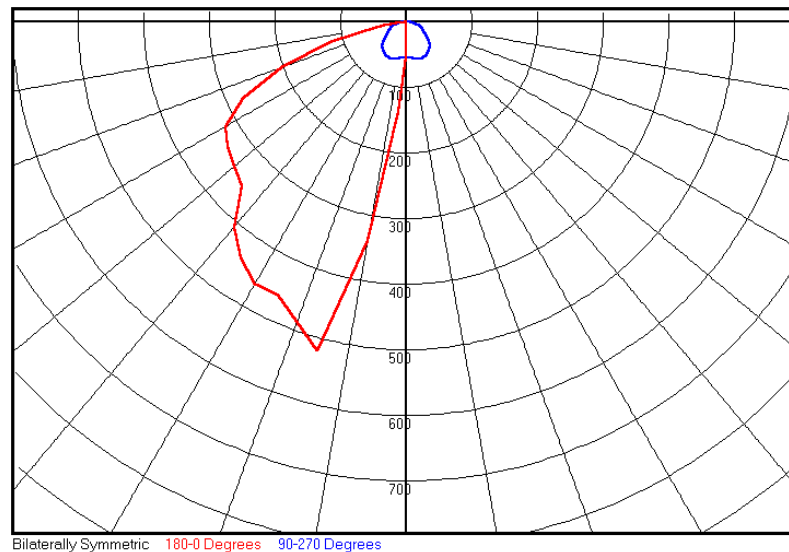


FIG. 3 – Courbes photométriques

utilisé est le format *IES* [5] défini par l'IESNA<sup>1</sup>. Ce format n'est autre que la description matricielle de la distribution angulaire. Il intègre aussi la notion de symétrie si le solide photométrique n'est défini que pour une demi sphère ou même un quart de sphère. La figure 4 montre un exemple de solide photométrique possédant une variation directionnelle particulièrement importante, et dont le fichier *IES* correspondant se trouve en annexe.

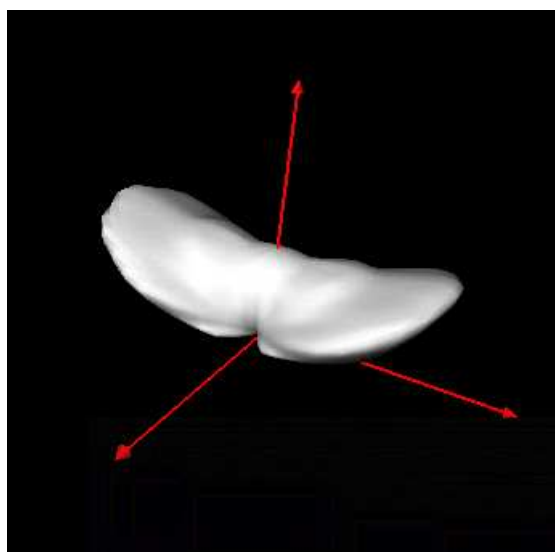


FIG. 4 – Solide photométrique

Signalons aussi l'existence du format *EULUMDAT*, qui est le standard européen. S'il est plus évolué que le format *IES*, il n'est pas encore très répandu dans le milieu de l'éclairagisme. Nous avons donc choisi d'utiliser le format *IES* pour ne pas être restreints par les données disponibles.

1. Illuminating Engineering Society of North America, <http://www.iesna.org>

## 4.2 Reconstruction

### 4.2.1 Approche formelle

Pour reconstruire le solide photométrique quelle que soit l'incidence, nous avons utilisé le modèle de Noé et al. [10] qui met en œuvre une recombinaison de *BRDF* à partir de mesures goniophotométriques.

La méthode est basée sur les intégrales singulières, définies par :

$$I(\rho, f)(\vec{X}) = \int_{\Omega} f(\vec{x})K(\rho, \vec{x} \cdot \vec{X})d\omega(x) \quad (2)$$

avec :

- $I$ , l'intégrale singulière de la fonction  $f$  ;
- $\vec{X}$ , la direction donnée;
- $\Omega$ , la sphère unitaire ;
- $K(\rho, \cdot)$ , un noyau de paramètre  $\rho$ ,  $\rho \in ]-1; 1[$ . Noé et al. ont choisi :

$$K(\rho, \theta_i) = \frac{3}{2\pi} \times \frac{\cos \theta_i}{(1 - \rho)^3} \quad (3)$$

Si le noyau vérifie certaines propriétés, alors on peut montrer que :

$$\int_{\Omega} I(\rho, f)d\omega = \int_{\Omega} fd\omega \quad \text{et} \quad \lim_{\rho \rightarrow 1^-} I(\rho, f) = f \quad (4)$$

Ainsi, en posant des noyaux bornés (capsules) aux endroits représentant les mesures, nous sommes capables d'obtenir une très bonne approximation de la fonction  $f$ , et ceci en un temps très rapide puisque les noyaux sont locaux à la zone d'évaluation concernée.

Enfin, après discrétisation, nous obtenons la fonction  $F(\vec{X})$  discrétisée qui, pour une direction donnée  $\vec{X}$ , exprime l'intensité émise par la source en fonction des mesures  $F_i$ .

$$F(\vec{X}) = \sum_{i=1}^n F_i K(\rho, \vec{X}_i \cdot \vec{X}) \Delta\omega_i^2 \quad (5)$$

$\Delta\omega_i^2$  est fixé de façon à minimiser l'erreur entre la recombinaison et la fonction originale. Noé et al. montrent que c'est une constante égale à  $\frac{\sum_{i=1}^n f(\vec{X}_i)F_i}{\sum_{i=1}^n f(\vec{X}_i)^2}$

Des informations complémentaires peuvent être trouvées dans [9] et [10].

### 4.2.2 Hiérarchisation

Le choix de  $\rho$  est à la fois déterminant et délicat. Pour y remédier, Noé et al. ont développé une approche hiérarchique. Sans entrer dans le détail, nous pouvons dire qu'il s'agit d'un raffinement successif en calculant à chaque fois l'erreur entre la fonction originale et la représentation. Cela permet de s'affranchir du choix de  $\rho$ .

### 4.2.3 Avantages

Cette recombinaison possède deux avantages importants: d'une part, le support local du noyau permet une évaluation rapide; d'autre part, le raffinement hiérarchique procure un meilleur contrôle.

Dans la phase de validation, Noé et al. montrent qu'on obtient des temps de reconstruction divisés d'un facteur 100 par rapport aux méthodes habituelles basées sur les harmoniques sphériques ou les polynômes de Zernike. Pour l'évaluation, les temps sont environ divisés par dix.

#### 4.2.4 Interpolation préalable

Ce modèle comporte cependant un point faible : il requiert un nombre de mesures suffisant. En effet, si il n'y a pas assez de mesures, nous risquons d'avoir des trous entre les différents noyaux. Cela n'est pas un problème pour reconstruire une *BRDF* car les mesures sont souvent nombreuses. Mais, ce n'est pas toujours le cas pour les solides photométriques. Nous avons vu en 4.1 que la description du solide photométrique, par des courbes orthogonales, pouvait être très sommaire.

C'est pourquoi, nous effectuons préalablement une interpolation pour répartir plus uniformément les données. Pour cela, nous avons choisi la méthode en arcs de spirales proposée par Zéghers [15] :

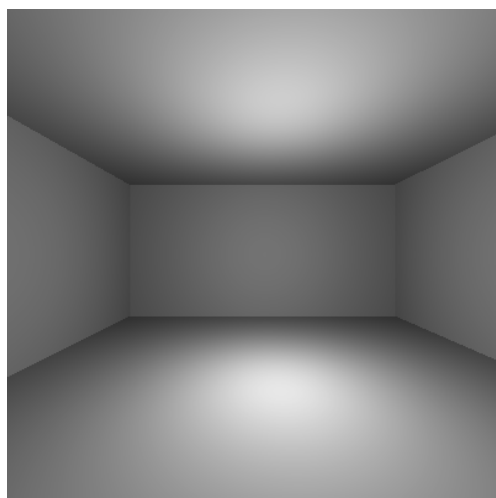
soit  $(\theta, \phi)$ , la direction à calculer ;  $\theta$  est encadré par deux angles  $\theta_1$  et  $\theta_2$ . De même,  $\phi$  est encadré par  $\phi^-$  et  $\phi^+$ . Ces quatre angles représentent les intensités  $I_1^-, I_2^-, I_1^+, I_2^+$ . La formule de Zéghers donne alors l'intensité  $I(\theta, \phi)$  :

$$I(\theta, \phi) = \frac{(\phi^+ - \phi)[(\theta_2 - \theta)I_1^- + (\theta - \theta_1)I_2^-] + (\phi - \phi^-)[(\theta_2 - \theta)I_1^+ + (\theta - \theta_1)I_2^+]}{(\phi^+ - \phi^-)(\theta_2 - \theta_1)} \quad (6)$$

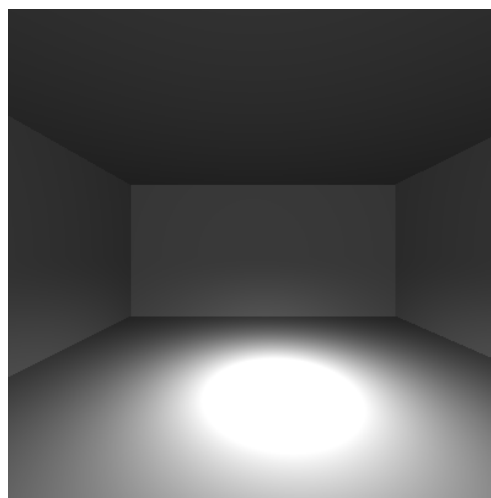
## 5 Application aux sources ponctuelles

Dans un premier temps, nous allons associer un solide photométrique à une source ponctuelle. Comme pour le cas lambertien, la luminance est calculée en divisant l'intensité par le carré de la distance à la source.

Sur les images suivantes, nous observons bien des différences d'éclairement lorsque la source est munie d'un solide photométrique particulier.



Source ponctuelle lambertienne  
5,85 secondes



Source ponctuelle avec solide photométrique  
8,77 secondes

FIG. 5 – Différence d'éclairement suivant le solide photométrique

Les images sont de taille 400 par 400. Pour les temps de calcul<sup>2</sup>, le surcoût de 50% n'est pas rédhibitoire dans une optique de calcul de précision. Quant à la consommation mémoire, le stockage du fichier *IES* et des noyaux sur les cinq niveaux de récursion ne coûte que 410 kilo-octets.

2. Sur un AMD Athlon cadencé à 800 mégahertz.

## 6 Sources surfaciques

Comme nous l'avons vu en 3.1, Zaninetti et al. ont développé un algorithme permettant de calculer l'éclairement induit par une source surfacique en un temps relativement rapide. La figure 6 montre le découpage d'une source surfacique en fonction de l'angle solide minimal donné. La forme hachurée représente une occlusion provoquant une ombre douce. La prise en compte de chaque carreau de source dépend de la visibilité des quatre extrémités et du centre.

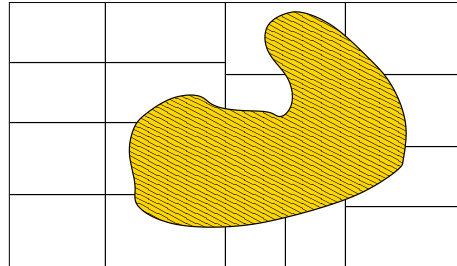


FIG. 6 – Découpage d'une source surfacique

Zaninetti et al. considéraient la luminance d'un élément de source comme étant uniforme donc seulement fonction de son angle solide. La prise en compte de la variation directionnelle peut se faire de manière très simple.

Nous savons que lorsque la distance à l'objet est supérieure à cinq fois la plus grande longueur de la source, celle-ci peut être considérée comme une source ponctuelle; c'est à dire que nous plaçons en champ lointain. En découpant la source de manière à respecter cette condition, chaque élément subdivisé peut être vu comme une source ponctuelle. Et l'énergie émise par la source surfacique est donc la somme des contributions de l'ensemble des sous-sources ponctuelles.

Pour évaluer notre intensité, nous avons besoin de connaître la direction d'incidence moyenne du carreau de source. Comme nous avons déjà calculé la visibilité des extrémités et du centre du carreau, il est naturel de prendre comme direction d'incidence la moyenne des ces directions non masquées par un objet.

La figure 7 montre l'éclairement produit au sol par une source surfacique directionnelle. Nous avons utilisé le même solide photométrique que pour la figure 5.

Nous constatons que pour un nombre moyen de divisions équivalent, les temps de calcul sont comparables. La consommation mémoire est indépendante du type de source utilisée. Elle est donc toujours de 410 kilo-octets.

Nous pouvons cependant remarquer un bruit sur l'image de droite.

## 7 Conclusion et perspectives

Nous avons proposé un modèle permettant de recomposer le solide photométrique d'une source lumineuse ponctuelle mais aussi surfacique. Nous avons vu que cette méthode possédait deux avantages principaux: d'une part, le support local des noyaux garantit une évaluation rapide puisque seuls les noyaux proches seront pris en compte; d'autre part, la structure hiérarchique permet de contrôler la précision.

Ce modèle comporte peu d'inconvénients sinon la nécessité d'une répartition minimale des mesures pour éviter les trous lors de la reconstruction.

Si les résultats paraissent visuellement corrects, nous pensons qu'il est indispensable de comparer nos calculs avec des mesures réelles. Slater a déjà effectué des travaux en ce sens pour définir des procédures tests [13]. Nous considérons donc que la prochaine étape doit être la validation du modèle.



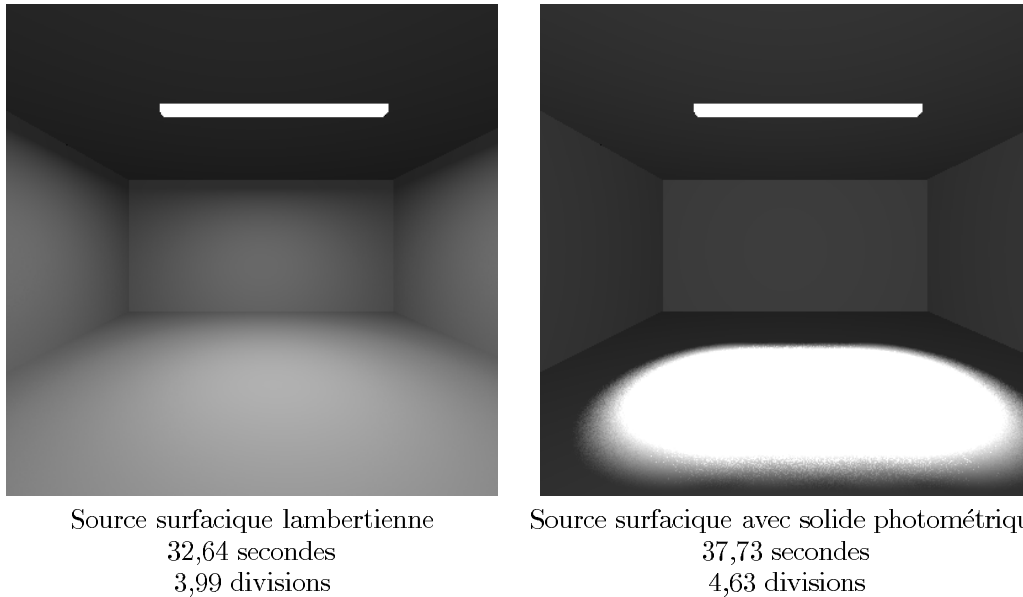


FIG. 7 – Source surfacique

Les calculs en champ proche requièrent une représentation différente. Ashdown [1] a développé une méthodologie pour mesurer l'émission d'une source dans ces conditions. Et dernièrement, ce processus a été mis en œuvre par la société *Radiant Imaging*<sup>3</sup> ([6], [12]). Nous espérons pouvoir étendre notre modèle à d'autres dimensions et utiliser les données fournies par cette société. Restera ensuite à étudier les rapports entre champ proche et champ lointain lorsque ces deux notions sont présentes dans une même scène.

## 8 Remerciements

Nous remercions Richard Mitanchey du Laboratoire des Sciences de l'Habitat<sup>4</sup> pour sa collaboration, et pour nous avoir introduit au monde de l'éclairagisme.

## Références

- [1] Ian Ashdown. Near-Field Photometry: A New Approach. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 22(1):163–180, Winter 1993.
- [2] Pascal M. Deville and Jean-Claude Paul. Modelling the Spatial Energy Distribution of Complex Light Sources for Lighting Engineering. In P. M. Hanrahan and W. Purgathofer, editors, *Rendering Techniques '95 (Proceedings of the Sixth Eurographics Workshop on Rendering)*, pages 147–159, New York, NY, 1995. Springer-Verlag.
- [3] Wolfgang Heidrich, Jan Kautz, Philipp Slusallek, and Hans-Peter Seidel. Canned light fields. In G. Drettakis and N. Max, editors, *Rendering Techniques '98 (Proceedings of Eurographics Rendering Workshop '98)*, pages 293–300, New York, NY, 1998. Springer Wien.
- [4] Caroline Houle and Eugene Fiume. Light-Source Modeling Using Pyramidal Light Maps. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 55(5):346–358, September 1993.

<sup>3</sup>. <http://www.rading.com>

<sup>4</sup>. École Nationale des Travaux Publics, Vaulx-en-Velin

- [5] Illuminating Engineering Society Of North America (IESNA). Standard file format for electronic transfer of photometric data. Technical Report LM-63-1995, IES, 1995.
- [6] D.R. Jenkins and H. Monch. Source Imaging Goniometer Method of Light Source Characterisation for Accurate Projection System Design. In *Society for Informartion Display Conference*, Long Beach, 2000.
- [7] Eric Languénoü and Pierre Tellier. Including Physical Light Sources and Daylight in Global Illumination. In *Third Eurographics Workshop on Rendering*, pages 217–225, Bristol, UK, May 1992.
- [8] Tomoyuki Nishita, Isao Okamura, and Eihachiro Nakamae. Shading Models for Point and Linear Light Sources. *ACM Transactions on Graphics*, 4(2):124–146, April 1985.
- [9] Nicolas Noé. *Étude de fonctions de distribution de la réflectance bidirectionnelle*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 1999.
- [10] Nicolas Noé and Bernard Péroche. Hierarchical reconstruction of BRDFs using locally supported functions. *Computer Graphics Journal*, 19(2):173–184, June 2000.
- [11] Marc Roelens, Gilles Fertey, and Bernard Péroche. Light Sources in a Ray Tracing Environment. In K. Bouatouch and C. Bouville, editors, *Photorealism in Computer Graphics (Proceedings Eurographics Workshop on Photosimulation, Realism and Physics in Computer Graphics, 1990)*, pages 195–213, 1992.
- [12] R.F. Rykowski. Illumination System Measurement Using CCD Cameras. In *International Optical Design Conference*, 1994. Technical digest.
- [13] A.I. Slater. Illuminance Distributions: Prediction for Uniform and Non-uniform Lighting. *Lighting Research and Technology*, 21(4):133–159, 1989.
- [14] Jacques Zaninetti, Pierre Boy, and Bernard Péroche. An adaptive method for area light sources and daylight in ray tracing. In *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics '99)*, volume 18, pages C–139–C–150, September 1999.
- [15] Eric Zéghers. *Radiosité spectrale et sources directionnelles : application à l'éclairage des tunnels routiers*. PhD thesis, IRISA (Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires), 1997.

## A Annexe

### A.1 Exemple de fichier IES

```

IESNA:LM-63-1995
[TEST] 2100976; (Estimate based on T5 H0 test)
[MANUFAC] Ledalite Architectural Products 604-888-6811
[LUMCAT] 8213F01EN
[DATE] 15/Apr/99
[FIXTURE] Extruded aluminum housing
[OPTIC] E,N
[LAMP] F28T5
[BALLAST] ELECTRONIC
[LUMINAIRE] Minuet Small
[ALIGN] SYMMETRIC--0 degree plane parallel to lamps
[WATT] 31.0
TILT=NONE
1 2610 1.0 37 5 1 1 0.46 4.00 0.00
1.0 1.0 31.0
90.0 92.5 95.0 97.5 100.0 102.5 105.0 107.5 110.0 112.5 115.0 117.5 120.0
122.5 125.0 127.5 130.0 132.5 135.0 137.5 140.0 142.5 145.0 147.5 150.0
152.5 155.0 157.5 160.0 162.5 165.0 167.5 170.0 172.5 175.0 177.5 180.0
0.0 22.5 45.0 67.5 90.0
0.0 7.1 14.9 25.6 38.4 53.1 68.4 83.9 100.2 116.6 133.2 148.9 164.7
180.0 195.1 210.0 224.7 237.7 251.1 264.1 276.9 289.3 300.8 311.5 321.6
331.4 340.0 347.8 355.4 361.6 367.5 372.3 376.5 379.0 381.6 382.8 383.9
0.0 158.5 215.8 270.7 317.2 304.8 272.8 255.2 253.5 256.5 259.3 263.0 266.6

```

	270.7	274.9	279.4	283.7	288.5	293.9	300.2	307.8	316.3	324.8	332.8	340.0
	346.8	352.7	357.8	363.0	367.9	372.5	376.7	379.5	381.5	382.8	383.5	383.9
0.0	28.3	143.3	297.0	380.3	440.9	495.9	559.2	620.8	647.8	609.5	551.8	499.3
	462.5	448.5	441.0	433.5	426.0	418.4	411.2	404.2	397.3	390.9	384.2	378.8
	374.2	371.7	372.0	374.2	376.3	377.9	379.4	380.6	382.2	383.5	383.9	383.9
0.0	81.3	230.2	397.5	506.2	548.6	613.4	658.2	712.2	775.6	830.2	842.8	789.8
	717.3	648.4	589.8	556.4	538.6	523.9	513.7	497.1	477.3	459.8	443.5	428.1
	414.7	402.7	393.6	387.9	385.8	384.8	384.3	383.8	383.6	383.9	383.9	383.9
0.0	13.7	79.5	238.3	416.5	549.4	587.7	653.1	704.4	747.1	813.8	876.7	915.6
	882.6	803.7	724.4	651.4	597.2	571.9	552.8	533.6	515.3	496.2	477.5	460.0
	443.0	427.0	411.7	399.2	391.0	387.6	386.4	384.7	383.9	383.9	383.9	383.9

## A.2 Images



FIG. 8 – *Source surfacique uniforme*

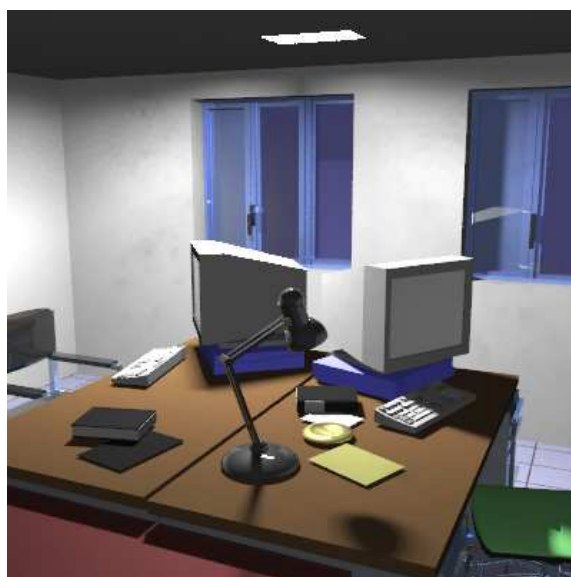


FIG. 9 – *Source surfacique avec solide photométrique*