



HAL
open science

Modelisation de Nouvelles Sources Lumineuses pour le Lancer de Rayons

Pierre-Frédéric Villard

► **To cite this version:**

Pierre-Frédéric Villard. Modelisation de Nouvelles Sources Lumineuses pour le Lancer de Rayons. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. 2001. hal-00849273

HAL Id: hal-00849273

<https://inria.hal.science/hal-00849273>

Submitted on 30 Jul 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.

UNIVERSITÉ JEAN MONNET SAINT-ÉTIENNE

Rapport de stage de DEA

**MODELISATION DE NOUVELLES SOURCES
LUMINEUSES POUR LE LANCER DE RAYONS**



ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DE SAINT-ÉTIENNE
158 COURS FAURIEL 42023 SAINT-ÉTIENNE

MAÎTRE DE STAGE :
BERNARD PÉROCHE

Remerciements

Je remercie l'ensemble du personnel de l'École des Mines pour l'accueil qui m'a été fait et pour l'aide qu'ils m'ont apportée tout au long du stage.

Je tiens à remercier tout particulièrement :

- Monsieur le professeur **Bernard Péroche** pour m'avoir permis, par sa confiance, d'apprécier la réalité du monde de la recherche,
- Le directeur de l'École des Mines **M.Philippe Hirtzman** pour m'avoir accueilli dans son école,
- Le thésard **M.Stéphane Albin** pour l'aide qu'il m'a apportée tout au long du stage et notamment pour les nombreux bug informatiques qu'il a su résoudre,
- L'ensemble des thésards pour les nombreuses informations précieuses qu'ils m'ont données (adresses de site internet et autres indications pratiques),
- Le stagiaire de DEA **M.Olivier Chassagneux** pour nos conversations d'ordre informatique (très utiles pour la maîtrise de l'outil de base) voir aussi d'ordre sportive (très utiles pour se décontracter durant les temps de pause).



Contents

Remerciements	2
1 Introduction	6
2 Le logiciel de rendu	8
2.1 Le tracé de rayons	8
2.2 Le logiciel YART	9
2.3 L'énergie	9
2.4 La luminance	9
2.5 Les sources de lumière	10
3 Construction du solide photométrique	11
3.1 Récupération des données constructeur	11
3.1.1 Introduction : La norme I.E.S.N.A.	11
3.1.2 Lecture des fichiers IES issus de la norme I.E.S.N.A.	12
3.1.3 Récupération de l'intensité en un point	14
3.1.4 Conclusion	15
3.2 Recomposition de l'intensité	15
3.2.1 Objectif	15
3.2.2 Discrétisation de la sphère	16
3.2.3 Intégration de l'intensité par la méthode des noyaux	16
3.2.4 Discrétisation de l'intégrale	17
3.2.5 Approche hiérarchique	17
3.2.6 Implémentation	18
4 Sources lumineuses caractérisées par une distribution d'intensité unique- ment angulaire	20
4.1 Cas d'une source ponctuelle	20
4.1.1 Le type de source	20
4.1.2 Obtention de la luminance	21
4.1.3 Essais sur les sources ponctuelles	22
4.1.4 Conclusion	24
4.2 Cas d'une source surfacique	25
4.2.1 La méthode de la simple intégration	25

4.2.2	La méthode de l'échantillonnage ponctuel	27
4.2.3	La méthode de subdivision de la source	28
4.2.4	L'expérience de Slater	29
4.2.5	Comparaison avec les données mesurées de Slater	30
4.2.6	Essais de distribution d'énergie variant avec la position	30
4.2.7	Conclusion sur les sources surfaciques	31
5	Sources lumineuses caractérisées par une distribution spatiale et angulaire	33
5.1	Introduction	33
5.1.1	Objectif	33
5.1.2	Le champ proche	33
5.1.3	Organisation du chapitre	34
5.2	Simulation pour le pr-calcul	34
5.2.1	La fonction plenoptique cADE91	34
5.2.2	Le lumigraphe cGOR96	35
5.2.3	Les sources de lumire «en boîtes» cHEI98	35
5.3	Goniophotomtre en champ proche	37
5.3.1	Présentation des travaux de Ian Ashdown	37
5.3.2	Principe	38
5.3.3	La société Radiant Imaging	38
5.3.4	Le format «radiant source»	39
5.3.5	L'information spectrale	40
5.3.6	La génération de rayons	41
5.3.7	Les études menées par Radiant Imaging	42
5.4	Formulation mathématique	44
5.4.1	Les données	44
5.4.2	Construction de la structure mathématique	45
5.4.3	L'intensité reçue par un point de la scène	47
5.5	Conclusion	48
6	Conclusion	49
6.1	Conclusion sur le travail effectué	49
6.2	Conclusion personnelle	49

List of Figures

1.1	Exemple d'image de synthèse obtenue par un calcul d'éclairément effectué par Ian Ashdown	7
2.1	Schéma de principe du lancer de rayons	8
2.2	Géométrie de la luminance	9
3.1	Un solide photométrique	11
3.2	Distribution angulaire des sources "Xenon" de type halogène	12
3.3	Exemple des données utilisées dans le fichier IES	13
3.4	Symétrie horizontale et verticale	14
3.5	Interpolation sur des Angles	15
3.6	Recomposition de l'intensité localement autour de \vec{V}	16
3.7	Octaèdre, niveaux de récursion 0, 1 et 2	17
3.8	figure de localisation des noyaux sur 1/4 de sphère	18
3.9	figure de localisation des bandes	19
4.1	Convention pour les angles horizontaux et verticaux dans le format IESNA	21
4.2	Récupération de la luminance en un point	21
4.3	Intensité émise sur un point P	26
4.4	Sources surfaciques par échantillonnage	27
4.5	Sources surfaciques par subdivision	28
4.6	Plan de la scène de l'expérimentation de Slater	29
4.7	Tableau de comparaison	30
4.8	Exemple d'un luminaire allongé	31
5.1	La fonction plénoptique	34
5.2	Paramétrisation du lumigraphe	35
5.3	Géométrie d'une source de lumière à l'intérieur du lumigraphe	36
5.4	La sphère imaginaire	37
5.5	Le goniophotomètre imaginé par Ashdown	38
5.6	Le goniophotomètre de la société Radiant Imaging	39
5.7	Série d'images numériques pour différentes positions angulaires	39
5.8	filtre bleu, vert et rouge	40
5.9	Illumination d'une lampe métallique halogène	40
5.10	Un rayon aléatoire	41

5.11 Exemple de luminaire	42
5.12 Exemple d'image goniométrique d'un luminaire	43
5.13 Schéma et photographie d'un photomètre CCD	43
5.14 Images d'intensité lumineuse	44
5.15 Exemple de données	45
5.16 Utilisation de lobes	46
5.17 Un noyau associé à un échantillon	46
5.18 Calcul de l'intensité en un point	47
5.19 Matrice image de la distribution spatiale de l'intensité lumineuse	48
5.20 distribution angulaire de l'intensité lumineuse	49

Chapter 1

Introduction

Ces dernières années, de nombreuses méthodes ont été proposées pour caractériser la lumière afin de produire des images de synthèse réalistes. Cependant, ces approches ne sont pas toujours adaptées pour prendre en compte toutes les propriétés particulières des sources de lumière.

Dans le but de générer des simulations pour des applications industrielles (comme, par exemple, pour des entreprises travaillant sur l'éclairage), ces émissions de lumière doivent être mesurées dans des laboratoires et stockées dans des bases de données pour pouvoir être utilisées dans des modèles d'illumination globale.

Ce stage vise à améliorer la qualité des images de rendu réaliste au niveau de l'éclairage.

Un travail a déjà été effectué pour des sources lumineuses planes uniformes et diffuses.

Le but de ce stage est d'étendre ce modèle aux sources surfaciques ayant une distribution spatiale et angulaire quelconque et ceci afin de mieux représenter la réalité. Ce travail nécessitera de représenter le solide photométrique associé à la source lumineuse de manière à calculer l'intensité lumineuse en un point donné et suivant une direction donnée. Cette structure qui permet de prédire la luminance pourra varier suivant la position sur la source si sa dimension est supérieur à un.

L'organisation de ce document est la suivante:

- Le chapitre 1 est la présente introduction, où sont décrits les principaux objectifs de ces travaux.
- Le chapitre 2 présente le lancer de rayons et des grandeurs physiques utilisées par la suite.
- Le chapitre 3 décrit une méthode pour récupérer l'intensité suivant l'angle sous lequel la lumière est perçue d'après des données fournies par le constructeur. Ces données sont issues d'une norme que l'on détaillera. Nous y présenterons également une méthode de reconstruction qui permet de calculer l'intensité suivant chaque angle solide de la sphère.
- Le chapitre 4 traite des sources lumineuses obtenues avec la structure présentée précédemment. Ces sources ont donc une distribution qui varie donc uniquement angulairement. Nous



Figure 1.1: Exemple d'image de synthèse obtenue par un calcul d'éclairage effectué par Ian Ashdown

verrons, dans une première partie, des sources ponctuelles ainsi qu'une présentation de la façon dont l'éclairage est calculé. Puis nous traiterons des sources surfaciques, avec notamment trois façons de calculer ce type de source.

- Le chapitre 5 traite des sources lumineuses obtenues avec des méthodes qui permettent d'obtenir des informations sur la distribution spatiale et angulaire. Après avoir expliqué la nécessité de rechercher de telles indications, nous expliquerons les différents moyens de les obtenir.
- Le chapitre 6 est la conclusion, qui récapitule les divers éléments présentés auparavant.

Chapter 2

Le logiciel de rendu

2.1 Le tracé de rayons

Le "lancer de rayons" permet de créer une représentation d'un ensemble d'objets, chacun défini par une description de tous ses éléments en trois dimensions: c'est ce qu'on appelle la création d'images "3D". Le système calcule ensuite une vue perspective de cet ensemble, perspective rendue très réaliste par l'introduction des ombres, des reflets et des transparences.

Le principe est très simple puisqu'il s'agit de reproduire le trajet de la lumière dans une scène mais en sens inverse de parcours.

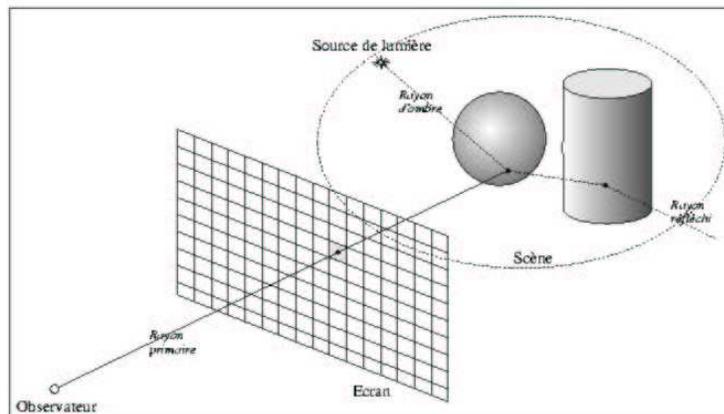


Figure 2.1: Schéma de principe du lancer de rayons

On utilise donc un rayon lumineux partant de l'œil et passant par un point de l'écran. On détermine alors quel est le premier objet vu dans cette direction. Puis, on calcule son éclairage en relançant des rayons (appelés *rayons d'ombre*) vers les sources lumineuses. On peut ainsi déterminer les ombres portées sur les objets par d'autres objets.

Il est également possible que la surface de l'objet soit réfléchissante ou réfractante. L'algorithme relance alors d'autres rayons dans des directions déterminées par les lois physiques de réflexion

ou réfraction. Ce sont des *rayons secondaires*.

2.2 Le logiciel YART

C'est un logiciel de lancer de rayons. Il a été développé par Marc Roelens dans [Roe93]. Il est écrit en langage C sous forme d'un ensemble de modules. C'est donc l'outil de base pour le laboratoire de recherche en synthèse d'image de l'École des Mines de Saint-Étienne.

Il utilise le modèle CSG où un solide est un objet dont l'intérieur et l'extérieur sont bien définis. La CSG permet de modifier des volumes solides grâce à des opérations booléennes (on peut, grâce aux fonctions intégrées : couper un objet avec un autre, faire une union de deux objets (ou plus), créer un nouveau volume par l'intersection d'objets différents).

Mon travail était axé sur l'amélioration du module de représentation des sources de lumière. Le rôle d'une source lumineuse est d'apporter de l'éclairage dans une scène. C'est une sorte d'objet invisible qui projette de la lumière sur les autres objets.

2.3 L'énergie

Cette notion est la base de tout le logiciel de rendu, car, par définition, elle est la grandeur calculée par le processus.

Dans le cas des rendus classiques, l'énergie est souvent représentée par des valeurs d'énergie correspondant au bleu, au vert et au rouge. Ces valeurs sont souvent des quantités comprises entre 0 et 1. Cela pose de nombreux problèmes dans l'algorithme de rendu comme, par exemple, lors de l'ajout d'énergie, la valeur obtenue dépasse les limites permises. Pour cela, on pourrait tronquer ces valeurs hors limite mais cela induirait des erreurs importantes. Il est alors plus correct d'employer des grandeurs physiques comme la luminance (*cf.* 2.4).

Nous nous intéressons maintenant à l'énergie en provenance d'une source. La direction de provenance de cette énergie est donc connue.

2.4 La luminance

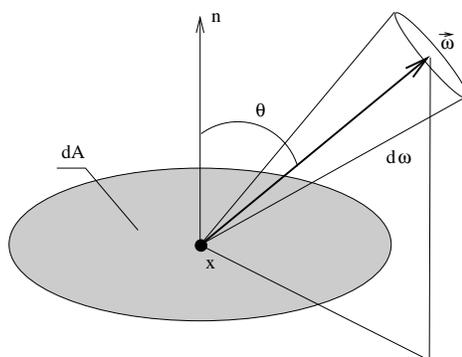


Figure 2.2: Géométrie de la luminance

La luminance $L(x, \vec{\omega})$ est le flux lumineux émis ou reçu par une surface en un point x dans une direction $\vec{\omega}$ donnée, par unité de surface dA et par unité d'angle solide projeté $\cos\theta d\omega$.

Elle s'exprime en $[W.M^{-2}.SR^{-1}]$. L'angle θ est l'angle d'incidence, mesuré par convention entre la direction $\vec{\omega}$ et la normale à la surface en x (cf Figure 2.2).

Dans le domaine d'étude qu'est la recherche du photorealisme, il faut trouver des images indiscernable d'une photographie. On utilise la luminance parce que, du fait qu'elle est trouvée par unité d'aire, elle est plus adaptée à la vision humaine. En effet, l'œil humain compare la couleur en un point par rapport à la couleur autour de ce point. La connaissance de sa répartition sur toutes les surfaces visibles des objets de la scène permet de reconstituer les images.

2.5 Les sources de lumière

L'illusion de la réalité passe par la prise en compte des sources lumineuses et des effets d'clairages sur un objet (zones d'ombre...). Les principales techniques mises en jeu sont :

- le traitement des ombres et des intensités de lumière (lorsque le passage de l'ombre à la lumière se fait de manière continue : chaque point est affecté d'une luminosité différente, créant un dégradé de couleur qui permet de rendre compte des éclairages) ; la profondeur de champ permet de perfectionner l'aspect de l'image. Pour une perspective lointaine, le fait d'ajouter du flou traduit une impression de réalisme.
- la réflexion : chaque matériau absorbe ou renvoie la lumière. Cette propriété va jouer sur l'objet lui-même (les reflets, le scintillement) mais aussi sur les objets voisins, puisque la lumière est envoyée sur les objets voisins. Cela représente l'éclairage indirect.

Le lancer de rayons permet d'obtenir un certain réalisme par une simulation de l'optique géométrique, les rayons se réfléchissent ou se réfractent selon les matériaux. Chacune de ces opérations passe par la couleur. Chaque pixel est activé par un rayon, qui se traduit par une couleur, synthèse additive des trois couleurs primaires.

Chapter 3

Construction du solide photométrique

L'objectif de ce chapitre est d'obtenir une fonction issue de données réelles qui permet de trouver l'intensité lumineuse pour n'importe quelle direction décrite par un angle horizontal allant de 0 à 360 degrés et par un angle vertical allant de 0 à 180 degré.

3.1 Récupération des données constructeur

3.1.1 Introduction : La norme I.E.S.N.A.

L'étude de la lumière et de ses interactions avec la matière est primordiale en synthèse d'image. Une description des phénomènes fondamentaux qui nous sont indispensables est présentée en Annexe 1.

L'intensité lumineuse d'une source ponctuelle est définie par deux types de distribution : la distribution spectrale et la distribution angulaire. Cette dernière est caractérisée par un solide photométrique qui est mesuré par un goniophotomètre. Ces solides photométriques (*cf.* Figure 3.1) nous fournissent des informations bidimensionnelles (les intensités pour l'ensemble les directions). Nous verrons plus tard que nous avons besoin d'information dans quatre dimensions car la source n'est en fait jamais ponctuelle.



Figure 3.1: Un solide photométrique

En 1986, l'Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) publia l'une des premières normes en matière d'information photométrique. Cette norme a été révisée deux fois pour enlever toutes les ambiguïtés afin d'arriver à la norme «IES LM-63-1995» [IES95]. Les solides photométriques y sont décrits suivant ce format qui autorise une décomposition irrégulière en angle zénithal et azimutal. Les fabricants fournissent donc un solide photométrique sous la forme d'un échantillonnage de la fonction d'intensité en différents points d'une partie de l'espace. Nous disposons ainsi d'un ensemble de valeurs d'intensité dans un certain nombre de plans (*cf.* Figure 3.2).

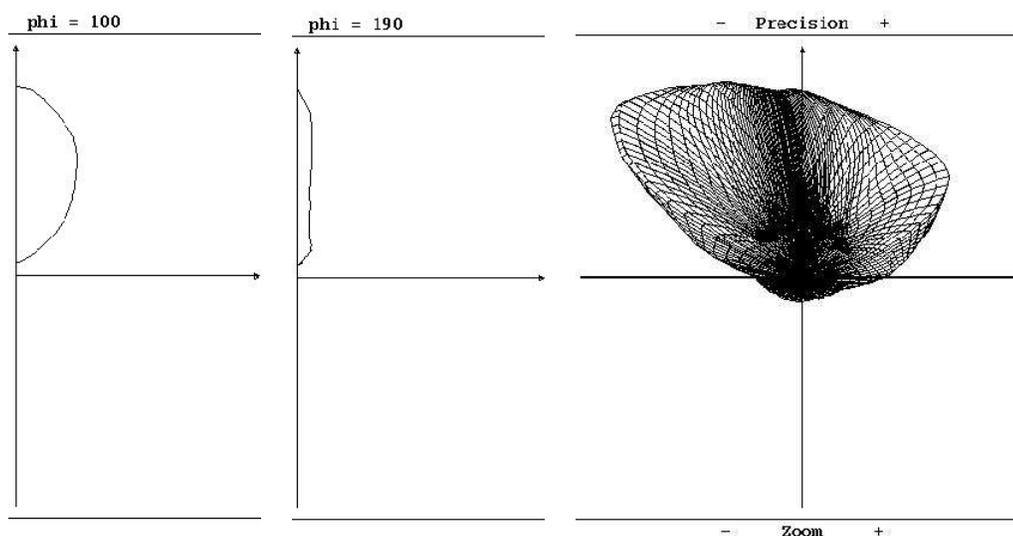


Figure 3.2: Distribution angulaire des sources “Xenon” de type halogène

3.1.2 Lecture des fichiers IES issus de la norme I.E.S.N.A.

Le fichier des données photométriques IES LM-63 est un fichier texte ASCII avec la structure présentée ci-dessous (Figure 3.3). Toutes les lignes sont terminées par un retour à la ligne (comme le veut la convention pour les fichiers dans les environnement de programmation pour MS-DOS). Une «*ligne identifiatrice*» peut être constituée d'une ou plusieurs lignes de texte ASCII.

La description détaillée de chaque ligne est présentée dans la norme IES LM-63. Voici un résumé de la signification de chaque ligne:

De la référence «*IESNA LM-63*» (ligne 0) au type d'inclinaison «*TILT*» (ligne 5), un certain nombre de mots clefs appropriés peut être utilisé. Ils sont tous optionnels et servent à indiquer le type de test effectué, le nom du fabricant...

Les données du luminaire peuvent varier avec un angle d'inclinaison. Si c'est le cas, le fichier fournit des données multiplicatrices pour les différents angles. (ligne 6 à 9)

```

00 IESNA:LM-63-1995
01 Mot clef 1
02 Mot clef 2
03 ...
04 Mot clef n
05 TILT= ijfile-spec ou ijINCLUDE ou ijNONE
06 ijgéometrie du luminaire (seulement si TILT  $\neq$  ijNONE)
07 ijnombre de paires d'angles et facteur multiplicatif (seulement si TILT  $\neq$  ijNONE)
08 ijangles (seulement si TILT  $\neq$  ijNONE)
09 ijfacteurs multiplicatifs (seulement si TILT  $\neq$  ijNONE)
10 ijnombre de lampes ijlumens par lampe ijmultiplicateur de candela
    ijnombre d'angles verticaux ijnombre d'angles horizontaux
    ijtype de photométrie ijtype d'unité ijlargeur ijlongueur ijhauteur
11 ijfacteur de ballast ijusage futur ijwatts
12 ijangles verticaux
13 ijangles horizontaux
14 ijvaleur en candela pour tous les angles verticaux du premier angle horizontal
15 ijvaleur en candela pour tous les angles verticaux du second angle horizontal
16 ...
17 ijvaleur en candela pour tous les angles verticaux du neme angle horizontal

```

Figure 3.3: Exemple des données utilisées dans le fichier IES

La ligne 10 permet d'avoir des informations utiles pour la récupération de données tel que le nombre d'angles, le nombre de lampes ... Elle fournit d'autres données comme le *ijmultiplicateur de candela* qui permet d'avoir la valeur de l'intensité en candela. le *ijtype d'unité* est soit *ijmètre* soit *ijpouce*. Les trois dimensions suivantes sont celles de l'ouverture lumineuse. Ce terme ambigu désigne la zone de même éclairage.

La ligne 11 donne le facteur de ballast (le ballast est un dispositif employé dans les lampes à décharge pour assurer la stabilisation et éventuellement l'allumage de la décharge).

Les angles sur les deux lignes suivantes sont énumérés de manière croissante et ils n'appartiennent souvent qu'à une partie du cercle. La valeur pour des angles hors des limites du domaine doit être trouvée par symétrie comme le montre la Figure 3.4.

Les dernières lignes comportent les valeurs en candela. Il y a une ligne pour chaque angle horizontal, et une valeur en candela pour chaque angle vertical correspondant. Ces valeurs sont des quantités mesurées en laboratoire. La valeur réelle utilisée dans le programme doit être calculée d'après la formule suivante :

$$\text{valeur}_{\text{réelle}} = \text{valeur}_{\text{mesurée}} * \text{multiplicateur de candela} * \text{facteur de ballast}$$

L'Annexe 2 montre un exemple de fichier IES.



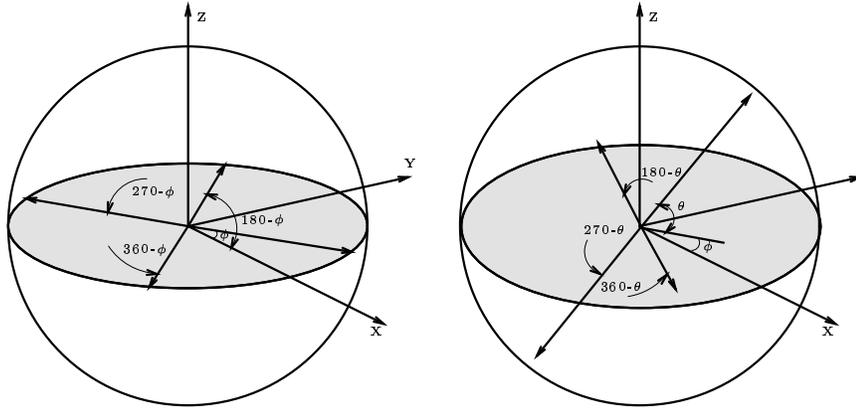


Figure 3.4: Symétrie horizontale et verticale

3.1.3 Récupération de l'intensité en un point

Enfin, nous devons interpoler les valeurs en candela pour les angles horizontaux et verticaux non représentés dans les données photométriques afin de déterminer l'intensité pour une direction quelconque de l'espace. Il existe de nombreux algorithmes d'interpolation que nous pouvons appliquer à ces données mais nous utiliserons une méthode d'interpolation suivant des arcs de spirales développée par Eric Zeghers dans [Zeg97] :

L'intensité recherchée est dans un plan d'angle ψ par rapport au plan vertical d'origine. Cet angle est encadré par ψ^- et ψ^+ . Elle forme un angle θ avec le plan (xOy). Cet angle est lui aussi encadré par θ_1 et θ_2 . Nous obtenons ainsi 4 valeurs ($I_1^-, I_1^+, I_2^-, I_2^+$) lisibles dans le format *IES* (à chaque couple d'angle (θ_i, ψ_j) correspond une intensité $I_{i,j}$). L'intensité est alors donnée par :

$$I(\theta, \psi) = \frac{(\psi^+ - \psi)[(\theta_2 - \theta)I_1^- + (\theta - \theta_1)I_2^-] + (\psi - \psi^-)[(\theta_2 - \theta)I_1^+ + (\theta - \theta_1)I_2^+]}{(\psi^+ - \psi^-)(\theta_2 - \theta_1)} \quad (3.1)$$

Dans des cas particuliers où l'un des angles existe déjà :

Si θ existe, il suffit de prendre $\theta_2 = 1$ et $\theta_1 = 0$ dans la formule 3.1 :

$$I(\theta, \psi) = \frac{(\psi^+ - \psi)I^- + (\psi - \psi^-)I^+}{(\psi^+ - \psi^-)} \quad (3.2)$$

Si ψ existe, idem avec $\psi^+ = 1$ et $\psi^- = 0$:

$$I(\theta, \psi) = \frac{(\theta_2 - \theta)I_1 + (\theta - \theta_1)I_2}{(\theta_2 - \theta_1)} \quad (3.3)$$

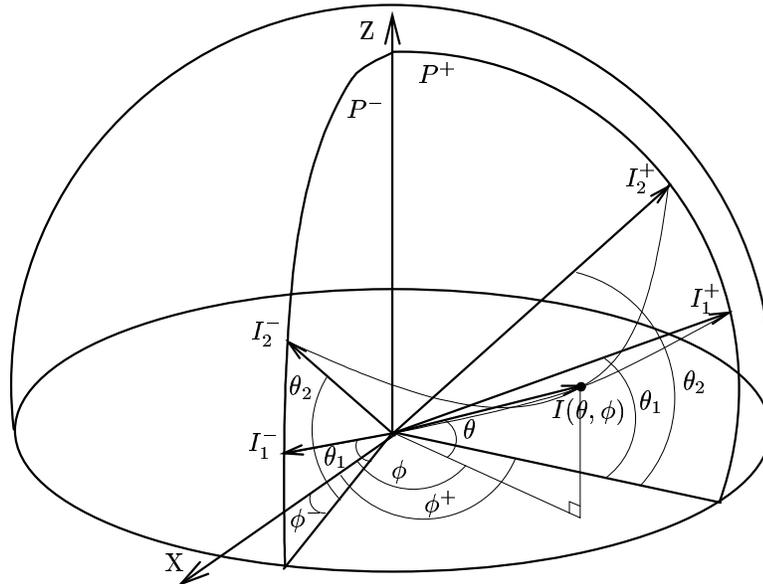


Figure 3.5: Interpolation sur des Angles

3.1.4 Conclusion

Le format de fichier standard IES comme il est spécifié dans la norme IES LM-63-1995 est nécessairement à la fois large et compliqué.

L'implémentation a été effectuée premièrement d'après l'organigramme fournit en Annexe 3. Chaque donnée photométrique est lue et stockée dans une structure accessible par un pointeur. Les valeurs des différents angles et candela sont stockées dans des tableaux. Cette partie sert donc à lire le fichier IES.

Puis, la partie qui permet d'obtenir l'intensité pour un fichier IES quelconque et suivant une direction (donnée par deux angles) quelconque a été codée suivant l'organigramme fournit en Annexe 4. Celui-ci utilise le principe de symétrie de la fonction et l'interpolation étudiée précédemment.

3.2 Recomposition de l'intensité

3.2.1 Objectif

Nous possédons désormais des intensités mesurées issues de données constructeur qu'il va falloir utiliser pour reconstituer la distribution complète de l'intensité en un point.

Ce calcul d'intensité doit être effectué le plus rapidement possible avec un résultat suffisamment précis. De même, l'occupation en place mémoire doit être minimale.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une méthode de recomposition inspirée des travaux de Nicolas Noé dans [Noé99] sur les représentations des BRDF mesurées (*cf.* Annexe 5 pour la définition de la BRDF).

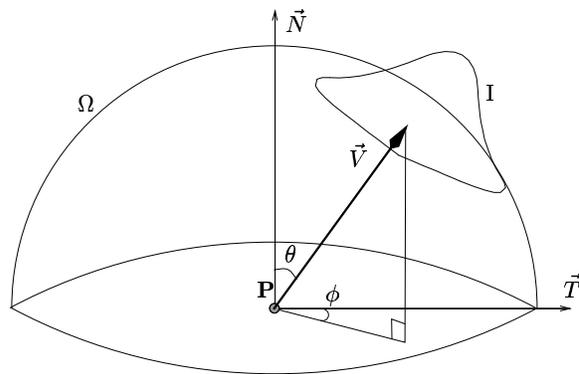


Figure 3.6: Recomposition de l'intensité localement autour de \vec{V}

L'avantage de cette méthode est que l'intensité est calculée localement sans être influencée par les données qui sont trop éloignées. L'intensité est une fonction qui dépend de la direction et qui est calculée uniquement à partir du voisinage de cette direction.

3.2.2 Discrétisation de la sphère

L'utilisation d'une sphère discrétisée est très pratique pour générer des directions et des intégrations. C'est aussi une base qui va servir au stockage de l'information car la sphère sera échantillonnée en un ensemble de points.

Il existe plusieurs méthodes de subdivision de la sphère mais nous utiliserons ici une subdivision récursive en èdres. Les octaèdres sont des polyèdres réguliers à huit faces triangulaires équilatérales s'inscrivant dans la sphère unité. Il a six sommets et douze arêtes.

Nous allons alors augmenter le nombre de sommets par un processus de récursion tel que le milieu de chaque arête devienne lui-même un nouveau sommet. L'octaèdre de base sera considéré comme de niveau 0 et à chaque étape de la subdivision correspond un nouveau niveau (cf. Figure 3.7).

3.2.3 Intégration de l'intensité par la méthode des noyaux

C'est une méthode d'intégration utilisant les intégrales singulières. Les intégrales singulières sont obtenues à partir d'une convolution particulière : $\mathbf{IS}_\rho(\mathbf{F}) = \mathbf{K}_\rho * \mathbf{F}$ où :

- $\mathbf{IS}_\rho(\mathbf{F})$ est l'intégrale singulière de la fonction \mathbf{F} ;
- \mathbf{K}_ρ est un *noyau* pour le paramètre ρ ;
- $\rho \in]-1;1[$.

L'intérêt des intégrales singulières c'est que, avec certaines propriétés particulières sur les noyaux, c'est à dire :

$$K_\rho(0) = 2\pi \int_{t=-1}^1 K_\rho(t) dt = 1 \text{ et}$$

$$\lim_{\rho \rightarrow 1^-} 2\pi \int_{t=-1}^1 K_\rho(t) t dt = 1,$$

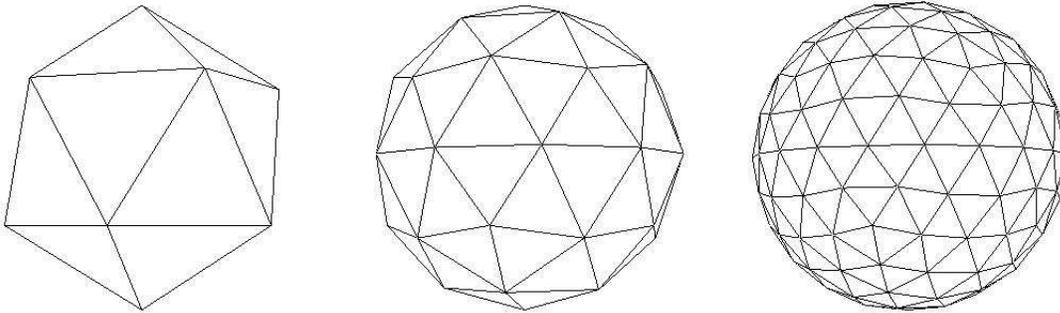


Figure 3.7: Octaèdre, niveaux de récursion 0, 1 et 2

on a $IS_\rho(F)$ converge uniformément vers F lorsque $\rho \rightarrow 1^-$.

D'où la propriété suivante : $\int_{\omega \in \Omega} IS_\rho(F) d\omega = \int_{\omega} F d\omega$ (avec Ω qui représente la sphère unité).

Après avoir trouvé un noyau qui vérifiait les bonnes propriétés, on peut définir l'intégrale singulière $IS_\rho(f)$ associée à f par :

$$IS_\rho(f)(X) = \int_{x \in \Omega} f(x) \cdot K_\rho(x \cdot X) d\omega(x) \quad (3.4)$$

3.2.4 Discrétisation de l'intégrale

Si on se place dans le cas discret, c'est à dire que l'on dispose de données réelles (valeurs suivant des directions données pour un angle horizontal et un angle vertical), on a l'intensité sous la forme d'une fonction F discrétisée : $I_i = F(\theta_i, \psi_i)$ avec θ_i et ψ_i représentant une direction d'émission de la lumière X_i et I_i l'intensité mesurée pour cette direction. On peut alors discrétiser l'expression de la manière suivante :

$$I(X) = \int_{x \in \Omega} I(x) \cdot K_\rho(x \cdot X) d\omega(x) \implies I(X) = \sum_{i=1}^n I_i \cdot K_\rho(X_i \cdot X) \Delta\omega_i \quad (3.5)$$

Il faut donner une valeur à $\Delta\omega_i$, qui dépend à priori de l'échantillon indexé par i . On va donner un angle solide constant $\Delta\omega$, minimisant l'erreur entre la recombinaison et la fonction originale. Le problème posé par la discrétisation est alors celui du choix de l'échantillonnage ρ .

3.2.5 Approche hiérarchique

On va représenter la fonction sur différents niveaux. C'est à dire que l'on va commencer par représenter la fonction, puis de façon plus fine, l'erreur entre la fonction et la première recombinaison, etc. On va aussi travailler avec une double recombinaison, en discrétisant à

la fois sur la grille des échantillons mais aussi sur une grille régulière de Ω . On aura donc un raffinement progressif et contrôlable.

L'avantage de cette méthode est que c'est à la fois rapide (toutes les fonctions sont à support local) et précis (on augmente la subdivision tant qu'on n'est pas inférieur à un seuil).

3.2.6 Implémentation

Construction des noyaux

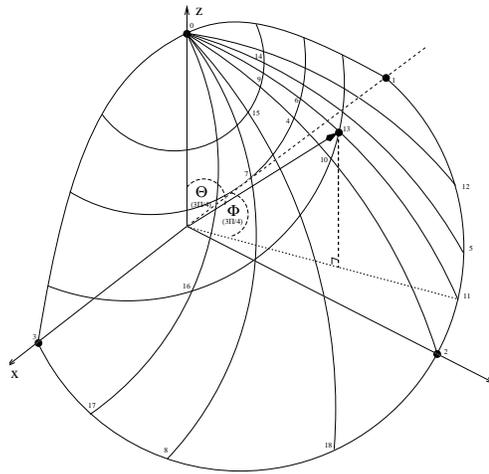


Figure 3.8: figure de localisation des noyaux sur 1/4 de sphère

On va tout d'abord calculer la position des différents noyaux. Ceux-ci seront positionnés sur chaque sommet du polyèdre considéré et ils sont repérés par deux angles θ et ψ . La progression du paramètre entre les différents niveaux est : $\rho_{n+1} = \sqrt{\frac{\rho_n + 1}{2}}$. (cf. Figure 3.8)

Pour la localisation des noyaux, on utilise une structure moins précise: on stocke les noyaux sur des bandes repérées par un angle θ comme le montre la Figure 3.9.

Pour $K_\rho(Xi.X)$, on utilise le noyau suivant :

$$K_\rho(Xi.X) = (\cos(\widehat{\vec{Xi} \cdot \vec{X}}) - \rho)^2 \times \frac{3}{2\pi(1-\rho)^3}$$

Le principe complet de l'implémentation de la construction de ces noyaux est synthétisé sur l'organigramme fourni en Annexe 6:

Pour chaque niveau, on prend chaque sommet de l'èdre pour lequel on calcule son facteur de normalisation $(\frac{3}{2\pi(1-\rho)^3})$. Puis, en fonction de ses angles (θ, ϕ) , on calcule l'intensité exacte

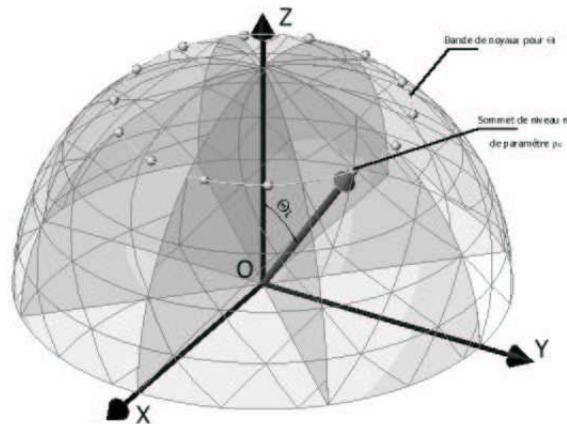


Figure 3.9: figure de localisation des bandes

$I(\theta, \phi)$. On détermine alors l'écart entre cette valeur et celle calculée par la fonction *Evaluer-Intensite*. S'il est supérieur à un seuil, on optimise ce calcul.

Calcul de l'intensité en un point

Pour calculer la valeur de l'intensité à attribuer en un point (qui lors de l'étape de construction est en fait un noyau), on intègre de manière discrète sur tous les niveaux et sur toutes les bandes. Chaque terme de cette intégrale correspond à un noyau pour lequel on assigne sa valeur en intensité (*cf.* l'organigramme fourni en Annexe 7).

Validation des résultats

- Importance du nombre de récursivité.

Il s'agit de tester l'importance du degré de l'octaèdre servant à discrétiser la sphère.

D'après les essais fournis en Annexe 8, on peut voir que des èdres de niveau 3 ou 4 suffisent en acceptant une erreur moyenne de 3%.

- Calcul de valeurs intermédiaires.

Pour valider le calcul de la valeur de chaque noyau, des valeurs intermédiaires ont été analysées pour les trois premiers niveaux (*cf.* Annexe 9).

Ces résultats validant les trois premiers niveaux, on peut penser que le raisonnement sera aussi valide pour les prochains niveaux.

Chapter 4

Sources lumineuses caractérisées par une distribution d'intensité uniquement angulaire

Dans ce chapitre, nous allons uniquement caractériser un luminaire par son solide photométrique. Ces sources seront ponctuelles dans un premier temps, puis, surfaciques dans un deuxième temps.

4.1 Cas d'une source ponctuelle

La lumière ponctuelle est le type le plus simple de lumière que l'on puisse trouver. Du point de vue des temps de rendu, ce type de source est le plus performant et permet donc d'obtenir des résultats très rapidement lors de la phase de mise au point d'une scène (conception de la géométrie, par exemple).

Bien que rapide à calculer, les scènes utilisant des sources ponctuelles manquent de réalisme, notamment au niveau des ombres projetées par les différents objets qui les constituent.

4.1.1 Le type de source

L'intensité suivant une direction est calculée directement par une interpolation des données des fichiers IESNA [IES95].

Une source ponctuelle issue d'un fichier IESNA est caractérisée par sa position dans l'espace (3 coordonnées), sa normale et sa tangente pour servir de repère aux angles de la norme IESNA (*cf.* Figure 4.1) et le fichier de type IES.

De plus, lorsque nous verrons des sources de lumière surfaciques et que nous serons dans le cas du champ proche nous utiliserons une méthode proposée par Ian Ashdown dans [Ash92] qui consiste à mettre des sources ponctuelles pour simuler la luminance de ces sources surfaciques.

On parle de champ proche lorsque la distance d'un point à un luminaire est inférieur à cinq fois la plus grande dimension du luminaire.



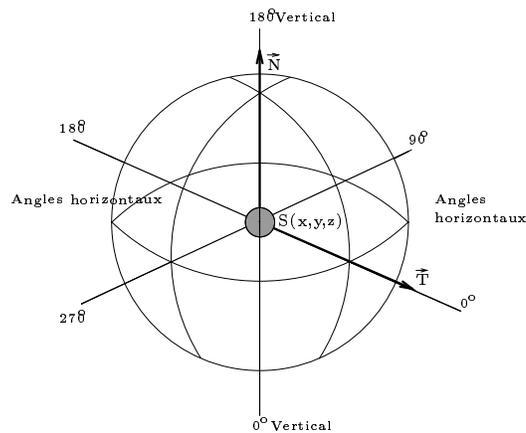


Figure 4.1: Convention pour les angles horizontaux et verticaux dans le format IESNA

4.1.2 Obtention de la luminance

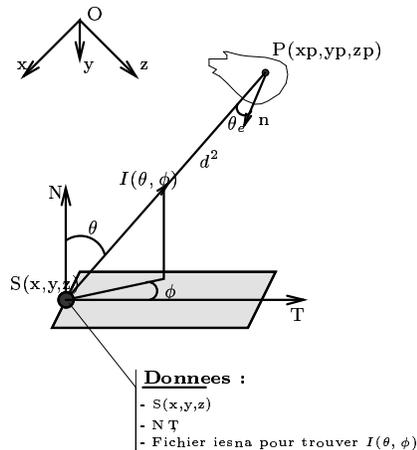


Figure 4.2: Récupération de la luminance en un point

L'intensité est trouvée par interpolation des valeurs de la norme IESNA grâce aux angles θ et ϕ (cf. Chapitre 3.1). Ceux-ci sont définis par rapport à un vecteur normal et un vecteur tangent à la source. L'intégration sur un angle solide est alors effectuée par la méthode des intégrales singulières (cf. Chapitre 3.2).

Puis, il faut utiliser la loi du facteur $1/d^2$ et appliquer le facteur du cosinus oblique pour obtenir la luminance à partir de l'intensité (cf. Figure 4.2).

Ce raisonnement a été suivi pour l'implémentation comme le montre l'organigramme (en Annexe 10) qui a servi de base pour le codage.

$$L = \frac{d^2 \phi}{d\omega * dA * \cos\theta} \quad \text{or} \quad I = \frac{d\phi}{d\omega} \quad (4.1)$$

$$\text{donc : } L = \frac{dI}{dA * \cos\theta} \quad \text{avec } dA = d^2 * d\omega \quad (4.2)$$

$$\text{d'où finalement :} \quad (4.3)$$

$$L = \frac{dI}{d^2 * d\omega * \cos\theta} \quad (4.4)$$

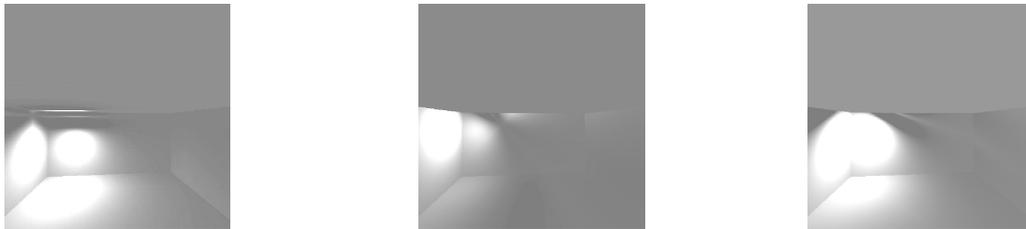
4.1.3 Essais sur les sources ponctuelles

La fonction qui sert à calculer la luminance fait intervenir beaucoup de variables. Plusieurs essais étaient donc nécessaires pour valider les différents paramètres intervenant lors de son calcul.

Importance de l'orientation des vecteurs

Les premiers paramètres sont des vecteurs : la normale et la tangente à la source. Ils ont pour objectif de devenir un repère pour le luminaire. Les angles qui sont nécessaires pour interpoler une intensité donnée par le constructeur sont mesurés à partir de ce repère.

Exemple: modification de l'orientation de la normale



Normale dirigée droit vers le sol Normale dirigée vers le mur Normale dirigée vers le coin

La source ponctuelle est ici un spot qui éclaire avec la même intensité suivant un cône.

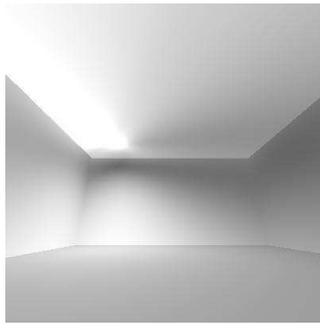
Ces trois images vérifient bien que le faisceau du spot suit le vecteur normal.

Le vecteur tangent reste dans le même plan tel que lors du premier essai.

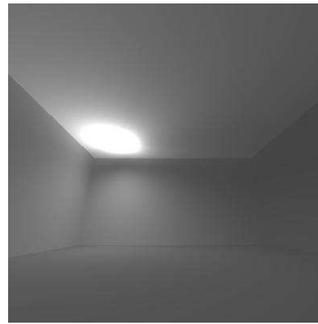
Importance du facteur $1/d^2$

L'intensité est en $[W/Sr]$ et la luminance est en $[W/Sr/m^2]$. Le facteur $1/d^2$ est donc un paramètre d'homogénéisation.

Les images ci-dessous montrent l'influence de ce facteur qui rend les images plus sombres à cause de la diminution de l'intensité de la lumière avec la distance. Cette déperdition donne un aspect plus «réalistes».

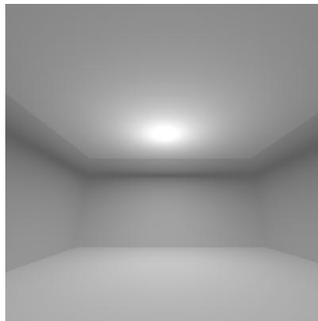


Calcul sans facteur $1/d^2$

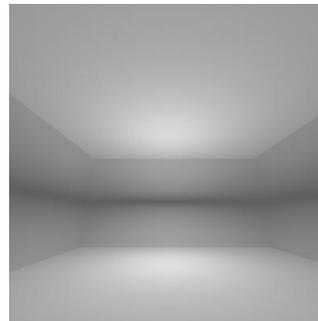


Calcul avec facteur $1/d^2$

Les images ci-dessous montrent l'influence de la distance entre l'objet et la source.



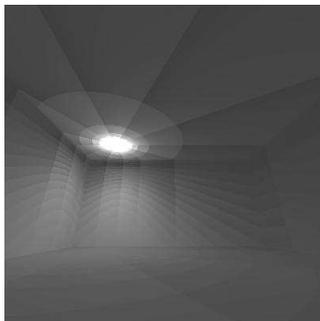
Lumière à 2/3 du plafond



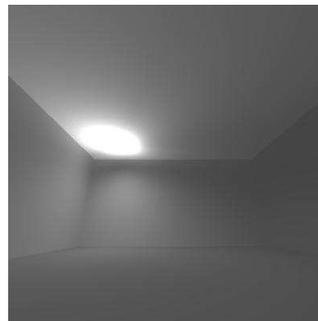
Lumière au milieu de la hauteur

Importance de l'intégration par angle solide

Le calcul des intensités se fait suivant les angles solides d'après la méthode déjà présentée dans recomposition des intensités mesurées¹:



Calcul par simple interpolation



Calcul par intégration

On peut voir que l'image issue d'un calcul par intégration donne une image plus lissée que celle issue d'un calcul par simple interpolation.

On remarque par ailleurs, sur l'image de gauche, les différents dégradés issus de chaque valeur exacte.

¹ cf. Chapitre 3.2

Importance de la distribution de la source

Ce paramètre correspond à la distribution de l'intensité suivant l'angle horizontal ψ . C'est donc le type de fichier IES².

Les trois images ci-dessous montrent le rendu donné par un luminaire n'éclairant que sur un demi-cercle.



On peut voir qu'il n'y a pas uniquement un faisceau éclairant une partie de la scène mais que la lumière est diffusée partout dans la pièce. La partie éclairée par le demi-cercle reste tout de même la plus lumineuse.

En effet, si on garde le calcul issu de l'interpolation sans intégrer sur les angles solides, on obtient, pour les mêmes images que ci-dessus :



4.1.4 Conclusion

Le calcul de l'éclairage d'une scène avec une source ponctuelle utilisant un fichier IES est assez rapide (par exemple: 59 secondes pour la scène ci-dessous contenant 509 objets).

²Le fichier donné par la norme IESNA



Les images en Annexe 11 montrent que, pour une même scène, l'éclairage calculé pour différents types de solides photométriques peut difficilement être approché par des sources lambertiennes³. Par contre, les ombres nettes et tranchantes rendues par ces sources ponctuelles n'existent pas dans la réalité. En effet, toutes les sources lumineuses (en fonction des distances entre la source, l'objet qui provoque l'ombre et la surface qui reçoit l'ombre) produisent des ombres aux contours plus ou moins adoucis. Ce phénomène est dû au fait que les sources lumineuses ne sont jamais des points, mais ont toujours une dimension plus ou moins grande : les néons, le réflecteur d'une lampe de bureau... Il convient donc de modéliser des sources non ponctuelles.

4.2 Cas d'une source surfacique

Plusieurs méthodes ont récemment été proposées dans la littérature pour modéliser des sources tendues (linéaires et surfaciques). Il s'agit cependant de modèles théoriques, inadaptés aux mesures fournies par les fabricants.

Cette source lumineuse est beaucoup plus proche des sources lumineuses que l'on trouve dans le monde réel. En effet, une lumière tendue possède des dimensions finies, les objets ne bloquent alors que partiellement la lumière émise par de telles sources, c'est pourquoi les transitions entre les zones d'ombres et les zones de lumière sont progressives. On parle alors d'ombres douces.

Étant donné que la modélisation de telles sources simule une lumière tendue par de nombreux solides photométriques, les temps de calculs augmentent très fortement. Ce type de lumière est donc à utiliser avec précaution.

4.2.1 La méthode de la simple intégration

Cette méthode consiste à vérifier si le centre de la source est visible depuis un point à tester. On peut alors établir les quatre directions critiques de la source formées par les vecteurs reliant ce point aux quatre extrémités de la source.

³Sources ayant un éclairage uniforme et diffus

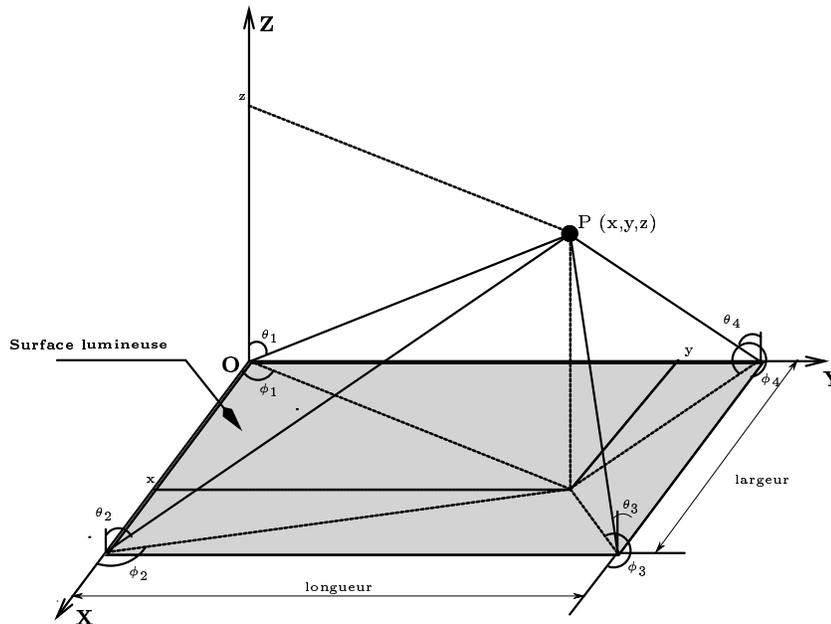
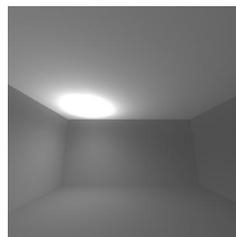


Figure 4.3: Intensité émise sur un point P

Pour obtenir l'intensité en ce point, il faut intégrer la fonction d'intensité sur le solide photométrique en prenant pour frontière les quatre directions «critiques» comme le montre l'organigramme en Annexe 13. Il utilise la formule suivante:

$$Intensite = \frac{1}{n_{discretisation}} \times \left(\sum_{\theta=\theta_1}^{\theta_2} \sum_{\phi=\phi_1}^{\phi_2} I(\theta, \phi) + \sum_{\theta=\theta_2}^{\theta_3} \sum_{\phi=\phi_2}^{\phi_3} I(\theta, \phi) + \sum_{\theta=\theta_3}^{\theta_4} \sum_{\phi=\phi_3}^{\phi_4} I(\theta, \phi) + \sum_{\theta=\theta_4}^{\theta_1} \sum_{\phi=\phi_4}^{\phi_1} I(\theta, \phi) \right) \quad (4.5)$$

Cette méthode présente l'énorme défaut qu'elle ne crée pas de zone de pénombre : pour chaque point de la scène, il n'y a qu'un rayon d'ombre qui atteint la source de lumière. C'est donc uniquement un concept qui a servi à tester les différentes notions abordées jusqu'à là : solide photométrique, expérience de Slater...



Exemple avec une source

4.2.2 La méthode de l'échantillonnage ponctuel

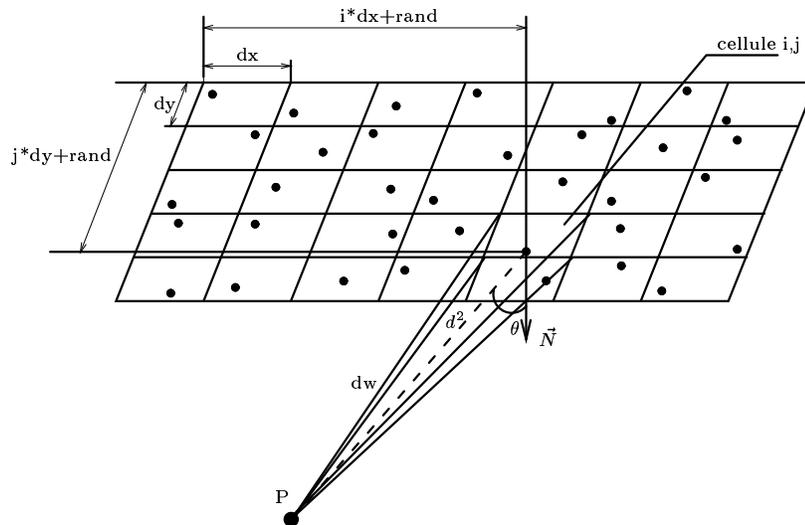
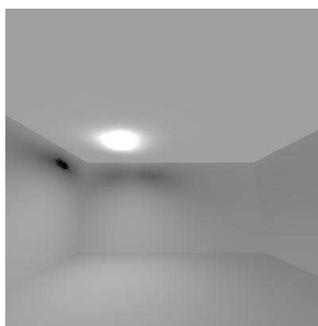


Figure 4.4: Sources surfaciques par échantillonnage

Une deuxième méthode consiste à échantillonner une source en plusieurs sources ponctuelles (cf. Figure 4.4). La source surfacique est donc composée d'une multitude de sources ponctuelles auxquelles on applique un solide photométrique. La qualité de cette approximation sera donc fonction du nombre d'échantillons composant la source.

La source surfacique est composée d'une multitude de cellules qui sont uniformes pour obtenir un angle solide constant. Afin de réduire le biais de l'erreur commise, les positions des centres de ces sources sont choisies aléatoirement.



Exemple avec une source

Nombre d'échantillons	Tps de calcul
120	10'18"
90	7'46"
56	4'56"
25	2'21

Influence de la précision

En pratique, pour avoir des résultats suffisamment précis, il faut utiliser un nombre de cellules relativement grand. Il faut donc trouver un meilleur compromis entre temps de calcul et qualité d'image obtenue.

4.2.3 La méthode de subdivision de la source

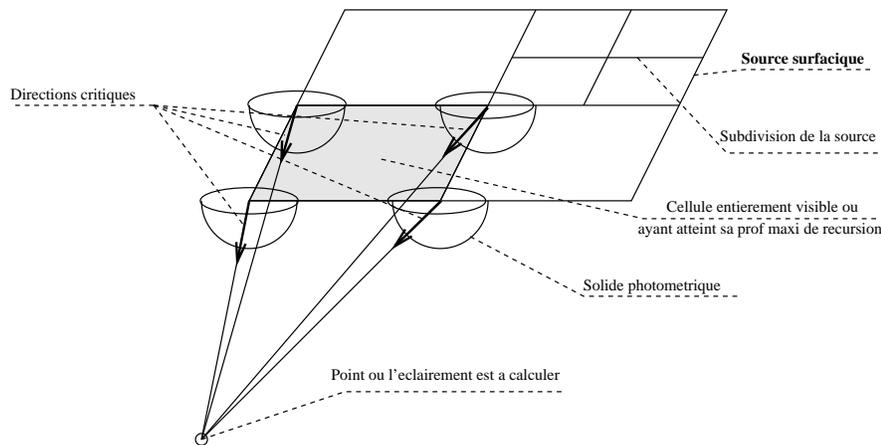


Figure 4.5: Sources surfaciques par subdivision

Cette méthode permet de diviser la surface de manière plus ou moins régulière suivant des critères de visibilité. Elle a été étudiée par Jacques Zaninetti dans [Zan98] pour des sources surfaciques planes uniformes.

Les critères de subdivision concernent la pyramide engendrée par la source et l'angle solide qu'elle sous-tend. Ce critère volumique ne tient pas uniquement compte de la surface, mais aussi du point depuis lequel elle est vue.

Une fois qu'une cellule entièrement visible ou ayant atteint la profondeur maximale de récursion est trouvée, on intègre la fonction de luminance suivant la méthode expliquée en 4.2.1.

En conclusion, pour obtenir des ombres douces, on découpe la surface, un rectangle. L'influence de chacune de ces sources est alors calculée, puis additionnée pour obtenir une intensité globale, enfin une moyenne est calculée pour obtenir l'intensité spécifique. Les ombres douces sont créées par le fait qu'un objet bloquera la lumière mise par certaines sources ponctuelles et ne bloquera pas la lumière mise par d'autres.



Exemple avec une source

Cette méthode présente le double avantage d'être à la fois assez rapide par rapport à la méthode étudiée précédemment tout en étant relativement précise.

4.2.4 L'expérience de Slater

Elle a été notamment étudiée par Richard Mitanchey dans [Mit96]. Le travail de Slater fournit un ensemble de données mesurées dans une expérimentation en grandeur réelle, les données goniométriques étant par ailleurs fournies par le constructeur. Il est intéressant de remarquer que Nithisoontorn de la société Zumtobel, confronte également ces résultats avec ceux donnés par le logiciel COPHOS dans [Nit94].

Les mesures photométriques ont été établies dans une pièce vide de dimension $6.71m \times 6.65m \times 3m$. Le plafond est constitué d'une texture blanche ($\rho=0.7$). Les murs sont gris ($\rho = 0.3$) et le sol est gris foncé ($\rho=0.2$). Les mesures de luminance ont été faites sur des tables de hauteurs 0.75 au dessus du sol. Les luminaires sont disposés suivant la figure 4.6

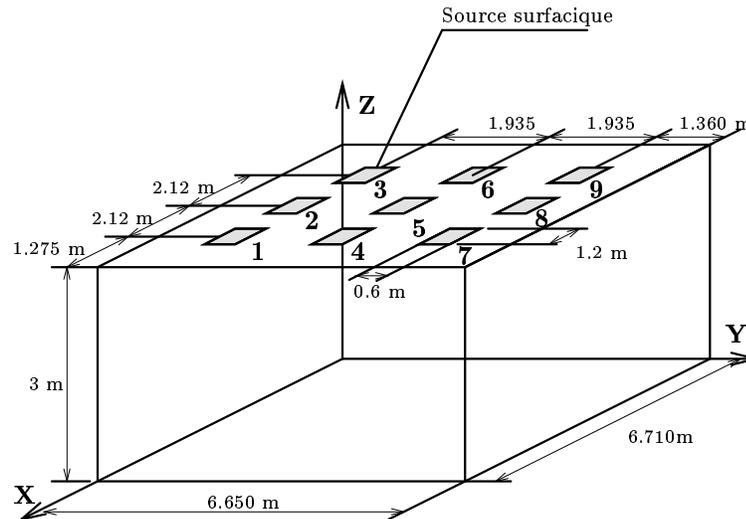


Figure 4.6: Plan de la scène de l'expérimentation de Slater

grille de mesure :

espace suivant x(m) : 0.520
 espace suivant y(m) : 0.485
 distance du mur 1(m) : 0.235
 distance du mur 2(m) : 0.415

grille du luminaire :

espace suivant x(m) : 2.12
 espace suivant y(m) : 1.935
 distance du mur 1(m) : 1.275
 distance du mur 2(m) : 1.42

Les autres indications sur l'expérience sont données dans l'Annexe 12.

4.2.5 Comparaison avec les données mesurées de Slater

Il s'agit de reproduire les deux configurations correspondant respectivement au cas uniforme comprenant tous les luminaires et au cas non-uniforme ne comprenant qu'une partie des luminaires. Les valeurs données par le logiciel YART sont comparées aux données de Slater grâce à une structure statistique qui calcule l'erreur relative, l'erreur moyenne et la variance dont elle extrait l'écart type. Ce travail de comparaison avec les données de Slater est inspiré de celui mené par H.Bougdah dans [Bou91].

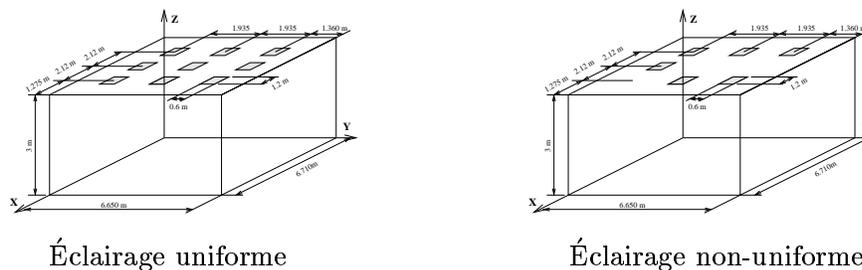
Des essais ont également été réalisés avec des sources ponctuelles pour représenter les sources surfaciques afin de valider la théorie du champ lointain.

Les essais sont donnés en Annexe 14 dont voici le résumé (Tableau 4.7) :

Type de source	écart moyen uniforme	écart moyen non-uniforme
ponctuelles	4.46%	6.14%
échantillonnées	8.37%	11.25%
Sources subdivisées	15.62%	15.81%

Figure 4.7: Tableau de comparaison

On peut constater une bonne corrélation entre les éclairagements donnés par les sources ponctuelles et les données de Slater (des écarts relatifs de l'ordre de 10%). En revanche, les données issues d'une modélisation par des sources surfaciques sont encore assez loin de la réalité (plus de 15%). Il semble nécessaire d'établir une distribution d'énergie variant avec la position.



4.2.6 Essais de distribution d'énergie variant avec la position

Comme l'a souligné Samuel Carré dans [Car98], rien ne prouve que le solide photométrique est le même sur tout le luminaire: dans le cas de luminaires allongés, nous pouvons imaginer des répartitions distinguant la partie centrale des extrémités (cf Figure 4.8).

Des essais ont été effectués en prenant un facteur homothétique que l'on multiplie à la valeur de la luminance.

Ce facteur varie avec la position du point à calculer sur la surface (c'est à dire l'intersection du rayon lancé avec la source).

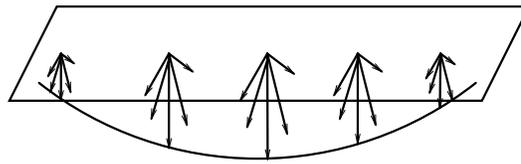
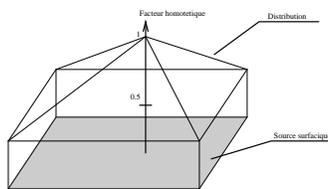
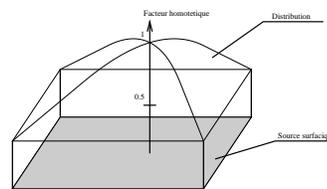


Figure 4.8: Exemple d'un luminaire allongé

Pour l'instant, deux modèles de distribution ont été essayés : un ayant une distribution inversement proportionnelle à la distance par rapport au centre de la source et un ayant une distribution parabolique.

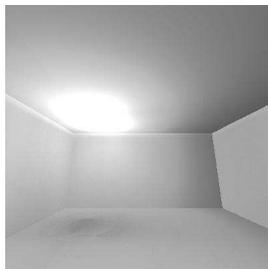


Variation proportionnelle



Variation parabolique

Malheureusement, les valeurs ainsi calculées ne se rapprochent pas des valeurs mesurées par Slater.



Variation proportionnelle



Variation parabolique

4.2.7 Conclusion sur les sources surfaciques

Les calculs utilisant les sources surfaciques sont assez longs par rapport à ceux des sources parfaitement lambertiennes. Par contre, si on compare ces temps de calcul avec ceux des sources utilisant un lobe⁴, on s'aperçoit que le temps n'est que légèrement supérieur.

L'Annexe 15 montre que les images obtenues en utilisant un solide photométrique sont plus contrastées. Les objets des scènes ont alors une apparence plus réaliste.

On voit aussi sur les murs que la distribution de la lumière n'est pas régulière. Cet aspect moins lisse rend les images plus naturelles.

Par contre, les images calculées utilisent des sources en champ lointain. Or, il existe de nombreux cas où une distribution de la lumière uniquement angulaire ne suffit pas : il faut rajouter une distribution spatiale.

⁴Loi du $\cos^n \theta$

Chapter 5

Sources lumineuses caractérisées par une distribution spatiale et angulaire

Ce chapitre traite de sources lumineuses volumiques ou surfaciques modélisées à partir de données en champ proche préalablement tabulées.

5.1 Introduction

5.1.1 Objectif

Pour prendre en compte des sources lumineuses tendues, des modèles basés sur les courbes goniophotométriques de ces sources ont été développés. Cependant, ce type de modèle ne permet pas de modéliser de façon précise le comportement d'une source lumineuse tendue dans un environnement, car le domaine d'utilisation de courbes goniophotométriques (c'est-à-dire la distance séparant la source lumineuse et les surfaces à illuminer) est restreint au voisinage d'une certaine distance. Notamment en champ proche, l'utilisation de ces courbes entraîne des erreurs importantes sur le calcul de l'illumination d'une surface. L'objectif est donc de modéliser des sources surfaciques ayant des distributions spatiale et angulaire spécifiques.

5.1.2 Le champ proche

Lorsqu'on considère un luminaire dans une simulation numérique, on a principalement le choix entre deux modélisations: une modélisation dite en champ lointain et une dite en champ proche. À chacune de ces modélisations correspond un moyen différent de caractériser un luminaire.

Par convention, on se trouve en champ lointain lorsque la distance entre le point étudié et la source est au moins cinq fois plus importante que la plus grande dimension du luminaire. Le luminaire est alors considéré comme une source ponctuelle. Cette source ponctuelle peut alors très bien être représentée par la distribution angulaire des intensités.

La théorie du champ lointain convient parfaitement pour l'étude des luminaires «simples», comme les ampoules, de par leur taille réduite. Mais lorsqu'on utilise de grandes sources

surfaiques, il est impratif de travailler en champ proche.

5.1.3 Organisation du chapitre

Les données de champ proche peuvent tre dtermines d’aprs une simulation sur un luminaire parfaitement modelis (avec toutes ses particularits physiques) sur lequel on lance des rayons en utilisant l’absorption et la rflexion. On recupe alors ces rayons qui seront des chantillons utilisables plus tard (*cf.* Chapitre 5.2).

Ces mmes chantillons peuvent tre trouvs partir de véritables mesures effectues l’aide d’un goniophotomtre spcial (*cf.* Chapitre 5.3).

Pour utiliser ces mesures et recomposer la distribution complte de l’intensit, on peut employer une méthode utilisant le principe des intégrales singulires (*cf.* Chapitre 5.4): elle consiste associer un noyau à chaque chantillon.

5.2 Simulation pour le pr-calcul

Une première idée pour récupérer des échantillons utilisables par la suite est de faire une simulation sur un luminaire parfaitement modélisé. Pour cela, il faut d’abord caractériser les diverses informations qui définissent la lumière et trouver un moyen de stocker ces informations

5.2.1 La fonction plenoptique [AB91]

Cette fonction vient de *plenus* complte, pleine et *optic* optique. Elle dcrit donc tout ce qu’on observe (couleur, dplacement, orientation, nergie, ...), c’est dire qu’elle est base sur des critres rapides de vision physiologique et psychophysique. L’intensit de la lumire est donc donne par la fonction $P(\theta, \phi, \lambda, t, Vx, Vy, Vz)$

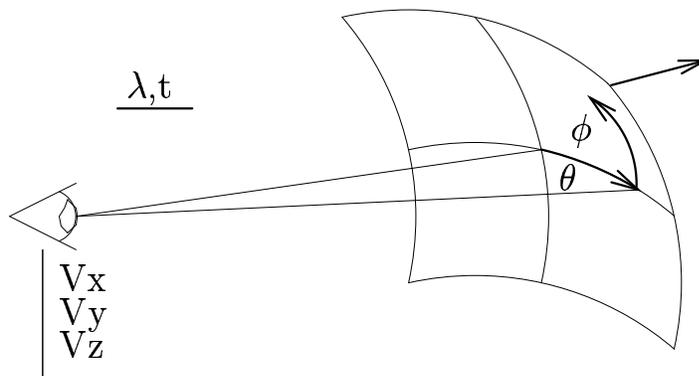


Figure 5.1: La fonction plenoptique

La Figure 5.1 montre que l’information sur l’image partir d’un point de vue est dfinit par un rayon lumineux passant par la pupille une certaine localisation (Vx, Vy, Vz) , tous les

angles possibles (θ, ϕ) pour toutes les longueurs d'ondes λ et chaque instant t .

5.2.2 Le lumigraphe [GGSC96]

Le lumigraphe est un sous-ensemble de la fonction plenoptique. On passe de l'espace 5D de la fonction plenoptique un espace 4D, c'est dire un cube entourant l'objet (un moment t et pour une longueur d'onde λ).

On peut représenter la fonction à l'aide de deux plans, comme le montre la Figure 5.2:

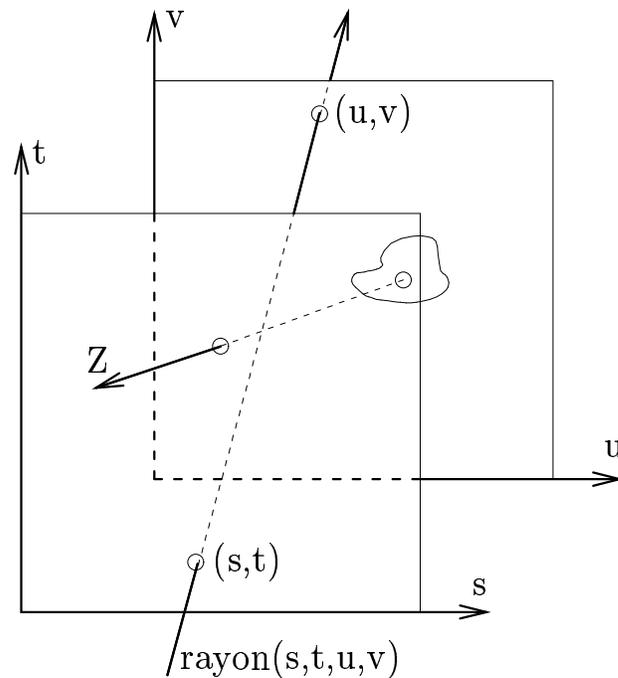


Figure 5.2: Paramétrisation du lumigraphe

Un plan (u, v) est très proche du luminaire et un plan (s, t) , parallèle est un peu plus loin. Il va servir à paramétrer les rayons.

Un rayon dans le lumigraphe 4D est caractérisé par ses quatre coordonnées (u, v, s, t) telles que ce rayon perce le premier plan en (u, v) et intersecte le second plan en (s, t) .

Un lumigraphe est donc constitué par l'ensemble des valeurs $L(u, v, s, t)$.

5.2.3 Les sources de lumière «en boîtes» [HKSS98]

La méthode est, pour un luminaire donné ayant une géométrie et une distribution d'intensité particulières, de calculer le champ de lumière sortant.

Pour cela, on lance des photons depuis la source et on garde les résultats obtenus dans un lumigraphe (Figure 5.3). Plus tard, ce champ de lumière pourra être utilisé pour éclairer une scène en faisant abstraction de la géométrie du luminaire.

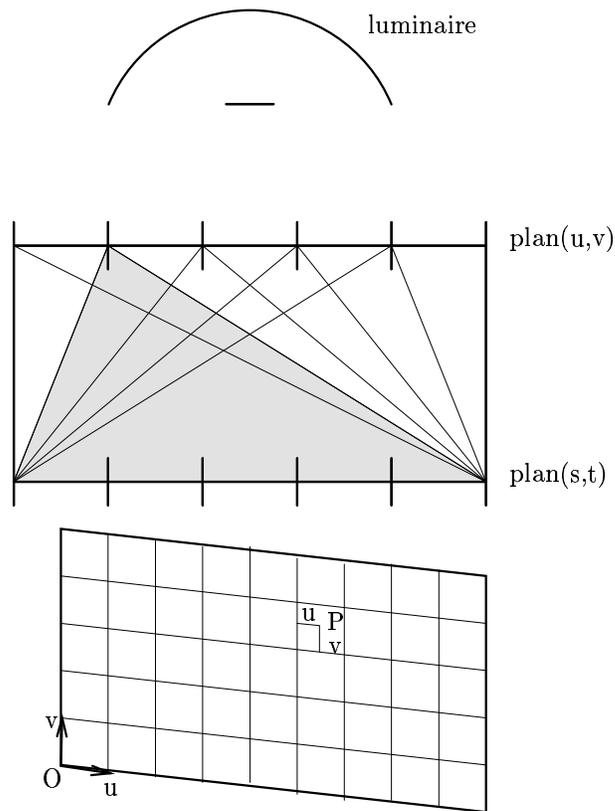


Figure 5.3: Géométrie d'une source de lumière l'intérieur du lumigraph

Le cube représentant une source de lumière peut être créé par la génération d'illumination globale sur la géométrie de la lampe. Le résultat est alors donné pour de multiples points de (u, v) . Pour calculer le processus d'illumination globale, on peut utiliser un lancer de rayons avec la technique de Monte-Carlo.

En résumé, on précalculera la distribution spatiale d'énergie sur la zone d'interface constituant la surface de sortie de la source lumineuse. Cette distribution spatiale d'énergie sera calculée en modélisant entièrement la source lumineuse (réflecteurs, ampoule, ...) et en prenant en compte précisément les changements d'énergie entre les surfaces constituant le sous-environnement de la source par une méthode de projection.

Ensuite, nous utilisons le résultat de ce calcul pour résoudre le problème de l'illumination de l'environnement.

5.3 Goniophotomtre en champ proche

5.3.1 Prsentation des travaux de Ian Ashdown

Ian Ashdown, de la socit *Ledalite Architectural Products Inc.*, tente dans [Ash93] de mettre en oeuvre un goniophotomtre en champ proche.

Considrons une sphre englobant le luminaire (Figure 5.4). Chaque rayon mis par le luminaire devra transpercer cette sphre. Ainsi, en mesurant la luminance de chaque rayon qui intersecte cette sphre, nous avons toutes les informations sur le champ de lumire provenant de la source.

Pour cela, Ashdown propose d'utiliser une camra capteur CCD dont la mise au point est effectue l'infini. Un capteur de rsolution 512×512 pixels permet de mesurer 262144 rayons, il conside qu'un pixel correspond un rayon et cela represente un angle solide de 0.2 stradian.

Il a, par exemple, effectu des essais où le goniophotomètre était situé à 2.0 mètres du centre de la lampe et, les mesures à 2.5 degrés d'intervalle.

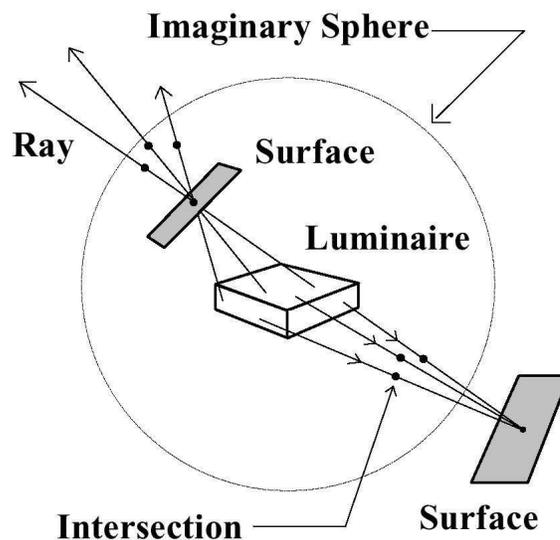


Figure 5.4: La sphre imaginaire

Cette technique est trs intressante car elle permet une abstraction totale du luminaire: il est assimil sa sphre imaginaire. Peu importe la gomtrie du luminaire, ce peut tre une simple ampoule ou un chandelier en cristal. Enfin et surtout la distance des surfaces claires au luminaire n'a pas d'importance.

5.3.2 Principe

La camra est fixe sur un bras mobile dans un plan vertical. Le luminaire tourne sur lui mme, ce qui permet donc de faire des mesures sur une sphre complte comme le montre la Figure

5.5.

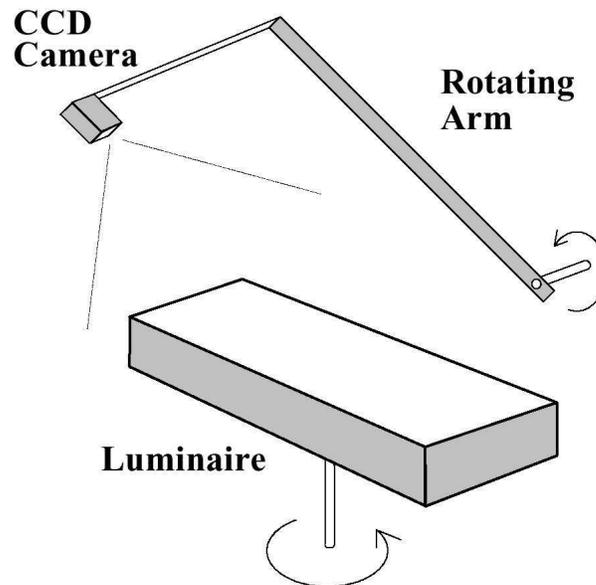


Figure 5.5: Le goniophotomtre imagin pas Ashdown

Le resultat des mesures est donc une banque d'image, avec pour chacune un angle azimutal et un angle zenithal. Ashdown considere, aprs experimentations, que 540 images de 64×64 pixels sont necessaires pour la caractrisation d'un luminaire. Cela represente 2.1 Mo. Ces donnees peuvent tre compressees; il parvient mme des tailles de 100 500 Ko, en comprimant les donnees *sans perte*. Une compression *avec pertes* permet d'atteindre des tailles de 5 100 Ko, suivant le niveau de qualite dsir.

Malheureusement, Ian Ashdown ne travaille plus sur ce sujet, ses travaux n'ayant pas trouv d'applications industrielles directes. Par contre, il existe une socite qui fournit des information sur les luminaires en champ proche, justement d'apr's les travaux de Ian Ashdown: la socite Radiant Imaging.

5.3.3 La socite Radiant Imaging

Parallèlement aux travaux de Ashdown, cette socite a mis au point une mthodologie d'acquisition de donnees en champ proche. Un goniophotomtre spcifique (Figure 5.6) a t dvelopp qui permet l'obtention de ces donnees.

Cet appareil fonctionne de maniere analogue l'appareil imagin par Ashdown, par utilisation d'une camra CCD se dplaant sur une sphere imaginaire autour du luminaire tudi. Cependant, l'o Ashdown s'tait arrt, la socite Radiant Imaging a continu puisque cet appareil est utilis des fins commerciales. Le site internet de la socite propose justement de tlcharger quelques exemples de luminaires, ainsi qu'un logiciel permettant de les utiliser.

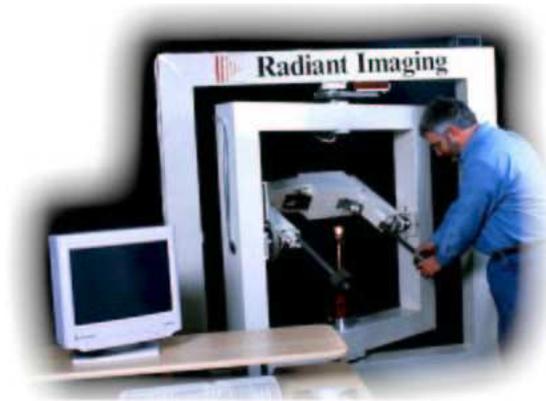


Figure 5.6: Le goniophotomtre de la socit Radiant Imaging

5.3.4 Le format *;;radiant source;;*

C'est le format utilis par la socit pour stocker l'ensemble des informations caractristiques de la source.

Il renferme donc:

- Une description du luminaire (fabricant, puissance, consommation, rfrence, ...);
- Un tableau donnant, en fonction des deux angles (θ et ϕ), l'intensit mesure;
- Pour chaque colonne du tableau, c'est dire pour chaque couple d'angle, une matrice representant une *;;photo;;* du luminaire, dont chaque pixel represente une luminance en [cd/m^2] (Figure 5.7). En fait, chaque pixel est associ un rayon lumineux dont on connaît la luminance.

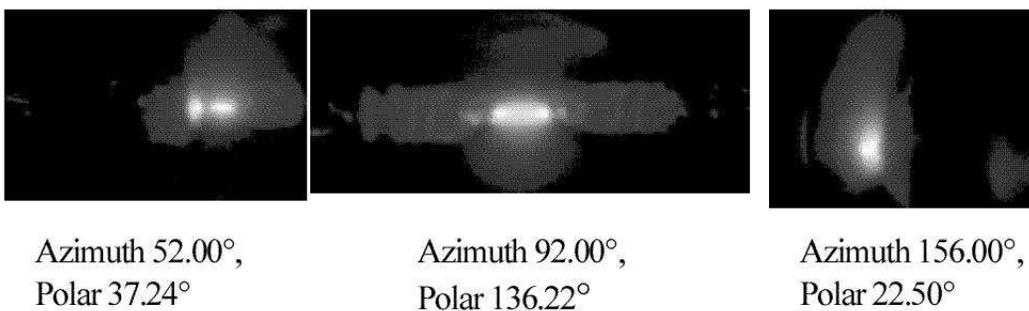


Figure 5.7: Srie d'images numriques pour differentes positions angulaires

5.3.5 L'information spectrale

Le goniophotomètre est également équipé d'une roue avec des filtres. Les Figures 5.8 montrent des exemples de filtres utilisés lors de l'acquisition des images :

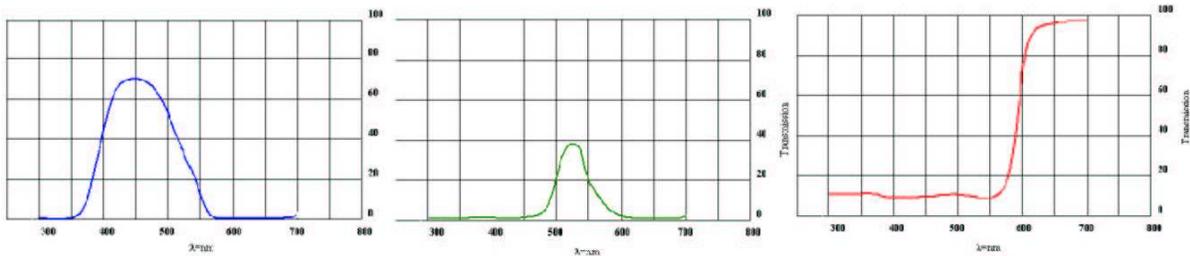


Figure 5.8: filtre bleu, vert et rouge

Par exemple, l'illumination d'un luminaire fluorescent de type «metal halide» n'est pas uniforme suivant la longueur d'onde. Toutes les couleurs proches des électrodes sont plus brillantes, mais le changement en intensité n'est pas le même pour toutes les longueurs d'onde.

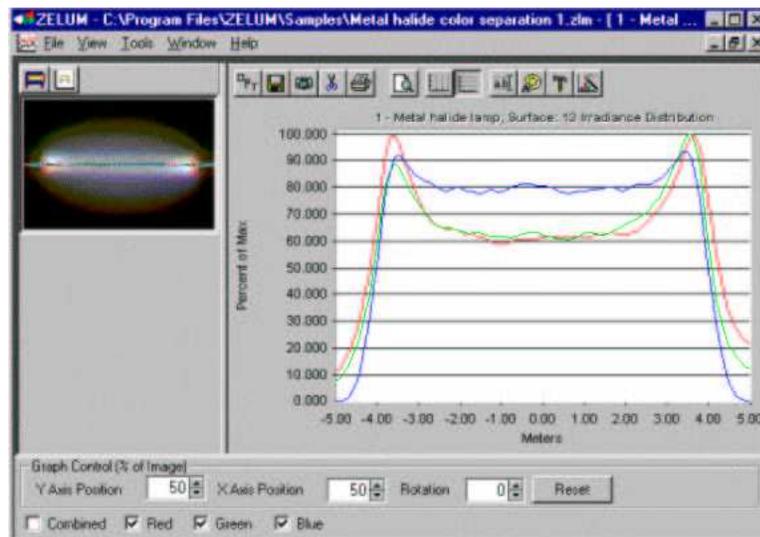


Figure 5.9: Illumination d'une lampe metal halide

Ainsi, sur la Figure 5.9, on peut remarquer que l'illumination du rouge et du vert change de 40 % quand la composante bleue change seulement de 20 %.

5.3.6 La génération de rayons

Il existe deux méthodes pour générer des rayons avec les logiciels de Radiant Imaging: une méthode toute intégrée qui génère l'ensemble des rayons à partir du format «*radiant source*», et une méthode basée sur un fichier de rayons pré-générés grâce au logiciel ProSource.

En effet, le logiciel ProSource peut générer des rayons qu'il stocke dans un fichier ASCII. Il est possible de choisir combien de rayons vont être générés. La plupart des modèles fonctionnent bien avec de un à dix millions de rayons. Ils sont générés à partir de 2000 images du format «*radiant source*».

Le fichier peut être soit composé de rayons générés totalement au hasard, soit de rayons générés en utilisant l'échantillonnage d'importance.

Dans le premier cas, les rayons ont pour origine une position aléatoire sur la source lumineuse et pointent dans des directions aléatoires (Figure 5.10).

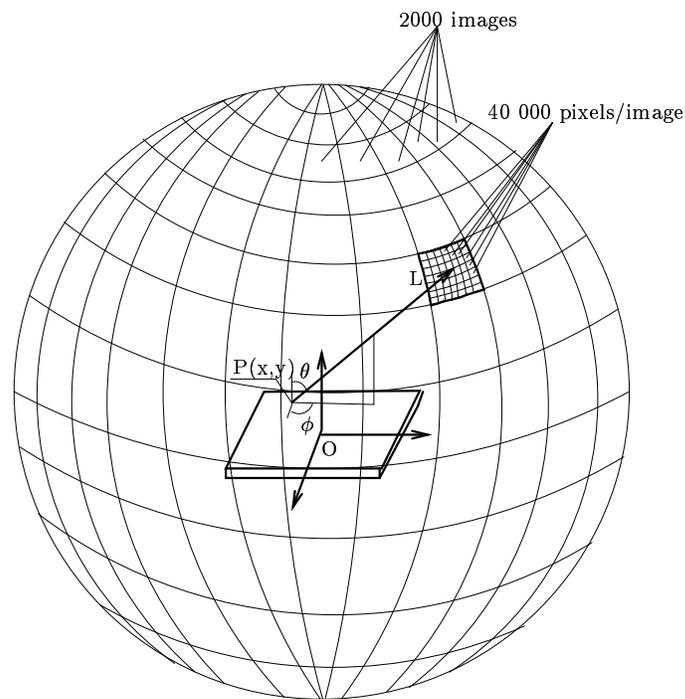


Figure 5.10: Un rayon aléatoire

Dans le second cas, les rayons originaires de n'importe quelle partie du luminaire et envoyés dans différentes directions ont différents niveaux d'importance. La chance pour un rayon d'être sélectionné est basée sur la luminance des pixels de chaque image.

Chaque fichier de rayons inclut tous les angles spécifiés pour la génération de rayons ainsi que toutes les autres données.

5.3.7 Les tudes menes par Radiant Imaging

La socit Radiant Imaging a dpos plusieurs brevets et crit plusieurs publications techniques dans le domaine de l'optique et de l'illumination. Cela est le fruit de plus de vingt ans d'exprience:

- La premire tude prsente l'ide pour modliser les sources tendues en champ proche: l'utilisation d'un goniophotomtre;
- La deuxime tude prsente la camra CCD comme moyen de mesure en guise de goniophotomtre;
- La dernire tude prsente comment les rsultats issus des mesures par camra CCD peuvent tre employs comme donnees goniometriques.

Une mthode goniometrique pour caractriser des sources de lumire [JM00]

Cette premire tude propose une solution pour l'utilisation des sources de lumire tendues c'est dire avec une gomtrie complexe, avec des proprits sur les surfaces comme l'absorption et la rflexion et des proprits de diffusion. De plus, ces proprits sont souvent dpendantes de la temprature.

La Figure 5.11 montre une source de lumire de type tungtne-halogue:

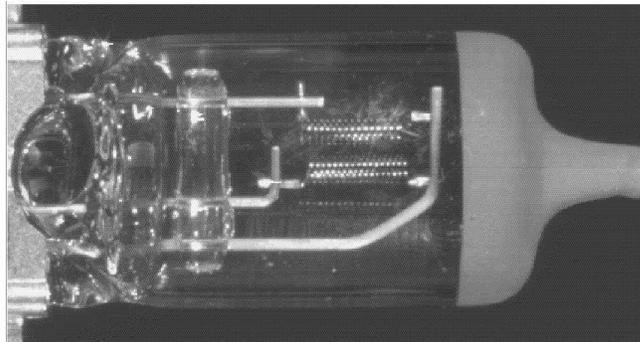


Figure 5.11: Exemple de luminaire

On peut voir, sur cette photo, les nombreuses particularits physiques qui interagissent avec la lumire produite par le filament. La mthode propose est d'chantillonner la fonction de luminance en utilisant des images issues d'un goniophotomtre.

L'exemple de la Figure 5.12 montre une mesure effectue sur le mme luminaire. On peut remarquer les nombreuses obstructions ainsi que des sources d'blouissement.

La prcision de ce modle permet d'inclure toutes les anomalies de ce genre et, visibles pour tous les angles.

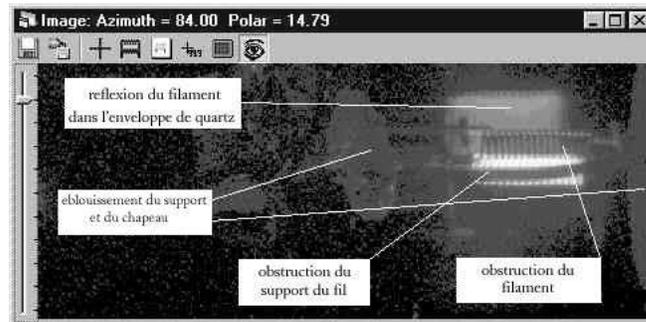


Figure 5.12: Exemple d'image goniométrique d'un luminaire

Obtention de colorimétrie en image numérique pour des mesures rapides de luminance et de chromaticité [JBK⁺01]

Les mesures de couleur ou de luminance sont souvent limitées à dix points de mesure sur une surface cause du temps nécessaire pour faire un seul point de mesure.

Un colorimètre tristimulus image numérique basé sur une technologie CCD a été développé pour être capable de mesurer la luminance sur un million de localisations en quelques secondes (cf. Figure 5.13).

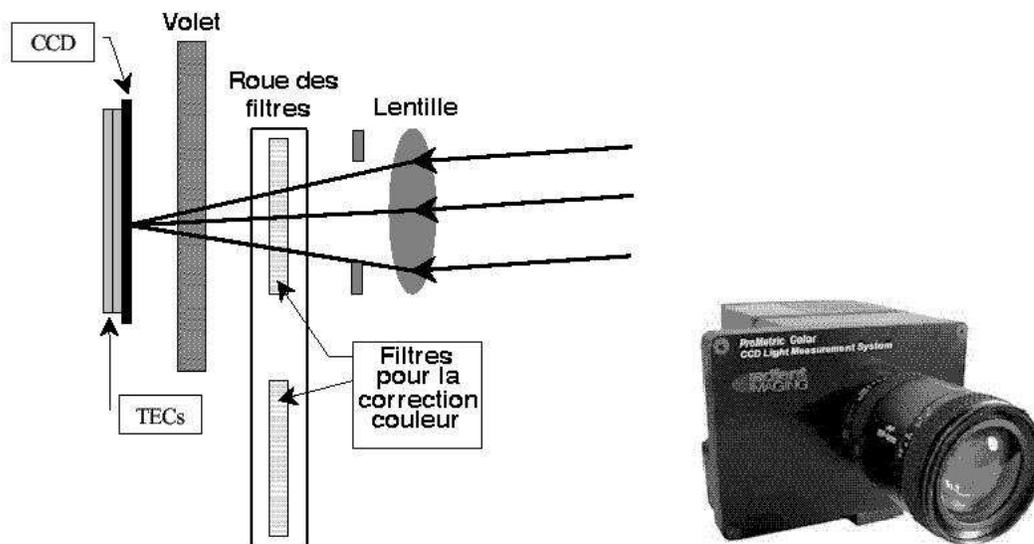


Figure 5.13: Schéma et photographie d'un photomètre CCD

Dans ce système, la lumière passe par la lentille, puis passe par un filtre color dans une roue filtre commandée par ordinateur et passe enfin par un obturateur mécanique. L'image est reflétée sur le tableau CCD contrôlé par un système de refroidissement thermo-électrique (TEC).

Comme avec n'importe quel photomètre ou colorimètre tristimulus, le système CCD doit être correctement calibré pour donner des mesures dans les bonnes unités de luminance et de coordonnées de chromaticité CIE.

Obtention de données photométriques partir de dispositifs optiques [Ryk94]

Les données issues du capteur CCD ne sont pas utilisables directement en tant que luminance. Il y a, par exemple, des différences importantes liées à la projection sur un écran à cristaux liquides LCD.

Cela est dû au comportement de la lentille et des phénomènes tels que la distorsion, la grosseur de la lentille, la rugosité, le système d'illumination, ... Et cela se traduit par des différences importantes surtout au centre et aux coins de l'image.

La Figure 5.14 montre à gauche une carte de l'intensité comme une fonction de localisation issue directement de la projection d'un système LCD.

La Figure 5.14 montre à droite les mêmes données mais en projection sur une surface plutôt que sur ce système LCD.

Les différences sont assez importantes et ont été confirmées par des mesures en laboratoires.

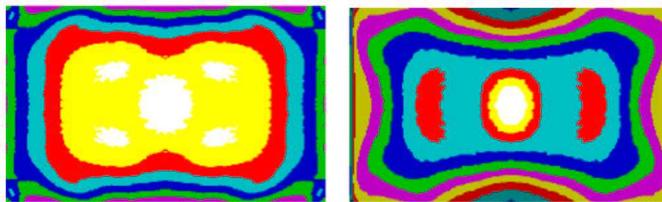


Figure 5.14: Images d'intensité lumineuse

Pour résoudre ce problème, l'illumination de la lentille est calculée par lancer de rayons.

5.4 Formulation mathématique

L'objectif est ici de recomposer la distribution complète de l'intensité en utilisant le principe des intégrales singulières par analogie avec le cas étudié dans le Chapitre 3.2.

5.4.1 Les données

Pour effectuer ces tests, on suppose que nous disposons au départ d'un ensemble d'échantillons de mesure comme dans le cas d'une distribution uniquement angulaire (Figure 5.15).

Chaque échantillon est constitué de:

- Sa position sur la source surfacique;
- Ses angles θ et ϕ pour définir sa direction;
- Son intensité lumineuse.

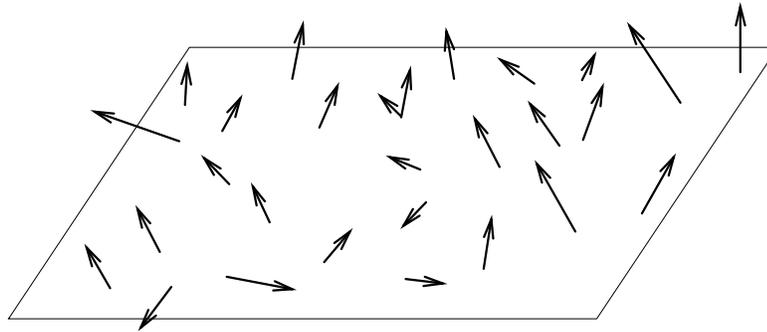


Figure 5.15: Exemple de données

Il existe deux méthodes pour récupérer des tableaux de rayons :

- Soit en faisant une simulation en lançant un pré-calcul sur le luminaire (cf Chapitre 5.2) ;
- Soit partir de mesures fournies par le fabricant du luminaire (cf Chapitre 5.3) ;

5.4.2 Construction de la structure mathématique

Objectif

L'objectif est de récupérer tous les avantages de la méthode des intégrales singulières, c'est à dire :

- Un calcul rapide tout en étant suffisamment précis;
- Une faible place mémoire;
- Des calculs pouvant être faits localement.

Une solution consisterait à utiliser un lobe, c'est à dire une fonction de la forme $\cos^n\theta$. Ce lobe serait associé à chaque échantillon : Figure 5.16.

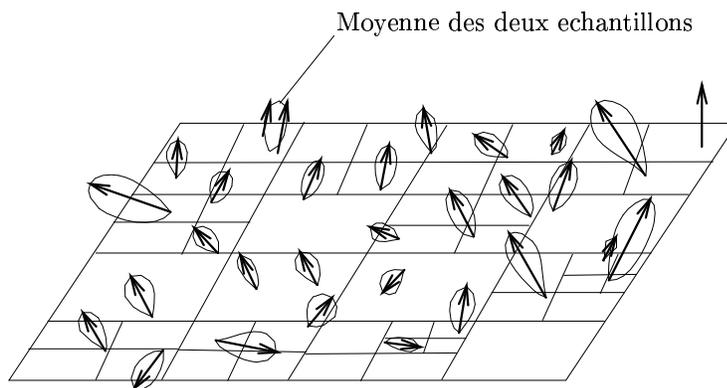


Figure 5.16: Utilisation de lobes

De la mme manire, on peut associer un noyau la place du lobe:

$$K_{\rho}(\theta, x, y) = 1/cste.((\cos\theta) - \rho)^2 + (x - \rho)^2 + (y - \rho)^2)$$

La Figure 5.17 en deux dimensions montre qu'il faut prendre en compte la contribution de chaque échantillon du luminaire. Bien entendu, ce temps de calcul plus long entraînera un résultat plus proche de la réalité.

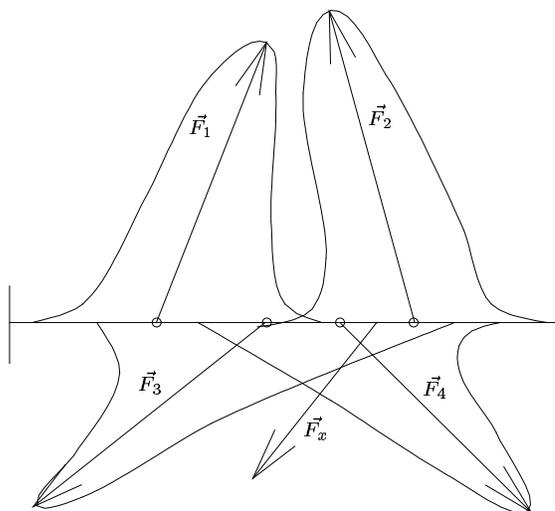


Figure 5.17: Un noyau associ un chantillon

5.4.3 L'intensité reçue par un point de la scène

Dans le logiciel de lancer de rayons, une première étape consiste à subdiviser la source lumineuse pour ne garder en mémoire que l'ensemble des cellules visibles depuis le point testeur.

Puis, on calcule l'éclaircissement depuis le centre de chaque cellule visible comme le montre la Figure 5.18:

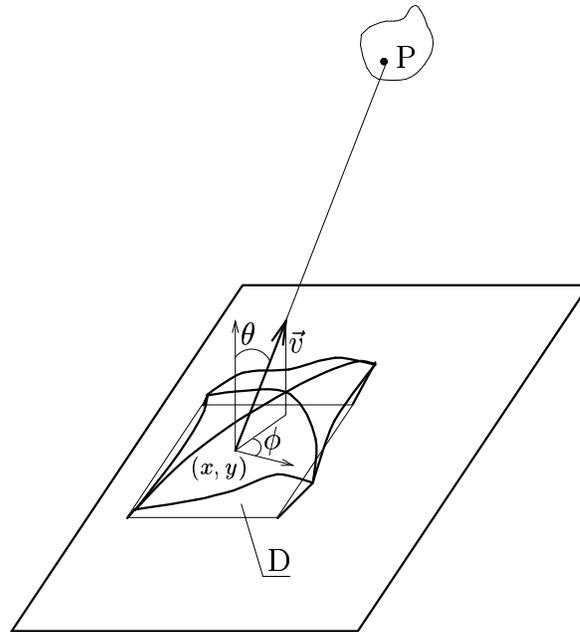


Figure 5.18: Calcul de l'intensité en un point

Le calcul est donc effectué sur un support local (ce n'est pas la peine de calculer la contribution des autres cellules).

Il est juste nécessaire de connaître:

- (x, y) : les coordonnées du point testeur;
- D : le domaine de cellule visible;
- la direction $\vec{v}(\theta, \phi)$ entre la cellule et P;
- les luminances pour les positions (X_i, Y_i) et directions \vec{V}_i .

Nous aurons alors toutes les informations pour utiliser la formule:

$$I_{\rho_1, \rho_2, \rho_3}(f)(\vec{v}, x, y) = \int_{\vec{V}_i \in \Omega} \int_{X_i \in \mathfrak{R}} \int_{Y_i \in \mathfrak{R}} f(\vec{V}_i, X_i, Y_i) K_{\rho_1, \rho_2, \rho_3}(\vec{v}, \vec{V}_i, (X_i - x), (Y_i - y)) dX_i dY_i d\omega(\vec{V}_i) \quad (5.1)$$

Avec $K_{\rho_1, \rho_2, \rho_3}(\vec{v} \cdot \vec{V}_i, (X_i - x), (Y_i - y)) = 1/k[(\vec{v} \cdot \vec{V}_i - \rho_1)^2 + ((X_i - x) - \rho_2)^2 + ((Y_i - y) - \rho_3)^2]$

$1/k$ représente la constante de normalisation. Calculons sa valeurs:

Pour que $K_{\rho_1, \rho_2, \rho_3}$ vrifie bien les proprits des noyaux, il faut que :

$$2\pi \int_{a=\rho_1}^1 \int_{b=\rho_2}^1 \int_{c=\rho_3}^1 K_{\rho_1, \rho_2, \rho_3}(a, b, c) da.db.dc = 1$$

$$\text{donc } k = 2\pi \int_{a=\rho_1}^1 \int_{b=\rho_2}^1 \int_{c=\rho_3}^1 1/k[(a - \rho_1)^2 + (b - \rho_2)^2 + (c - \rho_3)^2].da.db.dc$$

$$= \frac{-2\pi}{3}(\rho_1 - 1)(\rho_2 - 1)(\rho_3 - 1)[(\rho_1 - 1)^2 + (\rho_2 - 1)^2 + (\rho_3 - 1)^2]$$

Il reste montrer que $K_{\rho_1, \rho_2, \rho_3}$ vrifie bien la deuxime proprit des noyaux intgraux de convolution, c'est à dire que:

$$\lim_{\rho_1 \rightarrow 1} - \lim_{\rho_2 \rightarrow 1} - \lim_{\rho_3 \rightarrow 1} - 2\pi \int_{a=\rho_1}^1 \int_{b=\rho_2}^1 \int_{c=\rho_3}^1 1/k[(a - \rho_1)^2 + (b - \rho_2)^2 + (c - \rho_3)^2].a.b.c.da.db.dc = 1$$

En remplaçant k par sa valeur, les calculs analytiques ont été effectués par le logiciel Maple et ils donnent bien le bon résultat.

Nous avons alors toutes les informations pour calculer la luminance pour n'importe quel point de la scène.

5.5 Conclusion

En utilisant les donnes issues de mesures partir d'un goniophotomtre ou issues d'un pr-calcul grâce une simulation, on dispose d'un ensemble de matrices pour chaque angle znital et azimutal. L'ensemble des directions est donc connu par un tableau de luminances (cf. Figure 5.19).

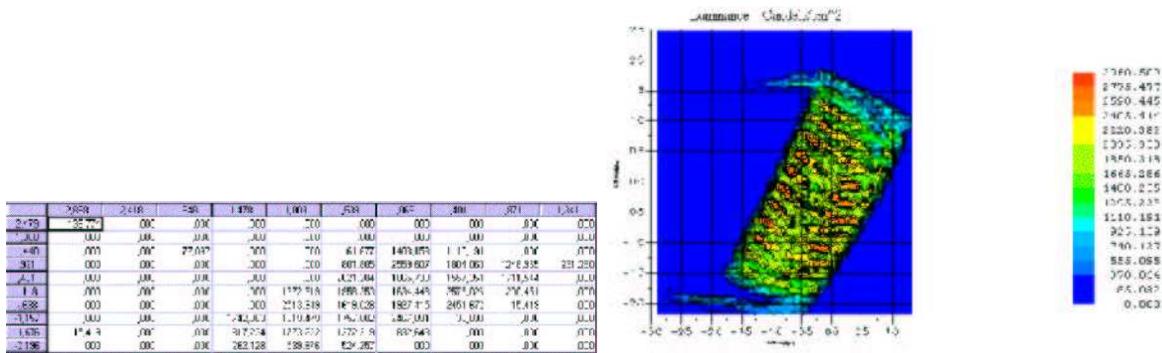


Figure 5.19: Matrice image de la distribution spatiale de l'intensité lumineuse

Un travail de recomposition consistera alors à attribuer un noyau par chantillon. Pour chaque point où l'éclairement est calculé, on peut trouver la direction (θ, ϕ) . On a alors l'image de l'éclairement dans cette direction (Figure 5.20). On peut alors déterminer les secteurs où il y a une obstruction sur la carte des luminances.

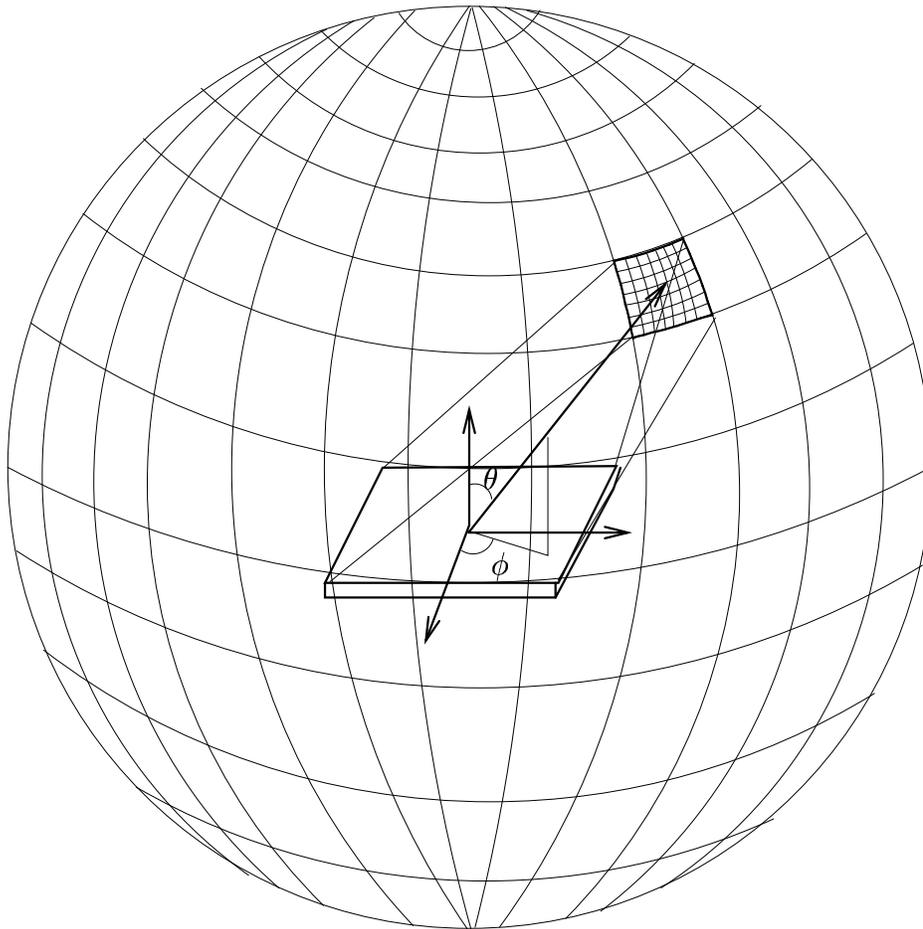


Figure 5.20: distribution angulaire de l'intensité lumineuse

Chapter 6

Conclusion

6.1 Conclusion sur le travail effectué

Ce travail a permis d'atteindre les premiers objectifs fixés :

- Lecture d'un format standard donné par des fabricants de luminaire
- Avoir une source approchant le plus possible la réalité d'après une série de mesures.
- Avoir une programmation homogène et s'incluant parfaitement dans le logiciel existant.
- Avoir un programme robuste et valable pour tous les types de scène et tous les types de luminaire surfacique.
- Obtenir des images qui soient physiquement réalistes.

Par contre, les résultats ne sont validés que par une seule série de mesures réelles alors qu'il était au départ prévu d'effectuer des tests dans une salle vide uniquement éclairée par une source surfacique dont on connaît parfaitement les caractéristiques.

La deuxième étude portant sur la modélisation complète de sources étendues en champ proche a débouché sur une importante bibliographie. Les pistes d'étude pour continuer ce travail sont donc importantes. Il est par exemple possible d'inclure la dimension spectrale si on utilise des données mesurées.

6.2 Conclusion personnelle

Ce stage de sept mois au sein du laboratoire LISSE aura été très enrichissant dans ma formation que ce soit du point de vue des connaissances qu'il m'a apportées que de celui de l'initiation à la recherche.

Tout d'abord, il m'a permis de mettre en pratique une démarche d'ingénieur qui était ma formation initiale dans un secteur, assez éloigné, mais utilisant les mêmes outils.



De plus, sur le plan informatique, j'ai découvert l'environnement UNIX. Tout spécialement, j'ai appris à utiliser le traitement de texte L^AT_EX, le logiciel de dessin Xfig et l'éditeur Emacs. De même, j'ai appris à programmer en langage C, un code avec lequel je n'avais presque jamais programmé.

Enfin, cette expérience m'aura été d'autant plus bénéfique qu'elle m'a permis de mettre en application certaines connaissances théoriques comme le calcul d'intégrales lors de la recherche de noyaux intégraux, le calcul statistique lors de l'analyse des essais, la lecture de l'anglais lors des dchiffrages des articles...

Je tiens, finalement, à réitérer mes remerciements à l'ensemble du personnel du laboratoire LISSE pour l'accueil qu'il m'a réservé ainsi que pour toutes les connaissances que j'ai pu acquérir.



Bibliography

- [AB91] E.H. Adelson and J.R. Bergen. The plenoptic function and the elements of early vision. *Computational Models of visual processing, landy and Movshon, Eds. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, ch 1.*, 1991.
- [Ash92] I. Ashdown. Solving the near-field problem. *Ledalite Architectural Products Inc*, 1992.
- [Ash93] I. Ashdown. Near-field photometry: A new approach. *Journal of the illuminating Engineering Society*, 22(1), 1993.
- [Bou91] H. Bougdah. Illuminance from electric lighting installations: Methods of comparison of measured and calculated value. *Lighting Research and Technology 23(3), Liverpool school of Architecture and Building Engineerin*, 1991.
- [Car98] S. Carré. Outil de conception architecturale pour l'éclairage naturel/artificiel. *Thèse Doct. : Université de Rennes 1*, 1998.
- [GGSC96] S.J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szelinski, and M.F. Cohen. The lumigraph. *Computer Graphics (SIGGRAPH '96 Proceeding)*, 1996.
- [HKSS98] W. Heidrich, J. Kautz, P. Slusallek, and H.P. Seidel. Canned lightsources. *Proceedings of Eurographics Workshop on Rendering, Eurographics*, pages 293–300, 1998.
- [IES95] IESNA. Standard file format for electronic transfer of photometric data. *LM-63-9*, 1995.
- [JBK⁺01] D.R. Jenkins, D.C. Beuzekom, G. Kollman, C.B. Wooley, and R. Rykowski. Digital imaging colorimeter for fast measurement of chromaticity coordinate and luminance uniformity of display. *Flat Panel Display Technology and Display Metrology II, Edward F. Kelley Ed*, 2001.
- [JM00] D.R. Jenkins and H. Monch. Source imaging goniometer method of light source characterization for accurate projection system design. *Society for Information Display Conference, Long Beach*, 2000.
- [Mit96] R. Mitanchey. Synthèse d'image appliquée à l'éclairage intérieur des bâtiments. *Thèse Doct. : École des Mines de Saint-Étienne*, 1996.



- [Nit94] M. Nithisoontorn. Shooting algorithm for illuminance: Comparison of prediction with experiment. *Lighting Research and Technology , Lighting Engineering Departement of Dornbirn*, 1994.
- [Noé99] N. Noé. Etude de fonctions de distribution de la réflectance bidirectionnelle. *Thèse Doct. : École des Mines de Saint-Étienne*, 1999.
- [Roe93] M. Roelens. Un environnement pour le tracé de rayon utilisant une modélisation par arbre de construction. *Thèse Doct. : École des Mines de Saint-Étienne*, 1993.
- [Ryk94] R.F. Rykowski. Illumination system measurement using ccd cameras. *International Optical Design Conference, Technical Diges*, page 102, 1994.
- [Zan98] J. Zaninetti. Modélisation vectorielle de l'éclairage global en lancer de rayons. *Thèse Doct. : École des Mines de Saint-Étienne*, 1998.
- [Zeg97] E. Zeghers. Radiosité spectrale et sources directionnelles : Application à l'éclairage des tunnels routiers. *Thèse Doct. : Université de Rennes 1*, 1997.