



**THÈSE / UNIVERSITÉ DE RENNES 1**  
*sous le sceau de l'Université Européenne de Bretagne*

pour le grade de  
**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1**

*Mention : Informatique*  
**Ecole doctorale Matisse**

présentée par

**Mickaël Ribardière**

préparée à l'unité de recherche UMR6074 IRISA  
Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires  
IFSIC

---

**Simulateur pour l'étude  
de la visibilité  
dans les  
environnements enfumés.**

**Thèse soutenue à Rennes  
le 16 Décembre 2010**

devant le jury composé de :

**Mathias PAULIN**

Professeur, Univ. P. Sabatier Toulouse / rapporteur

**Christophe RENAUD**

Professeur, Univ. du littoral Lille / rapporteur

**Bruno ARNALDI**

Professeur, INSA Rennes / examinateur

**Vincent JOLIVET**

M. de Conf., Univ. Limoges / examinateur

**Bernard PEROCHE**

Professeur, Univ. Lyon 1 / examinateur

**Samuel CARRÉ**

Ingénieur, CSTB Nantes / examinateur

**Kadi BOUATOUCH**

Professeur, Univ. Rennes 1 / directeur de thèse



*Ici, une citation*

**Son auteur**  
*l'ouvrage*





# Remerciements

**I**CI LES REMERCIEMENTS à compléter.





---

# Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introduction</b>  | <b>15</b> |
| Contexte . . . . .   | 16        |
| Objectifs . . . . .  | 16        |
| <br>   |           |
| <b>Première Partie :</b>   |           |
| <b>Considérations préalables et théories</b>                           | <b>19</b> |
| <br>   |           |
| <b>1 Considérations préalables sur l'organisation du document</b>      | <b>21</b> |
| <br>   |           |
| <b>2 Illumination globale</b>  | <b>23</b> |
| 2.1 Problème d'Illumination Globale . . . . .                          | 23        |
| 2.1.1 Grandeurs physiques . . . . .                                    | 23        |
| 2.1.2 L'équation de rendu . . . . .                                    | 25        |
| 2.2 Quelques méthodes basées lancer de rayon . . . . .                 | 26        |
| 2.2.1 Introduction aux méthodes de Monte Carlo . . . . .               | 26        |
| 2.2.2 Diminution de la variance . . . . .                              | 26        |
| Échantillonnage par importance . . . . .                               | 27        |
| Échantillonnage stratifié . . . . .                                    | 28        |
| 2.2.3 Le tracé de chemins mono et bidirectionnel . . . . .             | 28        |
| 2.2.4 Le lancer de photons . . . . .                                   | 31        |
| 2.2.5 Le cache d'éclairement . . . . .                                 | 33        |
| <br>   |           |
| <b>3 Milieux participatifs : quelques points théoriques</b>            | <b>35</b> |
| 3.1 Milieux participatifs et le transport de la lumière . . . . .      | 35        |
| 3.1.1 Présentation et définitions . . . . .                            | 35        |
| 3.1.2 L'équation de transfert radiatif . . . . .                       | 36        |
| 3.2 Illustrations des phénomènes dans un milieu participatif . . . . . | 38        |
| 3.3 Méthodes à base de tracé de chemins . . . . .                      | 40        |
| <br>   |           |
| <b>4 Conclusion</b>  | <b>43</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Seconde Partie :</b>  |           |
| <b>L'illumination globale surfacique</b>                             | <b>45</b> |
| <b>1 Travaux connexes</b>  | <b>47</b> |
| 1.1 Présentation détaillée du cache d'éclairage . . . . .            | 47        |
| 1.2 Quelques méthodes à base de cache d'éclairage . . . . .          | 48        |
| 1.3 Discussion sur ces méthodes . . . . .                            | 50        |
| 1.3.1 La forme des zones d'influence des enregistrements . . . . .   | 50        |
| 1.3.2 La limite des gradients du premier ordre . . . . .             | 51        |
| <b>2 Enregistrements adaptatifs pour le cache d'éclairage</b>        | <b>53</b> |
| 2.1 Présentation de la méthode . . . . .                             | 53        |
| 2.2 Les enregistrements adaptatifs . . . . .                         | 53        |
| 2.3 Les gradients . . . . .  | 56        |
| 2.3.1 Recalculer l'éclairage le long des axes . . . . .              | 56        |
| 2.3.2 Les gradients de translation . . . . .                         | 59        |
| Définition et calcul . . . . .                                       | 59        |
| L'interpolation . . . . .  | 59        |
| 2.3.3 Les gradients de rotation . . . . .                            | 60        |
| Définition et calcul . . . . .                                       | 60        |
| L'interpolation . . . . .  | 61        |
| 2.4 Adaptation aux variations de l'éclairage . . . . .               | 62        |
| 2.5 Optimisations apportées à la méthode . . . . .                   | 63        |
| 2.5.1 Détermination automatique du seuil . . . . .                   | 63        |
| 2.5.2 Réutilisation du cache en cours de calcul . . . . .            | 64        |
| 2.6 Résultats . . . . .  | 64        |
| Commentaires généraux sur les résultats . . . . .                    | 64        |
| Résultats pour la scène de la boîte de Cornell . . . . .             | 66        |
| Résultats pour la scène <i>lama, tore et grille</i> . . . . .        | 68        |
| Résultats pour la scène de la <i>villa Arpel</i> . . . . .           | 70        |
| D'autres résultats . . . . .   | 72        |
| <b>3 Conclusion</b>  | <b>75</b> |
| <b>Troisième Partie :</b>  |           |
| <b>Les milieux participatifs</b>                                     | <b>77</b> |
| <b>1 Travaux connexes</b>  | <b>79</b> |
| 1.1 Méthodes à base de <i>Photon Mapping</i> . . . . .               | 79        |
| 1.1.1 La méthode de base . . . . .                                   | 79        |
| 1.1.2 Les extensions du <i>Volume Photon Mapping</i> . . . . .       | 81        |
| 1.1.3 Conclusion sur les méthodes de <i>Photon Mapping</i> . . . . . | 84        |
| 1.2 Radiance Caching . . . . .                                       | 85        |
| <b>2 Cache d'éclairage volumique</b>                                 | <b>89</b> |
| 2.1 Présentation de la méthode . . . . .                             | 89        |
| Vue générale de la méthode . . . . .                                 | 90        |
| 2.2 Enregistrements volumiques adaptatifs . . . . .                  | 91        |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 2.3  | Gradients et effets volumiques . . . . .                                 | 93         |
| 2.4  | Remplissage adaptatif du cache . . . . .                                 | 94         |
| 2.4.1  | Présentation . . . . .   | 94         |
| 2.4.2  | Collecte des enregistrements et estimation de la luminance . . . . .     | 96         |
| 2.4.3  | Ajout d'enregistrements par échantillonnage par importance . . . . .     | 98         |
| 2.4.4  | Test de la variabilité de l'estimation de la luminance . . . . .         | 101        |
| 2.5  | Résultats . . . . .  | 101        |
| 2.5.1  | Enregistrements volumiques sphériques <i>versus</i> adaptatifs . . . . . | 101        |
| 2.5.2  | Répartition des enregistrements . . . . .                                | 102        |
| 2.5.3  | Précision de la méthode . . . . .  | 105        |
| 2.5.4  | Comparaison avec des méthodes basées <i>Photon Mapping</i> . . . . .     | 106        |
|  | Résultats pour la scène du couloir . . . . .                             | 107        |
|  | Résultats pour la scène du cendrier . . . . .                            | 109        |
| 2.5.5  | D'autres résultats . . . . .   | 110        |
| <b>3</b>   | <b>Conclusion</b>  | <b>115</b> |
| <br>   |  |            |
| <b>Quatrième Partie :</b>                        |  |            |
| <b>Considérations sur les aspects dynamiques</b> |  | <b>117</b> |
| <b>1</b>   | <b>Théories</b>  | <b>119</b> |
| 1.1  | La problématique d'une simulation dynamique . . . . .                    | 119        |
| 1.2  | Travaux connexes . . . . .   | 120        |
| 1.3  | Discussion et perspective de travail . . . . .                           | 122        |
| <b>2</b>   | <b>Un cache d'éclairage temporel</b>                                     | <b>123</b> |
| 2.1  | Présentation de la méthode . . . . .                                     | 123        |
| 2.2  | Décomposition de l'espace temps . . . . .                                | 123        |
| 2.3  | Enregistrements adaptatifs spatio-temporels . . . . .                    | 125        |
| 2.3.1  | Durée de vie d'un enregistrement . . . . .                               | 125        |
| 2.3.2  | Description des enregistrements adaptatifs spatio-temporels . . . . .    | 126        |
| 2.3.3  | Combinaison de gradients temporels . . . . .                             | 127        |
|  | Gradients photométriques . . . . .                                       | 128        |
|  | Gradients géométriques . . . . .   | 129        |
| 2.4  | Utilisation des enregistrements adaptatifs spatio-temporels . . . . .    | 129        |
| 2.5  | Adaptation de la durée de vie . . . . .                                  | 130        |
| 2.5.1  | Adaptation photométrique . . . . .                                       | 130        |
| 2.5.2  | Adaptation à la visibilité . . . . .                                     | 133        |
| <b>3</b>   | <b>Conclusion</b>  | <b>135</b> |
| <br>   |  |            |
| <b>Conclusion générale et perspectives</b>       |  | <b>137</b> |
|  | Rappel des objectifs . . . . .   | 137        |
|  | Travaux réalisés . . . . .   | 137        |
|  | Cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs . . . . .                 | 138        |
|  | Cache d'éclairage volumique . . . . .                                    | 139        |
|  | Cache d'éclairage spatio-temporel . . . . .                              | 139        |

---

|  |            |
|--|------------|
| Travaux futurs et perspectives . . . . .                                   | 139        |
| <b>Annexes</b>   | <b>141</b> |
| <b>A Formulation des gradients de translation et rotation</b>              | <b>141</b> |
| <b>B Données d'entrée et implémentation des milieux participatifs</b>      | <b>143</b> |
| B.1 Les données d'entrée <i>DSSF</i> et les hypothèses de départ . . . . . | 143        |
| B.2 Les choix d'implémentation . . . . .                                   | 143        |
| B.3 L'interpolation dans une feuille du <i>kd-tree</i> . . . . .           | 144        |
| <b>C Définition de la bordure des zones d'influence volumiques</b>         | <b>147</b> |
| <b>Bibliographie</b>   | <b>149</b> |

# Table des figures

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Première Partie :</b>  |           |
| <b>Considérations préalables et théories</b>  | <b>19</b> |
| 2.1 La luminance . . . . .  | 24        |
| 2.2 <i>Path Tracing</i> : Réduction de la variance en sur-échantillonnant . . . . .   | 29        |
| 2.3 Le principe du tracé de chemins bidirectionnel . . . . .  | 29        |
| 2.4 Comparaison des méthodes de tracé de chemins mono et bidirectionnel .   | 30        |
| 2.5 Une caustique rendu avec la méthode du <i>Photon Mapping</i> . . . . .  | 31        |
| 2.6 Visualisation directe de la carte de photons et <i>final gathering</i> . . . . .  | 32        |
| 3.1 Les différentes interactions entre la lumière et le milieu participatif . . . .   | 35        |
| 3.2 Les diffusions simple et multiples dans les milieux participatifs . . . . .   | 38        |
| 3.3 Un couloir rempli de fumée . . . . .  | 39        |
| 3.4 Les graphes représentant l'évolution du milieu participatif : la diffusion et l'atténuation . . . . .                               | 39        |
| 3.5 Les graphes représentant l'évolution du milieu participatif : la luminance incidente et la luminance diffusée et atténuée . . . . . | 40        |
| 3.6 La méthode de tracé de chemins avec un milieu participatif . . . . .  | 41        |
| <b>Seconde Partie :</b>   |           |
| <b>L'illumination globale surfacique</b>  | <b>45</b> |
| 1.1 Les zones d'influence idéales . . . . .   | 51        |
| 2.1 8 zones pseudo-elliptiques pour décrire la zone d'influence . . . . .   | 54        |
| 2.2 Description de la zone d'influence . . . . .  | 55        |
| 2.3 Comparaison entre les zones circulaires et les zones adaptatives . . . . .  | 56        |
| 2.4 Détermination des sources ponctuelles équivalentes . . . . .  | 57        |
| 2.5 Les 2 types de sources ponctuelles équivalentes : directes et indirectes . .  | 58        |
| 2.6 L'interpolation avec les gradients de rotation . . . . .  | 61        |
| 2.7 Comparaison entre nos gradients de rotation et ceux de Ward et Heckbert   | 62        |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.8  | Adaptation de la longueur des axes aux variations de l'éclairage . . . . .                            | 63 |
| 2.9  | Réutilisation des enregistrements en cours de calcul . . . . .  | 65 |
| 2.10 | Comparaison de différentes méthodes avec la scène de la boîte de Cornell . . . . .                    | 66 |
| 2.11 | Différence relative entre un résultat obtenu avec notre méthode et un résultat de référence . . . . . | 67 |
| 2.12 | Résultats avec la scène <i>lama, tore et grille</i> . . . . .   | 68 |
| 2.13 | L'impact du seuil $\rho$ sur la qualité des résultats . . . . .                                       | 69 |
| 2.14 | 2 vues de la scène de la <i>villa Arpel</i> avec différentes méthodes . . . . .                       | 70 |
| 2.15 | Vue plus générale de la scène de la <i>villa Arpel</i> . . . . .                                      | 71 |
| 2.16 | 4 vues de la scène du temple asiatique . . . . .  | 72 |
| 2.17 | Cache d'éclairage avec enregistrements adaptatifs et les matériaux brillants . . . . .                | 73 |
| 2.18 | Vue de l'extérieur de la scène de la <i>villa Arpel</i> . . . . .                                     | 73 |

### Troisième Partie :

#### Les milieux participatifs

77

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 1.1  | Le calcul de $\alpha_i$ pour l'algorithme du <i>Beam Radiance Estimate</i> . . . . .                             | 83  |
| 1.2  | L'intersection des photons pour l'algorithme du <i>Beam Radiance Estimate</i> . . . . .                          | 83  |
| 1.3  | L'estimation de la luminance par faisceau pour l'algorithme du <i>Beam Radiance Estimate</i> . . . . .           | 83  |
| 1.4  | Comparaison de résultats entre deux méthodes de <i>Photon Mapping</i> . . . . .                                  | 84  |
| 1.5  | Calcul de la diffusion simple dans l'algorithme de cache de luminance . . . . .                                  | 86  |
| 1.6  | Calcul de la diffusion multiple dans l'algorithme de cache de luminance . . . . .                                | 87  |
| 2.1  | Les 18 axes définissant la zone d'influence des enregistrements volumiques . . . . .                             | 92  |
| 2.2  | La discrétisation en triangles et sous-triangles de la zone d'influence des enregistrements volumiques . . . . . | 92  |
| 2.3  | Processus d'ajout des enregistrements . . . . .  | 95  |
| 2.4  | Processus de recherche des intersections avec la zone d'influence d'un enregistrement . . . . .                  | 96  |
| 2.5  | Intégration de luminance diffusée et atténuée avec la méthode des trapèzes . . . . .                             | 97  |
| 2.6  | Le processus d'ajout des enregistrements par importance . . . . .  | 99  |
| 2.7  | La boîte de Cornell et un milieu participatif homogène et isotrope . . . . .                                     | 102 |
| 2.8  | Répartition des enregistrements sur un plan . . . . .  | 103 |
| 2.9  | Répartition des enregistrements sur un rayon . . . . .   | 103 |
| 2.10 | La boîte de Cornell avec une source de lumière directive . . . . .   | 104 |
| 2.11 | Répartition des enregistrements créés sur un rayon dans la boîte de Cornell . . . . .                            | 104 |
| 2.12 | Vérification de la précision de la méthode d'ajout dans la scène du couloir . . . . .                            | 105 |
| 2.13 | Vérification de la précision de la méthode d'ajout dans la scène de la boîte de Cornell . . . . .                | 106 |
| 2.14 | Configuration de la scène du couloir . . . . .   | 107 |
| 2.15 | Première série de résultats obtenus dans la scène du couloir . . . . .   | 108 |
| 2.16 | Seconde série de résultats obtenus dans la scène du couloir . . . . .  | 109 |
| 2.17 | Résultats obtenus dans la scène du cendrier . . . . .  | 110 |
| 2.18 | Résultat obtenu avec la scène du couloir. . . . .  | 111 |
| 2.19 | Résultat obtenu avec la scène de la <i>villa Arpel</i> . . . . .   | 111 |
| 2.20 | La scène de la <i>villa Arpel</i> dans le brouillard un matin ensoleillé. . . . .                                | 112 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 2.21 | Résultat obtenu avec la scène du temple asiatique. . . . . | 112 |
| 2.22 | Résultat obtenu avec du soleil. . . . .                    | 113 |

## Quatrième Partie :

### Considérations sur les aspects dynamiques

117

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 1.1 | Illustration d'un effet de <i>flickering</i> . . . . .   | 120 |
| 2.1 | Décomposition de l'espace temps en <i>instants clés</i> . . . . .                                      | 124 |
| 2.2 | Création des enregistrements spatio-temporels . . . . .  | 125 |
| 2.3 | Fonction de pondération temporelle . . . . .   | 126 |
| 2.4 | Trois enregistrements non temporels permettent de définir un enregistrements spatio-temporel . . . . . | 127 |
| 2.5 | Reconstruction d'enregistrements intermédiaires . . . . .  | 127 |
| 2.6 | L'interpolation dans un enregistrement adaptatif spatio-temporel . . . . .                             | 128 |
| 2.7 | L'axe le plus long de la zone d'influence d'un enregistrement temporel . . . . .                       | 131 |
| 2.8 | Adaptation de la durée de vie . . . . .  | 132 |
| 2.9 | Adaptation de la durée de vie à la visibilité . . . . .  | 133 |

### Annexes

140

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| B.1 | Organisation des sommets dans la feuille du <i>kd-tree</i> . . . . . | 145 |
| C.1 | Décomposition du triangle unitaire . . . . .                         | 147 |





---

# Liste des tableaux

|   |            |
|---|------------|
| <b>Première Partie :</b>  |            |
| <b>Considérations préalables et théories</b>  | <b>19</b>  |
| <br>  |            |
| <b>Seconde Partie :</b>   |            |
| <b>L'illumination globale surfacique</b>  | <b>45</b>  |
| 2.1 Statistiques des rendus dans la scène de la boîte de Cornell . . . . .                                | 66         |
| 2.2 Statistiques des rendus pour la figure 2.14 . . . . .   | 71         |
| <br>  |            |
| <b>Troisième Partie :</b>   |            |
| <b>Les milieux participatifs</b>  | <b>77</b>  |
| 2.1 Statistiques pour la méthode d'ajout sur les scènes de la boîte de Cornell<br>et du couloir . . . . . | 106        |
| 2.2 Statistiques des rendus pour la figure 2.15 . . . . .   | 108        |
| 2.3 Statistiques des rendus pour la figure 2.16 . . . . .   | 109        |
| 2.4 Statistiques des rendus pour la figure 2.17 . . . . .   | 110        |
| <br>  |            |
| <b>Quatrième Partie :</b>   |            |
| <b>Considérations sur les aspects dynamiques</b>  | <b>117</b> |





---

# Introduction

**D**EPUIS QUELQUES ANNÉES déjà, la synthèse d'image en informatique graphique permet de simuler de nombreux effets lumineux observables dans la nature. Des méthodes plus ou moins réalistes, plus ou moins complexes, ont été développées afin de répondre à différentes exigences en fonction du type d'application désirée. Ces contraintes conditionnent le niveau de réalisme de la simulation. La synthèse d'image orientée réalité physique s'intéresse dans un premier temps au comportement physique de la lumière. Celle-ci est émise par des sources (naturelles ou artificielles), se propage dans l'espace, interagit avec des objets aux caractéristiques plus ou moins complexes puis intersecte l'œil de l'observateur se transformant alors en stimulus activant un comportement biologique (interprétation par le cerveau). La question principale est de savoir comment modéliser numériquement l'ensemble de ces comportements afin de restituer, sur l'écran de l'ordinateur pour la plupart des applications, une impression de réalisme. Les concepts physiques sont alors étudiés et retravaillés pour les adapter au support de simulation numérique qu'est l'ordinateur et aux objectifs ciblés par l'application.

Un grand nombre d'applications, que l'on peut classer dans deux catégories distinctes, utilisent la synthèse d'image : les applications « ludiques » et les applications scientifiques. Les premières, telles que les jeux vidéo ou le cinéma, ont pour objectif de donner une impression de réalisme, de « tromper » l'observateur, ou encore ont un but purement artistique. Les secondes cherchent à comprendre et à analyser les comportements physiques à l'aide de l'outil numérique.

Nous avons dit que la lumière se propage dans l'espace et interagit avec les objets composant l'environnement. Si l'on rajoute dans l'environnement des éléments aux comportements plus complexes tels que la fumée, alors le parcours de la lumière dans l'espace est perturbé. L'ensemble du problème se complique donc un peu plus puisque de nouvelles interactions sont à prendre en compte. C'est l'ensemble de ces comportements lumineux (c'est-à-dire les interactions de la lumière sur les surfaces et dans les fumées) que nous nous proposons d'analyser afin de développer une méthode de simulation qui réponde à l'ensemble des exigences fixées au départ.

## Contexte

La thèse s'est déroulée au sein du Département Acoustique et Éclairage (DAE) du CSTB et plus particulièrement dans le cadre du pôle *Éclairage Électricité Électromagnétisme*. Le logiciel *Phanie* de simulation d'éclairage, développé et maintenu par le CSTB, offre déjà la possibilité de réaliser plusieurs types d'études d'éclairage : bilan d'éclairage naturel, étude de l'éclairage artificiel, adaptation et calibration de l'éclairage artificiel dans un bâtiment en fonction de son utilisation... L'algorithme interne utilisé par *Phanie* est la *Radiosité* que nous ne décrivons pas dans ce document (pour plus d'information sur la méthode de *Radiosité* voir le livre [CWH93] et plus précisément sur les techniques utilisées par *Phanie* voir [CDG80] et la thèse de Samuel Carré [Car98]). Cette méthode est difficilement utilisable dans le cadre d'une simulation d'éclairage faisant intervenir des fumées. Toutefois, la nouvelle méthode développée doit être intégrée à l'outil *Phanie*. Un travail de documentation concernant les méthodes existantes de simulation d'éclairage, avec et sans fumée, a donc été réalisé afin de pouvoir déterminer leurs forces et leurs faiblesses ainsi que celles qui peuvent être une base de travail au développement du nouvel algorithme. Une part non négligeable du travail a donc été d'apporter de nouvelles fonctionnalités à *Phanie* pour pouvoir y intégrer quelques unes de ces méthodes, les évaluer et développer notre propre algorithme répondant aux objectifs fixés.

## Objectifs

La finalité de la thèse est de développer un outil de visualisation réaliste d'environnements enfumés afin de pouvoir tester l'efficacité de dispositifs de guidage pour les usagers. Cet outil doit utiliser une méthode de calcul s'appuyant sur des concepts et des lois physiques. Le véritable objectif de la thèse est donc de proposer une méthode de calcul réaliste des interactions lumineuses dans des environnements enfumés. La problématique fait apparaître différentes contraintes et exigences dépendantes des lois physiques et du contexte de la simulation physique de l'éclairage. Nous pouvons distinguer quatre points de développement principaux de la thèse :

### L'illumination globale

La scène est composée de sources lumineuses naturelles et/ou artificielles avec des caractéristiques photométriques plus ou moins complexes. Une part non négligeable de l'éclairage est due aux inter-réflexions lumineuses c'est à dire les multiples «rebonds» de la lumière sur les objets avant d'heurter le capteur (l'œil, la caméra. . .) C'est ce qu'on appelle l'éclairage indirect. Afin d'avoir des résultats plus précis, les quantités physiques photométriques sont définies par des spectres ; l'espace de travail colorimétrique *RVB* (pour Rouge, Vert et Bleu) n'étant pas suffisamment étendu pour une simulation physiquement réaliste. Enfin, l'ajout de la fumée intervient dans le calcul de l'illumination globale et complexifie la problématique puisque les interactions de la lumière sont plus nombreuses et diverses.

### Les milieux participatifs

Les milieux participatifs sont des éléments qui absorbent, émettent et/ou diffusent la lumière. La fumée en est un exemple. Celle-ci possède des caractéristiques photométriques qu'il est nécessaire de prendre en compte. Elle est distribuée dans l'espace,

plus ou moins concentrée en certains endroits de l'environnement. Cette distribution évolue dans le temps et nous est donnée par les outils de simulation numérique du Département Sécurité, Structures, Feu (*DSSF*) du *CSTB*. Il faudra donc proposer un rendu prenant en compte cette évolution spatiale et temporelle (les résultats pourront se présenter sous la forme d'un film d'animation par exemple).

### **L'observateur**

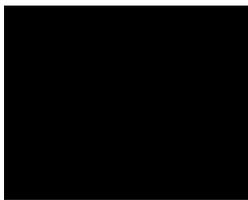
De même que la fumée, l'observateur se déplace dans l'environnement. Le but ici n'étant pas de réaliser une simulation temps réel mais une simulation physiquement réaliste, le déplacement de l'observateur sera donc connu à l'avance.

### **La restitution des résultats**

Il faut pouvoir proposer une restitution réaliste des résultats pour étudier la visibilité. Il peut être nécessaire de prendre en compte le fait que les résultats de la simulation seront présentés sur un écran d'ordinateur ce qui implique des limites colorimétriques par exemple.

Le but premier de ce travail est donc de proposer une méthode de calcul d'illumination globale en présence de fumée permettant de rendre compte de l'évolution de celle-ci dans l'espace et dans le temps ainsi que du déplacement de l'observateur. L'étude de la visibilité implique une simulation physiquement réaliste basée sur le modèle physique formel de l'illumination globale. Quelques simplifications sont nécessaires pour pouvoir résoudre ce problème numériquement. Nous les détaillerons plus tard et nous en montrerons les limites. Ensuite, la méthode doit être « efficace » : le but étant de prendre en compte les aspects dynamiques (déplacement de l'observateur et évolution de la fumée), il faut pour cela que les résultats puissent être calculés dans un temps raisonnable. Enfin, il faut que la méthode soit indépendante de la géométrie de la scène et des objets la composant. Elle doit aussi être indépendante du type de source utilisé. Nous verrons que certaines contraintes ont été mises de côté durant le développement du travail de thèse afin de se concentrer sur des aspects particuliers de la problématique. Enfin, certaines contraintes semblent être contradictoires telles que les aspects de rapidité des calculs et le réalisme physique de la méthode ; d'autres peuvent être de moindre importance ou n'impliquer que quelques développements supplémentaires sans changer les principes de base de la méthode proposée... Ces contraintes pourront faire l'objet de travaux futurs.





---

## Première Partie

### CONSIDÉRATIONS PRÉALABLES ET THÉORIES



# Considérations préalables sur l'organisation du document

L'ORGANISATION DE CE DOCUMENT est la conséquence d'une étude préalable approfondie de la problématique et de ses contraintes. Elle reflète le déroulement du travail de thèse. Dans cette partie, nous décrirons rapidement cette étude, les conclusions qui en ont été tirées et les choix qui en découlent. Nous présenterons aussi dans les chapitres suivants quelques notions théoriques concernant les problématiques soulevées par le sujet.

La simulation d'éclairage dans des environnements enfumés, et l'étude de visibilité qui peut ensuite être faite, est une problématique suffisamment complexe pour pouvoir être abordée sous plusieurs angles. Les interactions entre la lumière et les milieux participatifs, dont la fumée en est un exemple, sont modélisées par un modèle connu sous le nom d'*équation de transfert radiatif* (souvent abrégée en *RTE* pour *Radiance Transfer Equation*). Ce modèle prend en compte les différentes caractéristiques photométriques des milieux participatifs telles que les coefficients d'absorption et de diffusion et la fonction de phase (voir le chapitre 3.1 page 35). Un premier angle d'étude, très orienté physique, aurait été de chercher à mesurer ces caractéristiques photométriques pour les milieux participatifs et plus particulièrement pour les fumées. Peu d'expériences ont été menées dans ce sens. Nous pouvons citer notamment l'article de Roysam *et al.* [RCGB91] qui propose un processus expérimental pour mesurer la fonction de phase d'une particule composante d'une fumée. Plus récemment, le travail de Narasimhan *et al.* [NGD<sup>+</sup>06] présente une technique pour mesurer les propriétés des milieux participatifs liquides tels que le lait, le vin, l'eau avec des impuretés... Un autre angle de recherche est de chercher à résoudre numériquement la *RTE* et de proposer une méthode de rendu la plus efficace possible (en précision et en temps de calcul). Le travail de thèse se déroulant dans le laboratoire d'étude d'éclairage du *CSTB*, c'est ce deuxième angle d'étude qui a donc été choisi. Le Département Sécurité, Structures, Feu (*DSSF*) du *CSTB* fournira les données photométriques du milieu participatif.

La méthode de résolution qui sera choisie ou développée devra être intégrée à l'outil de simulation d'éclairage *Phanie*. Comme nous l'avons dit dans l'introduction, ce logiciel utilise la méthode de *Radiosité*. Cette méthode est difficilement réutilisable dans le cadre de la simulation d'éclairage dans des environnements enfumés<sup>1</sup>. De plus, les études d'éclairage manipulent des scènes aux modèles géométriques de plus en plus complexes pouvant faire intervenir des millions de polygones. La méthode de *Radiosité* devient alors extrêmement coûteuse à utiliser dans de telles situations. Il a donc été décidé d'implémenter dans le logiciel *Phanie* une nouvelle méthode de simulation d'éclairage. L'objectif de cette méthode est de pouvoir manipuler des environnements complexes pour l'étude d'éclairage avec et sans fumée. Deux grands axes de recherche, dépendants

1. Nous pouvons cependant citer ici le travail de Languénoü *et al.* [LBC94] qui développe une méthode d'illumination globale en présence de milieux participatifs quelconques basée sur la technique de *Radiosité*.

l'un de l'autre, ont alors été définis : le premier étant la simulation d'éclairage dans des environnements complexes puis le deuxième est l'extension de cette méthode à la prise en compte des milieux participatifs. Ces deux axes de recherches correspondent à la seconde et à la troisième partie de ce document : page 45 pour le premier et page 77 pour le second.

L'étude bibliographique a été faite en prenant en compte la totalité de la problématique : quelles méthodes peuvent être efficaces pour la simulation d'éclairage dans des environnements pouvant être géométriquement complexes et pouvant être enfumés ? Nous avons aussi relevé que la fumée évoluait dans l'espace et dans le temps. De plus, l'observateur peut éventuellement se déplacer dans la scène multipliant ainsi les points de vue. Ces aspects dynamiques doivent alors être considérés : quelles méthodes peuvent être facilement utilisables dans le cadre d'une simulation animée ? Un troisième axe de recherche apparaît ici concernant les aspects dynamiques. La quatrième partie de ce document page 117 traitera en détail cette problématique.

Pour chacune des parties, les méthodes de simulations existantes pouvant répondre à la problématique initiale seront étudiées et analysées (dans les chapitres *travaux connexes* de chaque partie notamment). En effet, l'étude bibliographique globale a permis de sélectionner certaines méthodes qui nous semblaient les plus intéressantes pour chacune des parties du travail de thèse. Certaines ont été implémentées dans *Phanie* pour pouvoir les analyser plus en détails.

Enfin, la problématique de la restitution des résultats n'a pas été abordée dans ce travail de thèse. Les résultats que nous avons obtenus seront présentés sous la forme d'images « vraies couleurs » . Si ces images peuvent sembler satisfaisantes pour de nombreuses applications de l'informatique graphique, elles peuvent poser quelques problèmes concernant le champs de l'étude d'éclairage. Chaque écran possède sa propre dynamique d'affichage et deux écrans peuvent afficher une même image de manière différente<sup>2</sup>. De plus, il est très difficile de savoir, par exemple, quel est l'éclairage reçu en un point donné de l'image. En simulation d'éclairage, les résultats sont alors souvent présentés sous forme d'images « fausses couleurs » en niveaux d'éclairage ou de luminance. Enfin, le problème psychosensoriel de la perception des couleurs différentes pour chaque individu entre aussi en jeu.

Les deux chapitres suivants traitent des concepts théoriques concernant la problématique de l'illumination globale et les milieux participatifs. Il s'agit en partie de l'étude préalable au travail de développement de nouvelles méthodes de résolution. Quelques méthodes existantes, manipulant ces concepts théoriques, seront aussi présentées.

---

2. Ce problème de calibration d'écran peut aussi être important dans des champs d'utilisation artistiques explorés par l'informatique graphique. Elle revêt cependant un caractère primordial dans le cas de la simulation d'éclairage où une grande précision dans les calculs et dans la restitution des résultats est demandée.

# Illumination globale

LA SIMULATION D'ÉCLAIRAGE physiquement réaliste nécessite de simuler, à l'aide d'un algorithme performant, l'ensemble des interactions lumineuses complexes intervenant dans une scène. La lumière émise par une source naturelle ou artificielle peut être réfléchiée une fois (éclairage direct) ou bien une multitude de fois (éclairage indirect) dans la scène. C'est ce que nous appelons la problématique de l'illumination globale. Le cœur du travail de thèse est de proposer un algorithme permettant de résoudre cette problématique. Dans ce chapitre, nous présenterons quelques notions théoriques nécessaires à la compréhension de la problématique de l'illumination globale ainsi que quelques solutions existantes. Dans un premier temps, nous mettons de côté les interactions de la lumière avec des milieux participatifs. Ces aspects de la problématique de l'illumination globale seront abordés dans le chapitre 3.1.

## 2.1 Problème d'Illumination Globale

La compréhension de la nature de la lumière et la façon dont celle-ci interagit dans l'environnement est nécessaire pour pouvoir simuler correctement l'illumination globale. Nous nous proposons ici de décrire succinctement certaines grandeurs physiques utiles à la définition de la problématique. Nous décrivons aussi la formulation mathématique du problème d'illumination globale.

### 2.1.1 Grandeurs physiques

Les différentes grandeurs physiques permettant de caractériser la lumière sont données par la *radiométrie* c'est à dire la science qui étudie les radiations électromagnétiques telles que la lumière visible. Nous décrivons ici rapidement les quatre grandeurs principalement utilisées : le flux, l'intensité, l'éclairement et la luminance. De nombreux ouvrages traitent plus en détail des grandeurs physiques caractérisant la lumière. Nous pouvons notamment citer Cohen *et al.* [CWH93] pour une introduction sur la radiométrie à l'usage de l'informatique graphique. La *photométrie* est elle aussi très utilisée pour décrire la lumière. Elle prend en compte la perception de la lumière par l'homme et intègre donc la réponse visuelle d'un observateur standard mesurée par la courbe  $V(\lambda)$  où  $\lambda$  est une longueur d'onde donnée.

**Le flux** noté  $\phi$ , mesuré en Watts ( $W$ ), est la quantité totale d'énergie (notée  $Q$ ) reçue ou émise par une surface et par unité de temps :

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.1)$$

En photométrie, on parle de flux lumineux  $\phi_v$  et son unité est le lumen (noté  $lm$ ) :

$$\phi_v = \int_{\Lambda} \phi(\lambda)V(\lambda)d\lambda \quad (2.2)$$

où  $\Lambda$  représente l'ensemble des longueurs d'onde du spectre visible (typiquement entre 380 et 780  $nm$ ).

L'intensité notée  $I$ , est le flux émis par unité d'angle solide,  $\vec{\omega}$ . Son unité est le Watt par stéradian ( $W.str^{-1}$ ).

$$I = \frac{d\Phi}{d\vec{\omega}} \quad (2.3)$$

En photométrie, on parle d'intensité lumineuse et son unité est le candela notée  $cd$ .

L'éclairement souvent noté  $E$ , est le flux incident par unité d'aire et son unité est le  $W.m^{-2}$ .

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (2.4)$$

L'éclairement décrit la densité spatiale d'une radiation incidente en une surface donnée. On peut aussi noter l'existence d'une notation pour une radiation émise en une surface donnée : on parle alors d'exittance ou de radiosité (que l'on note souvent  $B$ ). En photométrie, l'unité de l'éclairement est le lux noté  $lx$ .

La luminance notée  $L$  est le flux quittant une surface par unité de surface projetée et par unité d'angle solide. Son unité est le  $W.m^{-2}.sr^{-1}$  (et  $cd.m^{-2}$  en photométrie).

$$L(x, \vec{\omega}) = \frac{d\Phi}{\cos\theta dA d\vec{\omega}} \quad (2.5)$$

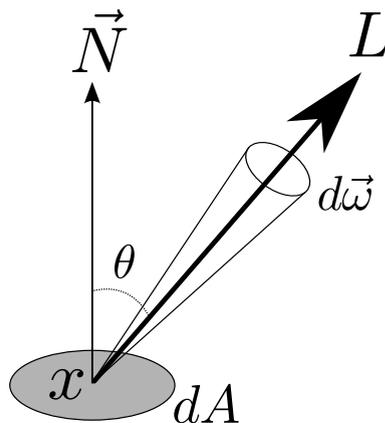


FIGURE 2.1 – La luminance  $L$  exprime le flux quittant une surface par unité de surface projetée,  $dA$ , et par unité d'angle solide,  $d\vec{\omega}$

Certaines relations existent entre ces différentes grandeurs. Nous pouvons noter particulièrement le fait que l'éclairement peut être exprimé en fonction de la luminance :

$$E = \int_{\Omega} L(x, \vec{\omega}) \cos\theta d\vec{\omega} \quad (2.6)$$

où  $\Omega$  est l'hémisphère centré autour de la normale à la surface en  $x$ .

### 2.1.2 L'équation de rendu

Introduite en informatique graphique en 1986 par Kajiya [Kaj86] l'équation de rendu établie les conditions nécessaires de l'équilibre du transport de la lumière dans une scène (sans les milieux participatifs). Elle formalise ainsi la luminance sortante en toute surface de la scène considérée. La luminance quittant une surface  $L_s$  est la somme de la luminance émise  $L_e$  dans une direction  $\vec{\omega}_r$  par la surface en un point  $x$  et de la luminance réfléchiée en ce même point par la surface  $L_r$ .  $L_s$  est alors donnée par l'équation :

$$L_s(x, \vec{\omega}_r) = L_e(x, \vec{\omega}_r) + L_r(x, \vec{\omega}_r) \quad (2.7)$$

La luminance émise par la surface  $L_e$  est facile à calculer puisqu'il s'agit d'une donnée d'entrée du modèle numérique. La luminance réfléchiée  $L_r$  est quant à elle classiquement définie à l'aide de l'équation :

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = \int_{\Omega} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) L_i(x, \vec{\omega}_i) \cos\theta_i d\vec{\omega}_i \quad (2.8)$$

où  $\Omega$  est l'hémisphère centré autour de la normale à la surface en  $x$ ,  $\vec{\omega}_i$  est une direction incidente de la lumière,  $\theta_i$  l'angle formé entre la normale à la surface en  $x$  et  $\vec{\omega}_i$  et  $f_r$  est la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle que l'on dénomme *BRDF* (pour *Bidirectional Reflectance Distribution Function* en anglais). Cette fonction modélise la manière dont la lumière est réfléchiée par une surface. La BRDF  $f_r$  définit la relation entre la luminance réfléchiée  $L_r$  et l'éclairement  $E_i$  au point  $x$  :

$$f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = \frac{dL_r(x, \vec{\omega}_r)}{dE_i(x, \vec{\omega}_i)} = \frac{dL_r(x, \vec{\omega}_r)}{L_i(x, \vec{\omega}_i) \cos\theta_i d\vec{\omega}_i} \quad (2.9)$$

Une propriété importante des BRDFs est la loi de **réciprocité** de *Helmholtz*. La fonction est indépendante du sens de propagation de la lumière :

$$f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = f_r(x, \vec{\omega}_r, \vec{\omega}_i) \quad (2.10)$$

Enfin, la conservation de l'énergie est une autre caractéristique physique fondamentale des BRDFs. Une surface ne peut pas réfléchir plus de lumière qu'elle n'en reçoit. La BRDF doit donc satisfaire l'équation suivante :

$$\int_{\Omega} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) \cos\theta_i d\vec{\omega}_i \leq 1 \quad \forall \vec{\omega}_r \quad (2.11)$$

Une BRDF vérifiant la loi de Helmholtz et celle de la conservation de l'énergie est dite physiquement plausible. La BRDF est un outil largement utilisé en informatique graphique. De nombreux modèles ont été développés pour pouvoir décrire différents types de matériaux. L'étude de ces différents modèles a fait l'objet de nombreux travaux que nous ne détaillerons pas dans ce documents. Nous pouvons cependant citer la thèse de Nicolas Noé [Noe99] à laquelle nous renvoyons le lecteur ainsi que les travaux de Kurt et Edwards [KE09] pour un rapide état de l'art.

Pour finir, l'équation de rendu peut donc être développée en y intégrant l'équation 2.8 :

$$L_s(x, \vec{\omega}_r) = L_e(x, \vec{\omega}_r) + \int_{\Omega} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) L_i(x, \vec{\omega}_i) \cos\theta_i d\vec{\omega}_i \quad (2.12)$$

C'est souvent sous cette formulation que l'équation de rendu est présentée dans les algorithmes basés lancer de rayon que nous allons décrire dans le paragraphe suivant.

## 2.2 Quelques méthodes basées lancer de rayon

De nombreuses méthodes ont été développées afin de résoudre le problème de l'illumination globale. Nous pouvons citer par exemple la méthode de *Radiosité* (technique de rendu par éléments finis) utilisée jusqu'à présent dans le logiciel de photo-simulation *Phanie*. D'autres algorithmes, utilisant des méthodes probabilistes telle que l'intégration de Monte Carlo, ont été développés et font partie des méthodes les plus utilisées aujourd'hui. Nous nous intéresserons principalement à ces méthodes. Après avoir abordé quelques notions théoriques nécessaires à la compréhension de celles-ci, nous décrirons certaines d'entre elles.

### 2.2.1 Introduction aux méthodes de Monte Carlo

L'objectif d'un algorithme d'illumination globale est de résoudre l'équation de rendu (2.12). L'idée de base de l'intégration de Monte Carlo est d'évaluer l'intégrale

$$I = \int_{\Omega} f(x) d(x) \quad (2.13)$$

à l'aide d'un échantillonnage aléatoire. Pour cela, on considère  $N$  échantillons choisis aléatoirement selon une certaine fonction de densité  $p(x)$ . Le résultat de l'estimation est :

$$\langle I \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(x_i)}{p(x_i)} \quad (2.14)$$

avec  $p(x_i) \geq 0$  et  $\int_{-\infty}^{\infty} p(x) d(x) = 1$ . Si on utilise l'intégration de Monte Carlo pour estimer la luminance réfléchie  $L_r$  de l'équation 2.8, soit la deuxième partie de l'équation de rendu 2.12, et que l'on échantillonne les directions incidentes au point  $x$ , on obtient :

$$\langle L_r(x, \vec{\omega}) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f_r(x, \vec{\omega}'_i, \vec{\omega}) L_i(x, \vec{\omega}'_i) (\vec{\omega}'_i \cdot \vec{n})}{p(\vec{\omega}'_i)} \quad (2.15)$$

Un des défauts de l'intégration de Monte Carlo est qu'elle génère des images bruitées dues à la variance. Avant de décrire certaines des méthodes qui utilisent l'intégration de Monte Carlo en informatique graphique, nous allons voir quelques points théoriques pour pouvoir diminuer cette variance. Pour plus de détails sur d'autres méthodes qui ne seront pas décrites plus loin, nous pouvons mentionner l'état de l'art de Szirmay-Kalos [SK98] sur les méthodes d'illumination globale stochastiques.

### 2.2.2 Diminution de la variance

La valeur attendue (*expected value*) pour une variable aléatoire  $Y = f(x)$  est donnée par

$$E[Y] = \int_{\Omega} f(x) p(x) dx \quad (2.16)$$

et la variance par

$$V[Y] = E[(Y - E[Y])^2] = E[Y^2] - E[Y]^2. \quad (2.17)$$

Si on l'applique à l'intégration de Monte Carlo, on vérifie bien que l'estimation  $I$  de l'équation 2.14 donne le résultat correct :

$$\begin{aligned}
 E[\langle I \rangle] &= E \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(x_i)}{p(x_i)} \right] \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_{\Omega} \frac{f(x_i)}{p(x_i)} p(x_i) dx_i \\
 &= \frac{1}{N} N \int_{\Omega} \frac{f(x_i)}{p(x_i)} p(x_i) dx_i \\
 &= \int_{\Omega} f(x_i) dx_i = I.
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

On peut aussi calculer sa variance (pour plus de détails voir par exemple la thèse de Veach [Vea98]) :

$$\begin{aligned}
 V[\langle I \rangle] &= E[\langle I \rangle^2] - E[\langle I \rangle]^2 \\
 &= \frac{1}{N} \int_{\Omega} \frac{f^2(x)}{p(x)} dx - I^2
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

L'erreur de l'estimation est donnée par

$$\sigma[Y] = \sqrt{V[Y]}. \tag{2.20}$$

Ainsi, l'erreur de l'estimation de Monte Carlo est proportionnelle à  $1/\sqrt{N}$ . Ceci signifie que pour diviser la variance par deux, il faut échantillonner quatre fois plus. Ce sur-échantillonnage est la technique de réduction de la variance la plus intuitive. Elle n'est cependant pas très efficace et pour des algorithmes d'illumination globale les temps de calcul quadrupleront pour diviser le bruit par deux seulement. Il existe plusieurs autres façons de réduire la variance. La première consiste à choisir plus d'échantillons dans les parties importantes de la fonction ; c'est ce qu'on appelle l'échantillonnage par importance (*importance sampling*). La fonction de densité de probabilité  $p$  doit être proportionnelle à la fonction  $f(x)$  à estimer. Une autre technique de réduction de la variance est de partitionner le domaine d'intégration en plusieurs sous-régions et de considérer l'intégrale comme la somme des intégrales de ces sous-régions. Cette technique est connue sous le nom d'échantillonnage stratifié (*stratified sampling*).

### Échantillonnage par importance

L'échantillonnage par importance part de l'idée qu'il faut concentrer les échantillons dans les parties importantes de la fonction. Pour cela, il faut construire une fonction de densité de probabilités  $p(x)$  qui a la même « forme » que la fonction  $f(x)$  à calculer. En choisissant une variable stochastique  $X$  avec  $p(x)$ ,  $x \in [a, b]$  tel que  $p(x) > 0$  lorsque  $f(x) \neq 0$ , on obtient l'estimation  $I$  suivante :

$$I = \int_a^b \frac{f(x)}{p(x)} p(x) dx = E \left[ \frac{f(X)}{p(X)} \right]. \tag{2.21}$$

On peut donc construire des échantillons aléatoires à partir de  $X$ . Ainsi, plus  $X$  aura une forte densité de probabilité, plus il y aura d'échantillons construits dans cet espace.

On obtient l'estimation  $I_{ip}$

$$I_{ip} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(\varepsilon_i)}{p(\varepsilon_i)}. \quad (2.22)$$

où  $\varepsilon_i$  sont des échantillons aléatoires construits à partir de  $X$ . La fonction de densité optimale  $p_{optimum}(x)$ , qui permet d'avoir une variance égale à zéro, est

$$p_{optimum}(x) = \frac{f(x)}{I}. \quad (2.23)$$

Malheureusement, on ne connaît pas  $I$  puisque c'est la quantité que l'on essaye de calculer. Cependant, en choisissant une bonne fonction de densité de probabilité, on peut diminuer la variance tout en limitant le nombre d'échantillons.

### Échantillonnage stratifié

Ici, l'idée est de partitionner le domaine d'intégration  $\Omega$  en plusieurs sous-domaines  $\Omega_i$  qui ne se recoupent pas

$$\bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega. \quad (2.24)$$

Sur chaque sous-domaine  $\Omega_i$ , on obtient l'intégrale

$$I_i = \int_{\Omega_i} f(x) dx \quad (2.25)$$

que l'on peut estimer par

$$\langle I_i \rangle = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} \frac{f(x_i)}{p_i(x_i)} \quad (2.26)$$

avec  $N_i$  le nombre d'échantillons aléatoires dans le sous-domaine  $\Omega_i$  et  $p_i$  la fonction de densité associée à  $\Omega_i$ . Sur le domaine  $\Omega$  on obtient alors l'estimateur :

$$\langle I \rangle = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{v_i}{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \frac{f(x_j)}{p(x_j)} \quad (2.27)$$

où  $N_i$  est le nombre de sous-domaines,  $N_j$  le nombre d'échantillons dans le sous-domaine  $i$  et  $v_i = \int_{\Omega_i} (f(x)/p(x)) p(x) dx$ . En utilisant cette technique, on ne peut pas augmenter la variance. La variance est même proportionnelle à  $1/N^2$  ce qui est mieux que le simple échantillonnage aléatoire (voir la thèse de Veach [Vea98]).

### 2.2.3 Le tracé de chemins mono et bidirectionnel

La première technique de simulation d'éclairage à avoir utilisé la méthode de Monte Carlo est le tracé de chemins (ou *Path Tracing* en anglais) proposée par Kajiya en 1986 [Kaj86] en tant que solution à l'équation de rendu 2.12 présentée dans le même article. L'idée de base de l'algorithme est que l'on peut échantillonner aléatoirement tous les chemins de lumière. Le tracé de chemins est une extension du lancer de rayons afin de pouvoir prendre en compte des problèmes nécessitant d'évaluer une intégrale (sources surfaciques, éclairage indirect dû aux matériaux diffus...) Les rayons sont lancés à partir de l'observateur au travers d'un pixel de l'image. Si le rayon intersecte une surface,

un rayon secondaire est lancé dans une direction choisie aléatoirement. La distribution de lumière dans l'image finale est donc estimée en tirant aléatoirement plusieurs chemins de lumière dans l'espace des chemins possibles. Le défaut principal du tracé de chemins est la variance qui apparaît dans l'image sous forme de bruit. Plus l'on utilise de chemins par pixel, moins la variance sera importante mais plus les temps de calcul seront longs (voir la figure 2.2). Cependant, il sera quasiment impossible de supprimer complètement le bruit généré par l'algorithme. Une image convenable est souvent obtenue après des temps de calcul très longs. Ceci est principalement dû aux limitations de l'intégration de Monte Carlo. Nous avons déjà présenté quelques unes des techniques permettant de diminuer cette variance et ainsi d'améliorer les résultats (voir partie 2.2.2).



FIGURE 2.2 – Réduction de la variance en sur-échantillonnant avec la méthode de tracé de chemins monodirectionnel : plus il y a d'échantillons, moins il y a de bruit mais plus les temps de calcul sont longs.

L'algorithme du tracé de chemins bidirectionnel (*Bidirectional Path Tracing*) fut présenté par Lafortune et Willems en 1993 [LW93] et indépendamment en 1994 par Veach et Guibas [VG94]. Il s'agit d'une extension du tracé de chemins de Kajiya. Les chemins sont générés à l'aide de deux sous-chemins qui partent en même temps de l'observateur et de la source lumineuse (figure 2.3).

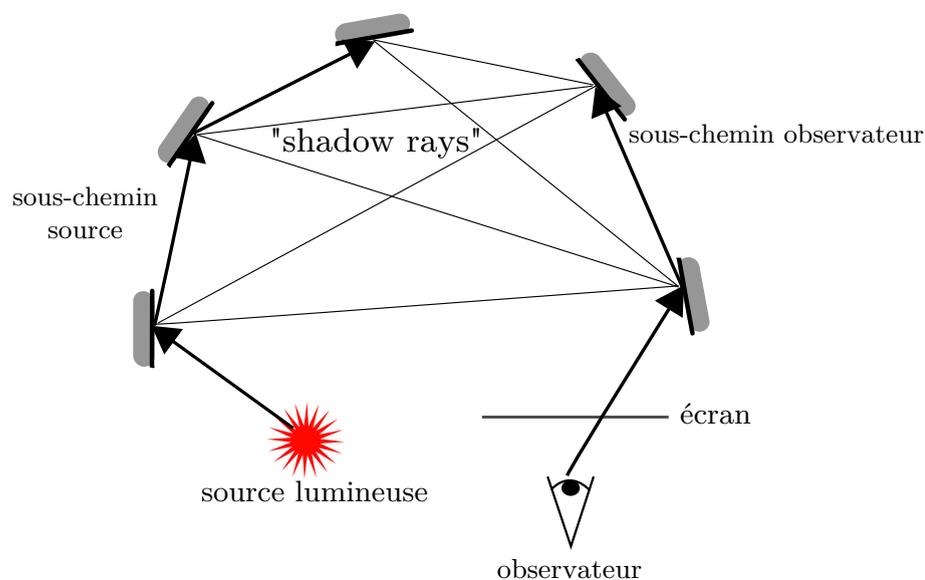


FIGURE 2.3 – Le principe du tracé de chemins bidirectionnel : les chemins sont générés depuis la source de lumière et depuis l'observateur.

Toutes les intersections avec les surfaces des deux sous-chemins sont interconnectées entre elles : ce sont les *shadow rays*. Leur contribution est ajoutée au pixel en cours de calcul. Même si le tracé de chemins bidirectionnel peut améliorer la qualité des résultats par rapport au tracé de chemin mono-directionnel (voir la figure 2.4 comparant la gestion de la variance entre un tracé de chemin mono-directionnel et un tracé de chemin bidirectionnel pour un cas avantageux pour ce dernier) les temps de calcul restent toutefois très long. De plus, dans certains cas, le gain en nombre de chemins par rapport au tracé de chemins mono-directionnel peut être minimisé par le fait que les chemins sont plus difficiles à calculer en tracé de chemins bidirectionnel. Le tracé de chemins mono-directionnel peut alors être plus rapide. Nous pouvons aussi mentionner l'algorithme du *Metropolis Light Transport* proposé par Veach et Guibas dans [VG94] et [VG97] qui est une extension du tracé de chemins mono et bidirectionnel. Le but est de concentrer le nombre de chemins dans les régions importantes de la scène et ainsi minimiser la variance. Pour ce faire, l'algorithme du *Metropolis Light Transport* commence par un premier échantillonnage aléatoire, à l'aide d'un tracé de chemins mono ou bidirectionnel, de l'espace des chemins de lumière. Ces chemins sont ensuite « mutés ». La stratégie est d'échantillonner les chemins proportionnellement à la fonction à évaluer.

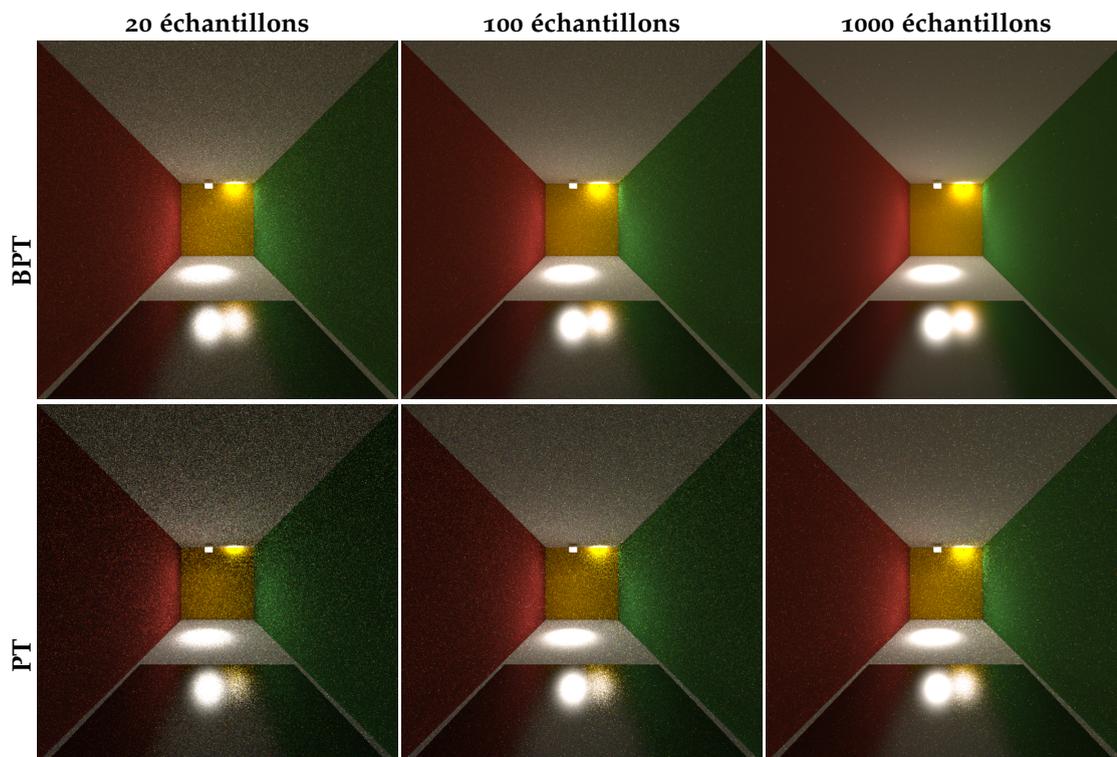


FIGURE 2.4 – La méthode du tracé de chemins bidirectionnel (BPT) peut être plus avantageuse que la méthode du tracé de chemins mono-directionnel (PT). Ici, les 2 sources sont très directionnelles et celle de droite éclaire le mur du fond (éclairage indirect). Les calculs de la seconde colonne sont 6 fois plus lents que ceux de la première colonne (pour une même méthode) et ceux de la troisième colonne 60 fois plus lents.

#### 2.2.4 Le lancer de photons

Le *lancer de photons* (ou *carte de photons*) est une technique d'illumination globale proposée par Jensen [Jen96] permettant de simuler de nombreux effets lumineux et notamment les caustiques qui sont particulièrement difficiles à restituer avec des méthodes de tracé de chemins classiques (voir la figure 2.5). Le livre *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping* [Jen01] propose une présentation complète et détaillée de l'algorithme avec un guide d'implémentation. Nous invitons le lecteur à le consulter pour des détails complets sur la méthode.

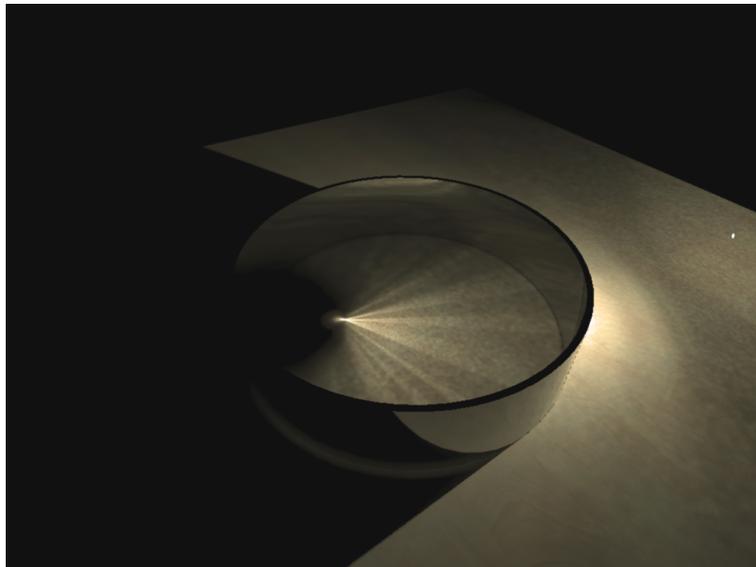


FIGURE 2.5 – La méthode du *Photon Mapping* permet de simuler de nombreux effets et notamment les caustiques qui sont très difficiles à obtenir avec une méthode de tracé de chemins classique. Ici, l'anneau réfléchissant concentre la lumière d'une source surfacique très petite sur la surface diffuse.

Le lancer de photons est un algorithme en deux passes. La première passe consiste à lancer les photons depuis les sources puis, pour chaque « rebond » sur une surface d'un objet de la scène, des informations concernant le photon sont stockées dans la carte de photons. Les informations stockées sont la direction incidente, la position et le flux incident. La carte de photons est ensuite utilisée pour le rendu dans la seconde passe. L'image finale est obtenue à l'aide d'une estimation de densité de photons sur la surface visible depuis l'observateur.

**Première passe : le lancer de photons** Un grand nombre de photons est lancé, à la manière d'un tracé de chemins, dans la scène depuis les sources. Chaque photon propage une décomposition du flux de la source de départ. Chaque fois qu'un photon intersecte une surface, les informations nécessaires sont stockées et une roulette russe détermine si le chemin continue ou non. La nouvelle direction du photon dépend de la BRDF du matériau. Deux cartes de photons sont en fait utilisées dans l'algorithme de base : une carte de photons pour les caustiques et une carte de photons globale. La carte de photons pour les caustiques contient tous les photons qui ont été réfléchis ou réfractés par une surface spéculaire avant d'heurter une surface diffuse. La carte de photons globale contient quant à elle tous les photons ayant heurté une surface diffuse. La structure utilisée pour stocker les photons est un *kd-tree* équilibré (*balanced kd-tree*) afin de faciliter

la localisation des photons lors de la phase de rendu.

**Seconde passe : le rendu** Une fois tous les photons émis et stockés dans les cartes de photons, l'éclairage indirect en un point  $p$  est calculé à l'aide d'une estimation de densité des photons autour de  $p$ . Cependant, une visualisation directe de la carte de photons pour le calcul de l'éclairage indirect donne souvent des résultats bruités puisque le nombre de photons autour d'un point  $p$  est souvent insuffisant. Pour palier à ce problème, la seconde passe de l'algorithme utilise souvent une méthode appelée *final gathering*. Cette étape consiste à calculer la luminance sortante  $L_r(p, \vec{\omega}_r)$  pour chaque point visible  $p$  à l'aide d'un échantillonnage de Monte Carlo. L'estimation de densité de photons intervient au cours de cet échantillonnage pour estimer la luminance incidente  $L_i(p, \vec{\omega}_i)$  au point  $p$  (voir l'équation 2.8 page 25). La figure 2.6 montre une comparaison entre un rendu direct de la carte de photons et un rendu réalisé avec une passe de *final gathering*. Même si cette étape permet d'obtenir des image de très grande qualité, elle reste toutefois très coûteuse.

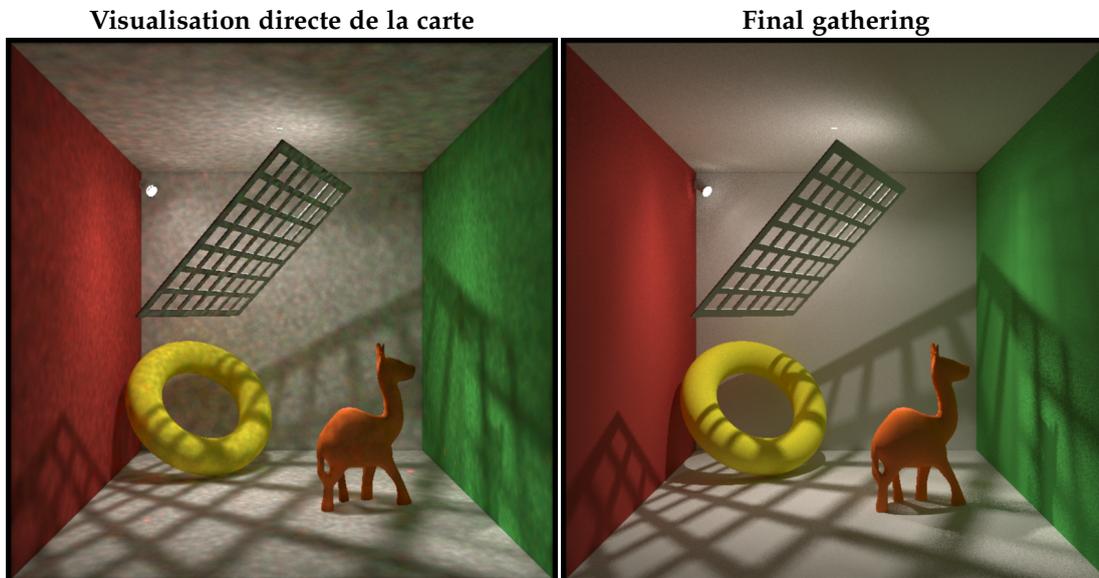


FIGURE 2.6 – Comparaison entre un rendu obtenu avec une visualisation directe de la carte de photons et un rendu obtenu avec *final gathering*.

De nombreuses approches ont été proposées afin d'accélérer cette phase de rendu. Nous pouvons citer les travaux de Hachisuka *et al.* [HOJ08]. Les auteurs présentent dans cet article une méthode multi-passes qu'ils nomment *Progressive Photon Mapping*. Puisqu'un très grand nombre de photons est nécessaire pour pouvoir réaliser une image de bonne qualité, le coût mémoire ainsi que les temps de calcul peuvent devenir élevés. Plusieurs phases d'émission de photons sont réalisées successivement. Entre deux phases d'émission, la carte peut être visualisée. Les luminances sur les surfaces vues depuis l'observateur (c'est-à-dire où l'estimation de densité a été faite), sont stockées. Si le résultat n'est pas suffisamment précis, la carte de photon actuelle peut être supprimée et de nouveaux photons sont émis pour raffiner le résultat. La phase de *final gathering* n'est alors plus nécessaire. Une autre technique, très utilisée pour accélérer la phase de *final gathering*, est la méthode de cache d'éclairage.

### 2.2.5 Le cache d'éclairement

C'est en 1988 que Ward *et al.* présentent la méthode de cache d'éclairement (*Irradiance Caching*) [WRC88]. Ils partent du constat que l'éclairement indirect varie très peu sur une même surface. L'éclairement ne devrait donc pas être calculé pour chaque pixel de l'image mais seulement pour quelques points de la surface. L'éclairement indirect est donc calculé sur un faible nombre de points dans la scène, que l'on nomme enregistrements, pour lesquels une zone d'influence est affectée dans laquelle l'éclairement peut ensuite être interpolé. Les enregistrements sont stockés dans le *cache d'éclairement*. L'éclairement sur les autres points visibles, englobés par des enregistrements (c'est-à-dire à l'intérieur de la zone d'influence d'un ou plusieurs enregistrements), est évalué en interpolant les valeurs de ces mêmes enregistrements. Cette méthode offre de nombreux avantages. Étant dépendante du point de vue, elle ne nécessite pas de calculer l'ensemble des interactions lumineuses d'une scène avant de générer l'image résultat (contrairement à la radiosité). L'éclairement ne doit être calculé que pour un nombre restreint de points visibles dans la scène ce qui permet d'accélérer considérablement les temps de calcul. Au vu de ces différentes qualités, nous avons choisi de ré-exploiter la méthode de cache d'éclairement pour le développement de notre nouvelle méthode de résolution de la problématique de l'illumination globale. Il faut cependant s'interroger sur la possibilité d'utiliser cette méthode dans le cas d'une simulation dans des environnements enfumés. Nous détaillerons cette méthode de cache d'éclairement dans la partie 1.1 page 47.



# 3 Milieux participatifs : quelques points théoriques

LA SIMULATION D'ÉCLAIRAGE prenant en compte les interactions lumineuses avec des milieux participatifs reste un domaine de l'informatique graphique encore très étudié. Le rendu numérique physiquement réaliste avec de tels milieux (de la fumée, de l'eau ou du feu par exemple) est extrêmement coûteux en temps de calcul puisqu'il consiste à résoudre une équation décrite sous la forme d'une triple intégrale. Nous verrons dans ce chapitre les théories sous-jacentes à la problématique de l'illumination globale en présence de milieux participatifs ainsi que quelques-unes des solutions existantes les plus simples pour répondre à cette problématique.

## 3.1 Milieux participatifs et le transport de la lumière

### 3.1.1 Présentation et définitions

Les milieux participatifs peuvent être considérés comme une distribution de particules dans une région donnée de l'espace 3D avec lesquelles la lumière interagit. Nous pouvons citer les nuages, l'atmosphère, l'eau, le lait, la fumée... Les matériaux transparents, tels que le marbre, la peau, certains plastiques sont une autre classe de milieux participatifs. Si, dans le cadre de nos travaux, nous ne nous intéresserons principalement qu'à la fumée, la simulation d'éclairage de l'ensemble des milieux participatifs nécessite de résoudre les mêmes problématiques modélisées par les mêmes équations. Les milieux participatifs possèdent des caractéristiques photométriques particulières qu'il faut considérer pour simuler des environnements complets. Nous avons dit qu'un milieu participatif est en fait un matériau dans lequel la lumière se propage et interagit avec la matière. La figure 3.1 décrit les différentes interactions lumineuses<sup>1</sup> typiquement considérées. Ces principales interactions sont l'absorption, l'émission et la diffusion.

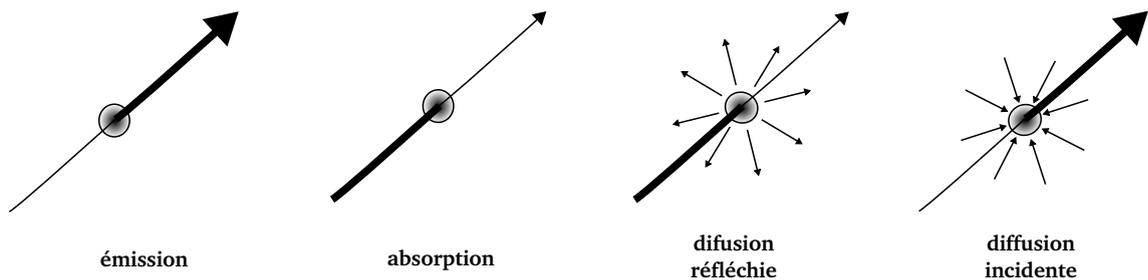


FIGURE 3.1 – Les différentes interactions entre la lumière et le milieu participatif affectent la propagation de la lumière.

1. Voir aussi le chapitre 1 du livre de Engel *et al.* [EHK<sup>+</sup>06] ou encore l'état de l'art sur les méthodes de rendu des milieux participatifs de Cerezo [CPCP<sup>+</sup>05].

**L'émission.** La matière du milieu émet de la lumière. Elle se comporte comme une source (par exemple le feu). La chaleur est transformée en flux lumineux ajoutant ainsi de l'énergie dans la direction de propagation de la lumière.

**L'absorption.** Effet inverse de l'émission de lumière. Le flux lumineux est transformé en chaleur. Dans ce cas, il y a une réduction du flux lumineux et donc une diminution de l'énergie dans la direction de propagation de la lumière.

**La diffusion.** Lorsque la lumière interagit avec le milieu, celle-ci peut être diffusée, c'est-à-dire qu'il se produit un changement de direction de la propagation de la lumière. Si, lors de la diffusion, il y a un changement de longueur d'onde, on parle de diffusion élastique (*elastic scattering*) de la lumière. Deux types de diffusion peuvent être considérées : la diffusion incidente (*in-scattering*) qui ajoute de l'énergie dans la direction considérée de propagation de la lumière et la diffusion réfléchie (*out-scattering*) qui enlève de l'énergie.

### 3.1.2 L'équation de transfert radiatif

L'ensemble des interactions lumineuses agissant dans un milieu participatif sont modélisées à l'aide de l'équation de transfert radiatif [Cha60], que nous appellerons dans la suite du texte *RTE* (pour *Radiative Transfer Equation*). Cette équation décrivant le changement de luminance  $L$  en un point  $x$  du milieu pour une direction  $\vec{\omega}$  est donnée sous la forme :

$$\begin{aligned} \frac{dL(x, \vec{\omega})}{dx} &= \alpha(x)L_e(x, \vec{\omega}) \\ &+ \sigma(x)L_i(x, \vec{\omega}) \\ &- (\sigma(x) + \alpha(x))L(x, \vec{\omega}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Cette équation introduit certaines des données photométriques caractérisant un milieu participatif ainsi que quelques notations que nous utiliserons par la suite. Ces premières données sont :

- $L_e(x, \vec{\omega})$ , la **luminance émise** par le milieu en  $x$  et dans la direction  $\vec{\omega}$
- $L_i(x, \vec{\omega})$ , la **luminance due à la diffusion incidente** au point  $x$
- $\alpha(x)$ , le **coefficient d'absorption** du milieu au point  $x$
- $\sigma(x)$ , le **coefficient de diffusion** du milieu au point  $x$
- $\kappa(x) = \alpha(x) + \sigma(x)$ , le **coefficient d'extinction** du milieu au point  $x$ .

Si ces trois derniers coefficients sont constants à travers le milieu, on dit que celui-ci est homogène (ou uniforme). Dans le cas contraire, on parle de milieu hétérogène. La luminance  $L_i$  due à la diffusion incidente dépend de la luminance provenant de toutes les directions  $\vec{\omega}'$  sur la sphère  $\Omega$  autour de  $x$  :

$$L_i(x, \vec{\omega}) = \int_{\Omega} \rho(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) L(x, \vec{\omega}') d\vec{\omega}'. \quad (3.2)$$

Ici,  $\rho(x, \vec{\omega}', \vec{\omega})$  définit la fonction de phase du milieu<sup>2</sup> au point  $x$ . En insérant l'équation 3.2 de  $L_i$  dans l'équation 3.1, on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{dL(x, \vec{\omega})}{dx} &= \alpha(x)L_e(x, \vec{\omega}) \\ &+ \sigma(x) \int_{\Omega} \rho(x, \vec{\omega}', \vec{\omega})L(x, \vec{\omega}')d\vec{\omega}' \\ &- \kappa(x)L(x, \vec{\omega}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Il est cependant plus facile et plus courant de travailler avec la forme intégrée de la RTE. Afin de pouvoir déterminer la luminance  $L$  en un point  $x$  (la position de l'observateur par exemple) dans une direction  $\vec{\omega}$ , on intègre les deux côtés de l'équation 3.3 le long d'un chemin rectiligne entre  $x_e$  le point d'entrée du rayon  $\vec{\omega}$  dans le milieu et  $x_s$  le point de sortie (voir la figure 3.2) :

$$\begin{aligned} L(x, \vec{\omega}) &= \int_{x_e}^{x_s} \tau(x_e, x')\alpha(x')L_e(x', \vec{\omega})dx' \\ &+ \int_{x_e}^{x_s} \tau(x_e, x')\sigma(x') \int_{\Omega} \rho(x', \vec{\omega}', \vec{\omega})L(x', \vec{\omega}')d\vec{\omega}'dx' \\ &+ \tau(x_e, x_s)L(x_0, \vec{\omega}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

où  $x_0$  est le point sur la surface la plus proche (si  $x_0$  est dans le milieu alors  $x_0$  et  $x_s$  sont confondus) et  $\tau(x_e, x') = e^{-\beta}$  est la *transmittance* entre  $x'$  et  $x_e$ .  $\beta$  est la **profondeur** ou **épaisseur optique** (*optical thickness* ou *depth*) qui est une interprétation physique permettant de connaître la longueur du trajet de la lumière dans le milieu avant de subir une diffusion. Plus sa valeur sera élevée, plus le milieu sera opaque.

$$\beta = \int_{x'}^x \kappa(\xi)d\xi. \quad (3.5)$$

Afin d'accélérer les calculs, certaines méthodes de rendu ne prennent pas en compte tous les effets lumineux décrits par l'équation 3.4 (voir l'état de l'art de Cerezo *et al.* [CPCP<sup>+</sup>05]). En effet, la luminance incidente  $L_i$  peut être considérée comme la somme de deux composantes :

$$L_i(x, \vec{\omega}) = L_s(x, \vec{\omega}) + L_m(x, \vec{\omega}) \quad (3.6)$$

où  $L_s$  est la diffusion simple (*single scattering*) et  $L_m$  la diffusion multiple (*multiple scattering*). Ces deux composantes sont représentées dans la figure 3.2. La diffusion simple correspond à la lumière qui n'a subi qu'un seul événement de diffusion dans le milieu durant son parcours entre une source (ou la surface d'un objet) et l'observateur. La diffusion multiple correspond quant à elle à la lumière incidente au point  $x$  qui a subi plusieurs événements de diffusion dans le milieu. La diffusion multiple étant la composante la plus difficile et la plus longue à calculer, certaines méthodes omettent ce terme. Dans le cadre de la simulation d'éclairage, il est nécessaire de pouvoir proposer une méthode prenant en compte l'ensemble des effets lumineux intervenant dans les milieux participatifs. Il est donc primordial d'y intégrer la diffusion multiple.

<sup>2</sup> La fonction de phase d'un milieu participatif peut être vue comme l'équivalent de la BRDF sur une surface. Elle décrit la distribution lumineuse inscrite dans la sphère  $\Omega$  autour de  $x$  en fonction de la direction incidente. Tout comme la BRDF, plusieurs modèles de fonction de phase existent (voir par exemple le livre de Engel *et al.* [EHK<sup>+</sup>06]).

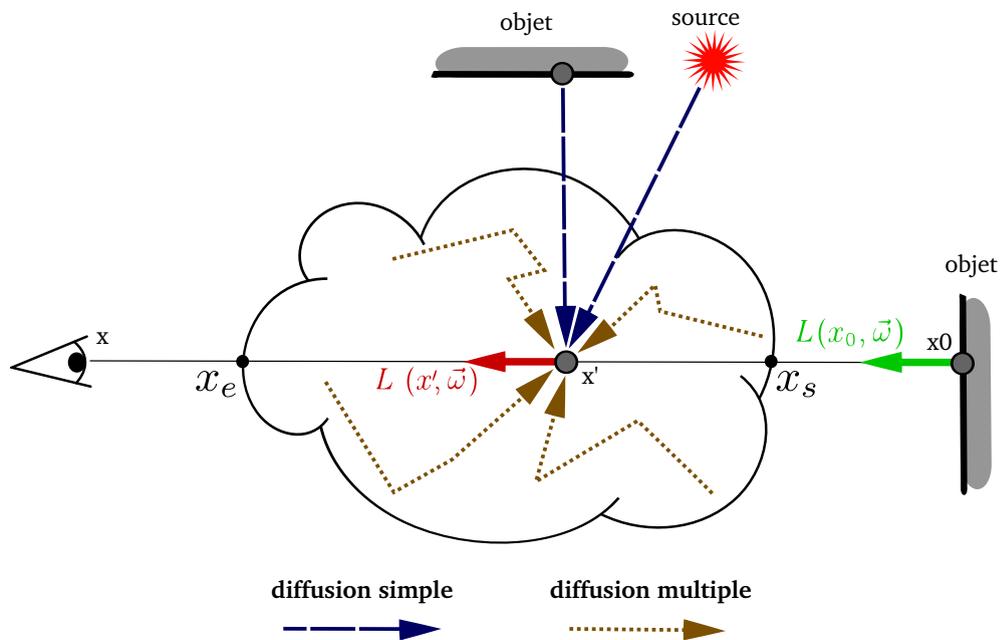


FIGURE 3.2 – La luminance incidente en  $x'$  peut avoir subi un seul événement de diffusion (single scattering) ou plusieurs (multiple scattering).

### 3.2 Illustrations des phénomènes dans un milieu participatif

La RTE, sous sa forme intégrée par exemple (équation 3.4), exprime l'ensemble des interactions lumineuses pouvant intervenir dans un milieu participatif le long d'un rayon  $\vec{\omega}$  entrant dans le milieu en  $x_e$  et sortant en  $x_s$  (voir la figure 3.2). Nous pouvons voir que cette RTE est définie comme la somme de trois composantes : la première étant la luminance émise par le milieu dans la direction  $\vec{\omega}$  atténuée entre  $x_e$  et  $x'$  un point donné sur le rayon (c'est la partie  $\int_{x_e}^{x_s} \tau(x_e, x') \alpha(x')$  de l'équation 3.4), la seconde est la luminance incidente atténuée par le milieu due aux diffusions simples et multiples et enfin la troisième contribution est la luminance émise ou réfléchiée par la surface la plus proche en  $x_0$ . Pour pouvoir résoudre la RTE, il est nécessaire de savoir modéliser et numériser le milieu participatif afin de retrouver, pour tout point du volume, les caractéristiques photométriques du milieu (les coefficients de diffusion et d'absorption ainsi que la fonction de phase) et aussi pouvoir intégrer ces données le long du rayon  $\vec{\omega}$ . Concernant les données photométriques et les caractéristiques du milieu participatif, elles nous sont fournies par l'outil de simulation numérique du Département Sécurité, Structure et Feu (DSSF) du CSTB<sup>3</sup>. Connaissant les caractéristiques photométriques du milieu, la première composante de la RTE est triviale à calculer. La troisième composante est, quant à elle, calculée à l'aide d'une des méthodes d'illumination globales présentées dans la seconde partie de la thèse par exemple. La seconde composante de la RTE est la composante la plus complexe à calculer. Afin d'illustrer le comportement photométrique de la fumée, nous nous proposons de représenter à l'aide de graphes l'évolution des termes intervenant dans le calcul de la troisième composante de la RTE le long d'un rayon traversant le milieu. Pour cela, nous nous plaçons dans un exemple concret, un long couloir rempli de fumée. Ce couloir est composé de 5 sources lambertiennes position-

3. Pour plus de détails concernant les choix d'implémentation et les structures de données choisies pour la modélisation des milieux participatifs dans le logiciel *Phanie*, nous renvoyons le lecteur à l'annexe B de ce document.

nées régulièrement sur sa longueur. Nous lançons un rayon  $\vec{\omega}$  qui traverse ce couloir et le milieu participatif. La figure 3.3 illustre cet exemple.

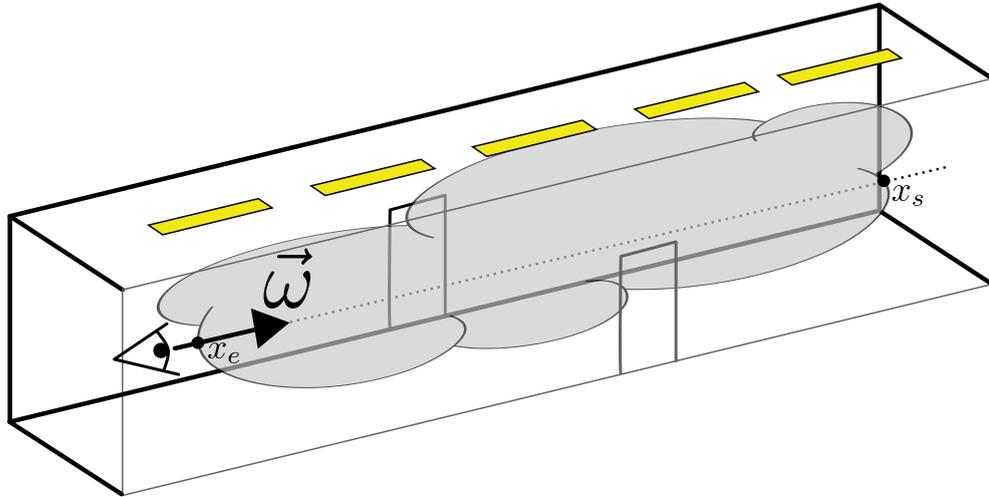


FIGURE 3.3 – Un couloir rempli d'un milieu participatif. Ce couloir est composé de 5 sources lumineuses dans lequel un rayon  $\vec{\omega}$  est lancé de bout en bout et traversant la fumée.

Il est alors possible de connaître, pour tout point  $x$  positionné sur le rayon  $\vec{\omega}$  entre  $x_e$  et  $x_s$ , les coefficients de diffusion, la luminance incidente due à la diffusion dans le milieu mais aussi la transmittance entre  $x$  et  $x_e$ . Nous pouvons donc reporter sur des graphes l'évolution de ces différentes valeurs le long du rayon  $\vec{\omega}$ . Ces graphes représentent en abscisse la longueur  $|\vec{x_e x}|$  autrement dit la position de  $x$  par rapport à la position d'entrée du rayon. Pour le cas décrit précédemment, les graphes sont donnés dans les figures 3.4 et 3.5 pour un milieu homogène et pour un milieu hétérogène.

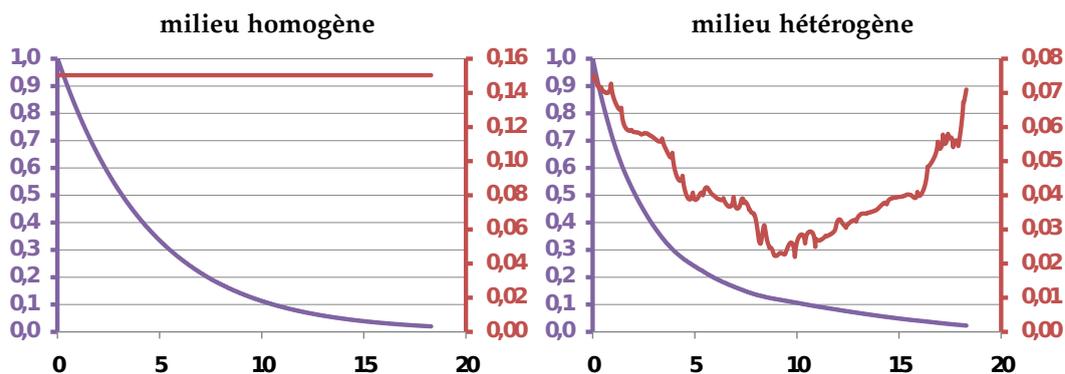


FIGURE 3.4 – Les graphes permettant de représenter l'évolution des caractéristiques d'un milieu traversé par un rayon  $\vec{\omega}$  sur 18m. (en abscisse) : le coefficient de diffusion  $\sigma(x)$  (exprimé en  $m^{-1}$ ) est dessiné en rouge et la transmittance combinée au coefficient de diffusion  $\tau(x_e, x)\sigma(x)$  est dessinée en violet.

Le milieu est traversé par le rayon  $\vec{\omega}$  sur 18m. ( $x$  variant de 0 à 18). Nous pouvons remarquer que la luminance incidente au rayon  $\vec{\omega}$  diffusée et atténuée par le milieu devient vite très faible. L'objectif d'une méthode d'illumination globale réaliste est de résoudre l'intégrale de cette luminance incidente diffusée et atténuée ( $\int_{x_e}^{x_s} \tau(x_e, x)\sigma(x)L_i(x, \vec{\omega})dx$  représentée en vert sur la figure 3.5) sans se limiter à la diffusion simple mais en prenant aussi en compte la diffusion multiple. Ces différentes représentations sous forme de

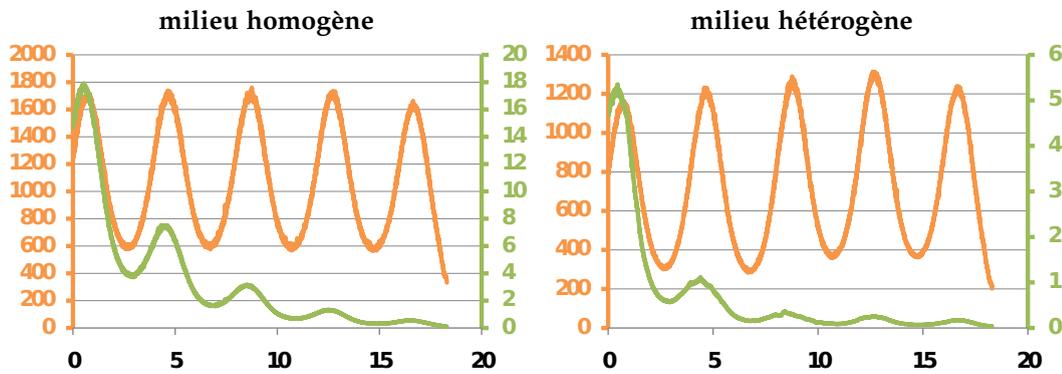


FIGURE 3.5 – Les graphes permettant de représenter l'évolution des caractéristiques d'un milieu traversé par un rayon  $\vec{\omega}$  sur 18m. : la luminance incidente  $L_i(x, \vec{\omega}) = \int_{\Omega} \rho(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) L(x, \vec{\omega}') d\vec{\omega}'$  due à la diffusion dans le milieu est dessinée en orange et la combinaison de la diffusion et de la transmittance  $\tau(x_e, x) \sigma(x) L_i(x, \vec{\omega})$  est dessinée en vert. L'unité pour les deux graphes est le  $cd.m^{-2}$ .

graphes pourront être utilisées pour évaluer et analyser les méthodes de résolution et notamment celle que nous avons développée.

### 3.3 Méthodes à base de tracé de chemins

Le rendu de milieux participatifs tels que le feu, la fumée ou encore l'eau a fait l'objet de nombreuses études en informatique graphique. Des méthodes plus ou moins réalistes ont été développées. L'état de l'art de Cerezo *et al.* [CPCP<sup>+</sup>05] permet d'avoir un très bon aperçu des méthodes existantes. Les premières méthodes ayant été proposées étaient des méthodes basées sur le tracé de chemins. Ces méthodes de rendu permettent de simuler l'ensemble des interactions lumineuses décrites précédemment. En 1996, Lafortune et Willems présentent un algorithme de suivi de chemins bidirectionnel pour les milieux participatifs [LW96]. Les chemins sont toujours construits à la fois depuis l'œil et depuis la source puis inter-connectés entre eux. Les perturbations dues au milieu traversé sont modélisées par de nouveaux sommets (dans le volume et plus seulement sur les surfaces) sur les chemins. Lors de l'interconnexion entre le chemin construit depuis l'observateur et le chemin construit depuis la source, il faut prendre en compte l'atténuation produite par le milieu. Cette atténuation *att* nous est donnée par la transmittance entre les deux sommets des chemins :

$$att = e^{-(\alpha+\beta)d} \quad (3.7)$$

avec  $d$  la distance séparant les deux sommets. L'équation 3.7 est valable pour un milieu homogène. Pour les milieux hétérogènes, il faut intégrer l'atténuation le long de la connexion afin de prendre en compte les différentes caractéristiques du milieu. D'autres méthodes, dérivées du tracé de chemins mono et bidirectionnel ont été proposées depuis. Nous pouvons notamment citer le *Metropolis Light Transport* développé par Veach et Guibas [VG97] et son extension avec les milieux participatifs proposée par Pauly *et al.* [PKK00]. Les méthodes de type tracé de chemins mono et bidirectionnel étant la base de nombreuses autres méthodes plus récentes et abouties, nous les avons implémentées dans le logiciel de photo-simulation *Phanie*. La figure 3.6 montre des résultats obtenus avec de telles méthodes. Ces méthodes, même si elles permettent de simuler de très

nombreux effets lumineux, restent extrêmement longues en temps de calcul et sont sujettes à de la variance. Diminuer cette variance est très coûteux en temps de calcul. Nous nous intéresserons plus tard à des méthodes de résolution plus récentes et plus efficaces et nous évaluerons s'il est possible de les utiliser dans le cadre de la simulation d'éclairage dans des environnements enfumés complexes.

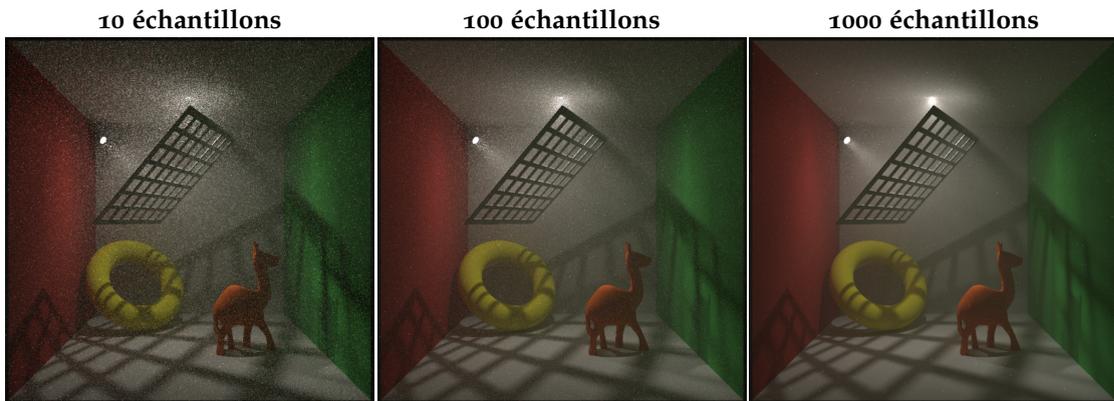


FIGURE 3.6 – La méthode de tracé de chemins avec un milieu participatif homogène ( $\sigma = 0.05$  et  $\alpha = 0.05$ ) et isotrope. Si le sur-échantillonnage permet de diminuer le bruit, avec 1000 échantillons le bruit résiduel est toujours visible. Supprimer ce bruit est extrêmement coûteux en temps de calcul.



---

## Conclusion

**N**OUS AVONS DÉCRIT dans cette première partie les concepts théoriques de la problématique de l'illumination globale avec et sans milieux participatifs. Quelques méthodes de résolution manipulant les concepts introduits ont aussi fait l'objet d'une rapide présentation. D'autres techniques présentant un intérêt pour la résolution de notre problématique initiale seront développées dans les parties suivantes de ce document.

L'étude préalable présentée dans cette première partie montre la possibilité de décomposer le problème en deux parties imbriquées. La résolution de l'illumination globale sans les milieux participatifs est un préalable à la résolution du problème plus général qui intègre de tels milieux. Nous avons donc décidé de développer une méthode de résolution pouvant manipuler des environnements avec et sans fumée. L'utilisation d'une seule méthode, s'appuyant sur les mêmes fondements, facilite son implémentation dans l'outil *Phanie* ainsi que sa maintenance. Son extension aux aspects dynamiques, qui fera l'objet de la troisième partie de ce document, doit aussi être pensée dès le début. Nous pensons que la méthode de cache d'éclairage est une piste de travail intéressante. En effet, les méthodes de type tracé de chemins sont extrêmement longues notamment dans le cas de scènes complexes. Ensuite, les méthodes à base de *Photon Mapping* peuvent ne pas être efficaces dans des environnements soumis à de l'éclairage naturel. Un très grand nombre de photons est alors nécessaire (de l'ordre de plusieurs millions) notamment dans des environnements ouverts.

Le cache d'éclairage est une technique devant être combinée à une méthode de tracé de chemins ou une méthode de *Photon Mapping* accélérant ainsi chacune de ces méthodes tout en conservant leurs avantages respectifs. Toutefois, l'utilisation de la méthode telle qu'elle est décrite initialement n'est pas envisageable dans le cas de la simulation d'éclairage physiquement réaliste. Ensuite, son extension à la prise en compte de milieux participatifs, dynamiques ou non, reste un champs d'étude ouvert et non exploré. Nous développerons dans les trois parties suivantes les optimisations que nous avons apportées à la méthode originale pour qu'elle puisse répondre à la problématique initiale. Dans la prochaine partie, nous proposerons une nouvelle méthode de cache d'éclairage adaptatif, permettant de prendre en compte les fortes variations de l'éclairage et ainsi stocker les contributions directes dans les enregistrements. Cette nouvelle méthode accélère la résolution de la problématique de l'illumination globale pour des environnements complexes non enfumés. Ensuite, nous exploiterons cette nouvelle méthode ainsi que ses concepts pour l'étendre à la prise en compte des milieux participatifs. Enfin, la dernière partie de ce document développera une technique simulant l'éclairage dans des environnements composés de milieux participatifs dynamiques tout en prenant en compte le déplacement de l'observateur. Nous verrons alors comment la cohérence spatio-temporelle peut être gérée par la méthode de cache

d'éclaircissement.



---

## Seconde Partie

# L'ILLUMINATION GLOBALE SURFACIQUE



# Travaux connexes

LA MÉTHODE DU CACHE D'ÉCLAIREMENT, combinée avec les méthodes de tracé de chemins ou de lancer de photons permet d'obtenir des résultats de très grande qualité tout en accélérant les temps de calcul par rapport aux méthodes initiales. C'est pour cela que notre choix s'est porté sur cette technique. Nous avons aussi implémenté dans le logiciel de photo-simulation *Phanie* les méthodes de tracé de chemins et de lancer de photons comme base de développement de la méthode de cache d'éclairage mais aussi afin de pouvoir les évaluer individuellement. L'avantage du cache d'éclairage réside principalement dans le fait que l'éclairage ne doit pas être calculé pour tous les pixels de l'image résultat. Nous pensons qu'il s'agit aussi d'une bonne piste de travail pour la problématique des milieux participatifs. Dans cette partie, nous allons décrire plus en détail la méthode du cache d'éclairage et nous verrons quelles optimisations ont été apportées depuis sa présentation en 1988 par Ward *et al.* [WRC88].

## 1.1 Présentation détaillée du cache d'éclairage

L'algorithme du cache d'éclairage exploite la cohérence spatiale en échantillonnant et en interpolant l'éclairage indirect diffus. L'éclairage est calculé pour un nombre restreint de points dans l'espace vu par l'observateur. Cet éclairage est stocké dans des enregistrements. Chaque enregistrement  $R$  possède un certain nombre d'attributs :

- $x_R$ , la position de l'enregistrement,
- $\vec{n}_R$ , la normale à la surface en  $x_R$ ,
- $E(R)$ , l'éclairage calculé en  $x_R$ ,
- $d_R$ , la moyenne harmonique des distances ([WRC88, KBPv06]) ou la distance minimum ([TLo4]) aux objets les plus proches depuis  $x_R$ .

Chaque enregistrement  $R$  possède une zone d'influence, dont le rayon est donné par  $a \cdot d_R$ , à l'intérieur de laquelle l'éclairage est connu. La constante  $a$  est donnée par l'utilisateur et représente l'erreur estimée lors du calcul des distances aux objets les plus proches de  $x_R$ . Si un point  $p$  est à l'intérieur de la zone d'influence d'un enregistrement  $R$ , l'éclairage en  $p$  peut être retrouvé à l'aide de l'éclairage stocké dans l'enregistrement  $R$ . Si, au contraire,  $p$  n'est recouvert par aucun enregistrement, un nouvel enregistrement est nécessaire en  $p$ . Puisque plusieurs enregistrements peuvent englober un point  $p$ , une fonction de pondération est alors utilisée. La contribution de l'enregistrement  $R$  au point  $p$  est alors pondérée par  $w_R$  dont l'expression est donnée par :

$$w_R(p) = \left( \frac{\|x_p - x_R\|}{d_R} + \sqrt{1 - \vec{n}_p \cdot \vec{n}_R} \right)^{-1} \quad (1.1)$$

L'ensemble  $S$  des enregistrements englobant le point  $p$  est :

$$S = \left\{ R : w_R(p) > \frac{1}{a} \right\}. \quad (1.2)$$

Si  $S$  n'est pas vide, l'éclairage en  $p$  peut alors être estimé à l'aide de tous les enregistrements composant  $S$  :

$$E(p) = \frac{\sum_{R \in S} E(R)w_R(p)}{\sum_{R \in S} w_R(p)} \quad (1.3)$$

Si  $S$  est vide, un nouvel enregistrement est calculé en  $x_p$  avec une nouvelle valeur d'éclairage calculée à l'aide d'une méthode de tracé de chemins ou une phase de *final gathering* pour un algorithme de lancer de photons. Ces méthodes permettent aussi d'obtenir la distance aux objets entourant  $p$  puis d'utiliser cette distance comme rayon de la zone d'influence du nouvel enregistrement. À ce stade, l'éclairage est considéré comme constant dans la zone d'influence d'un enregistrement. Pourtant, il varie sensiblement. Dans [WH92], Ward et Heckbert proposent une amélioration de l'algorithme du cache d'éclairage : les gradients d'éclairage. Ces derniers permettent de prendre en compte les variations d'éclairage indirect dans la zone d'influence d'un enregistrement. L'éclairage indirect d'un point  $x_p$  étant dans la zone d'influence de l'enregistrement  $k$  est donné par :

$$E(x_p) = E_k(1 + (\vec{n}_k \times \vec{n}_{x_p})\nabla_r + (x_p - x_k)\nabla_t) \quad (1.4)$$

où  $\nabla_r$  et  $\nabla_t$  sont les gradients de rotation et de translation prenant en compte les changements d'éclairage après une translation et/ou une rotation (voir [WH92] pour plus de détails).

## 1.2 Quelques méthodes à base de cache d'éclairage

La méthode du cache d'éclairage a été largement étudiée et améliorée depuis 1988. Pour plus de détails et de précisions sur l'implémentation notamment, nous renvoyons le lecteur aux cours en ligne *SIGGRAPH* de Křivánek *et al.* [KGW<sup>+</sup>08] et au livre de Křivánek et Gautron [KG09]. Comme nous l'avons dit dans la section précédente 1.1, la première optimisation apportée à la méthode initiale a été l'intégration des gradients de rotation et de translation afin de mieux anticiper les variations de l'éclairage dans les zones d'influence des enregistrements [WH92]. Nous présenterons ici succinctement quelques méthodes qui ont pour base la technique du cache d'éclairage.

Dans [SM02], Smyk *et al.* proposent une méthode qui permet d'augmenter le nombre d'enregistrements en fonction de l'amplitude des gradients afin de mieux reconstruire les changements brutaux d'éclairage indirect. La densité du cache est alors contrôlée en modifiant le rayon de la zone d'influence des enregistrements. Si l'augmentation du nombre d'enregistrements dans les zones où l'éclairage indirect varie fortement est intéressante, la diminution des rayons de la zone d'influence peut entraîner une forte augmentation de la densité du cache dans les coins de la scène et ainsi augmenter les temps de calcul. Dans leurs travaux, Tabellion et Lamorlette [TLo4] présentent plusieurs améliorations de la méthode originale dont l'utilisation de la distance minimum aux objets les plus proches (à la place de la moyenne harmonique des distances) pour déterminer le rayon de la zone d'influence. Comme pour [SM02], un nombre excessif d'enregistrements peuvent être créés sur les objets concaves. De la même manière, Křivánek

*et al.* [KBPv06] (voir aussi [KGW<sup>+</sup>08]) proposent d'autres modifications pratiques. La technique d'*Adaptive Caching* permet elle aussi de contrôler la densité du cache. La densité du cache adaptatif est contrôlée par le taux de changement de l'éclairage indirect afin de supprimer les défauts visibles. Si, pour un point  $p$  donné, un enregistrement crée une discontinuité dans l'interpolation, alors sa zone d'influence sera diminuée pour que cet enregistrement ne soit plus utilisé au point  $p$ . Cette technique a pour conséquence d'augmenter la densité d'enregistrements lorsque l'éclairage indirect varie fortement car le rayon de la zone d'influence devient plus petit. Malheureusement, avec la technique d'*Adaptive Caching*, l'enregistrement responsable de la plus forte discontinuité d'interpolation est souvent celui qui est le plus proche du point considéré. C'est donc celui qui propose normalement la meilleure valeur d'éclairage. Un tel enregistrement peut être très important pour une bonne interpolation et réduire sa zone d'influence a pour effet d'augmenter considérablement le nombre d'enregistrements. Dans le même papier [KBPv06], Křivánek *et al.* présentent une autre amélioration appelée *neighbor clamping*. Cette technique s'intéresse plus particulièrement au problème de fuite de rayons (plus connus sous le nom de *ray leaking*) dû à une mauvaise détection des objets les plus proches. Le rayon de la zone d'influence d'un enregistrement est contrôlé à l'aide de ses enregistrements voisins. Il y a donc plus de chance de mieux détecter les petites sources d'éclairage indirect.

Arikan *et al.* [AFO05] séparent quant à eux la luminance incidente en un point en deux composantes distinctes : la composante distante et la composante proche respectivement pour les émetteurs distants et proches. Ces composantes sont calculées séparément. La composante distante change lentement sur les surfaces : moins d'échantillons seront nécessaires pour l'estimer et la densité du cache correspondant sera plus faible. La composante proche sera quant à elle échantillonnée plus densément et permettra ainsi d'approximer les changements rapides de luminance.

La méthode du cache d'éclairage est facilement utilisable dans le cas d'un rendu animé malgré le fait que l'algorithme soit dépendant du point de vue. Un enregistrement peut être utilisé indépendamment du point de vue pour plusieurs images successives d'une animation. Un nouvel enregistrement est créé et stocké lorsqu'une nouvelle partie de la scène est vue par l'observateur. Il faut toutefois faire attention à la saturation de la mémoire. La première idée est de stocker dans l'enregistrement sa « date de validité » autrement dit jusqu'à quelle image de l'animation celui-ci sera valable. Cependant, si cette technique fonctionne bien lorsque l'observateur se déplace, elle peut ne pas être efficace lorsque des objets de la scène se déplacent. Dans [SiKDM05], Smyk *et al.* proposent une méthode plus aboutie pour un rendu animé. Leur objectif est de supprimer les effets de scintillement (souvent connu sous le terme anglais de *flickering*) qui peuvent apparaître dans une implémentation classique en animation. Pour cela, ils introduisent une structure de donnée appelée *anchor* pour pouvoir exploiter la cohérence temporelle. Chaque enregistrement conserve des *liens* permanents avec les objets intersectés lors de la phase de *final gathering* (la méthode est utilisée avec un lancer de photons). Une autre stratégie fut présentée par Boudet *et al.* [BGB08]. Ils combinent eux aussi un cache d'éclairage à un lancer de photons [Jen96, Jen01]. Puisque la carte de photons a l'avantage d'être complètement indépendante du point de vue, ils proposent de construire un cache d'éclairage à partir de cette carte de photons. Une fois le cache calculé, il peut être utilisé avantageusement pour un déplacement interactif (par exemple à l'aide d'une projection des enregistrements sur le plan image [GKBP05]) puisque l'éclairage est connu pour l'ensemble de la scène.

Le cache d'éclairage, dans sa version la plus classique, ne traite que des surfaces diffuses et la luminance des objets brillants doit être calculée pour chaque pixel de l'image à l'aide d'un tracé de chemins par exemple. Le cache de luminance, basé sur le même principe que le cache d'éclairage mais stockant au niveau de l'enregistrement les luminances incidentes, permet quant à lui de traiter les surfaces brillantes. La méthode consiste en une projection des luminances incidentes stockées au niveau de l'enregistrement dans des bases d'harmoniques sphériques ou hémisphériques (pour plus de détails voir notamment [Gre03, GKPBo4]). Cette méthode a d'abord été proposée par Křivánek *et al.* dans [Kř5, KGPBo5]. L'éclairage reçu par les surfaces diffuses et brillantes est stocké dans le cache et les BRDFs de hautes fréquences ainsi que les réflexions spéculaires sont calculées dans la passe de rendu. Dans [KGBP05], le calcul des gradients de luminance est amélioré. La méthode de cache de luminance a connu quelques améliorations depuis sa première présentation. Récemment, Herzog *et al.* [HMS09] proposent un algorithme de cache (d'éclairage ou de luminance) utilisant la méthode des *lightcuts*, un algorithme adaptatif et hiérarchique basé sur la méthode d'*instant-radiosity* [WFA<sup>+</sup>05, WABGo6]. À l'instar de [KGPBo5], la luminance incidente est projetée dans une base d'harmoniques hémisphériques. Un aspect intéressant de ce travail est le cache de luminance à deux niveaux : un pour l'éclairage indirect et un second pour l'éclairage direct. Ces deux niveaux sont calculés en parallèle. Deux caches sont alors maintenus ainsi que deux arbres de lumière (voir [WFA<sup>+</sup>05, WABGo6]). Un autre aspect intéressant de la méthode est le *multi-pass adaptive caching*. Il s'agit d'une extension de la méthode d'*adaptive caching* de Křivánek *et al.* [KBPv06]. Elle consiste à réduire la zone d'influence des enregistrements suivant une seule dimension (celle où la variation de l'éclairage est la plus forte). Les enregistrements auront alors des zones ellipsoïdales.

### 1.3 Discussion sur ces méthodes

Malgré le fait que la technique du cache d'éclairage ait été largement étudiée et améliorée depuis 1988, quelques défauts subsistent si l'on essaye d'utiliser cette méthode dans le cadre de la simulation d'éclairage. Nous avons recensé deux défauts principaux qui peuvent handicaper la méthode dans un tel contexte. La forme des enregistrements (circulaire dans la plupart des méthodes ou ellipsoïdale dans les travaux d'Herzog *et al.* [HMS09]) peut conduire à une forte concentration d'enregistrements dans les recoins de la scène et ainsi augmenter les temps de calcul inutilement. Les gradients du premier ordre peuvent aussi être un inconvénient lorsque de fortes variations d'éclairage surviennent. L'éclairage direct étant un cas extrême de variations brutales d'éclairage sur une surface, aucune méthode n'essaye de stocker à la fois l'éclairage direct et indirect dans les enregistrements. De plus, des défauts peuvent persister lorsque la scène est principalement éclairée par une (ou plusieurs) source indirecte très forte.

#### 1.3.1 La forme des zones d'influence des enregistrements

Nous pouvons constater que certaines méthodes essaient de palier aux problèmes d'interpolation en adaptant la concentration des enregistrements dans les zones où les variations de l'éclairage peuvent être fortes [KBPv06, HMS09]. L'augmentation de cette densité du cache se fait en jouant sur le rayon des zones d'influence des enregistrements. L'estimation de l'éclairage est alors meilleure puisque ces zones soumises à de fortes

variations seront sur-échantillonnées. Toutefois, s'il est intéressant d'augmenter la concentration d'enregistrements dans les zones où les gradients ne suffisent pas à recalculer la variation de l'éclairage, jouer sur le rayon des zones d'influence peut entraîner une sur-concentration d'enregistrements dans les coins et les rebords de la scène. L'utilisation de la distance minimum aux objets les plus proches pour définir le rayon des zones d'influence [TLo4] en lieu et place de la moyenne harmonique des distances est une technique encore plus critique. Pour éviter ce problème, Tabellion et Lamorlette [TLo4] contrôlent la densité du cache en utilisant l'aire projetée du pixel pour définir la taille minimale de la zone d'influence d'un enregistrement afin de sous-échantillonner les objets les plus éloignés. Cependant, dans le cas d'une animation, un nombre conséquent d'enregistrements doit être recalculé pour une nouvelle image si l'observateur s'approche de ces objets. L'idéal est donc de pouvoir sur-échantillonner dans les zones de fortes variations de l'éclairage tout en évitant une trop forte concentration dans les coins et les rebords. Nous pensons que le problème de sur-échantillonnage dans de telles zones est la conséquence de la forme circulaire des zones d'influence. Des zones d'influence plus complexes (voir la figure 1.1), qui s'adaptent en fonction de la géométrie environnante et de la qualité de l'interpolation de l'éclairage suivant plusieurs directions, peuvent être intéressantes. Nous verrons dans la partie 2 comment définir de telles zones d'influence et comment les adapter aux variations de l'éclairage.

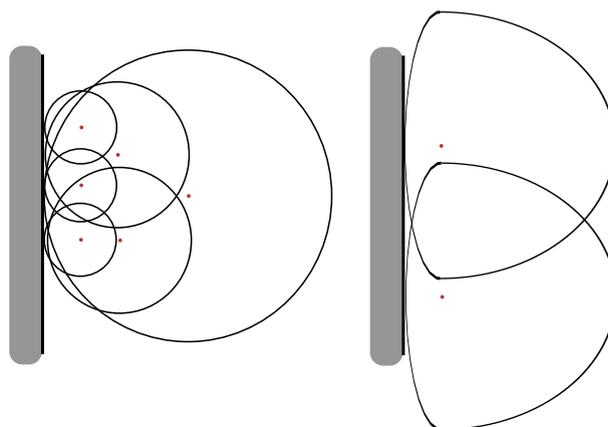


FIGURE 1.1 – Avec des zones d'influence circulaires (à gauche), plus d'enregistrements sont nécessaires dans les coins de la scène. Avec une zone d'influence plus petite du côté des objets proches et plus large du côté des objets éloignés (à droite), les enregistrements recouvrent des surfaces plus optimales et finalement moins d'enregistrements doivent être calculés. Ici, les zones d'influence sont vues de dessus.

### 1.3.2 La limite des gradients du premier ordre

Les gradients définis dans la méthode initiale ne permettent pas d'anticiper les fortes variations de l'éclairage dans la zone d'influence d'un enregistrement. Ces fortes variations sont dues à des effets d'ombrage et d'apparition de sources lumineuses. Les variations brutales d'une forte source de lumière indirecte ne seront pas correctement évaluées à l'intérieur d'une zone d'influence et pourront aboutir à des défauts visibles. Le cas extrême des sources de lumière directes est géré en recalculant l'éclairage direct lors de la phase de rendu. Nous nous proposons donc, dans nos travaux concernant le cache d'éclairage, de définir et d'évaluer de nouveaux gradients permettant de mieux anticiper les fortes variations de l'éclairage indirect mais aussi, pourquoi pas, direct. En

effet, dans le cas de la simulation d'éclairage, l'évaluation de l'éclairage direct pour chaque pixel de l'image résultat peut être très coûteuse en temps de calcul puisque de nombreuses sources artificielles étendues ainsi que de l'éclairage naturel peuvent être utilisés. Stocker de telles contributions dans les enregistrements permettrait d'accélérer considérablement la phase de rendu pour un éclairage complexe.

# Enregistrements adaptatifs pour le cache d'éclairage

LA MÉTHODE DU CACHE D'ÉCLAIREMENT a été plusieurs fois utilisée et étudiée depuis sa présentation en 1988 par Ward *et al.* [WRC88]. Les nombreuses optimisations apportées à l'algorithme ont permis de mieux recalculer l'éclairage dans la zone d'influence ou encore d'étendre la méthode aux objets brillants. Nous avons pourtant relevé, dans la partie précédente, la subsistance de certains défauts. Nous détaillerons ici les travaux que nous avons réalisés afin de pouvoir palier à ces défauts.

## 2.1 Présentation de la méthode

L'objectif principal ici est de proposer une technique offrant un meilleur contrôle de la densité du cache en fonction de la géométrie de la scène mais aussi des variations de l'éclairage. Nous voulons améliorer la prise en compte des fortes variations de l'éclairage et ainsi pouvoir stocker dans l'enregistrement les contributions indirectes mais aussi les contributions directes. Pour cela, nous présenterons une nouvelle forme des zones d'influence des enregistrements. Ces nouvelles zones d'influence, de forme plus complexe qu'une simple zone circulaire, dépendent à la fois de la géométrie environnante mais aussi des variations de l'éclairage. Ainsi, la densité du cache sera plus forte dans les zones où les gradients d'éclairage seront forts sans augmenter la concentration dans les bords de la scène. De nouveaux gradients seront aussi proposés afin de prendre en compte de plus fortes variations d'éclairage dans la zone d'influence des enregistrements et ainsi diminuer le nombre total d'enregistrements dans le cache.

## 2.2 Les enregistrements adaptatifs

Une des façons de contrôler la densité du cache est de diminuer la zone d'influence d'un enregistrement lorsque de forts gradients d'éclairage ou une mauvaise interpolation sont détectés. Pour cela, le rayon de la zone d'influence est diminué. Cependant, la variation de l'éclairage peut ne pas être la même dans toutes les directions autour du centre de l'enregistrement et il est dommageable de devoir réduire celle-ci pour l'ensemble de ces directions. La forme idéale peut être représentée par une surface plane dont les bords sont courbes (voir la figure 1.1 page 51). Cette surface ne peut pas être calculée exactement. Nous proposons donc une méthode pour approcher cette surface. La surface plane de la zone d'influence est décrite dans le plan tangent associé à l'enregistrement. Elle est définie à l'aide d'une décomposition angulaire de huit zones pseudo-elliptiques. La figure 2.1 illustre cette décomposition. Le système de coordonnées local de la zone d'influence courante  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{n})$  est utilisé pour déterminer huit axes autour de la position  $x_R$  de l'enregistrement  $R$ . Chaque axe est lui aussi inscrit dans

le plan tangent de l'enregistrement. La décomposition angulaire étant régulière, l'angle formé entre deux axes successifs est égal à  $\frac{\pi}{4}$ . La zone d'influence est alors divisée en huit sous-zones, chacune composée par deux côtés et un pseudo-arc. Les deux côtés des sous-zones ont comme point de départ  $x_R$  et sont alignés suivant deux axes successifs.

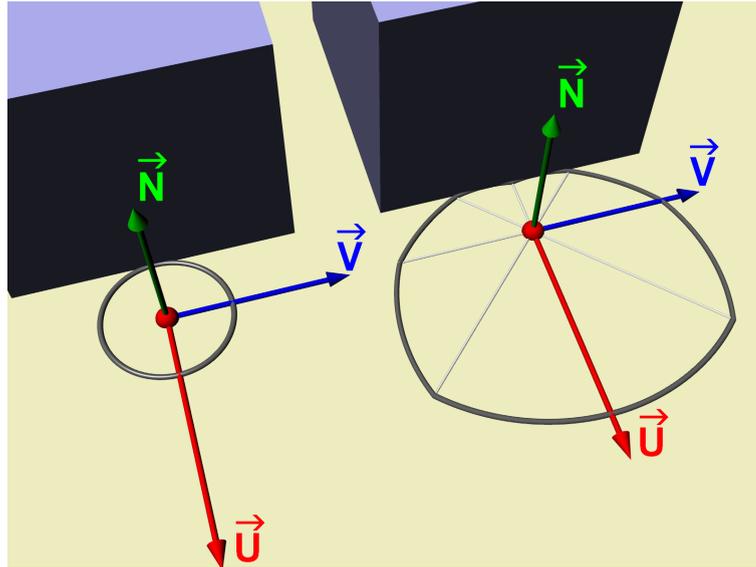


FIGURE 2.1 – 8 zones pseudo-elliptiques définissent la zone d'influence d'un enregistrement (représenté par le point rouge). Dans cet exemple, l'enregistrement se trouve près d'un cube : une zone circulaire (à gauche) est comparée avec une zone adaptative (sur la droite).

La longueur des cotés est calculée comme suit. Lorsque l'éclairage pour un enregistrement  $R$  donné est calculé, des rayons sont lancés depuis  $x_R$  couvrant l'hémisphère au dessus de  $R$ . Pour chaque rayon proche d'un axe  $k_i$  (un des huit axes définis précédemment), la distance à l'objet le plus proche dans ces directions (nous appellerons dorénavant cette distance la *distance minimum*) est affectée à l'axe. Un arc pseudo-elliptique, représentant le bord de la zone d'influence de la sous-zone considérée, est approché en utilisant une interpolation linéaire entre  $d_1$  et  $d_2$  (les distances des côtés bordant la sous-zone) si l'on considère  $k_1$  et  $k_2$  les deux axes successifs définissant les côtés. Le pseudo-arc décrivant la bordure de la courbe est alors défini par tous les points  $P''$  positionnés sur la bordure courbe entre  $k_1$  et  $k_2$  :

$$\|\overrightarrow{RP''}\| = (1 - t) \cdot d_1 + t \cdot d_2, \quad (2.1)$$

avec  $P'$  le point d'intersection entre  $(RP)$  et  $(P_1P_2)$ ,  $t = \frac{\|\overrightarrow{P_1P'}\|}{\|\overrightarrow{P_1P_2}\|}$  et  $P_i = R + \overrightarrow{k_i} \cdot d_i$ . La figure 2.2 décrit le principe de cette interpolation et les notations utilisées. Maintenant que les enregistrements et leur zone associée sont définis, il faut être capable de détecter si un point est recouvert ou non par la zone d'influence d'un enregistrement donné. S'il n'est pas recouvert, un nouvel enregistrement sera recalculé, comme dans l'algorithme initial. Pour détecter si un point  $p$  est recouvert par un enregistrement  $R$ , un premier test est réalisé. Si  $|x_p - x_R| < d_{k_{max}}$ , avec  $d_{k_{max}}$  la longueur du plus grand axe  $k_{max}$  de la zone d'influence, alors il est possible que  $p$  soit à l'intérieur de la zone d'influence de  $R$ . Si ce n'est pas le cas, l'enregistrement  $R$  ne sera pas utilisé pour l'interpolation en  $p$ . La projection du point  $p$  dans le plan tangent en  $R$  se trouve nécessairement entre deux axes associés à l'enregistrement. Il est alors possible, comme

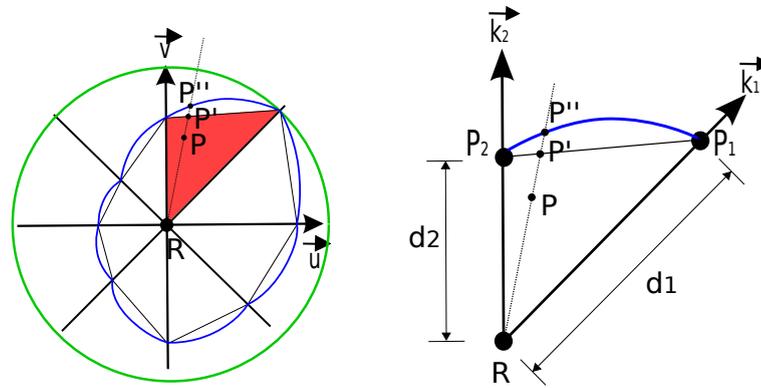


FIGURE 2.2 – Description et utilisation de la zone adaptative. Le point  $p$  est nécessairement entre 2 axes  $k_1$  et  $k_2$  de la zone assignée à  $R$ . Le cercle vert de rayon  $d_{k_{max}}$  (la longueur de l'axe le plus long  $k_{max}$ ) est le premier test utilisé pour rejeter ou non un enregistrement dans une interpolation.

représenté dans la figure 2.2, de retrouver le point  $P''$  à l'aide de l'équation 2.1. Une fonction similaire à la fonction de pondération  $w_R(P)$  originale proposée par Ward *et al.* dans [WRC88] peut alors être utilisée :

$$w_R(P) = \left( \frac{\|\vec{RP}\|}{\|\vec{RP}''\|} + \sqrt{1 - \vec{n}_p \cdot \vec{n}_R} \right)^{-1} - 1 \quad (2.2)$$

Le paramètre  $a$  n'apparaît pas dans l'équation 2.2 (car  $a = 1$ ) puisque la détection de l'objet le plus proche est plus précise (notamment parce qu'elle est associée à huit directions différentes et définie à l'aide de la distance minimum). À l'instar de la méthode de cache d'éclairage originale, l'enregistrement  $R$  est rejeté si  $w_R(P) \leq 0$ .

Dans la scène de la boîte de Cornell présentée dans la figure 2.3, les enregistrements à zone adaptative sont comparés avec des enregistrements à zone circulaire. Les deux méthodes utilisent la distance minimum aux objets les plus proches et exactement les mêmes paramètres de simulation (même nombre de chemin pour le calcul de l'éclairage et  $a = 1$  pour la méthode avec les zones circulaires). Les contributions directes ne sont pas considérées. Nous pouvons observer sur cette scène très simple un gain important en nombre d'enregistrements. Le temps de calcul est considérablement diminué, proportionnellement au nombre d'enregistrements, puisque chaque enregistrement requière le même temps de calcul pour les deux méthodes. Comme nous l'avons dit précédemment, avec les zones d'influence circulaires, les enregistrements se concentrent sur les bords et les coins des objets de la scène. Les zones adaptatives s'adaptent quant à elles à la géométrie ce qui a pour conséquence de diminuer le nombre total d'enregistrements (voir les images en niveaux de gris de la figure 2.3 pour la distribution des enregistrements). Pour un résultat similaire, la densité du cache est plus faible dans les bords et les coins des objets. Il reste toutefois quelques défauts inhérents à la méthode de cache d'éclairage tels que la fuite de rayons (*ray leaking*). Dans les parties suivantes, nous verrons comment palier à ce genre de problème et améliorer l'interpolation dans les zones d'influence adaptatives à l'aide de nouveaux gradients d'interpolation. Nous présenterons aussi une nouvelle méthode d'adaptation des zones en fonction de la variation de l'éclairage.

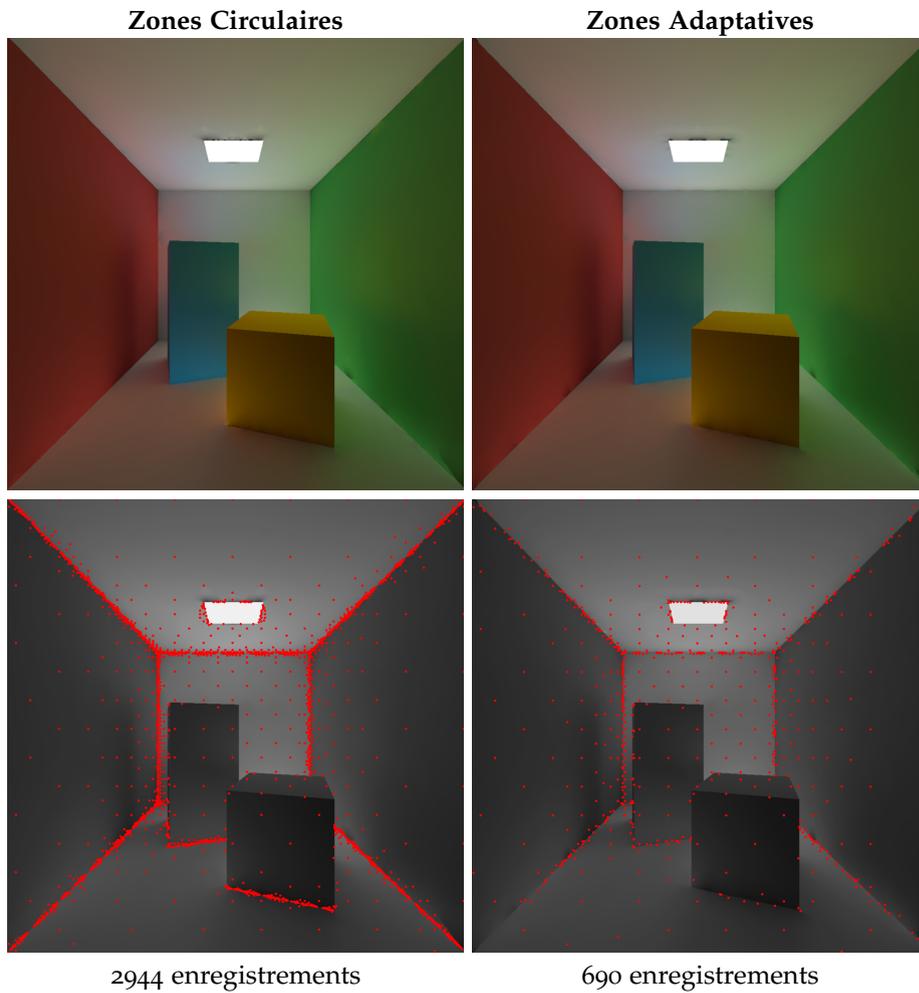


FIGURE 2.3 – Comparaison entre les zones circulaires (à gauche) et les zones adaptatives (à droite) avec l'éclairage indirect seulement ; les deux méthodes utilisent la distance minimum aux objets les plus proches et exactement les mêmes paramètres de calcul. Le temps de calcul pour un enregistrement est le même pour les deux méthodes : avec plus de 4 fois moins d'enregistrements, notre méthode est un peu plus de 4 fois plus rapide.

## 2.3 Les gradients

L'utilisation des nouvelles zones d'influence adaptatives nécessite de reconsidérer la façon dont les gradients sont calculés. Nous présenterons dans cette section une nouvelle méthode pour calculer les gradients de translation et de rotation pour chacun des huit axes de l'enregistrement.

### 2.3.1 Recalculer l'éclairage le long des axes

Les gradients aident à déterminer la façon dont l'éclairage évolue à l'intérieur de la zone d'influence d'un enregistrement. Pour cela, nous ré-exploisons le tirage des chemins, réalisé à l'aide d'une méthode de Monte Carlo, qui définit l'éclairage à la position  $x_R$ , le centre de l'enregistrement  $R$ . L'éclairage en  $x_R$  peut être exprimé à l'aide de l'équation :

$$E(x_R) = \int_{\Omega} L_i(x_R, \vec{\omega}) (\vec{n}_{x_R} \cdot \vec{\omega}) d\vec{\omega} \quad (2.3)$$

Puisqu'une méthode de Monte Carlo avec une distribution uniforme en angle solide est utilisée pour approcher cette valeur, elle peut être exprimée sous la forme :

$$E(x_R) = \frac{2\pi}{N} \sum_{i=1}^N L_i(x_R, \vec{\omega}_i) (\vec{n}_{x_R} \cdot \vec{\omega}_i) \quad (2.4)$$

où  $N$  est le nombre d'échantillons,  $L_i$  la luminance incidente pour le  $i^e$  échantillon dans la direction  $\vec{\omega}_i$  et  $\vec{n}_{x_R}$  la normale au point  $x_R$ . Considérons  $E_i(x_R) = 2\pi \cdot L_i(x_R, \vec{\omega}_i) (\vec{n}_{x_R} \cdot \vec{\omega}_i)$  comme une estimation de l'éclairement au point  $x_R$  (à un facteur  $2\pi$  près) due au  $i^e$  échantillon, autrement dit, une estimation de l'éclairement due à la  $i^e$  **source ponctuelle équivalente**. L'éclairement  $E_i(x_R)$  peut ainsi être vu comme la moyenne des éclairagements apportés par  $N$  sources ponctuelles équivalentes. Les sources ponctuelles équivalentes utilisées pour  $x_R$  ont été déterminées à l'aide d'une méthode de Monte Carlo. Dans le logiciel *Phanie*, nous utilisons principalement un tracé de chemins mono ou bidirectionnel [Kaj86, VG94, Veag98, LW93] (voir la figure 2.4 pour le cas d'un tracé de chemins bidirectionnel) mais une phase de *final gathering* d'un *Photon Mapping* peut aussi être utilisée.

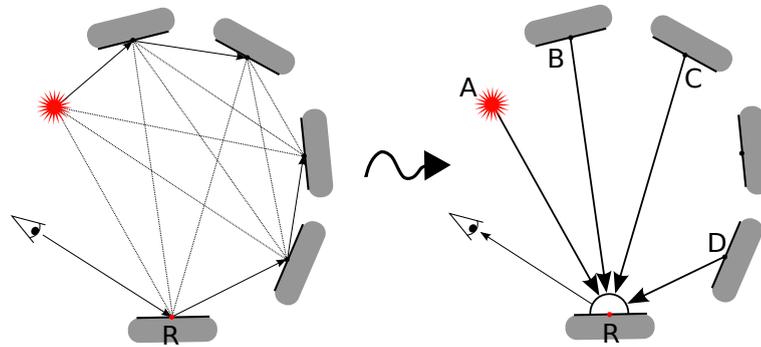


FIGURE 2.4 – Détermination des sources ponctuelles équivalentes avec un tracé de chemins bidirectionnel : l'échantillon permet de connaître 3 contributions indirectes (B, C et D) et une contribution directe (A) pour l'enregistrement R correspondant à 4 sources ponctuelles équivalentes. Plus d'échantillons donneront une meilleure couverture de l'hémisphère au dessus de R.

Une source ponctuelle équivalente correspond à un sommet sur le chemin de lumière ou observateur directement connecté à  $x_R$ , la position du nouvel enregistrement R et le premier sommet du chemin observateur. Il est alors possible de substituer  $L_i(x_R, \vec{\omega}_i) (\vec{n}_{x_R} \cdot \vec{\omega}_i)$  dans l'équation 2.4 :

$$E(x_R) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i(x_R) \quad (2.5)$$

Connaissant  $E_i$  à l'aide du tracé de chemins, l'**intensité équivalente**  $I_i^{eq}(\vec{\omega}_i)$  caractérisant la  $i^e$  source ponctuelle équivalente peut être exprimée sous la forme :

$$I_i^{eq}(\vec{\omega}_i) = \frac{E_i(x_R) \cdot d_i^2}{\vec{n}_{x_R} \cdot \vec{\omega}_i}, \quad (2.6)$$

avec  $d_i$  la distance à la  $i^e$  source ponctuelle équivalente. Ainsi, pour le nouvel enregistrement R à la position  $x_R$ , l'éclairement devient :

$$E(x_R) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_i^{eq}(\vec{\omega}_i) \cdot (\vec{n}_{x_R} \cdot \vec{\omega}_i)}{d_i^2} \quad (2.7)$$

Le concept de sources ponctuelles équivalentes et cette dernière équation exprimant l'éclairément au centre de l'enregistrement nous aideront à calculer les nouveaux gradients que nous proposons. Il est utile de pouvoir retrouver l'éclairément pour tout point positionné sur les axes de la zone d'influence d'un enregistrement  $R$ . Pour ce faire, nous réutilisons les sources ponctuelles équivalentes définies pour le centre  $x_R$  de l'enregistrement. Pour un point  $p$  positionné en  $x_p$  sur l'axe  $k$  de l'enregistrement  $R$ , nous pouvons exprimer l'éclairément à l'aide de l'équation suivante :

$$E(x_p) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_i^{eq}(\vec{\omega}'_i) \cdot (\vec{n}_{x_p} \cdot \vec{\omega}'_i)}{d_i'^2} V(x_i, x_p), \quad (2.8)$$

où  $\vec{\omega}'_i$  est la direction incidente de la source ponctuelle équivalente  $i$  vers  $x_p$ ,  $I_i^{eq}(\vec{\omega}'_i)$  est son intensité équivalente,  $d_i'$  est la distance séparant  $x_p$  à la source ponctuelle équivalente  $i$ .  $V(x_i, p_x)$  est le terme représentant la visibilité entre  $x_i$ , la position de la source ponctuelle équivalente  $i$ , et  $x_p$ . Comme décrit dans la figure 2.5, deux types de contributions sont à considérer : les contributions directes provenant des sources lumineuses et les contributions indirectes provenant quant à elles des objets intersectés lors du tracé de chemins. Les notations introduites par la figure 2.5 seront dorénavant utilisées (*i.e.*  $\vec{\omega}'_i = \vec{SR}$  et  $\vec{\omega}'_i = \vec{SR}'_k$ ).

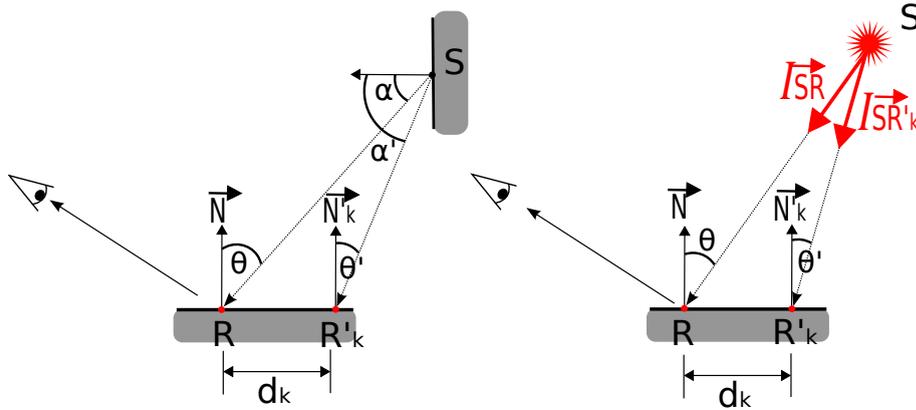


FIGURE 2.5 – Deux types de sources ponctuelles équivalentes (indirecte sur la gauche et directe sur la droite). Ces sources sont détectées lors de l'estimation de l'éclairément en  $R$  et sont ensuite utilisées pour déterminer l'éclairément en  $R'_k$  sur l'axe  $k$ .

Concernant les contribution indirectes, si l'on considère un matériau diffus pour  $S$ , alors la luminance réfléchiée par  $S$  est uniforme. L'intensité réfléchiée est alors fonction du cosinus de l'angle  $\alpha$  et de l'angle solide. Ainsi, pour tout point  $R'_k$  de l'axe  $k$  de la zone d'influence de l'enregistrement, l'intensité équivalente peut être estimée comme dépendante de la variation des cosinus entre  $\alpha$  et  $\alpha'$  :

$$I_i^{eq}(\vec{SR}'_k) = I_i^{eq}(\vec{SR}) \cdot \frac{\cos(\alpha')}{\cos(\alpha)} \quad (2.9)$$

où  $\alpha$  est l'angle entre  $\vec{SR}$  et la normale à l'émetteur  $S$ . Si les contributions directes sont aussi stockées dans l'enregistrement, il est nécessaire de considérer les sources ponctuelles équivalentes provenant des sources lumineuses réelles. Pour une source réelle, où la luminance émise n'est pas uniforme, l'intensité de la source ponctuelle

équivalente est proportionnelle à l'intensité réelle de la source  $I(\vec{SR})$ . L'intensité équivalente en  $R'_k$  sur l'axe  $k$  est ainsi approximée à l'aide du ratio des intensités réelles  $I(\vec{SR}'_k)$  et  $I(\vec{SR})$  :

$$I_i^{eq}(\vec{SR}'_k) = I_i^{eq}(\vec{SR}) \cdot \frac{I(\vec{SR}'_k)}{I(\vec{SR})} \quad (2.10)$$

En utilisant ces deux formulations (équations 2.10 et 2.9) ainsi que l'équation 2.8, l'éclairement peut être recalculé en tout point sur tous les axes de l'enregistrement.

### 2.3.2 Les gradients de translation

#### Définition et calcul

Les gradients de translation permettent d'anticiper, à l'intérieur de la zone d'influence d'un enregistrement, les variations de l'éclairement. En effet, celui-ci est rarement constant à l'intérieur d'une telle zone, particulièrement si de forts apports lumineux apparaissent et disparaissent en fonction de la position dans la zone considérée. Nous rappelons ici que l'objectif est de pouvoir mieux anticiper ce genre de variations, par exemple celles dues à une forte source indirecte (une tache solaire par exemple), sans avoir à diminuer la zone d'influence et ainsi trop augmenter la densité du cache. Une nouvelle méthode est donc proposée pour calculer les gradients : une formulation de Taylor du second ordre est introduite pour l'interpolation dans la zone d'influence. Cela requière de résoudre une équation exprimant l'éclairement  $\tilde{E}_k(x)$  en un point  $x$  sur l'axe  $k$  de l'enregistrement  $R$  :

$$\tilde{E}_k(x) = E(R) + G_k^1 \Delta_k + G_k^2 \frac{\Delta_k^2}{2} \quad (2.11)$$

où  $\Delta_k = |x - R|_k$  et  $G_k^1$  et  $G_k^2$  sont les gradients, stockés dans l'enregistrement, utiles à l'interpolation. On a ainsi  $\tilde{E}_k(0) = E(0) = E(R)$ . Comme il a été dit précédemment, il est possible de connaître la valeur de  $\tilde{E}_k(x)$  (l'éclairement au point  $x$ ) pour tous les points  $x$  sur un axe  $k$  grâce à l'équation 2.8. Si nous choisissons  $x'$  à une distance  $\Delta' = d_k/2$  de  $R$  avec  $d_k$  la longueur de l'axe  $k$  (définie comme la distance minimum aux objets les plus proches dans la direction de l'axe  $k$ ) et  $x$  à une distance  $\Delta = d_k$ , nous obtenons le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \tilde{E}(x') &= E(R) + G_k^1 \Delta' + G_k^2 \Delta'^2 / 2 \\ \tilde{E}(x) &= E(R) + G_k^1 \Delta + G_k^2 \Delta^2 / 2 \end{cases} \quad (2.12)$$

En appliquant l'équation 2.8 pour exprimer  $\tilde{E}(x')$  et  $\tilde{E}(x)$ , la résolution du système permettra de connaître  $G_k^1$  et  $G_k^2$  (voir l'annexe A pour la résolution du système et la formulation des gradients). Une approximation de l'éclairement peut maintenant être déterminée rapidement pour chacun des axes  $k$  de chaque enregistrement en utilisant l'équation 2.11.

#### L'interpolation

Maintenant que nous pouvons définir l'éclairement en tout point sur les axes de la zone d'influence, il faut pouvoir déterminer l'éclairement entre deux axes successifs. Comme nous l'avons mentionné dans la section 2.2 page 53, un point  $p$  appartient à la zone

d'influence de l'enregistrement  $R$  si sa projection sur le plan tangent à  $R$  est à l'intérieur d'une sous-zone courbe définie entre deux axes  $k_1$  et  $k_2$  (voir la figure 2.2 page 55). L'équation 2.11 est utilisée pour chacun des deux axes  $k_n$  comme suit :

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{k_n}(P) &= E(R) + G_k^1 \frac{\|\vec{RP}\|}{\|\vec{RP}'\|} \cdot d_{k_n} \\ &+ \frac{1}{2} G_k^2 \left( \frac{\|\vec{RP}\|}{\|\vec{RP}'\|} \cdot d_{k_n} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Nous considérons que le changement d'éclairément est linéaire entre deux axes successifs. L'éclairément en  $P$  dû à l'enregistrement  $R$  est alors évalué en utilisant une interpolation linéaire des deux valeurs  $\tilde{E}_{k_1}(P)$  et  $\tilde{E}_{k_2}(P)$  :

$$E(P) = w_R(P) \cdot [\tilde{E}_{k_1}(P) \cdot (1 - \tau) + \tau \cdot \tilde{E}_{k_2}(P)], \quad (2.14)$$

où, d'après le théorème de Thalès,  $\tau = \frac{\|\vec{P_1P'}\|}{\|\vec{P_1P_2}\|}$ . Nous définissons dans ce qui suit  $Tr(P) = [\tilde{E}_{k_1}(P) \cdot (1 - \tau) + \tau \cdot \tilde{E}_{k_2}(P)]$  comme étant le terme de translation pour le point  $P$ . Les différentes hypothèses et simplifications proposées ici ont fait l'objet de plusieurs expérimentations et donnent de bons résultats dans la pratique (voir la partie 2.6 page 64 pour les résultats).

### 2.3.3 Les gradients de rotation

#### Définition et calcul

Les gradients de rotation aident à déterminer les variations de l'éclairément dues aux perturbations de normale dans la zone d'influence d'un enregistrement. Avec les enregistrements à zones adaptatives, il est possible d'utiliser les gradients de rotation initiaux de Ward et Heckbert [WH92]. Toutefois, ces gradients ne sont pas efficaces lorsque de fortes variations d'éclairément peuvent apparaître dans la zone d'influence. Ces fortes variations peuvent être dues aux sources indirectes fortes ou encore, si l'on souhaite intégrer les apports directs, aux sources directes. Nous nous proposons de développer de nouveaux gradients de rotation permettant de prendre en compte ces signaux hautes fréquences. Notre approche utilise huit gradients de rotation, chacun correspondant à une perturbation de la normale d'un angle maximum  $\alpha_{max}$  pour chacun des axes associés à la zone d'influence de l'enregistrement. En exploitant l'équation 2.5 page 57, l'éclairément peut être calculé pour une nouvelle normale  $\vec{n}'_k$ , soit une perturbation de la normale  $\vec{n}_R$  de l'enregistrement  $R$  suivant l'axe  $k$  :

$$E(\vec{n}'_k) = \frac{1}{N} \sum_{i, (\vec{n}'_k \cdot \vec{\omega}_i) > 0} \frac{I_i^{eq}(\vec{\omega}_i) \cdot (\vec{n}'_k \cdot \vec{\omega}_i)}{d_i^2}. \quad (2.15)$$

Une formulation de Taylor du second ordre, fonction de  $\Delta_\theta$ , la distance angulaire entre la normale  $\vec{n}_R$  à l'enregistrement et  $\vec{n}'_k$  la normale perturbée, est introduite :

$$\tilde{E}(\alpha_{max}) = E(R) + G_k^{rot1} \Delta_\theta + \frac{1}{2} G_k^{rot2} \Delta_\theta^2 \quad (2.16)$$

avec  $\alpha_{max}$  l'angle maximum de perturbation autorisé. À l'instar des gradients de translation et le système d'équations 2.12, nous avons :

$$\begin{cases} \tilde{E}(\frac{\alpha_{max}}{2}) &= E(R) + G_k^{rot1} \frac{\Delta\theta}{2} + \frac{1}{2} G_k^{rot2} \left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)^2 \\ \tilde{E}(\alpha_{max}) &= E(R) + G_k^{rot1} \Delta\theta + \frac{1}{2} G_k^{rot2} (\Delta\theta)^2 \end{cases} \quad (2.17)$$

La résolution de ce système (voir l'annexe A) permet d'obtenir  $G_k^{rot1}$  et  $G_k^{rot2}$ , les gradients de rotation, en appliquant l'équation 2.15.

### L'interpolation

Comme dans le cas de l'interpolation de translation, lorsqu'un point  $P$  est à l'intérieur de la zone d'influence d'un enregistrement  $R$ , sa projection orthogonale sur le plan tangent à  $R$  est entre deux axes successifs que nous appellerons  $\vec{k}_1$  et  $\vec{k}_2$ . La normale  $\vec{n}_P$  en  $P$  est elle aussi entre deux vecteurs de perturbation de normale sur chacun des axes (voir la figure 2.6).

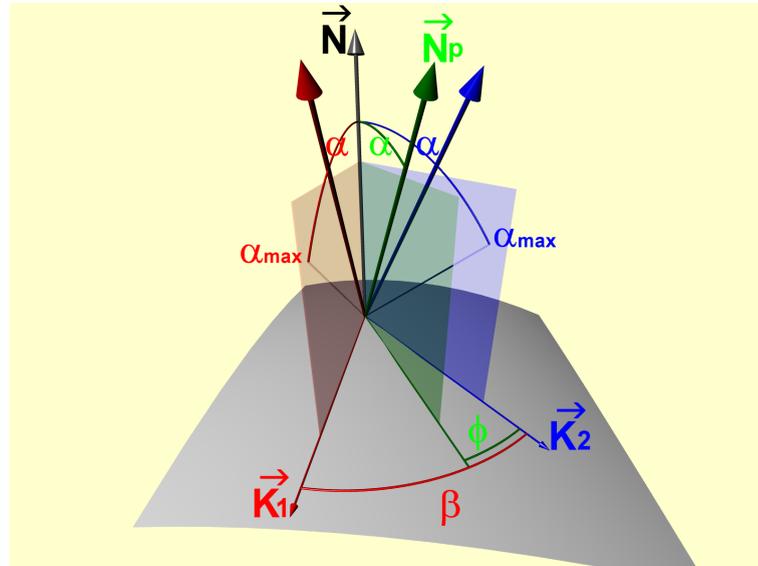


FIGURE 2.6 – L'interpolation pour la perturbation de normale :  $\phi$  est l'angle formé entre le plan  $(\vec{N}_R, \vec{N}_P)$  et le plan  $(\vec{k}_2, \vec{N}_R)$ .

Comme pour le cas de l'interpolation de translation, nous faisons la même hypothèse empirique concernant les variations de l'éclairement : nous les considérons comme linéaires entre deux axes successifs. Le terme de rotation  $Rot(P)$  peut alors être écrit comme suit :

$$Rot(P) = \left[ \frac{\phi}{\beta} \cdot \tilde{E}_{k_1}(\alpha) + \left(1 - \frac{\phi}{\beta}\right) \cdot \tilde{E}_{k_2}(\alpha) \right], \quad (2.18)$$

où  $\phi$  est l'angle formé entre le plan de projection de normale  $\vec{n}_R$  et  $\vec{k}_2$ , et  $\beta = \pi/4$  est l'angle entre  $\vec{k}_1$  et  $\vec{k}_2$  (voir la figure 2.6). L'interpolation de l'éclairement en un point  $P$  à l'intérieur de la zone d'influence de l'enregistrement  $R$  utilisant les gradients de rotation est exprimée de la manière suivante :

$$E(P) = w_R(P) \cdot (Tr(P) + Rot(P)) \quad (2.19)$$

Nous devons ici faire une petite modification de la fonction de pondération  $w_R$  qui doit tendre vers 0 lorsque  $\alpha$  tend vers  $\alpha_{max}$  afin d'éviter des discontinuités aux bords de la zone d'influence (voir [KGW<sup>+</sup>08] et la section 2.2 page 53). La fonction de pondération  $w_R(P)$  au point  $P$  devient alors :

$$w_R(P) = \left( \frac{|\vec{RP}'|}{|\vec{RP}|} - 1 \right) \cdot \left( 1 - \frac{\alpha}{\alpha_{max}} \right) \quad (2.20)$$

Nous remplaçons ici l'équation 2.2 par l'équation 2.20 puisque la perturbation angulaire est comprise entre 0 et  $\alpha_{max}$  et proposons une pondération variant linéairement avec l'angle  $\alpha$ . La figure 2.7 montre un exemple où les gradients de rotation de Ward et Heckbert ne sont pas suffisamment précis lorsque de fortes variations, dues à des contributions directes, sont stockées dans les enregistrements. Chacune des méthodes utilise des enregistrements à zones adaptatives décrits dans la section 2.2 page 53 ainsi que nos gradients de translation. Nos gradients de rotation fournissent des résultats plus doux sur les surfaces courbes. Des cas plus complexes avec des surfaces courbes concaves et convexes seront étudiés dans la section des résultats 2.6 page 64.

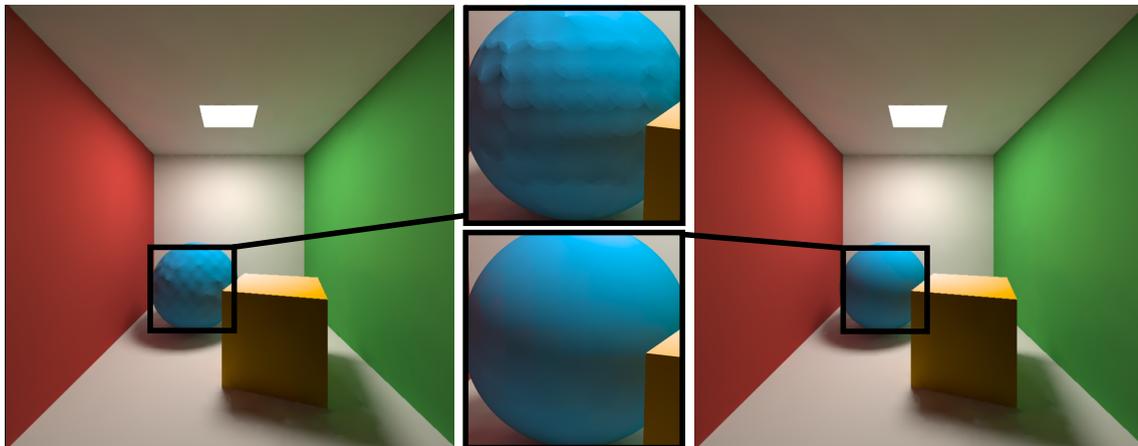


FIGURE 2.7 – Les gradients de rotation de Ward et Heckbert (à gauche) et nos gradients de rotation (à droite) avec de l'éclairage direct et indirect ; les deux méthodes utilisent le même nombre d'enregistrements (environ 150 enregistrements sur la sphère). Pour nos gradients,  $\alpha_{max}$  est fixé à 20 degrés.

## 2.4 Adaptation aux variations de l'éclairage

Les gradients d'interpolation quadratiques que nous avons présentés permettent d'anticiper, à l'intérieur de la zone d'influence d'un enregistrement, de nombreuses situations de variations d'éclairage. Toutefois, quelques situations particulièrement complexes, telles que la présence d'ombres, peuvent générer des défauts de rendu. Pour pouvoir s'adapter à ce genre de cas, il est possible d'ajuster la taille de la zone d'influence d'un enregistrement en fonction de ces variations brutales d'éclairage à l'intérieur de cette zone. Plus les variations d'éclairage sont fortes le long d'un axe  $k_i$ , plus la longueur de cet axe sera petite. La qualité de l'interpolation est contrôlée durant le calcul de l'enregistrement (voir la figure 2.8). La méthode de Monte Carlo permettant de calculer l'éclairage de l'enregistrement  $R$  sert aussi à déterminer la longueur initiale des axes définissant ainsi la forme initiale de la zone d'influence de  $R$ . Pour

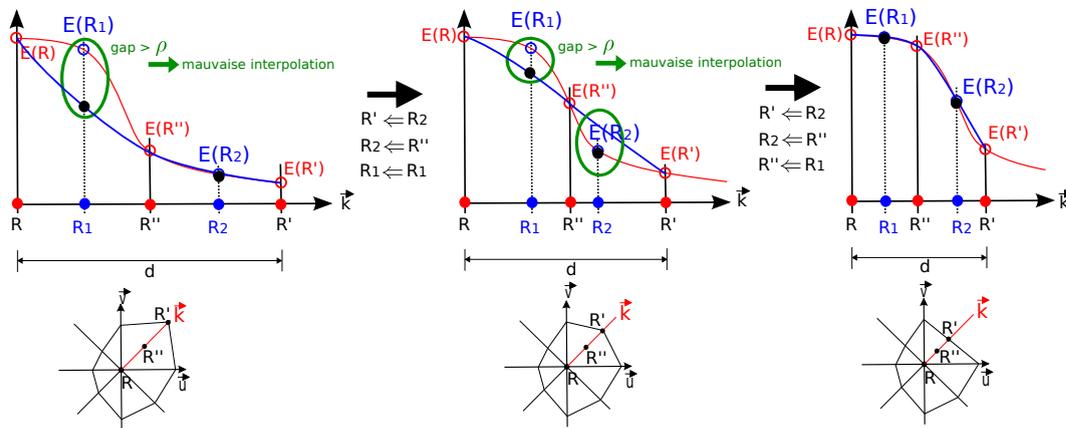


FIGURE 2.8 – Des points intermédiaires ( $R_1$  et  $R_2$ ) sont utilisés pour déterminer si l'interpolation (la courbe bleue) est correcte avec les points de contrôle  $R'$  et  $R''$ . L'interpolation n'est pas suffisamment bonne si la différence relative entre la valeur interpolée pour les points  $R_1$  et  $R_2$  (représentés par les points noirs sur le schéma) et les valeurs réelles  $E(R_1)$  et  $E(R_2)$  (les cercles bleus) excède un seuil  $\rho$  fixé par l'utilisateur. La courbe rouge représente la variation réelle de l'éclairement le long de l'axe. Les schémas de la seconde ligne représentent la diminution de l'axe considéré et la forme de la zone d'influence obtenue.

chacun des axes  $k_i$ , les gradients de translation sont calculés avec leur longueur initiale. Deux points intermédiaires sont ensuite utilisés pour contrôler la validité de l'interpolation :  $R_1$  positionné à une distance  $d_i/4$  et  $R_2$  à une distance  $3d_i/4$  ( $d_i$  étant la longueur courante de l'axe  $k_i$ ). Les valeurs réelles pour ces deux points sont déterminées en utilisant l'équation 2.8 donnée page 58. Les valeurs interpolées  $E_{interp}(R_1)$  et  $E_{interp}(R_2)$  sont quant à elles calculées en utilisant les gradients de translation courants déterminés à l'aide de l'éclairement évalué aux points  $R'$  (positionné à une distance  $d_i$  de  $R$ ) et  $R''$  (positionné à une distance  $d_i/2$ ). Les valeurs sont ensuite comparées deux à deux : si l'erreur  $\frac{E(R_1) - E_{interp}(R_1)}{E(R_1)}$  (ou  $\frac{E(R_2) - E_{interp}(R_2)}{E(R_2)}$  pour le point  $R_2$ ) excède un seuil  $\rho$  fixé par l'utilisateur, alors la qualité de l'interpolation est considérée comme non satisfaisante. Dans ce cas, le processus recommence avec une distance  $d_i$  plus faible. Il est alors plus judicieux de réutiliser les valeurs déjà calculées entre deux étapes successives (voir la figure 2.8) afin d'accélérer cette phase de calcul. Cette technique a pour effet d'augmenter la concentration d'enregistrements dans les zones où les gradients d'éclairement ne semblent pas suffisamment précis pour une bonne interpolation.

## 2.5 Optimisations apportées à la méthode

La méthode proposée ici, un cache d'éclairement à enregistrements adaptatifs, peut être améliorée à l'aide de quelques petites optimisations que nous allons décrire dans cette partie.

### 2.5.1 Détermination automatique du seuil

La qualité des gradients de translation et de l'interpolation est fortement dépendante du seuil  $\rho$ . Si  $\rho$  est trop élevé, c'est-à-dire trop permissif, l'interpolation peut être de mauvaise qualité. Si, au contraire, le seuil est trop restrictif, alors le cache peut devenir excessivement dense. Une idée est de choisir le seuil  $\rho$  en fonction du niveau de luminosité au point considéré. Pour cela, nous proposons d'utiliser une fonction (l'équation

2.21) basée sur la *loi d'Adrian* [Adr89]. La fonction initiale est utilisée pour calculer la sensibilité relative au contraste. Elle dépend de nombreux paramètres tels que la luminance du fond, la taille de la cible considérée, l'âge de l'observateur, la durée de l'observation, etc. Nous proposons une version très simplifiée de cette fonction :

$$\rho = (0.01 \cdot L + 0.05) \cdot \frac{\rho_{\text{mini}} \cdot 100}{L}, \quad (2.21)$$

où  $0 < \rho_{\text{mini}} < 1$  est la précision minimum requise par l'utilisateur et  $L$  est la luminance de l'enregistrement dans la direction de l'observateur. Avec ce modèle, une valeur de luminance faible sera associée à un seuil plus fort et ainsi la précision sera plus faible. En effet, l'observateur sera moins sensible à quelques défauts de calcul dans ces zones de faible luminance. À l'inverse, une valeur de luminance forte augmentera la précision en diminuant la valeur du seuil. Ce seuil tendra alors vers  $\rho_{\text{mini}}$ .

### 2.5.2 Réutilisation du cache en cours de calcul

Lors de la création d'un nouvel enregistrement, la construction des chemins (lancer les rayons et déterminer les visibilitées, choisir les directions de réflexion/transmission...) est la partie la plus coûteuse en temps de calcul. Une façon simple de limiter ce nombre de rayons est de réutiliser, en cours de construction d'un chemin, les enregistrements existants dans le cache. Lorsqu'un chemin heurte une surface où il est possible d'utiliser des enregistrements existants pour déterminer l'éclairage, il n'est pas nécessaire de continuer le chemin. Le principe est montré dans la figure 2.9. Il est possible d'utiliser cette technique seulement si les enregistrements stockent toutes les contributions<sup>1</sup> (directes et indirectes). Il n'est ainsi pas nécessaire de connecter avec la source choisie les surfaces où l'interpolation avec le cache est possible. L'apport du chemin pour l'enregistrement en cours de calcul est calculé à l'aide de l'éclairage interpolé avec les enregistrements existants. Plus il y aura d'enregistrements dans le cache, plus le calcul de l'éclairage d'un nouvel enregistrement deviendra rapide. En effet, les chemins deviennent plus courts, moins de rayons sont nécessaires et enfin la méthode de tracé de chemins converge plus vite. Les derniers enregistrements sont dans ce cas moins coûteux en temps de calcul que les premiers.

## 2.6 Résultats

### Commentaires généraux sur les résultats

Dans le cas de la simulation d'éclairage physiquement réaliste, les interactions lumineuses doivent être simulées le plus précisément possible. L'objectif est d'obtenir des résultats le plus cohérents possible avec la réalité physique. Pour les résultats présentés dans cette partie, nous nous sommes placés dans des cas d'études d'éclairage telles qu'elles peuvent être réalisées au *CSTB*. Tous les résultats ont été obtenus sans aucune restriction sur le nombre de rebonds indirects. Les quantités physiques, telles que la luminance et l'éclairage, sont représentées à l'aide d'un spectre décomposé en 40 longueurs d'onde. Les sources de lumière et leurs caractéristiques photométriques sont

<sup>1</sup>. Toutefois, notons qu'elle peut être utilisée avec des enregistrements ne stockant que les contributions indirectes. Un rayon d'ombre (*shadow ray*) devra être lancé vers la source de lumière choisie. Le principe est dans ce cas un peu moins efficace même s'il reste néanmoins intéressant.

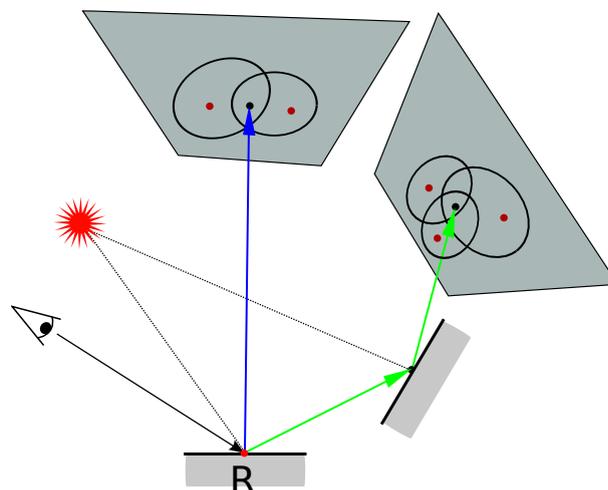


FIGURE 2.9 – Réutilisation des enregistrements existants dans le cache durant le calcul de l'éclairage pour un nouvel enregistrement  $R$ . Le chemin bleu nécessite seulement 2 rayons alors que le chemin vert a besoin de 4 rayons. Notons qu'un chemin complet comportant  $n$  intersections, sans réutilisation d'enregistrements existants, nécessite  $2n - 1$  rayons pour calculer sa contribution.

définies par des fichiers *IES* (Illuminating Engineering Society of North America) (voir le standard [IES02]).

Nous avons comparé notre méthode de cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs, que nous appellerons dans cette partie *ARIC* (pour *Adaptive Records for Irradiance Caching*) pour des soucis de concision, à plusieurs autres techniques existantes. Le tracé de chemins bidirectionnel ou *BPT* (pour *Bidirectional Path Tracing* [VG94, Ve98] et [LW93]) a d'abord été considéré. Nous nous sommes aussi intéressés à deux versions de la méthode de cache d'éclairage. La première méthode considérée (que nous appellerons *MDIC* pour *Minimum Distance Irradiance Caching*) utilise des enregistrements à zone d'influence circulaire dont le rayon est défini à l'aide de la distance minimum aux objets les plus proches. La seconde méthode (que nous appellerons *HMDIC* pour *Harmonic Mean Distance Irradiance Caching*) utilise elle aussi des zones circulaires, dont le rayon est défini à l'aide de la moyenne harmonique des distances aux objets les plus proches, ainsi que les techniques de *neighbor clamping* et d'*adaptive caching* proposées dans Křivánek *et al.* [KBPv06]. Ce test diminue la zone d'influence d'un enregistrement si sa contribution en un point donné introduit une discontinuité dans l'interpolation. La densité du cache s'adapte en fonction des fortes variations d'éclairage mais peut introduire une trop forte concentration en certains endroits de la scène. Cette technique peut bien entendu être exploitée avec notre méthode. Cependant, les résultats présentés dans cette partie ont été obtenus sans l'utilisation de cette optimisation. Pour ces deux méthodes de cache d'éclairage (*MDIC* et *HMDIC*), l'éclairage direct n'est pas stocké dans les enregistrements. Il sera donc recalculé durant la phase de rendu.

Toutes les méthodes comparées à la notre ont été implémentées dans le moteur de rendu de *Phanie* utilisant ainsi le même lancer de rayons. Les résultats ont été obtenus sur une machine Intel Core 2 Q9550 (2.83 GHz), en n'utilisant qu'un seul cœur du processeur, avec 4 Go de mémoire vive et fonctionnant avec un système d'exploitation linux 64 bits. D'autres résultats sont donnés à titre d'exemples page 72 afin d'illustrer l'utilisation de notre méthode dans différentes situations de simulations.

### Résultats pour la scène de la boîte de Cornell

La figure 2.10 montre des rendus obtenus dans la scène de la boîte de Cornell avec les quatre méthodes mentionnées. La résolution des images résultats est de  $800 \times 800$  pixels. Les statistiques des résultats sont données dans le tableau 2.1.

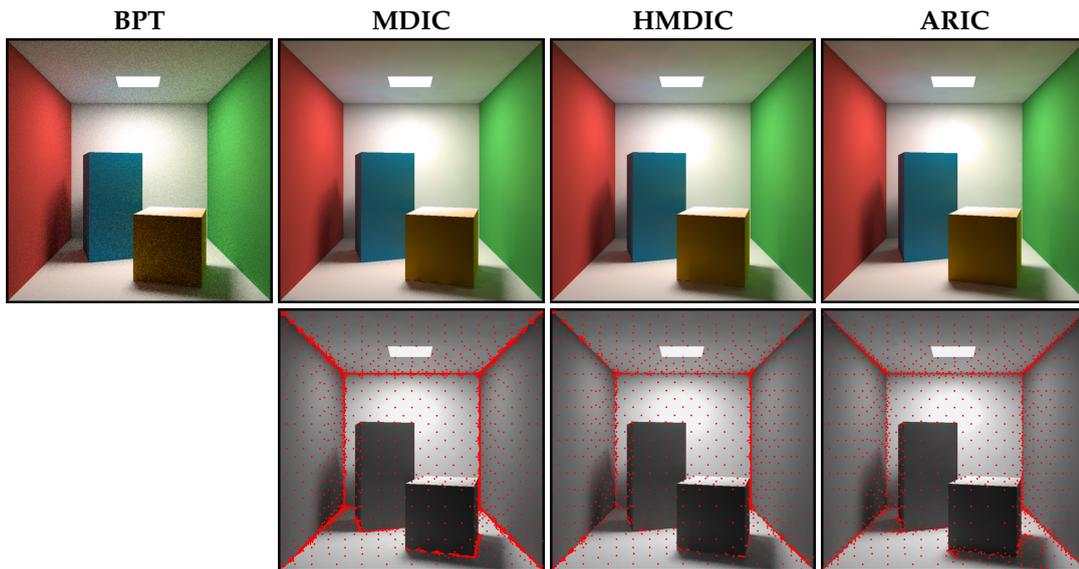


FIGURE 2.10 – Quatre vues de la scène de la boîte de Cornell obtenues avec quatre méthodes différentes. Avec la méthode à enregistrements adaptatifs (sur la droite), la densité d'enregistrements est plus forte dans les zones où les gradients sont forts (ici sur les bords des ombres).

|       | # enregistrements créés | Remplissage du cache | Phase de rendu | Temps total |
|-------|-------------------------|----------------------|----------------|-------------|
| BPT   | -                       | -                    | 81             | 81          |
| MDIC  | 2798                    | 200                  | 47             | 247         |
| HMDIC | 1443                    | 102                  | 47             | 149         |
| ARIC  | <b>1371</b>             | <b>74</b>            | <b>6</b>       | <b>80</b>   |

TABLE 2.1 – Statistiques des rendus dans la scène de la boîte de Cornell : le remplissage du cache correspond au temps (exprimé en secondes) mis pour créer les enregistrements et les stocker dans le cache. Cette phase n'existe pas dans le cas du BPT. La phase de rendu correspond au temps mis pour créer l'image résultat (i.e. l'interpolation des enregistrements et l'évaluation des contributions directes pour les méthodes MDIC et HMDIC).

La méthode du BPT a été calibrée pour prendre le même temps que notre méthode (12 échantillons par pixel). Les méthodes de cache d'éclairage ont été paramétrées avec l'objectif d'obtenir des résultats de qualité visuellement semblable. Pour pouvoir évaluer et comparer les méthodes, les mêmes critères de convergence pour l'échantillonnage de Monte Carlo ont été utilisés pour chacune d'elles. Pour les méthodes MDIC et HMDIC, les contributions directes ont été recalculées pour tous les pixels avec 30 rayons d'échantillonnage de la source de lumière surfacique. La paramètre  $a$ , non utilisé pour notre méthode, est fixé à 0.4 pour la méthode HMDIC alors qu'il est égal à 1 pour la méthode MDIC. Nous pouvons tout d'abord remarquer que le nombre d'enregistrements est plus élevé dans les méthodes MDIC et HMDIC. La répartition des enregistrements est aussi plus intéressante avec notre méthode. En effet, les surfaces restent relativement peu échantillonnées (puisque les gradients y sont relativement faibles), les coins de la

scène ne sont pas sur-échantillonnés (à l’instar de la méthode *HMDIC* qui est pourtant avantageée puisqu’elle utilise la moyenne harmonique des distances aux objets les plus proches) et enfin, les enregistrements sont concentrés autour des ombres pour mieux capturer les variations brutales d’éclairage. Pour la scène de la boîte de Cornell, ces variations brutales proviennent de l’éclairage direct. Nous pouvons aussi dire, dans le cas de cette scène très simple, que pour un résultat de qualité semblable, notre méthode de cache d’éclairage à enregistrements adaptatifs est plus performante que les autres en terme de temps de calcul. En effet, puisque l’éclairage direct est stocké dans les enregistrements, la phase de rendu se voit considérablement accélérée. Nous pouvons aussi noter que le temps de calcul pour un enregistrement est plus rapide pour notre méthode que pour les autres. Là encore, le fait de stocker l’éclairage direct et de pouvoir réutiliser les enregistrements existants durant le calcul d’un nouvel enregistrement (voir la section 2.5.2 page 64) apporte un gain de temps non négligeable.

La figure 2.11 montre la différence entre une image générée avec notre méthode et une image de référence.

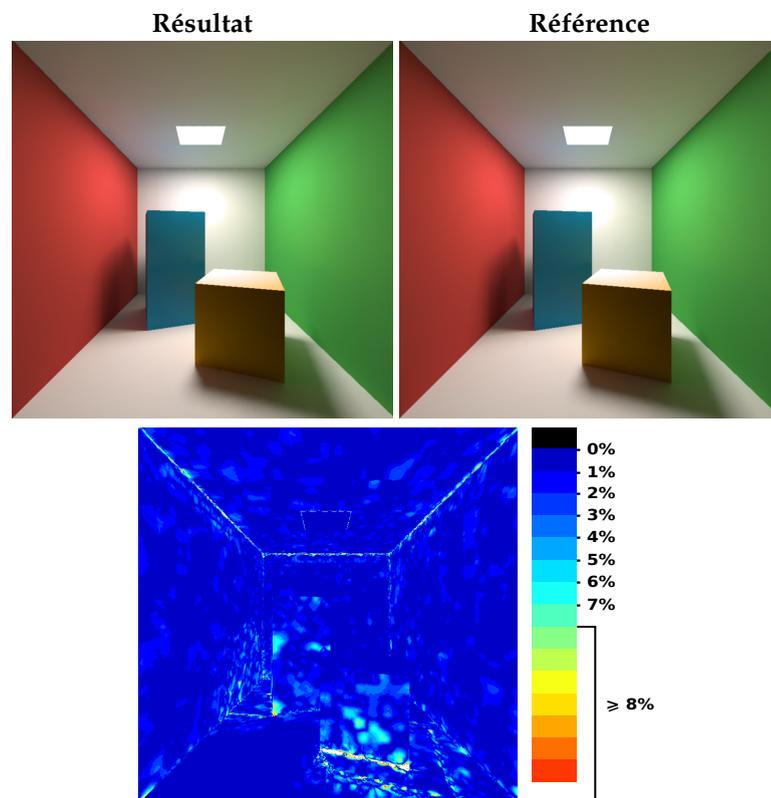


FIGURE 2.11 – Différence relative entre un résultat obtenu avec notre méthode et un résultat de référence : la moyenne des différences relatives est de moins de 1%.

L’image, d’une résolution de  $800 \times 800$  pixels, a été obtenue avec 1300 enregistrements. L’image résultat et l’image de référence sont comparées pixel à pixel. La moyenne des différences relatives pour tous les pixels dont la luminance est non nulle est de moins de 1%. La plupart des erreurs sont localisées sur les bords des ombres : un seuil  $\rho_{mini}$  plus faible est une solution pour résoudre ce problème. Les erreurs localisées sur les surfaces peuvent être corrigées avec un meilleur échantillonnage de Monte Carlo.

Nous pouvons constater que notre méthode se comporte très bien avec une scène sim-

ple. Nous allons maintenant essayer des scènes à la géométrie plus complexe et où les conditions d'éclairage peuvent mettre à défaut notre méthode.

### Résultats pour la scène *lama, tore et grille*

La scène *lama, tore et grille* illustrée dans la figure 2.12 est composée de surfaces courbes (concaves et convexes) et présente des changements d'éclairage hautes fréquences.

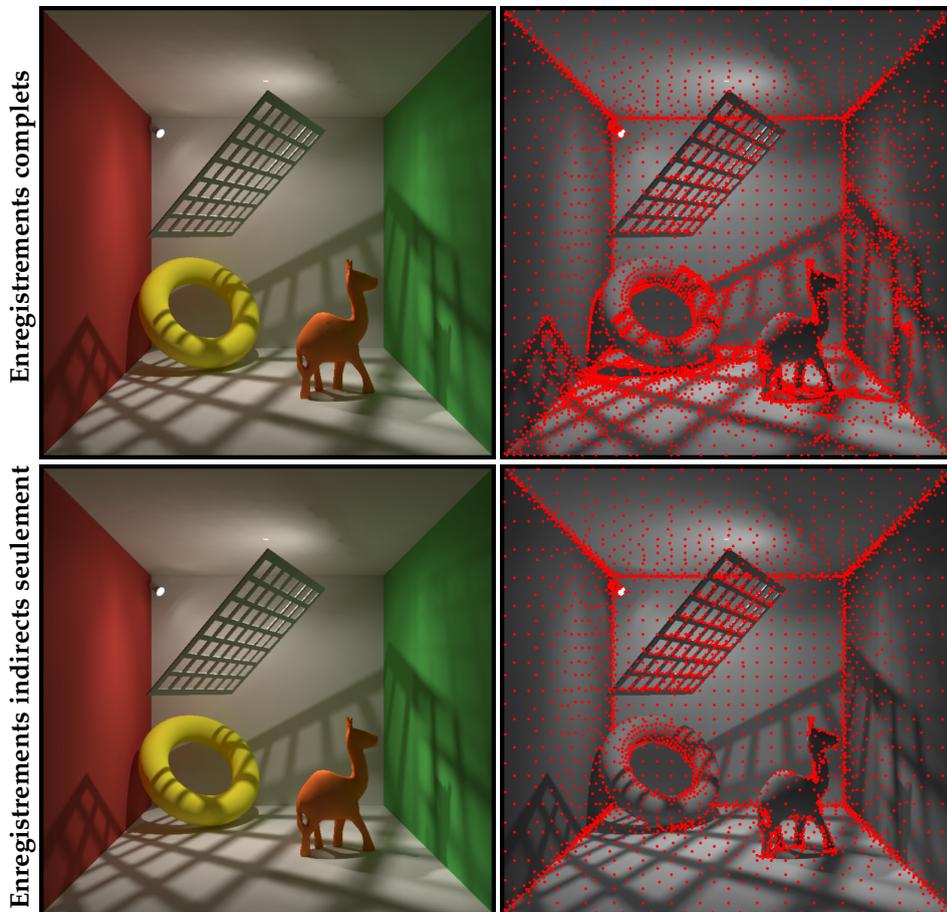


FIGURE 2.12 – Une scène composée de surfaces courbes (concaves et convexes) et présentant des changements d'éclairage hautes fréquences. La première ligne est calculée avec des enregistrements adaptatifs stockant les contributions directes et indirectes. La seconde ligne est quant à elle calculée avec des enregistrements adaptatifs ne stockant que les contributions indirectes (l'éclairage direct est recalculé durant la phase de rendu). Le résultat de la seconde ligne offre une meilleure qualité mais nécessite deux fois plus de temps de calcul.

Les changements d'éclairage hautes fréquences, dus à des sources de lumière très petites, sont difficiles à capter avec la méthode de cache d'éclairage. Certains effets peuvent ne pas être détectés ou mal restitués (comme l'ombre projetée de la grille dans les images de la figure 2.12). De plus, avec des petites sources de lumière, l'échantillonnage de Monte Carlo pur, c'est-à-dire sans cache d'éclairage, semble à priori meilleur puisque peu de rayons sont nécessaires pour calculer l'éclairage direct. Dans de telles situations, stocker les contributions directes pourrait sembler moins intéressant. La figure 2.12 compare deux versions de notre méthode *ARIC* : la première avec des enregistrements stockant l'ensemble des contributions (directes et indirectes) et la sec-

onde utilisant des enregistrements ne stockant que les contributions indirectes. Dans le cas de la seconde version, l'éclairage direct sera recalculé durant la phase de rendu. Les deux versions de notre méthode utilisent les mêmes paramètres. Puisque notre méthode adapte la densité du cache dans les régions où les variations d'éclairage sont fortes, les résultats présentés dans la figure 2.12 montrent deux distributions d'enregistrements différentes. Pour la première version, les enregistrements sont concentrés autour des ombres. Plus d'enregistrements sont donc nécessaires dans la première version (6016 enregistrements) que dans la seconde version (3241 enregistrements). Ceci est dû aux changements d'éclairage hautes fréquences c'est-à-dire à la complexité des ombres et de leur grand nombre. Toutefois, la première version nécessite deux fois moins de temps de calcul que la seconde version avec exactement les mêmes paramètres. Nous pouvons donc conclure que dans le cas de forts changements d'éclairage dus à des sources indirectes ou directes, notre méthode se comporte vraiment bien et offre des résultats de bonne qualité.

La figure 2.13 montre l'impact du seuil  $\rho$  sur un zoom de la scène *lama, tore et grille* illustrée dans la figure 2.12. Ces résultats sont calculés avec notre méthode *ARIC* avec des enregistrements stockant les contributions directes et indirectes.

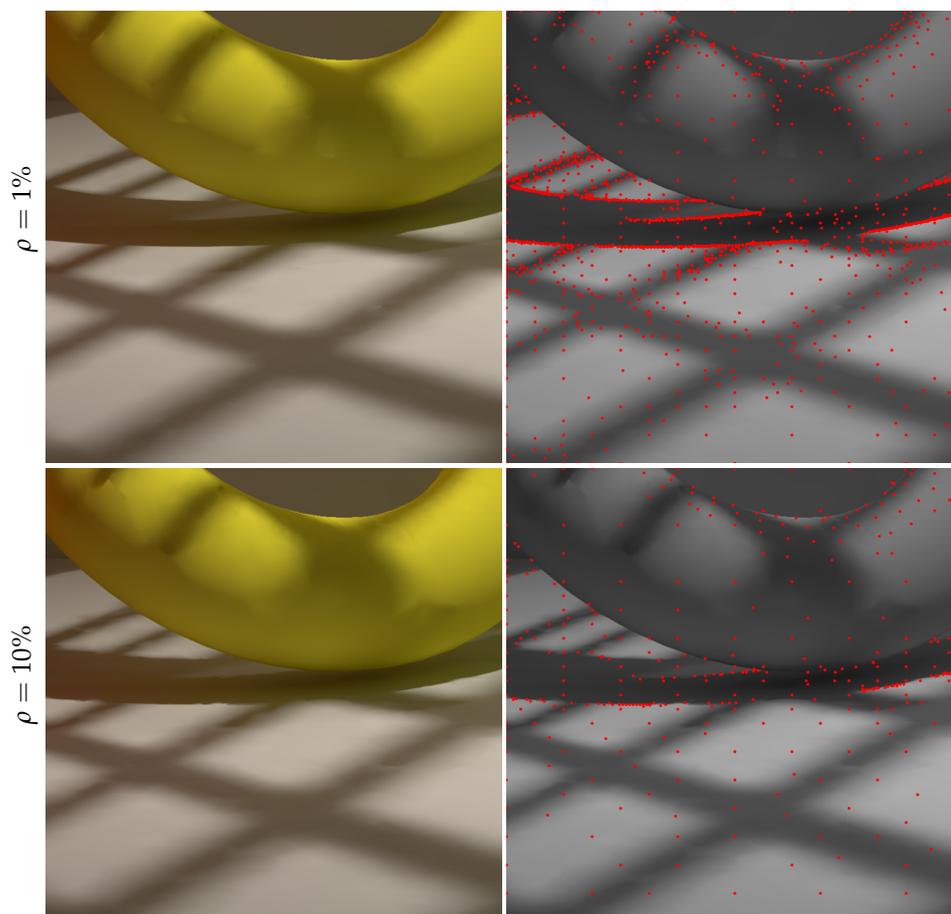


FIGURE 2.13 – L'impact du seuil  $\rho$  sur la qualité des effets hautes fréquences et sur la distribution des enregistrements.

Les deux résultats sont obtenus avec les mêmes paramètres hormis le seuil  $\rho$  qui diffère. Un seuil restrictif (par exemple  $\rho = 1\%$ ) permet de concentrer la distribution des

enregistrements autour des forts gradients d'éclairage alors qu'un seuil permissif (par exemple  $\rho = 10\%$ ) peut rater de tels effets. Dans le cas d'enregistrements complets avec un seuil permissif dans une scène composée de variations d'éclairage hautes fréquences, des défauts d'interpolation apparaissent sur le bord des ombres. Un seuil plus restrictif résout le problème en ajoutant des enregistrements autour de ces zones.

### Résultats pour la scène de la villa Arpel

Après avoir testé notre méthode avec des scènes « expérimentales » et relativement simples, nous avons essayé d'obtenir quelques résultats dans une scène plus proche de ce qui peut être utilisé dans le cas de la simulation d'éclairage. La figure 2.14 montre deux zooms de la scène de la villa Arpel générés avec notre méthode et les deux autres méthodes de cache d'éclairage.

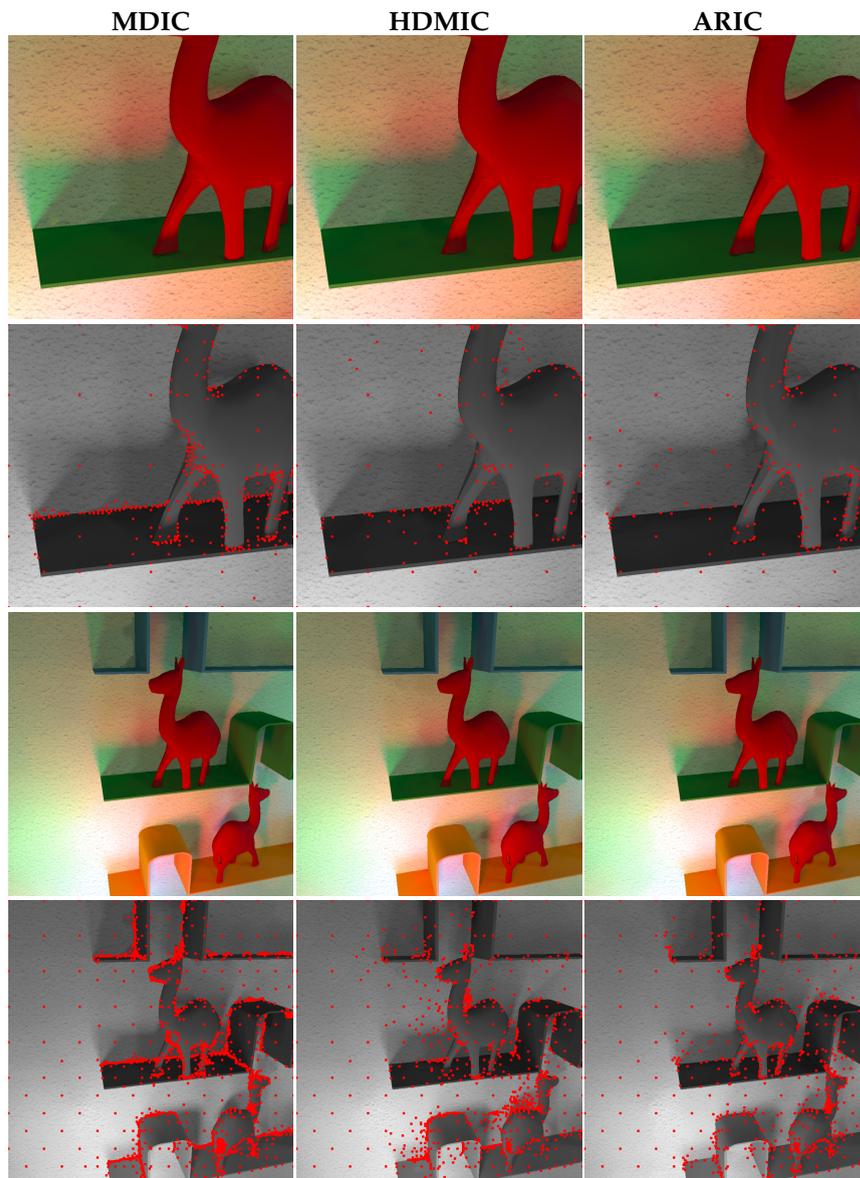


FIGURE 2.14 – 2 vues de la scène de la villa Arpel avec différentes méthodes de rendu. Les enregistrements sont représentés en rouge sur les images en niveaux de gris.

Les statistiques des rendus sont données dans le tableau 2.2 pour les zooms de la figure 2.14.

|                              |       | # enregistrements | Remplissage du cache | Temps total       |
|------------------------------|-------|-------------------|----------------------|-------------------|
| 1 <sup>er</sup> point de vue | MDIC  | 380               | 7min. 59s.           | 2h. 47min.        |
|                              | HMDIC | 197               | 3min. 3s.            | 2h. 40min. 30s.   |
|                              | ARIC  | <b>209</b>        | <b>3min. 10s.</b>    | <b>3min. 16s.</b> |
| 2 <sup>e</sup> point de vue  | MDIC  | 1247              | 18min. 15s.          | 2h. 34min. 6s.    |
|                              | HMDIC | 798               | 12min. 9s.           | 2h. 56min. 24s.   |
|                              | ARIC  | <b>523</b>        | <b>6min. 50s.</b>    | <b>6min. 57s.</b> |

TABLE 2.2 – Statistiques des rendus pour la figure 2.14.

L'image de la figure 2.15 illustre quant à elle une vue plus générale de la scène *villa Arpel* rendue avec notre méthode de cache d'éclairage avec des enregistrements adaptatifs. La résolution des images est de  $800 \times 800$  pixels pour les vues de la figure 2.14 et de  $1920 \times 1080$  pixels (correspondant à ce qu'on appelle le *full HD*) pour la figure 2.15.



FIGURE 2.15 – Vue plus générale de la scène de la villa Arpel rendue avec notre méthode de cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs complets (contributions directes et indirectes).

La scène est composée d'un éclairage artificiel complexe (11 sources de lumière avec 760 polygones et différents spectres colorés) et un ciel couvert pour les conditions d'éclairage naturel. Les caractéristiques du ciel sont issues du modèle de ciel standard CIE (voir les standards CIE dans [CIE96]). Étant donné le nombre conséquent de sources lumineuses, il est particulièrement intéressant de pouvoir stocker les contributions directes dans les enregistrements afin de limiter les temps de calcul, notamment de la phase de rendu. Pour les enregistrements, les contributions directes sont calculées à l'aide de 4000 rayons d'ombrage au total. Pour les images de la figure 2.14, le paramètre  $a = 0.4$  pour la méthode HMDIC et  $a = 1$  pour la méthode MDIC. Le cache de l'image de la figure 2.15 a été calculé en 1 heure et 6 minutes (et 33 secondes pour la phase de rendu) avec 6962 enregistrements, alors que la méthode HMDIC a pris 1 heure et 30 minute pour le calcul du cache (avec 6656 enregistrements) et environ 8 heures pour la phase de rendu. Comme nous pouvons le voir dans la figure 2.14, notre méthode

propose une meilleure répartition des enregistrements tout en diminuant leur nombre. Dans le cas de la vue générale de la figure 2.15, notre méthode crée plus d'enregistrements que la méthode *HMDIC* mais permet tout de même d'accélérer considérablement les temps de calcul.

### D'autres résultats

Nous donnons ici quelques illustrations montrant des résultats obtenus avec notre méthode de cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs dans des situations de simulations diverses. La figure 2.16 montre quatre images d'une scène de temple asiatique. Cette scène n'est composée que d'objets diffus (certains avec du *bump mapping*), éclairée par plusieurs sources artificielles et un ciel couvert CIE.

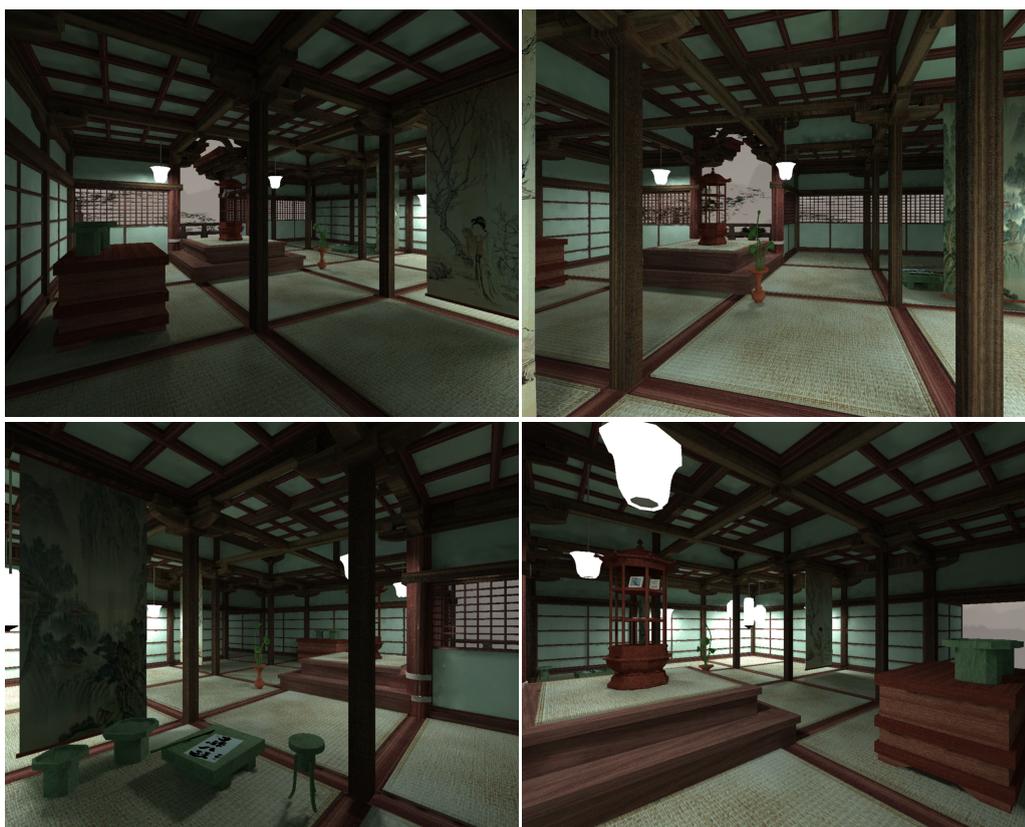


FIGURE 2.16 – 4 vues de la scène du temple asiatique (tous les objets sont diffus) obtenues avec notre méthode de cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs.

Notre méthode peut aussi s'intégrer dans un calcul d'illumination globale en présence de matériaux brillants. La figure 2.17 montre une scène avec une sphère dont le matériau est défini à l'aide d'une BRDF à lobes généralisés de Lafortune *et al.* [LFTG97] et une statuette de lama dont le matériau est un vitrage rouge. Le traitement des matériaux brillants est réalisé au cours de la phase de rendu à l'aide d'une méthode de Monte Carlo utilisant un échantillonnage par importance. Lors de ce tirage, si le chemin intersecte une surface recouverte par des enregistrements, ceux-ci peuvent être utilisés pour définir l'apport du chemin (voir la section 2.5.2 page 64). Enfin, la figure 2.18 montre le résultat d'une simulation en extérieur réalisée sur la scène de la *villa Arpel*. Les mêmes conditions de simulation que pour les résultats des figures 2.14 et 2.15 ont été utilisées.

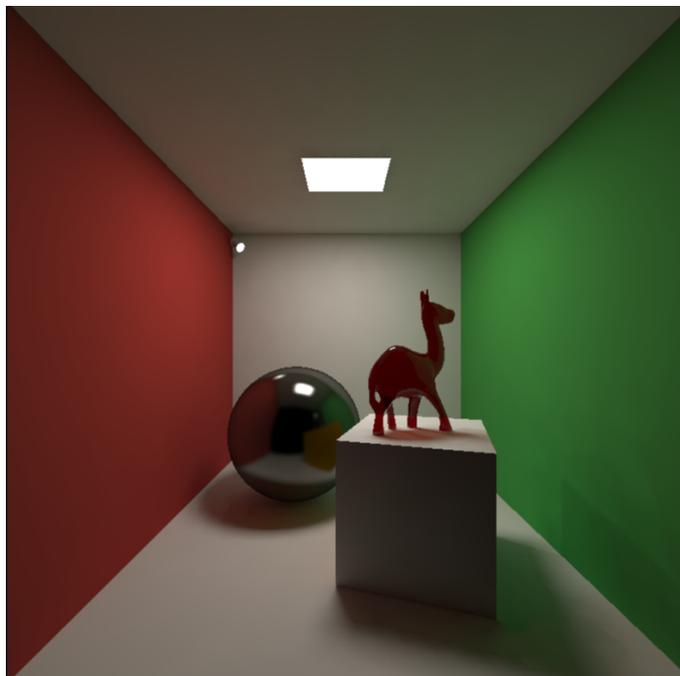


FIGURE 2.17 – La méthode de cache d'éclairage adaptatif peut être utilisée dans des simulations d'éclairage complètes notamment en présence d'objets brillants (ici le matériau de la sphère est une BRDF à lobes généralisés de Lafortune et al. [LFTG97]) et transparents (la statuette du lama est composée d'un vitrage rouge).



FIGURE 2.18 – La scène de la villa Arpel vue de l'extérieur : notre méthode permet de réaliser des simulations dans des environnements ouverts.



---

## Conclusion

CETTE SECONDE PARTIE s'est intéressée à la simulation d'éclairage pour les surfaces seulement. L'étude des méthodes existantes et l'analyse de leurs forces et leurs faiblesses, dans le contexte de la simulation d'éclairage réaliste, a orienté nos travaux vers le développement d'une nouvelle méthode de résolution de la problématique d'illumination globale. Cette méthode s'appuie sur la méthode de cache d'éclairage de Ward *et al.* [WRC88]. Elle permet de contrôler la densité du cache en fonction de la géométrie mais aussi en fonction des variations d'éclairage. Pour cela, il a été nécessaire d'introduire des enregistrements dont la forme de la zone d'influence, plus complexe qu'un simple cercle, prend en compte les changements de géométrie et d'éclairage sur les surfaces. Cette approche évite une trop forte concentration d'enregistrements dans les zones où cela n'est pas nécessaire (dans les bords de la scène ou encore lorsque la variation d'éclairage est très faible). Afin de mieux reconstruire les fortes variations d'éclairage, de nouveaux gradients de translation et de rotation ont été introduits. Lorsque ces gradients ne sont toutefois pas suffisants, le contrôle de la forme des enregistrements, en diminuant leur zone d'influence dans les directions adéquates, autorise une anticipation plus fine en cas de très fortes variations. Nous avons montré que ces différentes techniques étaient efficaces et permettaient d'intégrer l'éclairage direct, qui peut introduire des cas extrêmes de variations brutales d'éclairage, dans les enregistrements. Stocker les contributions directes, et ainsi accélérer la phase de rendu, peut devenir très intéressant dans le cas de la simulation d'éclairage réaliste. En effet, la manipulation de scènes géométriquement complexes et la prise en compte de photométries réalistes de sources artificielles et naturelles peuvent devenir très contraignantes pour les méthodes de simulations existantes. De plus, l'intégration du direct dans les enregistrements est très intéressante pour une simulation d'éclairage dynamique puisqu'il ne sera pas nécessaire de recalculer l'éclairage direct pour de nombreuses parties de l'image suivante dans l'animation. Les effets de *flickering* peuvent ainsi être évités. Enfin, cette méthode a fait l'objet d'une validation de la précision des résultats pour pouvoir être utilisée dans des études d'éclairage. Nous avons comparé des résultats obtenus avec notre méthode sur des scènes de validation avec ceux obtenus avec la méthode de *Radiosité* calibrée avec un maximum de précision. Avec des critères de précision permettant des temps de calcul raisonnables (c'est-à-dire largement inférieurs à la *Radiosité*) nous avons constaté une erreur de moins de 1%.

Les différents travaux présentés dans cette partie ont fait l'objet d'une soumission d'article à la revue *Computer Graphics Forum*. Au moment de la rédaction de ce document, nous sommes toujours dans l'attente d'une réponse. De plus, notre méthode a été implémentée dans le logiciel de photo-simulation *Phanie* et utilisée dans le cadre d'études d'éclairage réalisées au sein du *CSTB*.

La méthode proposée dans cette première partie a aussi été développée dans le but de

répondre à la problématique de l'illumination globale en présence de milieux participatifs. Quelques modifications sont cependant nécessaires afin d'adapter la méthode de cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs à des environnements enfumés. La partie suivante aborde donc les aspects concernant la simulation d'éclairage en présence de milieux participatifs.



---

## Troisième Partie

### LES MILIEUX PARTICIPATIFS



# Travaux connexes

QUELQUES MÉTHODES À BASE DE TRACÉ DE CHEMINS ont été présentées dans le chapitre 3.1 de la première partie de ce document. Cependant, des méthodes plus efficaces ont été développées ces dernières années. Nous ne nous intéresserons pas aux méthodes faisant l'impasse sur certaines interactions lumineuses à l'intérieur du milieu participatif (par exemple les méthodes ne prenant en compte que la diffusion simple) puisque l'objectif est de proposer une technique de simulation la plus complète possible. Une des méthodes les plus utilisées aujourd'hui pour la simulation d'éclairage en présence de milieux participatifs est le *Photon Mapping* et ses différentes évolutions. Une méthode basée sur le cache de luminance a été proposée dernièrement. Ces méthodes, stockant certaines informations concernant l'éclairage dans le volume et accélérant ainsi les temps de calcul, nous ont paru de prime abord être des options intéressantes pour répondre au problème initial. Nous détaillerons ici ces différentes techniques et nous verrons quels sont leurs avantages et leurs inconvénients.

## 1.1 Méthodes à base de *Photon Mapping*

### 1.1.1 La méthode de base

En 1998, Jensen et Christensen [JC98] proposent une extension du *Photon Mapping* afin de prendre en compte les milieux participatifs. Le *Volume Photon Mapping* permet de manipuler des milieux homogènes ou hétérogènes ainsi que la diffusion anisotropique. Il prend aussi en compte les diffusions simples et multiples. L'algorithme reprend les deux passes du *Photon Mapping* (voir la section 2.2.4 page 31). Durant la phase de tracé de photons, les interactions avec une surface sont gérées de la même façon que le *Photon Mapping* classique. Une troisième carte de photons est utilisée pour stocker les photons qui interagissent avec le milieu participatif. Lorsqu'un photon pénètre dans ce type de milieu, la distance moyenne  $d$  qu'il parcourra avant un événement est donnée par :

$$d = \frac{-\log \xi}{\kappa} \quad (1.1)$$

où  $\xi \in ]0, 1]$  est un nombre aléatoire distribué uniformément. Il s'agit ici de réaliser un échantillonnage par importance. Le flux du photon n'aura donc pas besoin d'être réduit après avoir subi une diffusion. Si le photon interagit avec le milieu, il faut savoir s'il est absorbé ou diffusé. Pour cela, on utilise une roulette russe afin de déterminer quel événement interviendra.

$$\xi \in ]0, 1] \rightarrow \begin{cases} \xi \leq \Lambda & \text{Le photon est diffusé} \\ \xi \geq \Lambda & \text{Le photon est absorbé} \end{cases} \quad (1.2)$$

avec  $\Lambda = \sigma/\kappa$ . Les mêmes procédés sont utilisés pour la construction d'un chemin dans une méthode de type tracé de chemins. Si le photon est diffusé, il continue avec le même flux dans une direction calculée à l'aide de la fonction de phase du milieu. La deuxième phase correspond toujours à la phase de rendu. L'estimation de la luminance sur les surfaces se fait comme dans le *Photon Mapping* standard. Il faut maintenant pouvoir estimer la luminance dans le milieu participant. L'estimation de la luminance incidente  $L_i$  dans le volume est réalisée en utilisant la relation entre le flux et la luminance :

$$L_i(x, \vec{\omega}) = \frac{d^2\Phi_i(x, \vec{\omega})}{\sigma(x)d\vec{\omega}dV}. \quad (1.3)$$

Suivant l'équation 3.3 page 37, la composante définissant la diffusion de luminance incidente  $L_i$  est donnée par :

$$\frac{dL_i(x, \vec{\omega})}{dx} = \sigma(x) \int_{\Omega} \rho(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) L(x, \vec{\omega}') d\vec{\omega}'. \quad (1.4)$$

Si on intègre l'équation 1.3 dans l'équation 1.4, on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{dL_i(x, \vec{\omega})}{dx} &= \sigma(x) \int_{\Omega} \rho(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) \frac{d^2\Phi_i(x, \vec{\omega}')}{\sigma(x)d\vec{\omega}'dV} d\vec{\omega}' \\ &= \int_{\Omega} \rho(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) \frac{d^2\Phi_i(x, \vec{\omega}')}{dV}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

L'estimation de la densité locale de photons dans le volume permet d'approcher cette valeur :

$$\begin{aligned} \frac{dL_i(x, \vec{\omega})}{dx} &\approx \sum_{p=1}^n \rho(x, \vec{\omega}'_p, \vec{\omega}) \frac{\Delta\Phi_p(x, \vec{\omega}'_p)}{\Delta V} \\ &\approx \sum_{p=1}^n \rho(x, \vec{\omega}'_p, \vec{\omega}) \frac{\Delta\Phi_p(x, \vec{\omega}'_p)}{\frac{4}{3}\pi r^3} \end{aligned} \quad (1.6)$$

avec  $n$  le nombre de photons choisi pour l'estimation,  $r$  la distance entre  $x$  et le photon le plus éloigné.  $\Delta V$  est assimilé à la sphère  $\frac{4}{3}\pi r^3$  contenant les  $n$  photons. Pour la phase de rendu, un rayon est lancé depuis l'observateur à travers un pixel. Si le rayon intersecte une surface, l'approche standard du *Photon Mapping* est utilisée. Si le rayon pénètre dans un milieu participatif, la luminance est calculée avec un lancer de rayons incrémental et adaptatif (*adaptive ray marching*). Pour chaque pas, l'équation 3.4 page 37 permet de calculer la luminance au point considéré. À l'intérieur de chaque segment du rayon, la luminance émise et la luminance incidente sont considérées comme constantes. Au point  $x_k$ , la luminance émise dans la direction  $\vec{\omega}$  est donnée par :

$$\begin{aligned} L(x_k, \vec{\omega}) &= \alpha(x_k) L_e(x_k, \vec{\omega}) \Delta x_k \\ &+ \sigma(x_k) L_i(x_k, \vec{\omega}) \Delta x_k \\ &+ e^{-\kappa(x_k)\Delta x_k} L(x_{k-1}, \vec{\omega}) \end{aligned} \quad (1.7)$$

où  $\Delta x_k = |x_k - x_{k-1}|$  est la taille du pas. Cette taille est calculée aléatoirement

$$\Delta(x) = -\frac{\log \xi}{\kappa(x)} \quad (1.8)$$

avec  $\xi \in ]0, 1]$  une variable aléatoire uniforme. La luminance incidente est divisée en deux parties (voir l'équation 3.6 page 37). Une hypothèse est faite concernant la diffusion simple  $L_s$  : seul l'éclairement direct provenant des sources est évalué

$$L_s(x_k, \vec{\omega}) = \sum_{l=1}^L L_l(x, \vec{\omega}'_l) \rho(x, \vec{\omega}'_l, \vec{\omega}) \sigma(x) \quad (1.9)$$

avec  $L$  le nombre de sources et  $\vec{\omega}'_l$  la direction d'éclairement entre la source  $l$  et le point  $x$ . La diffusion multiple est calculée avec l'estimation de densité volumique de l'équation 1.6. En intégrant cette estimation ainsi que l'équation 1.9 dans l'équation 1.7, on obtient l'équation 1.10 permettant d'intégrer la contribution des milieux participatifs.

$$\begin{aligned} L(x_k, \vec{\omega}) &= \alpha(x_k) L_e(x_k, \vec{\omega}) \Delta x_k \\ &+ \sum_{l=1}^L L_l(x_k, \vec{\omega}'_l) \rho(x_k, \vec{\omega}'_l, \vec{\omega}) \sigma(x_k) \Delta x_k \\ &+ \left\{ \sum_{p=1}^n \rho(x, \vec{\omega}'_p, \vec{\omega}) \frac{\Delta \Phi_p(x, \vec{\omega}'_p)}{\frac{4}{3} \pi r^3} \right\} \Delta x_k \\ &+ e^{-\kappa(x_k) \Delta x_k} L(x_{k-1}, \vec{\omega}) \end{aligned} \quad (1.10)$$

La méthode de *Volume Photon Mapping* a été implémentée dans le logiciel de photo-simulation *Phanie* afin de pouvoir l'évaluer. Un exemple de résultat est donné dans l'image de gauche de la figure 1.4 page 84.

### 1.1.2 Les extensions du *Volume Photon Mapping*

D'autres méthodes réutilisant les idées principales du *Volume Photon Mapping* ont été proposées depuis. Dans [GMAS05], Gutierrez *et al.* ajoutent la possibilité de simuler les milieux avec diffusions élastiques (dues aux changements de longueur d'ondes) et les chemins de lumière non-linéaires (effet dû aux indices de réfraction du milieu). En 2005, dans [BPPP05], Boudet *et al.* reprennent les principes du *Volume Photon Mapping* et du *Photon Splatting* pour accélérer les calculs. Une partie de leur algorithme peut être implémenté sur *GPU* (pour *Graphic Processor Unit* soit la carte graphique). En 2008, Jarosz *et al.* [JZ]08a] proposent une nouvelle façon d'estimer la luminance dans les milieux participatifs. Cette estimation se fait en utilisant ce qu'ils appellent les faisceaux de collecte (*beam gathering*). Le tracé de rayon incrémental et adaptatif n'est alors plus nécessaire. Pour ce faire, Jarosz *et al.* reformulent l'équation de transfert radiatif *RTE* sous la forme de l'intégration des chemins décrite par Veach dans [Vea98]. L'équation de mesure (*measurement equation*)  $I$ , décrivant la luminance incidente calculée à partir d'un ensemble de rayons dans la scène est donnée par :

$$I = \int_{\nu} \int_{\Omega 4\pi} W_e(x, \vec{\omega}) L(x, \vec{\omega}) d\vec{\omega} dv(x) \quad (1.11)$$

où  $\nu$  est le domaine dans le volume et  $W_e$  est la fonction d'importance représentant la façon d'interpréter la luminance au point  $x$ . Elle est décrite dans l'espace  $\nu \times \Omega 4\pi$ .  $I$  peut être calculée à l'aide de la méthode d'*importance sampling* :

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_e(x_i, \vec{\omega}_i) \alpha_i \quad (1.12)$$

avec la fonction d'importance  $W_e$  choisie arbitrairement.  $\alpha_i$ , le poids du photon (en fait un chemin aléatoire de longueur  $k_i$  obtenu avec une roulette russe), est calculé avec l'intégration des chemins :

$$\alpha_i = \frac{L_e(x_{i,0}, \vec{\omega}_{i,0})}{pdf(\vec{\omega}_{i,0})} G(x_{i,0}, x_{i,1}) \prod_{j=1}^{k_i-1} \frac{1}{q_{i,j}} \frac{\rho(x_{i,j}, \vec{\omega}_{i,j-1}, \vec{\omega}_{i,j}) G(x_{i,j}, x_{i,j+1})}{pdf(x_{i,j})} \quad (1.13)$$

où  $q_{i,j}$  est la probabilité d'arrêter le chemin au  $j^{\text{e}}$  sommet et  $G(x, y)$  le terme géométrique :

$$G(x, y) = \frac{V(x, y)\sigma(x)\tau(x, y)}{\|x - y\|^2}. \quad (1.14)$$

La figure 1.1 montre un exemple pour le calcul de  $\alpha_i$ . L'algorithme peut être décomposé en deux passes : une passe de lancer de photons et une passe de rendu. Le lancer des photons est identique au *Volume Photon Mapping* classique. Elle génère  $N$  échantillons, ou photons, pondérés. On stocke pour cela, comme dans l'algorithme classique, la position du photon  $x_i$ , la direction incidente  $\vec{\omega}_i$  ainsi que le poids  $\alpha_i$  (qui remplace le flux dans le *Volume Photon Mapping*). Durant la phase de rendu, la luminance incidente est estimée sur l'ensemble du rayon traversant le milieu participatif. Pour chaque photon, un rayon d'influence lui est associé. Ce rayon est calculé à l'aide d'une estimation de densité et permet de définir une sphère englobante du photon. Les photons considérés pour estimer la luminance incidente lors de la phase de rendu sont ceux pour lesquels le rayon intersecte leur sphère englobante (voir la figure 1.2). La contribution de chaque photon ( $\alpha_i, x_i, \vec{\omega}_i$ ) est accumulée en utilisant l'équation (pour plus de détails voir l'article de Jarosz *et al.* [JZJo8a]) :

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i(x, \vec{\omega}, s, x_i, r_i) \tau(x, x'_i) \sigma(x'_i) \rho(x_i, \vec{\omega}, \vec{\omega}_i) \alpha_i \quad (1.15)$$

où  $x'_i = x + t_i \vec{\omega}$  est la projection de la position du photon sur le rayon de direction  $\vec{\omega}$  et  $t_i = (x_i - x) \cdot \vec{\omega}$ .  $K_i$  est la fonction noyau effectuant un filtre pour compenser le fait que le photon ( $\alpha_i, x_i, \vec{\omega}_i$ ) considéré n'est pas exactement sur le rayon :

$$K_i(x, \vec{\omega}, s, x_i, r_i) = \begin{cases} r_i^{-2} K_2(\frac{d_i}{r_i}) & \text{si } d_i \in [0, r_i] \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (1.16)$$

avec  $r_i$  le rayon d'influence du photon et  $d_i$  la distance la plus courte entre le photon et le rayon  $\vec{\omega}$ . Jarosz *et al.* [JZJo8a] utilisent le noyau  $K_2(x) = 3\pi^{-1}(1 - x^2)^2$  (*Silverman's two-dimensional biweight kernel*). L'équation 1.16 représente l'estimation de la luminance par faisceau (voir la figure 1.3) et remplace le lancer de rayons incrémental du *Volume Photon Mapping*. Cependant, pour les milieux hétérogènes dont le coefficient de transmission  $\tau$  évolue dans l'espace, lors de la phase de rendu, il faut parcourir le milieu une première fois pour estimer ce coefficient et l'inscrire dans un table de données (*lookup table*). Cette *lookup table* sera ensuite utilisée pour interpoler la contribution d'un photon.

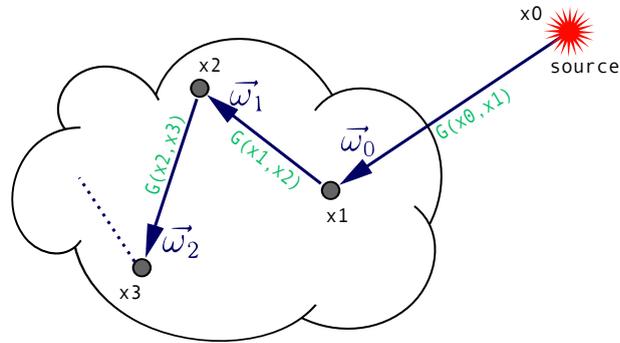


FIGURE 1.1 – Le calcul de  $\alpha_i$ . Pour le photon 3 dans le milieu, son poids sera donné par  $\alpha_3 = \frac{L_e(x_0, \vec{\omega}_0)}{\text{pdf}(\vec{\omega}_0)} G(x_0, x_1) \times \frac{1}{q_1} \rho(x_1, \vec{\omega}_0, \vec{\omega}_1) G(x_1, x_2) \times \frac{1}{q_2} \rho(x_2, \vec{\omega}_1, \vec{\omega}_2) G(x_2, x_3)$

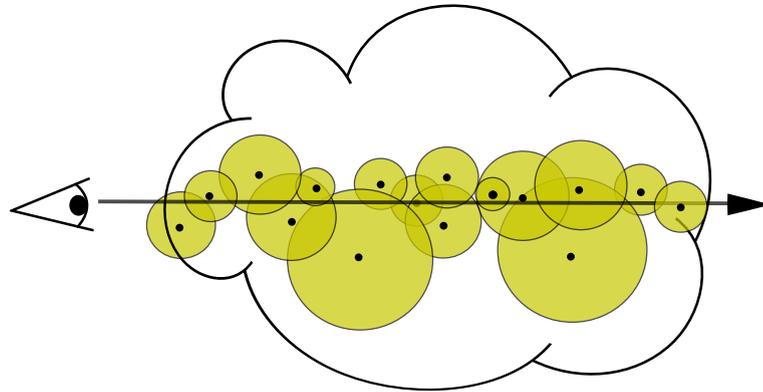


FIGURE 1.2 – Tous les photons, dont la sphère englobante est intersectée par le rayon d'observation, sont directement pris en compte pour calculer la luminance.

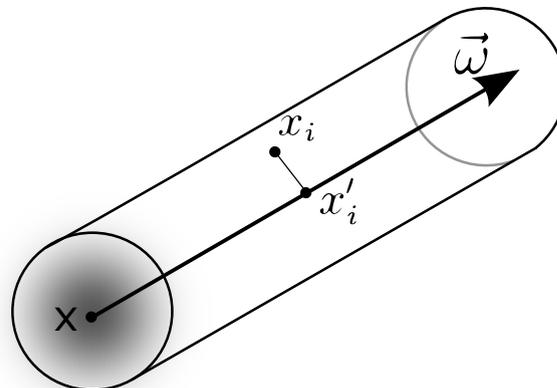


FIGURE 1.3 – L'estimation de la luminance par faisceau :  $x'_i$  se trouve à une distance  $t_i$  du point  $x$  d'entrée dans le milieu participatif le long du rayon  $\vec{\omega}$ . La fonction noyau (en gris) permet de compenser le fait que  $x_i$  n'est pas directement sur le rayon  $\vec{\omega}$ .

Cette méthode d’optimisation du *Volume Photon Mapping* classique nous semblait une piste de travail intéressante. Nous avons donc décidé de l’implémenter dans le logiciel de photo-simulation *Phanie* pour l’évaluer et la comparer à la méthode initiale. La figure 1.4 montre un exemple de résultat obtenu avec la méthode originale et la méthode de Jarosz *et al.* [JZJo8a]. Nous avons effectivement constaté un gain de temps non négligeable avec la méthode de *Beam Radiance Estimate*.

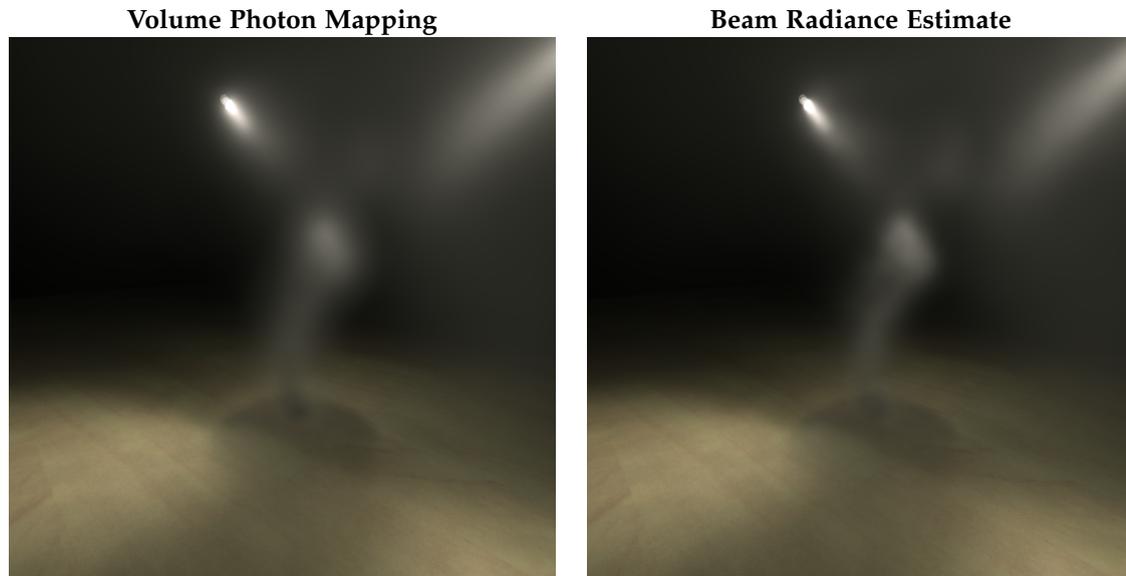


FIGURE 1.4 – Le rendu avec la méthode de *Volume Photon Mapping* a nécessité 1h. 30min. de temps de calcul alors que le rendu avec la méthode de Jarosz *et al.* [JZJo8a] nécessite 30min. Les deux méthodes ont été implémentées dans le logiciel *Phanie* et utilisent la même carte de photons.

### 1.1.3 Conclusion sur les méthodes de *Photon Mapping*

Le principal avantage des méthodes basées sur le *Photon Mapping* est le nombre très important d’effets lumineux qu’elles sont capables de simuler. L’émission des photons est une phase très rapide (de l’ordre de la minute pour la scène de la figure 1.4 où 4000k de photons ont été émis) par rapport à la phase de rendu. Cette dernière phase reste toutefois extrêmement longue et ce malgré l’optimisation présentée par Jarosz *et al.* [JZJo8a]. Cette principale limitation est due à la concentration des photons qui peut ne pas être optimum. En effet, les photons vont avoir tendance à se concentrer dans le volume sous les sources lumineuses. Dans de tels cas, l’intégration des photons le long du rayon ou bien l’intersection des nombreuses boîtes englobantes pour la méthode de Jarosz *et al.* [JZJo8a] deviennent très coûteuses en temps de calcul. Ceci est d’autant plus vrai dans le cas du couloir éclairé par cinq sources présenté dans la section 3.2 page 38. Puisque les photons volumiques vont se concentrer sous les sources de lumière, un rayon traversant le couloir devra traverser cinq nuages extrêmement denses de photons. Ces nuages, de part leur forte densité de boîtes englobantes, seront très coûteux à intersecter ou à intégrer. De plus, pour de bons résultats, il est nécessaire d’émettre de nombreux photons (notamment dans le cas d’une grande scène composée de nombreuses sources) augmentant ainsi la densité des nuages à traverser. Enfin, lorsque le rayon observateur intersecte une surface, le choix de la méthode de calcul de la luminance réfléchi par la surface est là aussi primordial. Nous avons vu dans la partie 2.2.4

page 31 que l'utilisation d'une visualisation directe d'une carte de photons surfaciques, même si elle est assez rapide, offre des résultats bruités. Une technique de type *final gathering* est quant à elle très coûteuse et l'est d'autant plus avec des milieux participatifs. Les rayons secondaires devront intégrer les photons volumiques multipliant ainsi les temps de calcul. Un cache d'éclairage surfacique est une solution intéressante pour accélérer ces temps de calcul mais l'intégration des photons reste très coûteuse et le calcul de l'éclairage des enregistrements le sera aussi. C'est pour toutes ces raisons que nous nous sommes intéressés à des méthodes basées sur le cache d'éclairage étendues aux cas des milieux participatifs.

## 1.2 Radiance Caching

Contrairement au rendu pour les surfaces, peu de méthodes se sont appuyées sur les techniques de cache d'éclairage ou de luminance pour résoudre le problème de l'illumination globale en présence de milieux participatifs. En 2008, Jarosz *et al.* étendent l'algorithme de *Radiance Caching* aux milieux participatifs [JDZJ08]. C'est le seul cas de méthode où des enregistrements dans le volume sont utilisés. En plus de stocker les enregistrements pour les surfaces, il faut alors stocker les enregistrements pour les volumes, avec leurs gradients. La distribution de la luminance diffuse incidente est soumise au même constat que pour les surfaces : elle est « douce » dans une large partie du milieu. Tout comme le *Volume Photon Mapping*, la partie la plus coûteuse de l'évaluation est le calcul de cette luminance diffuse incidente. Celle-ci est séparée en deux composantes : la diffusion simple et la diffusion multiple (voir l'équation 3.6 page 37) pour lesquelles il faut aussi calculer leur gradient. Nous ne détaillerons pas ici le calcul des gradients et nous renvoyons le lecteur à l'article de Jarosz *et al.* [JDZJ08]. La diffusion simple  $L_s$  est écrite comme l'intégrale sur toutes les surfaces de la scène au lieu de l'écriture classique qui est une intégrale sur la sphère centrée autour de  $x$  :

$$L_s(x, \vec{\omega}) = \int_A \rho(x, \vec{\omega}, \vec{\omega}') L_r(x', \vec{\omega}') V(x', x) G(x', x) dx' \quad (1.17)$$

avec

$$G(x', x) = \frac{\vec{n}(x') \cdot \frac{x-x'}{\|x-x'\|}}{\|x-x'\|^2} \quad (1.18)$$

et où  $L_r$  est donnée par

$$L_r = \tau(x, x') L(x', \vec{\omega}'). \quad (1.19)$$

Le calcul de cette luminance diffuse incidente due aux diffusions simples est réalisé à l'aide d'un tracé de rayons de type Monte Carlo :

$$L_s(x, \vec{\omega}) \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\rho(x, \vec{\omega}, \vec{\omega}'_j) L_r(x'_j, \vec{\omega}'_j) V(x'_j, x) G(x'_j, x)}{pdf(x'_j)}. \quad (1.20)$$

Le gradient, faisant intervenir les mêmes termes, sera calculé simultanément. L'approximation de Monte Carlo s'appuie sur un ensemble d'échantillons  $x'_j$  qui sont distribués sur les surfaces (sources et objets) de la scène en fonction de la fonction de densité de probabilités  $pdf(x'_j)$ . Les calculs de l'éclairage direct (provenant alors des sources) et indirect (provenant des objets) sont séparés : des échantillons sont placés sur les sources. Pour les réflexions sur les surfaces, un échantillonnage uniforme de la sphère autour

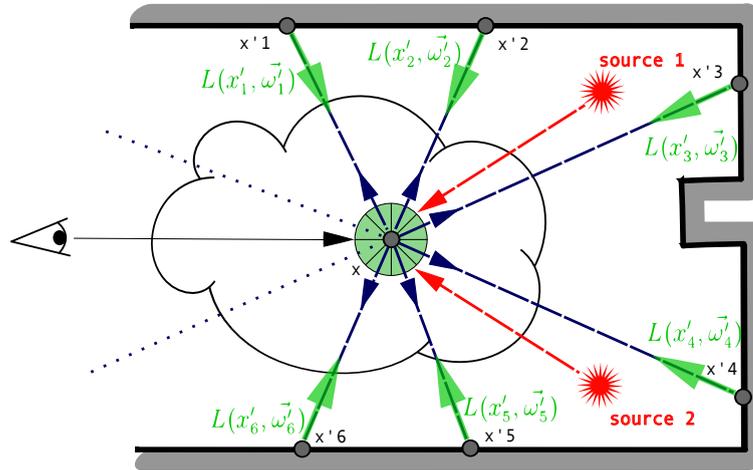


FIGURE 1.5 – Calcul de la luminance due aux diffusions simples. Pour la luminance provenant des sources (en rouge), un point est choisi sur chaque source. Pour la luminance provenant des surfaces (en vert), la sphère centrée autour de  $x$  est échantillonnée uniformément.

du point considéré est utilisé (voir la figure 1.5). Ces informations sont stockées ensuite dans des harmoniques sphériques.

La luminance due aux diffusions multiples  $L_m$  est l'intégrale des luminances provenant de tous les points du milieu participatif :

$$L_m(x, \vec{\omega}) = \int_{\Omega_{4\pi}} \int_0^\infty \rho(x, \vec{\omega}, \vec{\omega}') \tau(x', x) \sigma(x') L_i(x', \vec{\omega}') V(x', x) dr' dx' \quad (1.21)$$

où le domaine d'intégration est paramétré en utilisant les coordonnées polaires  $(r', \vec{\omega}')$  centrées sur  $x$  (donc  $x' = x - r' \vec{\omega}'$ ). L'approximation de Monte Carlo est alors donnée par :

$$L_m(x, \vec{\omega}) \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\rho(x, \vec{\omega}, \vec{\omega}'_j) \tau(x'_j, x) \sigma(x'_j) L_i(x'_j, \vec{\omega}'_j) V(x'_j, x)}{pdf(r'_j) pdf(\vec{\omega}'_j)}. \quad (1.22)$$

La direction  $\vec{\omega}'_j$  est échantillonnée uniformément sur la sphère autour de  $x$  ;  $N$  représentant le nombre d'échantillons sur cette sphère. Pour les événements de diffusion dans le milieu, l'échantillonnage par importance dépendant de la fonction de phase sera utilisé. Enfin, la longueur du segment dans le milieu  $r'_j$  est définie par  $pdf(r'_j) = \kappa(x) e^{-\kappa(x)r'_j}$  (voir la figure 1.6). L'algorithme du cache de luminance pour les milieux participatifs enregistre les valeurs de luminance dans quatre caches différents : un pour les réflexions sur les surfaces, un pour la luminance due aux diffusions simples provenant des surfaces, un pour la luminance due aux diffusions simples provenant des sources de lumière et un dernier pour la luminance due aux diffusions multiples<sup>1</sup>. Pour chaque point à l'intérieur du milieu pour lequel on veut évaluer la luminance incidente, on regarde d'abord dans les caches pour savoir si des données sont réutilisables afin d'interpoler la luminance au point considéré. Sinon, de nouveaux enregistrements sont créés en utilisant les méthodes vues précédemment. Tous les enregistrements dans les caches stockent les luminances incidentes dans des bases d'harmoniques sphériques (sauf pour les milieux isotropes où la direction incidente n'est pas utile) ainsi qu'un rayon de validité pour déterminer si un point considéré est à l'intérieur de la zone d'influence de

1. En réalité 5 caches sont utilisés si l'on compte le cache d'enregistrements pour les surfaces.

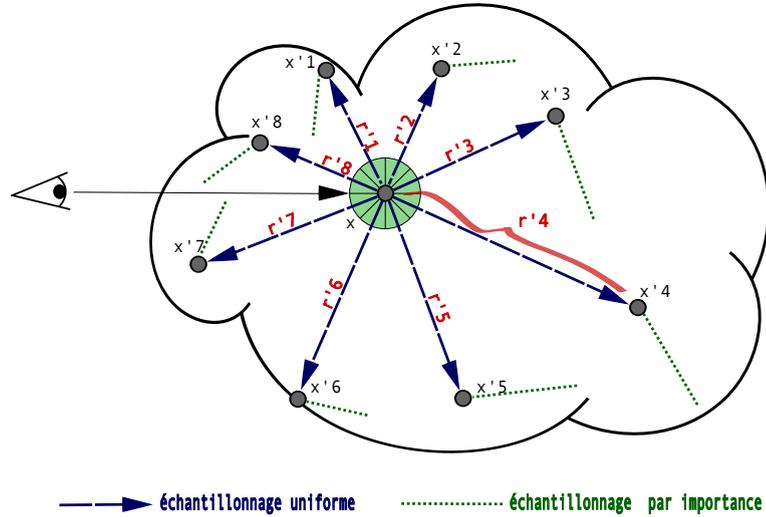


FIGURE 1.6 – Calcul de la luminance due aux diffusions multiples. Les  $N$  premiers « rebonds » sont échantillonnés uniformément puis, pour éviter une croissance exponentielle des calculs, un seul « rebond » est ensuite choisi par échantillonnage par importance.

l'enregistrement. Ce rayon de validité  $R(x)$  pour l'enregistrement  $x$  est calculé par :

$$R(x) = \varepsilon \frac{\sum_j L_j(x)}{\sum_j \|\nabla L_j(x)\|} \quad (1.23)$$

où  $\varepsilon$  est l'erreur tolérée (fixée par l'utilisateur) et  $j$  le nombre d'échantillons de Monte Carlo pour le calcul de la luminance due aux diffusions simples et multiples (pour plus de détails sur ce rayon de validité voir [JDZ]08]). Jarosz *et al.* constatent que l'intensité lumineuse dans les milieux participatifs diminue exponentiellement avec la distance au point considéré. Ils vont exploiter cette propriété en extrapolant exponentiellement les enregistrements dans les caches pour calculer la luminance incidente. La luminance en un point  $x$  est calculée en utilisant un ensemble d'enregistrements  $C$  pour lesquels  $x$  se trouve dans leur rayon de validité :

$$L(x) \approx \exp \left( \frac{\sum_{k \in C} \left( \ln(L_k) + \frac{\nabla L_k}{L_k} \cdot (x - x_k) \right) w(d_k)}{\sum_{k \in C} w(d_k)} \right) \quad (1.24)$$

avec  $L_k$ ,  $\nabla L_k$ ,  $x_k$  et  $r_k$  étant respectivement la luminance, le gradient, la position et le rayon de validité de l'enregistrement  $k$ . Jarosz *et al.* [JDZ]08] définissent  $w(d_k) = 3d_k^2 - 2d_k^3$  comme la fonction de pondération avec  $d_k = 1 - \|x_k - x\|/r_k$ .

Nous pouvons aussi noter que dans [JZ]08b], les auteurs proposent une extension de l'algorithme de cache d'éclairage avec milieux participants. Il s'agit en fait de nouveaux gradients de translation permettant de prendre en compte l'absorption, l'émission et la diffusion ainsi que les effets d'occlusion des surfaces par le milieu participatif. Ces gradients peuvent aussi être intégrés à la méthode de cache de luminance (voir [JZ]08b]). Cette dernière méthode, même si elle semble très intéressante, paraît complexe à implémenter et à utiliser notamment à cause des cinq caches à gérer (4 caches volumiques et 1 cache surfacique). De plus, le nombre de « rebonds » dans le volume est limité à trois. La diffusion multiple n'est donc pas calculée dans son intégralité. Nous pensons qu'il est possible de n'utiliser que deux caches : un pour les surfaces et un pour les milieux

participatifs, simplifiant ainsi la création des enregistrements et la gestion des caches sans limiter le nombre de « rebonds » de lumière dans le volume. Nous nous sommes donc inspirés de certains constats réalisés dans le cadre de nos travaux sur la méthode de cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs (voir la partie 2) pour les surfaces. Ainsi, nous avons ré-exploité cette méthode pour nos travaux concernant l'illumination globale en présence de milieux participatifs. Nous décrivons cette nouvelle méthode en détail dans la partie suivante.

# Cache d'éclairage volumique

LES MÉTHODES EXISTANTES de simulation d'éclairage complète dans des milieux participatifs (nous entendons par le terme *complète* la prise en compte de la diffusion simple et de la diffusion multiple) restent extrêmement coûteuses en temps de calcul. Nous avons constaté que les méthodes accélératrices basées sur le cache d'éclairage, classiquement utilisées pour le rendu surfacique, ont été très peu étudiées dans le cadre du rendu volumique. Nous estimons que cette méthode peut offrir de meilleures performances tout en permettant une simulation d'éclairage complète dans des milieux participatifs. De plus, les enregistrements adaptatifs ainsi que leurs nouveaux gradients que nous avons présentés dans le chapitre 2 de la seconde partie peuvent être une piste de travail intéressante concernant la simulation d'éclairage en présence de fumée. C'est cette voie que nous avons choisie d'emprunter pour répondre à la problématique de la simulation d'éclairage dans des milieux participatifs. Ce chapitre décrit notre nouvelle méthode d'illumination globale dans milieux participatifs.

## 2.1 Présentation de la méthode

Nous nous proposons ici d'étendre l'algorithme du cache d'éclairage (initialement appliquée aux objets surfaciques) aux milieux participatifs. Pour ce faire, nous exploitons la technique d'enregistrements adaptatifs présentée dans le chapitre 2 de la seconde partie de ce document. L'objectif est encore une fois de pouvoir ajuster la densité du cache d'enregistrements en fonction des changements d'éclairage. Les fortes variations d'éclairage pourront être mieux recalculées, améliorant ainsi la qualité des résultats. Les enregistrements volumiques pourront donc stocker l'ensemble des contributions lumineuses : les contributions indirectes provenant des surfaces mais aussi du milieu lui-même (diffusion multiple) et les contributions directes (diffusion simple). La forme de la zone d'influence des enregistrements, dépendant à la fois de la géométrie et des variations d'éclairage, doit être redéfinie pour les enregistrements volumiques. Pour éviter une trop forte concentration d'enregistrements dans les zones du milieu participatif de faible intérêt (par exemple une zone éloignée de l'observateur dans un milieu participatif très absorbant, il n'est alors pas nécessaire d'avoir une trop forte concentration d'enregistrements puisqu'elle ne sera pas perceptible) nous proposons une nouvelle méthode permettant de contrôler la densité du cache pendant sa création. Ce contrôle de la densité volumique du cache dépend de la qualité d'interpolation s'appuyant sur les enregistrements existants et les caractéristiques photométriques du milieu participatif. Limiter le nombre d'enregistrements permet un gain de temps lors de la phase de pré-calcul et la phase de rendu en limitant le nombre de recherches dans le cache. Ces recherches peuvent être coûteuses en temps de calcul dans un cache volumique. Enfin, pour la recherche des enregistrements dont la zone d'influence est intersectée par

un rayon, nous remplaçons l'utilisation d'un coûteux lancer de rayon incrémental par une méthode qui collecte l'ensemble de ces enregistrements. Avec ces techniques, les phases de pré-calcul et de rendu sont nettement accélérées. Notre méthode évalue l'éclairage pour les enregistrements et se limite donc aux milieux participatifs isotropes. Elle peut être étendue aux milieux anisotropes en considérant des données directionnelles comme la luminance échantillonnées et projetées dans une base de fonctions telle que les harmoniques sphériques ou les ondelettes. Pour autant, les principes de notre méthode restent les mêmes.

### Vue générale de la méthode

L'algorithme 1 résume la méthode de création des enregistrements le long du rayon observateur-pixel  $\vec{\omega}$  intersectant le milieu participatif.

---

#### Algorithm 1 Creation\_Enregistrements()

---

```

1: Pour tout pixel de l'image, un rayon  $\vec{\omega}$  est généré
2: si  $\vec{\omega}$  intersecte le milieu participatif alors
3:   Collecter les enregistrements dont les zones d'influence sont intersectées par  $\vec{\omega}$ 
4:   si Aucun enregistrement n'est intersecté alors
5:     Créer  $n$  enregistrements sur  $\vec{\omega}$  suivant une loi de densité uniforme  $pdf_1$ 
6:   fin si
7:    $L_{prec} \leftarrow$  Estimation de la luminance incidente atténuée et diffusée suivant  $\vec{\omega}$ 
8:   STOP  $\leftarrow$  faux //initialisation de la condition d'arrêt de la boucle
9:   tantque STOP = faux faire
10:    Créer  $n$  nouveaux enregistrements sur  $\vec{\omega}$  suivant une loi de densité évolutive
11:     $L_{cour} \leftarrow$  Estimation de la luminance incidente atténuée et diffusée suivant  $\vec{\omega}$ 
12:    si Variabilité faible entre  $L_{prec}$  et  $L_{cour}$  OU  $\vec{\omega}$  est complètement recouvert alors
13:      STOP  $\leftarrow$  vrai //L'estimation est satisfaisante, la boucle s'arrête
14:    sinon
15:      L'estimation n'est pas satisfaisante, il faut ajouter des enregistrements
16:    fin si
17:     $L_{prec} \leftarrow L_{cour}$ 
18:  fin tantque
19: fin si

```

---

Lorsqu'un rayon  $\vec{\omega}$  pénètre dans le milieu participatif (ligne 2 de l'algorithme), il est nécessaire de déterminer si ce rayon intersecte ou non les zones d'influence d'enregistrements existants déjà dans le cache volumique (ligne 3 de l'algorithme). Ces enregistrements adaptatifs volumiques ainsi que la définition de leur zone d'influence seront décrits en détail dans la section 2.2. Si le rayon  $\vec{\omega}$  n'intersecte aucune zone d'influence d'enregistrement,  $n$  enregistrements sont créés ( $n$  est un nombre fixé par l'utilisateur) le long de ce rayon, entre  $x_e$  le point d'entrée de  $\vec{\omega}$  dans le volume et  $x_s$  le point de sortie (lignes 4 et 5 de l'algorithme). Les positions de ces nouveaux enregistrements sont choisies aléatoirement et uniformément entre  $x_e$  et  $x_s$ . Les enregistrements adaptatifs volumiques sont créés de la même manière que les enregistrements adaptatifs surfaciques. L'éclairage d'un enregistrement est calculé à l'aide d'une méthode de type Monte Carlo (voir la section 2.4 page 57). Une première estimation de la luminance atténuée et diffusée  $\int_{x_e}^{x_s} \tau(x_e, x) \sigma(x) L_i(x, \vec{\omega}) dx$  le long du rayon  $\vec{\omega}$  peut alors être effectuée (ligne 7). Cette estimation de la luminance sera détaillée dans la section 2.4.2. L'intersection du rayon  $\vec{\omega}$  avec les zones d'influence des enregistrements (existants ou nouvellement créés) permet de définir des intervalles de couverture (pour les zones d'in-

fluence des enregistrements intersectés) et des intervalles vides sur ce rayon. Si le rayon est complètement recouvert par des zones d'influence d'enregistrement, aucun nouvel enregistrement ne sera nécessaire (seconde condition de la ligne 12 de l'algorithme). Dans le cas contraire, les nouveaux enregistrements seront ajoutés sur les intervalles vides du rayon (ligne 10 de l'algorithme). À chacun de ces intervalles vides est associé un poids influençant le choix de l'intervalle où le nouvel enregistrement sera ajouté. L'ensemble de la méthode de création des nouveaux enregistrements est détaillé dans la section 2.4 et dans la sous-section 2.4.3. Enfin, une nouvelle estimation de la luminance ( $L_{cour}$  à la ligne 11) est effectuée puis comparée à l'estimation précédente (première condition de la ligne 12). Si une forte variabilité de l'estimation est détectée (voir la section 2.4.4), le processus recommence et de nouveaux enregistrements sont ajoutés. En effet, une variabilité forte nécessite un raffinement de l'estimation de la luminance à l'aide de nouveaux enregistrements.

## 2.2 Enregistrements volumiques adaptatifs

Comme pour les enregistrements surfaciques, la forme de la zone d'influence d'un enregistrement peut avoir une influence non négligeable sur la densité du cache : adapter la taille de cette zone d'influence (comme dans la méthode d'adaptive caching de Krivánek *et al.* [KBPvo6]) peut augmenter considérablement le nombre d'enregistrements dans le cache. C'est d'autant plus vrai pour les enregistrements volumiques : si leur zone d'influence est représentée par une sphère, la réduction du rayon de cette sphère peut entraîner une forte augmentation de la densité du cache puisque le problème n'est plus en 2 dimensions mais en 3 dimensions. De plus, si le rayon de la sphère d'influence est défini par la distance minimum aux objets solides les plus proches, la concentration d'enregistrements volumiques proches de ces objets peut devenir très forte. L'idée est donc d'étendre le concept des enregistrements adaptatifs au problème tridimensionnel des milieux participatifs dans le but d'améliorer l'estimation des changements d'éclairage sans augmenter la densité du cache près des objets solides.

La zone d'influence idéale d'un enregistrement volumique, de forme *patatoïdale*, peut être approchée par une ellipsoïde déformée ne pouvant être calculée exactement. Il faut donc pouvoir proposer une forme de zone d'influence s'approchant de cette ellipsoïde déformée en répondant à la contrainte supplémentaire (imposée par la méthode du cache d'éclairage) de savoir rapidement si un point donné est à l'intérieur ou non de cette zone d'influence. Nous proposons une approximation de cette zone à l'aide d'une discrétisation décrite par 18 axes autour de la position de l'enregistrement  $R$  en utilisant le système de coordonnées global  $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ . Chacun des 18 axes a la position  $x_R$  de l'enregistrement  $R$  comme point de départ. La longueur associée à chacun de ces axes est définie par la distance minimum aux objets solides les plus proches dans les directions proches des axes. Huit axes sont définis sur le plan  $(R, \vec{x}, \vec{y})$  où l'angle entre deux axes successifs est égal à  $\frac{\pi}{4}$ . Il s'agit ici de l'équivalent des huit axes de la zone d'influence des enregistrements adaptatifs surfaciques (voir la partie 2.2 page 53). Deux autres axes sont définis par les vecteurs  $-\vec{z}$  et  $\vec{z}$ . Quatre autres sont les vecteurs  $(1, 0, 1)$ ,  $(0, 1, 1)$ ,  $(-1, 0, 1)$  et  $(0, -1, 1)$  et enfin les quatre derniers sont  $(1, 0, -1)$ ,  $(0, 1, -1)$ ,  $(-1, 0, -1)$  et  $(0, -1, -1)$ . La figure 2.1 illustre cette décomposition en 18 axes. Pour décrire la surface de la limite de la zone d'influence, nous utilisons une sous-décomposition en 8 triangles à l'aide des 6 axes  $-\vec{x}$ ,  $\vec{x}$ ,  $-\vec{y}$ ,  $\vec{y}$ ,  $-\vec{z}$  et  $\vec{z}$ . Cha-

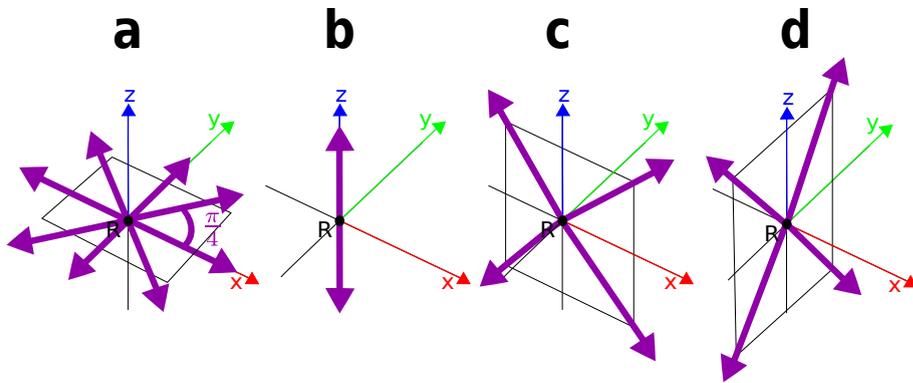


FIGURE 2.1 – La décomposition en 18 axes (représentés en violet) pour définir la zone d'influence des enregistrements volumiques : en (a) 8 axes définis dans le plan  $(R, x, y)$  séparés deux à deux d'un angle de  $\pi/4$ , en (b) les axes suivant  $\vec{-z}$  et  $\vec{z}$ , en (c) 4 axes  $(1, 0, 1)$ ,  $(-1, 0, 1)$ ,  $(-1, 0, -1)$  et  $(1, 0, -1)$  définis dans le plan  $(R, x, z)$  et enfin en (d) 4 axes  $(0, 1, 1)$ ,  $(0, -1, 1)$ ,  $(0, -1, -1)$  et  $(0, 1, -1)$  définis dans le plan  $(R, y, z)$ .

chacun des 8 triangles est décomposé en 4 autres sous-triangles à l'aide de 3 autres axes intermédiaires. La figure 2.2 montre la décomposition de la zone d'influence.

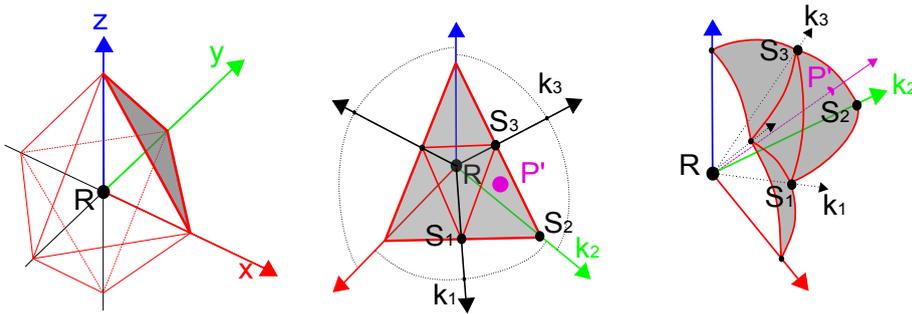


FIGURE 2.2 – La discrétisation en triangles et sous-triangles pour définir la surface de la limite de la zone d'influence des enregistrements volumiques en utilisant les axes décrits dans la figure 2.1 : une première sous-décomposition en 8 triangles avec les axes  $-\vec{x}$ ,  $\vec{x}$ ,  $-\vec{y}$ ,  $\vec{y}$ ,  $-\vec{z}$  et  $\vec{z}$  (à gauche) est utilisée. Ensuite 4 sous-triangles sont définis avec les 10 autres axes (au milieu) pour déterminer les surfaces courbes de la zone d'influence (à droite).  $P'$  est un point sur la surface de la zone d'influence calculé à l'aide des coordonnées barycentriques dans le triangle  $S_1, S_2, S_3$ .

Pour tout point  $P'$  positionné sur la surface de la zone d'influence, le vecteur  $\overrightarrow{RP'}$  intersecte un des 8 triangles puis un des 4 sous-triangles (voir la figure 2.2). Par exemple, les sommets  $S_1, S_2$  et  $S_3$  du sous-triangle intersecté en  $P''$  par  $\overrightarrow{RP'}$  sont les extrémités de trois des 18 axes  $k_1, k_2$  et  $k_3$ . La surface courbe est alors décrite à l'aide d'une interpolation utilisant les coordonnées barycentriques  $U, V$  et  $W$  dans ce triangle :

$$\|\overrightarrow{RP''}\| = \|\overrightarrow{RS_1}U + \overrightarrow{RS_2}V + \overrightarrow{RS_3}W\| \quad (2.1)$$

et nous faisons l'approximation  $P'' \simeq P'$ . Nous renvoyons le lecteur vers la l'annexe C pour plus de précision sur la définition de la bordure de la zone d'influence des enregistrements volumiques et de la détermination des coordonnées barycentriques  $U, V$  et  $W$ .

Pour détecter si un point  $P$  est à l'intérieur de la zone d'influence d'un enregistrement  $R$ , le premier test  $|x_P - x_R| < d_{k_{max}}$ , avec  $d_{k_{max}}$  la longueur de l'axe le plus grand de la

zone d'influence, est réalisé. Ensuite, le vecteur  $\overrightarrow{RP}$  est utilisé pour trouver le point  $P'$  positionné sur la surface de la zone d'influence. En effet,  $\overrightarrow{RP}$  intersecte un sous-triangle de la zone d'influence en  $P''$  ce qui permet de retrouver  $P'$ . Si  $\|\overrightarrow{RP}\| < \|\overrightarrow{RP'}\|$  alors  $P$  est à l'intérieur de la zone d'influence de  $R$  sinon  $P$  est à l'extérieur. La fonction de pondération  $w_R$  (voir la section 1.1 page 47 pour l'utilisation de la fonction  $w_R$ ) doit tendre vers 0 lorsque  $P$  s'approche de la surface de la zone d'influence :

$$w_R(P) = \frac{\|\overrightarrow{RP'}\|}{\|\overrightarrow{RP}\|} - 1 \quad (2.2)$$

On utilise alors ce poids et les gradients du second ordre suivant les axes  $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$  pour évaluer l'éclairement en un point  $P$  du volume<sup>1</sup>. À l'instar des enregistrements adaptatifs surfaciques, nous considérons que l'éclairement varie linéairement entre les axes de la zone d'influence. Ainsi l'éclairement en  $P$  dû à  $R$  est calculé à l'aide d'une interpolation linéaire des 3 valeurs évaluées selon des axes  $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$  et de leurs coordonnées barycentriques  $U$ ,  $V$  et  $W$  (annexe C).

La taille de la zone d'influence d'un enregistrement, dépendante de la géométrie environnante grâce à l'initialisation de la longueur des axes en fonction des objets les plus proches, est ensuite ajustée en fonction des variations de l'éclairement et de la qualité de l'interpolation. Nous utilisons le même procédé que pour les enregistrements adaptatifs surfaciques (décrit dans la section 2.4 page 62). Les mêmes gradients de translation que pour les enregistrements adaptatifs surfaciques seront utilisés à quelques différences près pour prendre en compte les effets d'atténuation dus au milieu participatif. Nous décrirons en détail ces différences dans la section suivante. Les gradients de rotation ne sont quant à eux pas utiles dans le cas des enregistrements adaptatifs volumiques. En effet, puisque le point est dans le volume, il n'y a pas de notion de normale et donc il n'y a pas de notion de rotation.

## 2.3 Gradients et effets volumiques

Le calcul des gradients peut être effectué en utilisant le concept de source ponctuelle équivalente introduit dans la section 2.3.1 page 56 et l'équation 2.8 page 58. L'éclairement dû à ces sources ponctuelles équivalentes peut alors être calculé en tout point pour chacun des axes de la zone d'influence de l'enregistrement. Si l'on considère un point  $P$  de coordonnées  $x_p$  positionné sur un axe  $k$  de l'enregistrement  $R$ , son éclairement est exprimé par :

$$E(x_p) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_i^{eq}(\overrightarrow{\omega}_i') \cdot (\overrightarrow{n}_{x_p} \cdot \overrightarrow{\omega}_i')}{d_i'^2} V(x_i, x_p), \quad (2.3)$$

où  $\overrightarrow{\omega}_i'$  est la direction incidente en  $x_p$  depuis la source ponctuelle  $i$ ,  $I_i^{eq}(\overrightarrow{\omega}_i')$  son intensité équivalente,  $d_i'$  la distance séparant  $x_p$  à  $x_i$ , les coordonnées de la source ponctuelle  $i$ .  $V(x_i, x_p)$  représente la visibilité entre  $x_i$  et  $x_p$ . Comme pour le rendu surfacique, deux types de contribution doivent être considérées : les contributions directes provenant des sources lumineuses et les contributions indirectes provenant des surfaces. À cela s'ajoute, dans le cas d'un rendu en présence de milieux participatifs, un troisième type de

<sup>1</sup>. voir l'équation 2.11 de la section 2.3.2 page 59 concernant les gradients de translation pour les enregistrements adaptatifs surfaciques.

contribution : les contributions indirectes provenant des interactions lumineuses dans le milieu participatif lui-même (diffusion multiple). Pour un point  $R'_k$  sur l'axe  $k$ , l'intensité équivalente d'une source lumineuse  $I_{eq}$  est proportionnelle à l'intensité réelle de la source lumineuse et elle est approchée par le rapport des intensités réelles  $I(\overrightarrow{SR'_k})$  sur  $I(\overrightarrow{SR})$ ,  $S$  étant la position de la source. Pour les sources ponctuelles surfaciques, l'intensité équivalente peut être estimée à l'aide du rapport des cosinus  $\alpha'$  sur  $\alpha$ , les angles formés entre la normale à la surface en  $S$  et les directions d'émission  $\overrightarrow{SR'_k}$  et  $\overrightarrow{SR}$  respectivement. Pour les sources ponctuelles équivalentes volumiques, ce rapport disparaît. Pour chacune de ces contributions équivalentes, la principale différence avec le rendu surfacique réside dans la fonction de visibilité  $V(x_i, x_p)$ . Cette fonction n'est plus binaire (valant 1 s'il y a visibilité entre  $x_i$  et  $x_p$  et 0 sinon) mais doit prendre en compte la transmittance  $\tau$  (voir la partie 3.1 page 35). Nous redéfinissons une nouvelle fonction de visibilité  $V_{Tr}(x_i, x_p) \in [0, 1]$  qui remplace  $V(x_i, x_p)$  dans l'équation 2.3 :

$$V_{Tr}(x_i, x_p) = V(x_i, x_p)\tau(x_i, x_p). \quad (2.4)$$

Une estimation complète du terme de transmittance, lors du recalcul de l'éclairage sur l'axe  $k$ , peut devenir très coûteuse en temps de calcul si elle est effectuée pour toutes les sources ponctuelles équivalentes. Nous avons choisi de considérer le coefficient d'extinction comme constant entre  $x_i$  et la position  $x_R$  de l'enregistrement  $R$ . Le coefficient d'extinction moyen est alors calculé à l'aide de la transmittance  $\tau(x_i, x_R)$  entre  $x_i$  et  $x_R$ . Pour cela, la transmittance moyenne  $Tr(x_i, x_p)$ , remplaçant  $\tau(x_i, x_p)$  dans l'équation 2.4, est exprimée de la manière suivante :

$$Tr(x_i, x_p) = e^{-\kappa_{av}(x_i, x_R) \cdot \|\overrightarrow{S_i R}\|} \quad (2.5)$$

avec  $\kappa_{av}(x_i, x_R)$  le coefficient d'extinction moyen déterminé entre  $x_i$  et  $x_R$  :

$$\kappa_{av}(x_i, x_R) = \frac{-\log(Tr(x_i, x_R))}{\|\overrightarrow{S_i R}\|}. \quad (2.6)$$

Cette hypothèse donne de bons résultats en pratique puisque les déplacements depuis  $x_R$  à  $x_p$  le long des axes restent relativement petits et les propriétés du milieu participatif traversé changent peu entre  $\overrightarrow{S_i R}$  et  $\overrightarrow{S_i R'}$ . Cependant, pour les sources quasi-ponctuelles, il peut être judicieux de recalculer précisément l'extinction le long de  $\overrightarrow{S_i R'}$ . En effet, pour un coût relativement faible, ce recalcul permettra des résultats plus précis pour de telles sources.

## 2.4 Remplissage adaptatif du cache

### 2.4.1 Présentation

L'adaptation de la taille des zones d'influence des enregistrements volumiques reposant sur les variations locales de l'éclairage ne permet pas d'éviter une densité d'enregistrements excessive dans le cache. En effet, l'ensemble du rayon observateur-pixel peut être recouvert d'enregistrements alors que certaines parties du milieu participatif traversé ne nécessitent pas une trop grande précision des calculs (notamment à cause d'une faible luminance, une forte absorption par le milieu...) Ceci est particulièrement vrai dans le cas d'une grande scène (comme dans l'exemple du couloir présenté dans la

section 3.2 page 38 et montré dans la figure 3.3) où beaucoup d'enregistrements seront nécessaires pour recouvrir l'ensemble d'un rayon la traversant. D'un autre côté, si l'ajout d'enregistrements est réalisé à l'aide d'une méthode stochastique (en fonction du coefficient d'extinction du milieu par exemple), une large partie du milieu participatif peut ne pas être recouvert et certains effets peuvent être mal restitués. Pour résoudre ce problème, nous présentons une technique permettant de contrôler la densité du cache et la qualité de l'interpolation au fur et à mesure que de nouveaux enregistrements sont ajoutés. L'idée principale est de choisir les endroits où l'ajout est nécessaire et de refuser l'ajout lorsque l'on considère l'interpolation comme suffisamment correcte.

Comme nous l'avons dit dans la section 3.2 page 38, l'objectif est de déterminer la luminance incidente atténuée et diffusée à travers le milieu participatif. Cette luminance est formalisée par la seconde partie de la fonction de transfert radiatif que nous nommerons  $RTE$  pour des raisons de concision (voir la section 3.1 page 35 et la section 3.2 page 38). Il faut aussi éviter une trop forte densité d'enregistrements dans les zones de faible intérêt sans prendre le risque de manquer les zones les plus intéressantes. Nous ne nous intéresserons pas ici à l'émission propre du milieu (première partie de la  $RTE$ ) puisqu'elle est assez facile à calculer. Les nouveaux enregistrements sont ajoutés sur le rayon entre  $x_e$ , le point d'entrée dans le milieu, et  $x_s$ , le point de sortie, dans les intervalles du rayon non recouverts par les zones d'influence d'enregistrements existants. Ces enregistrements existants sont collectés le long du rayon et permettent une première estimation de la luminance dans la direction donnée par le rayon  $\vec{x_s x_e}$ . Si aucune zone d'influence d'enregistrement n'est intersecté par le rayon, cette estimation de la luminance est alors nulle. Si au contraire, l'ensemble du rayon est recouvert par des enregistrements, aucun nouvel enregistrement n'est nécessaire. La figure 2.3 illustre le processus d'ajout des enregistrements.

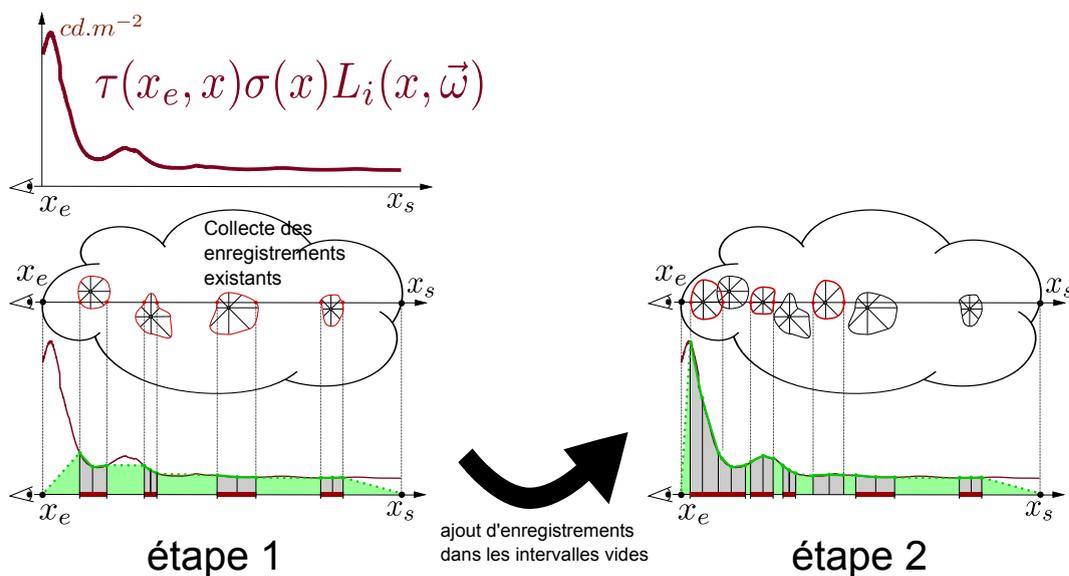


FIGURE 2.3 – Le processus d'ajout des enregistrements : l'objectif est de retrouver la luminance diffusée et atténuée pour tout point  $x$  sur le rayon  $\vec{\omega}$  entre  $x_e$ , le point d'entrée dans le milieu, et  $x_s$ , le point de sortie (la courbe rouge). La première étape consiste à collecter les enregistrements existants dans le cache intersectés par le rayon  $\vec{x_e x_s}$ . Il est possible de connaître la luminance atténuée et diffusée à l'intérieur de ces enregistrements (zones représentées en grises sur la courbe). Dans les étapes suivantes du processus, les nouveaux enregistrements seront ajoutés sur le rayon dans les intervalles non recouverts par des enregistrements (dessinés en vert).

La première étape consiste à collecter les enregistrements existants intersectés par le rayon  $\vec{x_e x_s}$  puis de calculer une première estimation de la luminance atténuée et diffusée. Cette étape sera décrite plus en détail dans la section 2.4.2. Connaissant les enregistrements intersectés, il est possible de définir les intervalles du rayon recouverts et non recouverts par les enregistrements existants. Les étapes suivantes du processus consistent à ajouter, si nécessaire, de nouveaux enregistrements sur le rayon dans les intervalles non recouverts et d'estimer une nouvelle fois la luminance. Le choix des intervalles où seront ajoutés les nouveaux enregistrements sera expliqué dans la section 2.4.3. Enfin, si le rayon n'est pas complètement recouvert d'enregistrements et qu'une forte variabilité est détectée entre deux estimations successives de la luminance (c'est-à-dire entre deux ajouts successifs d'enregistrements), le processus d'ajout d'enregistrements continue (voir la section 2.4.4).

## 2.4.2 Collecte des enregistrements et estimation de la luminance

Collecter les enregistrements nécessite de pouvoir déterminer l'intersection entre un rayon  $\vec{\omega}$  et la zone d'influence d'un enregistrement volumique. Pour cela, une sphère englobante est définie autour de chaque enregistrement. Cette sphère englobante a un rayon égal à  $d_{k_{max}}$  la longueur de l'axe le plus grand de l'enregistrement. Si  $\vec{\omega}$  intersecte la sphère englobante alors l'enregistrement a une chance d'être intersecté. Le calcul exacte de l'intersection d'un rayon avec la zone d'influence est relativement coûteuse en temps de calcul. Afin d'éviter ces longs temps de calcul, nous proposons une méthode de recherche des intersections par un processus dichotomique illustré dans la figure 2.4.

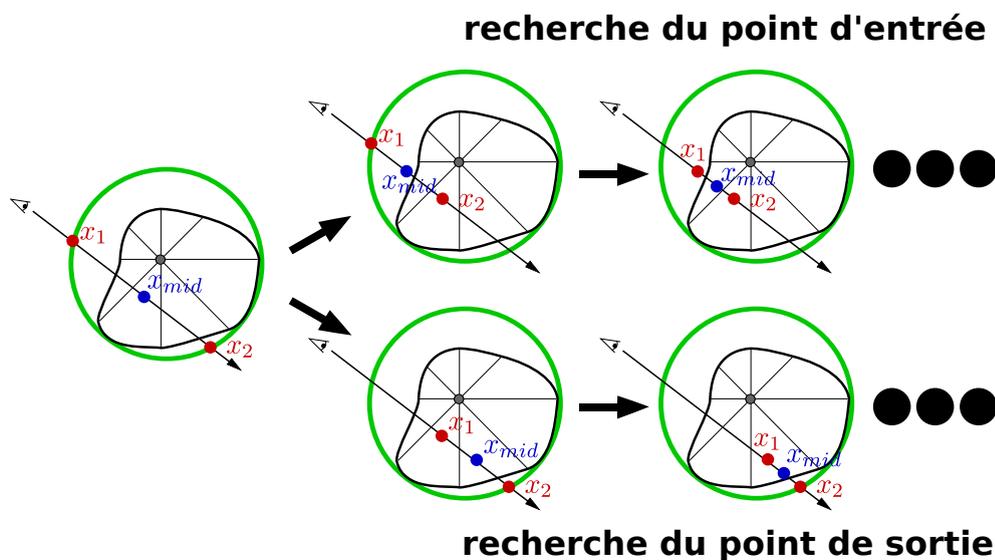


FIGURE 2.4 – Le processus de recherche approximative par dichotomie des intersections d'un rayon avec la zone d'influence d'un enregistrement : la sphère englobante est représentée en vert. La recherche est initialisée avec les points  $x_1$  et  $x_2$  (les intersections avec la sphère englobante) et le point  $x_{mid}$  (le point au milieu du segment  $|\vec{x_1 x_2}|$ ). Pour le point d'entrée, la recherche est réalisée entre  $x_1$  et  $x_{mid}$  et pour le point de sortie entre  $x_{mid}$  et  $x_2$ . La recherche est faite entre un point à l'intérieur et un point à l'extérieur de la zone d'influence. Le processus recommence ensuite  $n$  fois. Le dernier point à l'intérieur de la zone d'influence est le point recherché.

Notons  $x_1$  et  $x_2$  les points d'entrée et de sortie de la sphère englobante de l'enreg-

istrement considéré.  $x_{mid}$  est le point au milieu du segment  $|\overrightarrow{x_1x_2}|$ .  $x_1$  et  $x_2$  sont à l'extérieur de la zone d'influence (voir la section 2.2 pour savoir si un point est à l'intérieur ou non d'une zone d'influence). Si  $x_{mid}$  est à l'intérieur de la zone d'influence alors une recherche dichotomique est réalisée pour déterminer le point d'entrée dans la zone d'influence entre  $x_1$  et  $x_{mid}$  et le point de sortie entre  $x_{mid}$  et  $x_2$ . Un point au milieu des deux points existants ( $x_1$  et  $x_{mid}$  pour le point d'entrée et  $x_{mid}$  et  $x_2$  pour le point de sortie), est testé pour savoir s'il est à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone d'influence. Le dernier point testé à l'intérieur de la zone d'influence est considéré comme le point d'intersection avec celle-ci. Le test est réalisé  $n$  fois (nous avons constaté que 5 fois donnait de bons résultats dans la pratique). Ainsi il est possible de connaître, pour la zone d'influence d'un enregistrement, l'intervalle de  $\vec{w}$  qu'il recouvre entre  $x_e$  et  $x_s$ . Les nouveaux enregistrements seront ajoutés dans les intervalles non recouverts.

Pour accélérer la recherche des enregistrements, un arbre binaire est maintenu. Un nouvel enregistrement est stocké dans un nœud de l'arbre (au début au niveau de la racine de l'arbre). Lorsqu'un nœud atteint un nombre maximum d'enregistrements autorisé pour un nœud, il est coupé en deux suivant la dimension  $x$ ,  $y$  ou  $z$  autorisant la meilleure répartition des enregistrements (c'est-à-dire lorsque le nombre d'enregistrements à gauche est le plus proche du nombre d'enregistrements à droite).

Connaissant la couverture du rayon par les zones d'influence des enregistrements, la luminance diffusée et atténuée à travers le milieu peut être estimée. Chaque point d'intersection entre le rayon et les zones d'influence devient un point de contrôle pour lequel il est possible de calculer la luminance  $L_i$  à l'aide des enregistrements. Un troisième point de contrôle est utilisé entre le point d'entrée et le point de sortie pour chaque enregistrement intersecté. Entre deux points de contrôle, les changements de luminance sont considérés comme linéaires. La figure 2.5 illustre le principe.

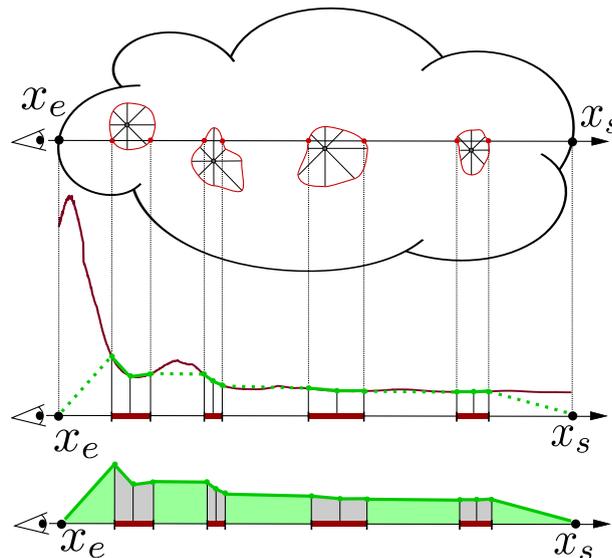


FIGURE 2.5 – Trois points de contrôle sont utilisés à l'intérieur de chaque enregistrement intersecté : le point d'entrée, de sortie et un autre point choisi au milieu.  $L_i$  peut être calculée pour chacun de ces points (représentés par des points verts sur la courbe verte) et une estimation de la luminance diffusée et atténuée par le milieu (i.e. l'intégrale de la courbe rouge foncé) est effectuée (la courbe verte) à l'aide de la méthode des trapèzes (dessinés en vert pour les intervalles vides du rayon et en gris pour les intervalles couverts). Ici, pour une meilleure estimation (la courbe rouge et la courbe verte ne se recourent pas), plus d'enregistrements sont nécessaires.

L'intégrale de la courbe obtenue est évaluée à l'aide de la méthode des trapèzes :

$$\begin{aligned}
L(x_e, \vec{\omega}) &= \int_{x_e}^{x_s} \tau(x_e, x') \sigma(x') L_i(x', \vec{\omega}) dx' \\
&+ Tr(x_e, x_s) L(x_s, \vec{\omega}) \\
&\simeq \sum_{i=0}^{n-1} L_{trap}(x_i, \vec{\omega}) \\
&+ Tr(x_e, x_s) L(x_s, \vec{\omega})
\end{aligned} \tag{2.7}$$

où  $n$  est le nombre de trapèzes définis sur  $\vec{\omega}$  après la collecte des enregistrements,  $x_i$  est un point de contrôle et  $L_{trap}(x_i, \vec{\omega})$  est l'intégrale approchée de la luminance diffusée et atténuée à l'aide du trapèze  $i$  défini entre  $x_i$  et  $x_{i+1}$  :

$$L_{trap}(x_i, \vec{\omega}) = \frac{f(x_i) + f(x_{i+1})}{2} (x_{i+1} - x_i) \tag{2.8}$$

et  $f(x_i) = Tr(x_i, x) \sigma(x_i) L_i(x_i, \vec{\omega})$  est la luminance diffusée et atténuée en  $x_i$ . L'équation 2.8 correspond à l'aire du trapèze défini entre  $x_i$  et  $x_{i+1}$ .

### 2.4.3 Ajout d'enregistrements par échantillonnage par importance

Avant d'ajouter de nouveaux enregistrements, les enregistrements dont les zones d'influence sont intersectées par les rayons  $\vec{\omega}$  sont collectés et les points de contrôle sont définis. Si aucun enregistrement n'est intersecté, la courbe est initialisée avec seulement deux points de contrôle,  $x_e$  et  $x_s$ , ayant une luminance évaluée à 0. La méthode d'ajout des enregistrements est illustrée sur la figure 2.6 et les explications données ici s'y réfèrent. Les points de contrôle et leurs valeurs sont stockés afin de conserver l'état courant de l'estimation, qui deviendra l'état précédent dans le cas d'ajout d'enregistrements supplémentaires. Les nouveaux enregistrements seront ajoutés seulement sur les intervalles vides du rayon, c'est-à-dire les intervalles qui ne sont pas encore recouverts par des zones d'influence. Avec ces nouveaux enregistrements, de nouveaux points de contrôle sont créés. Les positions de ces nouveaux points de contrôle sont insérés dans l'état précédent. Leur valeur pour cet état est estimée à l'aide d'une interpolation linéaire s'appuyant sur les points de contrôle précédents déjà existants (ce sont les points bleus insérés sur les courbes de la figure 2.6). Les états courant et précédent ont alors le même nombre de points de contrôle et peuvent être comparés. La figure 2.6 illustre le principe de l'analyse trapézoïdale. Contrairement aux intervalles vides du rayon, les intervalles de couverture ne nécessitent plus d'enregistrements.

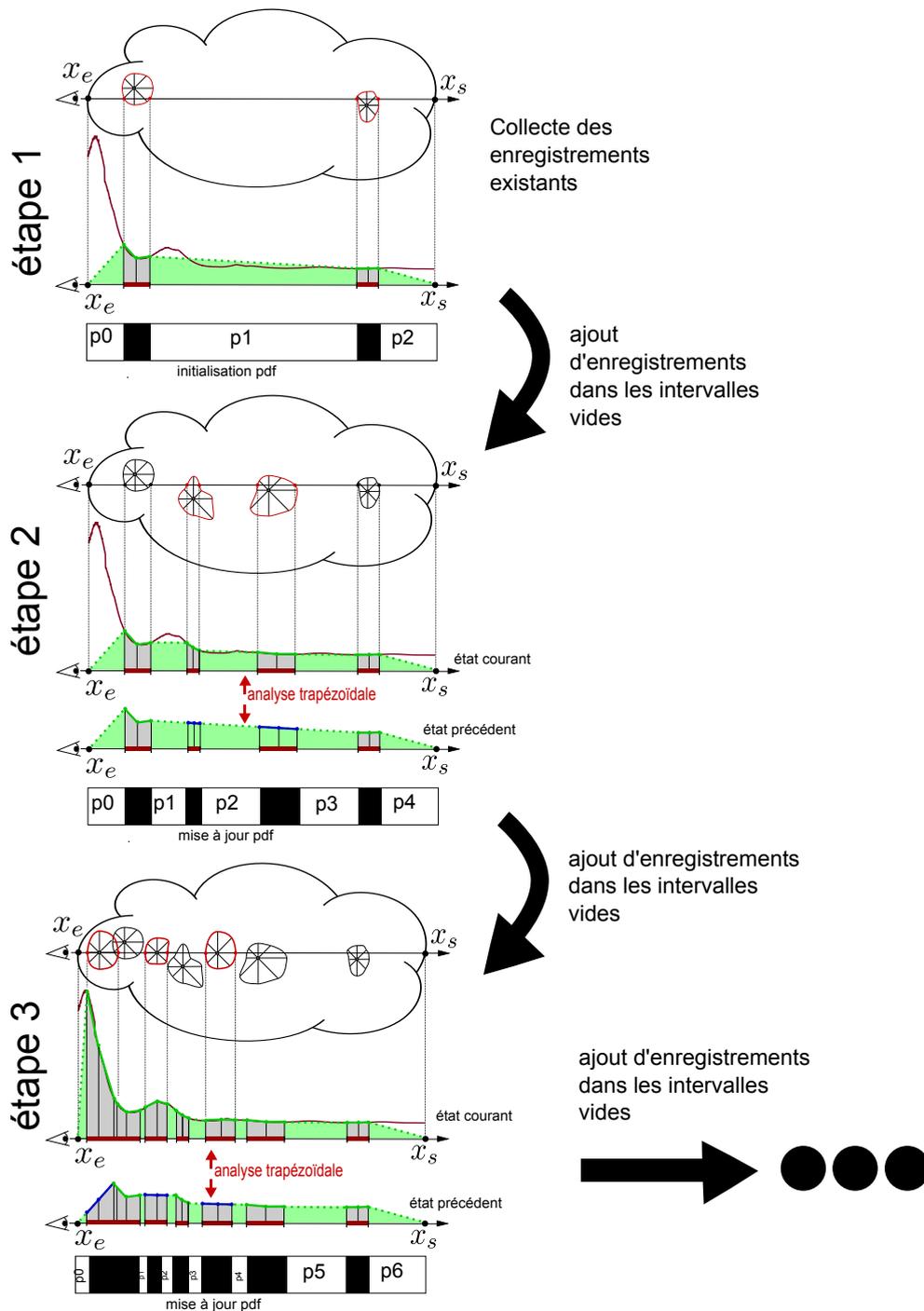


FIGURE 2.6 – Le processus d'ajout des enregistrements par importance : la courbe rouge représente la luminance atténuée et diffusée entre  $x_e$  et  $x_s$  (en  $\text{cd.m}^{-2}$ ). Dans la 1<sup>re</sup> étape, la pdf est initialisée, pour chaque intervalle non recouvert, avec des probabilités dépendantes de la valeur de l'estimation courante de la luminance. Ensuite, la variabilité de l'estimation est étudiée à l'aide d'un analyse trapézoïdale pour définir la probabilité des intervalles non recouverts. Les intervalles recouverts ont une probabilité nulle (représentée en noire). Pour l'analyse trapézoïdale, les nouveaux points de contrôle créés après l'ajout d'enregistrements sont insérés dans l'état précédent (dessinés en bleu) et leurs valeurs sont calculées en interpolant linéairement les valeurs des points de contrôle existants (les lignes bleues). Les états courant et précédent ont alors le même nombre de trapèzes pouvant être comparés deux à deux.

Le choix de l'intervalle vide sur lequel le nouvel enregistrement sera créé n'est pas anodin. En effet, il est plus intéressant d'affiner l'estimation de la luminance sur certains intervalles alors que d'autres ont un faible intérêt. Les intervalles où une forte variabilité de l'estimation de la luminance est détectée (entre deux ajouts successifs d'enregistrements) restent potentiellement les intervalles où l'estimation doit être affinée. Nous proposons alors d'utiliser une fonction de densité de probabilité (que nous nommerons dorénavant *pdf* pour *Probability Distribution Function*) décrivant la distribution des intervalles en fonction de leur intérêt pour l'ajout d'enregistrements. Un intervalle recouvert par la zone d'influence d'un enregistrement aura une probabilité de 0 et n'aura donc aucune chance d'être choisi pour l'ajout d'un nouvel enregistrement. Pour les intervalles vides, une probabilité leur est assignée. Cette probabilité dépend alors de la variabilité entre l'estimation précédente et l'estimation courante de l'intégration approchée de la luminance. Si l'on considère le trapèze  $i$  défini entre  $x_i$  et  $x_{i+1}$ , sa probabilité  $P_{diff}$  est alors donnée par :

$$P_{diff}(i) = \frac{|\Delta L_{trap}(x_i)|}{\sum_{k=0}^{n-1} |\Delta L_{trap}(x_k)|} \quad (2.9)$$

avec  $n$  le nombre de trapèzes et  $\Delta L_{trap}(x_i)$  la différence entre l'approximation courante de l'intégrale de la luminance  $L_{trap}^{cur}(x_i, \vec{\omega})$  et l'approximation précédente  $L_{trap}^{prec}(x_i, \vec{\omega})$  pour le trapèze  $i$ . La *pdf* est mise à jour avant chaque ajout si de nouveaux enregistrements sont nécessaires. Toutefois, avec la définition des probabilités donnée dans l'équation 2.9, un segment peut avoir une probabilité nulle s'il n'a jamais été choisi avant puisque aucune variabilité de l'estimation ne peut être détectée. Afin de ne pas avoir ce genre de problème, une partie constante est ajoutée à la probabilité  $P_{diff}$ . Cette constante prend en compte l'estimation courante de la luminance. La probabilité complète  $P$  pour le trapèze  $i$  devient alors :

$$P(i) = \gamma P_{diff}(i) + (1 - \gamma) \frac{L_{trap}^{cur}(x_i, \vec{\omega})}{\sum_{k=0}^{n-1} L_{trap}^{cur}(x_k, \vec{\omega})} \quad (2.10)$$

où  $\gamma \in [0, 1]$  est un paramètre fixé par l'utilisateur. Si  $\gamma < 0.5$  alors la probabilité d'un segment sera principalement dépendante de son estimation courante de la luminance. Les nouveaux enregistrements auront alors plus de chance d'être ajoutés sur les parties où l'estimation de la luminance sera forte. Il est en effet intéressant d'être plus précis dans ces zones puisque le risque d'erreur est plus grand. Les expériences que nous avons menées montrent que  $\gamma \in [0.2, 0.4]$  donne de bons résultats en terme de distribution des enregistrements et de convergence de la méthode.

Le choix de l'intervalle vide  $I_i$  où sera ajouté le nouvel enregistrement est réalisé en utilisant la *pdf* à l'aide d'une variable aléatoire uniforme. Il faut ensuite définir la position  $x_p$  de ce nouvel enregistrement dans l'intervalle  $I_i = [x_i; x_{i+1}]$  choisi. Cette position  $x_p$  est choisie de manière aléatoire et uniformément sur l'intervalle  $I_i$  telle que  $x_p = x_i + \alpha.(x_{i+1} - x_i)$  où  $\alpha \in [0, 1]$  est une variable aléatoire. L'enregistrement est ensuite créé en  $x_p$  et un nouvel intervalle de couverture, dépendant de sa zone d'influence, est ajouté sur le rayon. La *pdf* doit être mise à jour pour prendre en compte cette nouvelle distribution des intervalles vides et des intervalles de couverture. Pour éviter de recalculer une nouvelle *pdf* après chaque ajout d'un nouvel enregistrement, les enregistrements sont ajoutés par lot de  $n$  enregistrements (voir l'algorithme de la page 90),  $n$  étant un nombre minimum d'enregistrements à ajouter sans devoir recalculer la

*pdf*. Ce nombre est fixé par l'utilisateur. Cette optimisation introduit ici une petite subtilité. Au cours de l'ajout par lot, un même intervalle peut être choisi plusieurs fois. Un ou plusieurs enregistrements peuvent alors recouvrir cet intervalle. Il est alors nécessaire de vérifier si  $x_p$ , la position du nouvel enregistrement, n'est pas à l'intérieur d'un enregistrement existant dans l'intervalle choisi.

#### 2.4.4 Test de la variabilité de l'estimation de la luminance

Après l'ajout des enregistrements par lot, la variabilité de l'estimation de la luminance est testée pour savoir s'il est nécessaire ou non d'ajouter un nouveau lot d'enregistrements. Ce test est basé sur la différence relative  $\Delta L$  entre l'estimation complète courante de la luminance diffusée et atténuée  $L_{cur}(x_e, \vec{\omega})$  et l'estimation précédente  $L_{prec}(x_e, \vec{\omega})$  calculées à l'aide de l'équation 2.7 :

$$\Delta L = \frac{|L_{cur}(x_e, \vec{\omega}) - L_{prec}(x_e, \vec{\omega})|}{L_{prec}(x_e, \vec{\omega})}. \quad (2.11)$$

Si  $\Delta L \geq \chi$ , avec  $\chi$  un seuil fixé par l'utilisateur pour contrôler la précision de l'approximation, alors l'approximation est considérée comme insuffisamment précise et de nouveaux enregistrements sont nécessaires.

## 2.5 Résultats

Pour tester et valider notre méthode de cache d'éclairage volumique, il est tout d'abord nécessaire de valider les différentes hypothèses que nous avons pu faire. Il semble tout d'abord intéressant de connaître l'intérêt d'utiliser des enregistrements dont les zones d'influence ne sont pas sphériques notamment en ce qui concerne le nombre d'enregistrements créés. Ensuite, il faut savoir si l'ajout des enregistrements par échantillonnage par importance présenté dans la section 2.4.3 page 98 permet effectivement une meilleure répartition de ces enregistrements. Nous réaliserons ensuite une comparaison de notre méthode avec certaines méthodes d'illumination globale en présence de milieux participatifs proposées dans la littérature. Cette comparaison se fera en terme de qualité et de temps de calcul. Enfin, d'autres résultats obtenus dans des conditions de simulation diverses seront présentés dans une dernière section.

### 2.5.1 Enregistrements volumiques sphériques *versus* adaptatifs

Il semble évident que l'utilisation d'une zone d'influence sphérique dont le rayon est défini par la distance minimum aux objets les plus proches augmentera la concentration du cache par rapport à l'utilisation de zones d'influence adaptatives telles que nous les avons décrites dans la section 2.2. Nous avons voulu toutefois valider cette hypothèse. Pour cela, nous utilisons la scène de la boîte de Cornell avec un milieu participatif homogène (voir la figure 2.7) et isotrope où  $\sigma = 0.225$  et  $\alpha = 0.225$ . Nous testons aussi deux méthodes avec des enregistrements à zones sphériques : une dont le rayon des zones d'influence est défini à l'aide de la moyenne harmonique des distances aux objets solides les plus proches et une autre avec la distance minimum aux objets les plus proches. Pour les méthodes avec des enregistrements volumiques à zones sphériques, les 18 axes de la zone d'influence sont initialisés avec la même longueur (soit la distance minimum aux objets les plus proches soit la moyenne harmonique des distances). Afin

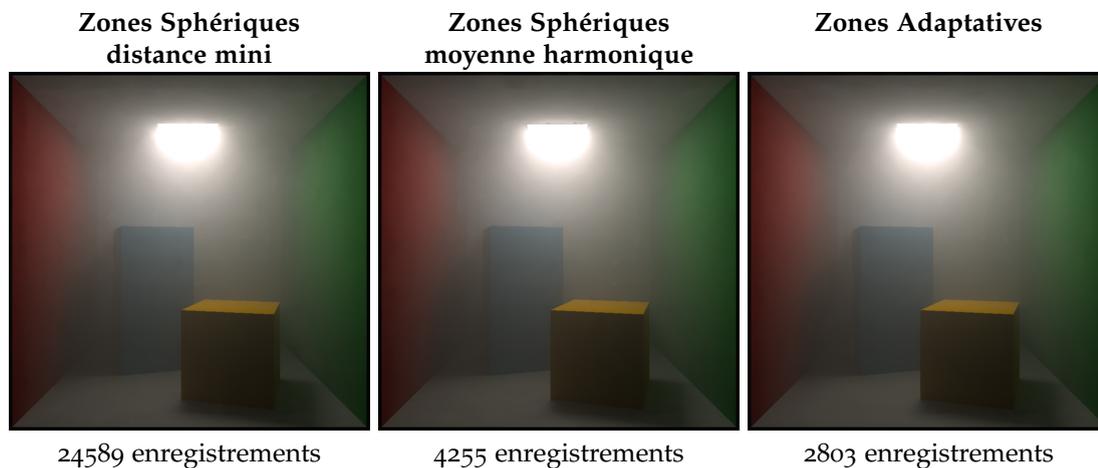


FIGURE 2.7 – La scène de la boîte de Cornell avec un milieu participatif homogène et isotrope où  $\sigma = 0.225$  et  $\alpha = 0.225$ . Notre méthode avec des enregistrements volumiques adaptatifs (ici l'adaptation se fait seulement à la géométrie) permet un gain non négligeable en nombre total d'enregistrements par rapport à des enregistrements à zones sphériques (sans adaptation) pour une qualité de résultat égale. Les trois méthodes utilisent les mêmes paramètres de simulation.

de ne comparer que l'impact des formes des zones d'influence des enregistrements sur la densité du cache, l'adaptation à la variation de l'éclairage n'est pas effectuée pour chacune des trois méthodes. Enfin, tous les paramètres de simulation sont les mêmes pour les trois méthodes. Nous pouvons constater que pour des résultats de qualité égale, notre méthode de cache d'éclairage avec des enregistrements volumiques s'adaptant à la géométrie de la scène minimise considérablement la densité du cache. Les temps de calcul sont, dans cet exemple, proportionnels au nombre d'enregistrements dans le cache. Pour toutes les méthodes, le temps de calcul par enregistrement est le même. Pour les enregistrements sphériques définis à l'aide la distance minimum aux objets les plus proches, la plupart des enregistrements se concentrent sur les bords des objets. La figure 2.8 illustre ce phénomène. Les enregistrements volumiques ont été créés sur un plan positionné dans la scène de la boîte de Cornell tel que décrit par le schéma de gauche de la figure 2.8. Les mêmes paramètres sont utilisés pour les deux méthodes. Seule une adaptation à la géométrie est utilisée pour les enregistrements volumiques adaptatifs. Nous pouvons constater que les enregistrements avec des zones d'influence sphériques se concentrent près des objets surfaciques ce qui n'est pas le cas avec des enregistrements à zones adaptatives (voir la distribution des enregistrements autour des cubes jaune et bleu dans les images de droite de la figure 2.8). Il y a donc un intérêt non négligeable à utiliser des enregistrements adaptatifs qui prennent en compte la géométrie environnante.

### 2.5.2 Répartition des enregistrements

Nous avons décrit dans la partie 2.4.3 une nouvelle méthode de création d'enregistrements le long d'un rayon. Le but est de concentrer les enregistrements créés dans les zones traversées par le rayon les plus intéressantes pour l'estimation de la luminance incidente atténuée et diffusée tout en évitant de passer trop de temps à créer des enregistrements dans les zones de faible intérêt. Dans cette section, nous testons cette méthode d'ajout et vérifions si elle se comporte comme nous le pressentons. Pour cela, nous utilisons la

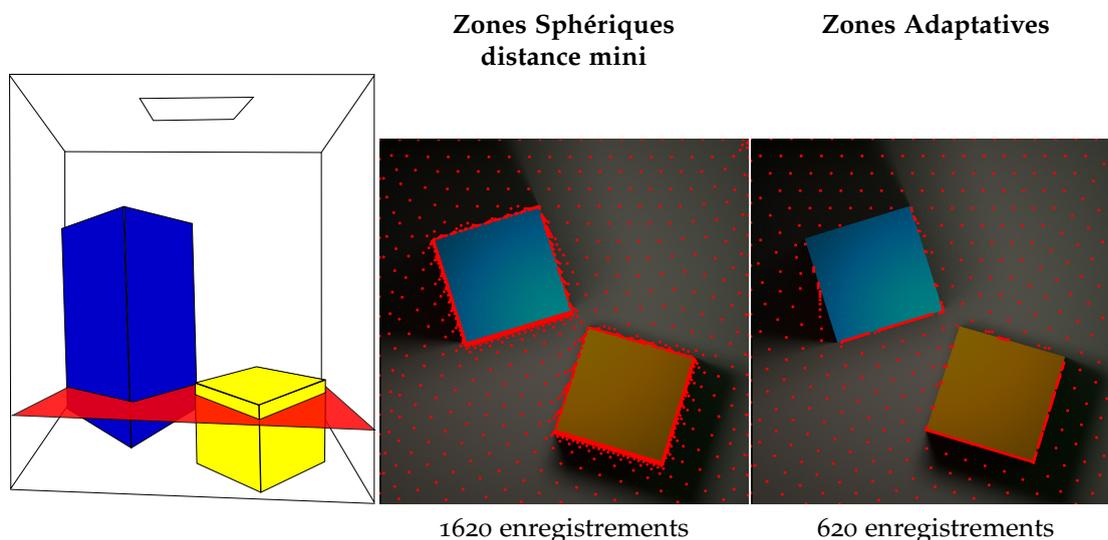


FIGURE 2.8 – Répartition des enregistrements volumiques créés sur un plan (schématisé par le plan rouge dans la vignette de gauche) dans la boîte de Cornell vue de dessus. Les mêmes paramètres sont utilisés pour les deux méthodes. Les enregistrements adaptatifs évitent une trop forte densité du cache près des objets surfaciques.

scène du couloir telle qu'elle a été décrite dans la figure 3.3 page 39 de la partie 3.2. La figure 2.9 illustre, sous forme de graphes, deux étapes successives de la méthode de création d'enregistrements volumiques le long d'un rayon traversant le couloir (voir la figure 2.9).

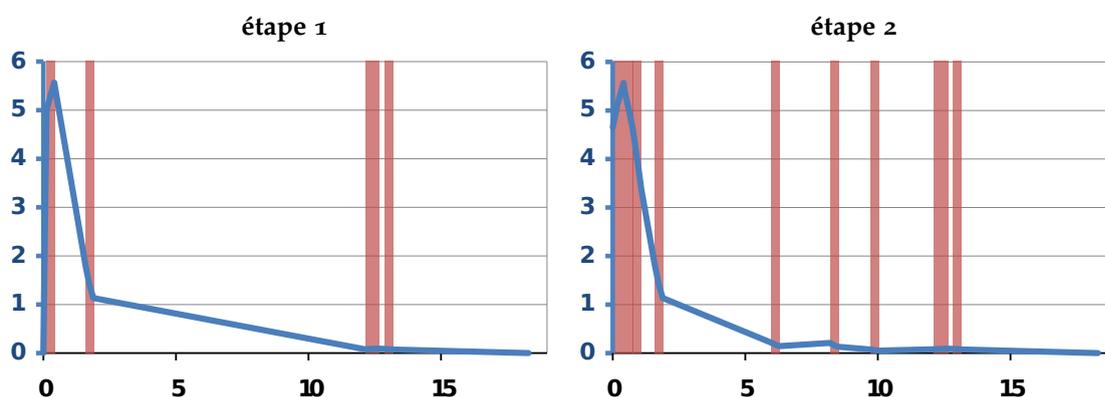


FIGURE 2.9 – Description de la répartition des enregistrements volumiques sur un rayon dans la scène du couloir. Les parties roses représentent les intervalles recouverts par des enregistrements. Pour la première étape (à gauche), 5 enregistrements ont été ajoutés aléatoirement sur le rayon. Pour la seconde étape (à droite), 6 enregistrements ont été ajoutés en fonction de l'estimation obtenue à l'étape 1. La courbe bleue représente la luminance incidente diffusée et atténuée  $\tau(x_e, x)\sigma(x)L_i(x, \vec{\omega})$ .

La première étape réalise un ajout aléatoire de 5 enregistrements sur le rayon initialement vide. En effet, lorsque le rayon est vide, la fonction de densité de probabilité est initialisée avec un seul élément (le segment du rayon entre  $x_e$  et  $x_s$ ). Une première estimation de la valeur recherchée, l'intégrale de la luminance incidente diffusée et atténuée  $\int_{x_e}^{x_s} \tau(x_e, x)\sigma(x)L_i(x, \vec{\omega})dx$  (voir la section 3.2 page 38), peut alors être faite. Cette première estimation sert alors de base pour la seconde étape et la mise à jour de la fonc-

tion de densité de probabilités. Nous pouvons remarquer sur le graphique de droite de la figure 2.9 que les 6 nouveaux enregistrements ont principalement été ajoutés dans la partie où l'estimation de la luminance (c'est-à-dire l'intégrale de la courbe bleue) est la plus forte. Si une variance est détectée entre l'estimation de la première étape et l'estimation de la seconde étape alors le processus continue : la fonction de densité de probabilités est actualisée et de nouveaux enregistrements seront ajoutés dans les zones non recouvertes. Nous avons aussi voulu tester cette méthode d'ajout des enregistrements sur une scène plus petite telle que la boîte de Cornell. Nous avons remplacé la photométrie lambertienne de la source par une photométrie plus directive de type spot et diminué la surface de celle-ci pour obtenir une source quasi-ponctuelle.

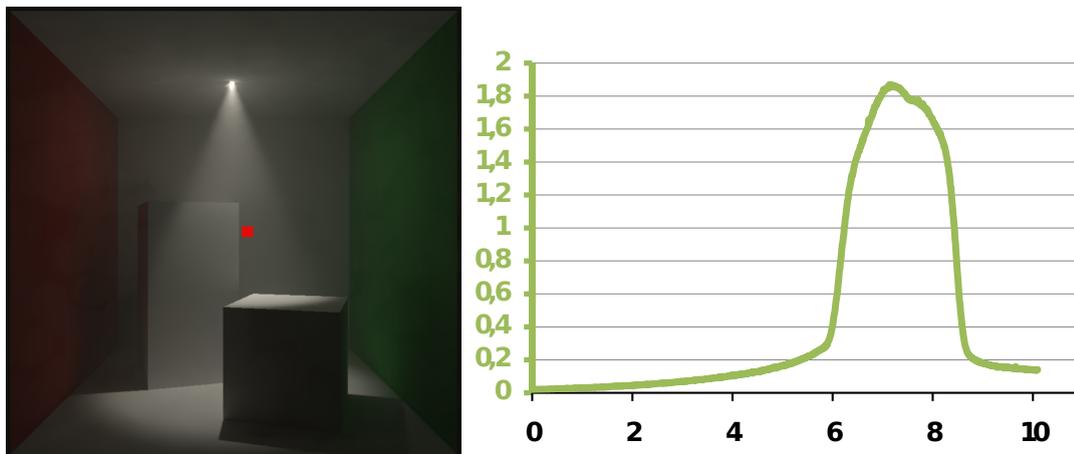


FIGURE 2.10 – La courbe verte du graphe de droite représente la luminance incidente diffusée et atténuée  $\tau(x_e, x)\sigma(x)L_i(x, \vec{\omega})$  le long d'un rayon traversant la scène. Le rayon considéré a pour point de départ l'observateur et passe par le centre du carré rouge dessiné sur l'image de gauche. Nous pouvons voir le pic de luminance sous la source de lumière directive.

La figure 2.10 montre une image résultat obtenue avec notre méthode et la courbe représentant la luminance incidente diffusée et atténuée  $\tau(x_e, x)\sigma(x)L_i(x, \vec{\omega})$  le long d'un rayon traversant la scène. Nous pouvons voir le pic de luminance formé par la source directive. Le long de ce même rayon, trois étapes successives d'ajout d'enregistrements sont illustrées par des graphes dans la figure 2.11.

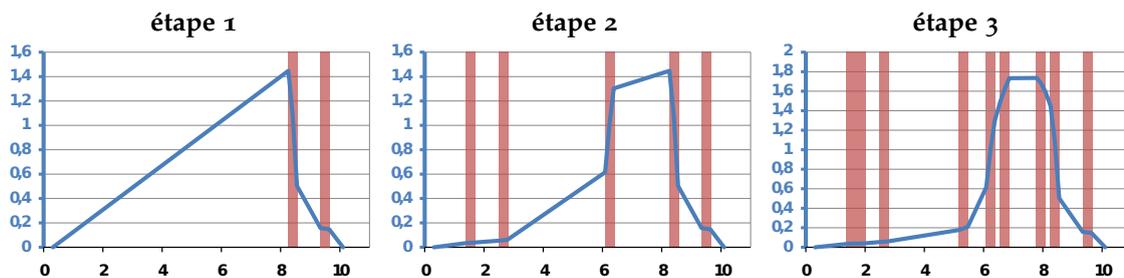


FIGURE 2.11 – Description de la répartition des enregistrements volumiques sur un rayon dans la scène de la boîte de Cornell avec une source directive. Pour la première étape (à gauche), 2 enregistrements ont été ajoutés aléatoirement sur le rayon. Pour la seconde étape (au milieu), 3 enregistrements ont été ajoutés en fonction de l'estimation obtenue à l'étape 1. 4 enregistrements ont été ajoutés dans la troisième étape (à droite).

Il est intéressant de noter que, dans ce cas, les enregistrements vont s'ajouter dans les

zones où la variance de l'estimation entre deux étapes successives est la plus forte. Ceci permet de raffiner les calculs dans les zones où les effets lumineux et leurs variations peuvent être forts (dans cet exemple le faisceau lumineux formé par la source directive). Si l'on se fie à la troisième étape représentée par le graphe de droite de la figure 2.11 et que l'on compare l'estimation obtenue (la courbe bleue) aux valeurs réelles (la courbe verte de la figure 2.10), on peut remarquer que des enregistrements sont encore nécessaires pour améliorer cette estimation. La section suivante s'intéresse à la précision de la méthode et de l'influence du paramètre de précision  $\chi$ .

### 2.5.3 Précision de la méthode

Il est important de pouvoir évaluer la précision de la méthode. Cette précision est fortement dépendante du paramètre  $\chi$  introduit dans la section 2.4.4 mais aussi du paramètre  $\rho$  concernant la validité des gradients et l'adaptation aux variations de l'éclairement (voir les résultats de la seconde partie de ce document et notamment la figure 2.13 page 69). Si le critère  $\rho$  permet de contrôler la variation de l'éclairement localement autour de l'enregistrement, le paramètre  $\chi$  est quant à lui plus global et permet de contrôler la précision de l'estimation de la luminance diffusée et atténuée le long d'un rayon traversant le milieu. Lorsque  $\chi$  tend vers 0, la méthode d'ajout aura tendance à recouvrir complètement le rayon d'enregistrements. Au contraire, si  $\chi$  est fort, le rayon sera peu couvert et des défauts peuvent apparaître. Pour vérifier la précision de la méthode, nous utilisons les deux mêmes scènes que celles de la section précédente, à savoir la scène du couloir et la scène de la boîte de Cornell avec une source lumineuse directive. Pour les deux scènes, le paramètre contrôlant la validité des gradients  $\rho$  est fixé à 5%. Nous voulons tester l'influence du paramètre  $\chi$  sur la précision de l'estimation de l'intégrale de la luminance diffusée et atténuée  $\int_{x_e}^{x_s} \tau(x_e, x) \sigma(x) L_i(x, \vec{\omega}) dx$ . Les résultats sont donnés dans la figure 2.12 pour la scène du couloir et la figure 2.13 pour la scène de la boîte de Cornell.

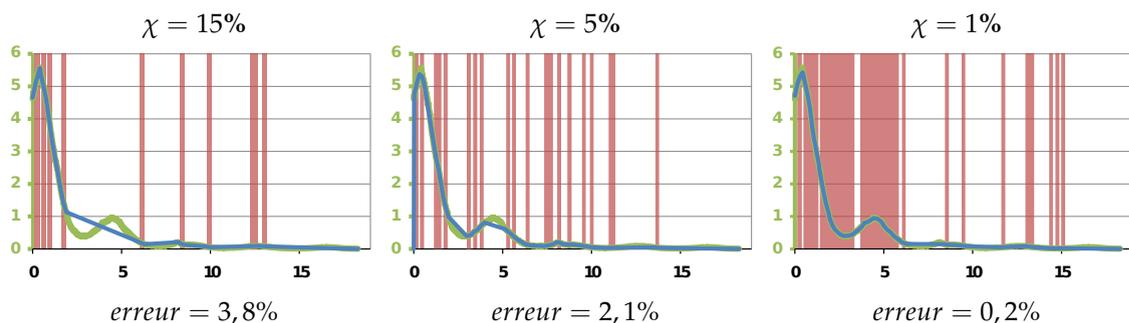


FIGURE 2.12 – Test de la précision de la méthode d'ajout pour la scène du couloir pour différentes valeurs de  $\chi$ . Les erreurs relatives entre la valeur réelle (la courbe verte) et l'estimation (la courbe bleue) de l'intégrale de la luminance incidente diffusée et atténuée  $\int_{x_e}^{x_s} \tau(x_e, x) \sigma(x) L_i(x, \vec{\omega}) dx$  sont données sous chaque graphe.

Les graphes de ces figures illustrent la « couverture » finale d'un rayon traversant les scènes après l'ajout des enregistrements volumiques<sup>2</sup> ainsi que l'estimation de la luminance diffusée et atténuée le long de ce rayon (les courbes bleues). Le rayon est initialement vide. La solution de référence (les courbes vertes sur les graphes) est calculée à

2. Ici, par le terme « couverture » nous entendons les intervalles du rayon recouverts par un enregistrements. Ces intervalles recouverts sont représentés par des aplats de couleur rose sur les graphes.

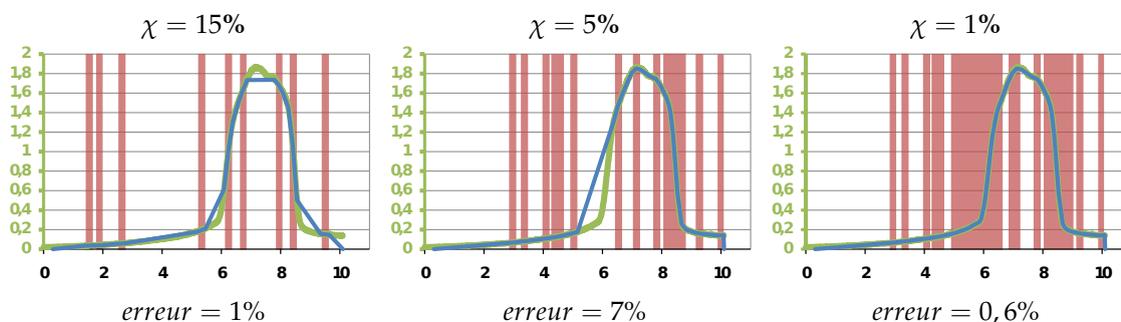


FIGURE 2.13 – Test de la précision de la méthode d'ajout pour la scène de la boîte de Cornell avec une source directive pour différentes valeurs de  $\chi$ .

l'aide d'un tracé de chemins le plus précis possible (quelques centaines de milliers de chemins). Les nombres d'étapes d'ajout successives ainsi que le nombre total d'enregistrements créés sur le rayon sont donnés dans le tableau 2.1.

|               | Couloir           |          | Boîte de Cornell  |          |
|---------------|-------------------|----------|-------------------|----------|
|               | # enregistrements | # étapes | # enregistrements | # étapes |
| $\chi = 15\%$ | 11                | 2        | 9                 | 3        |
| $\chi = 5\%$  | 20                | 3        | 14                | 4        |
| $\chi = 1\%$  | 34                | 5        | 22                | 6        |

TABLE 2.1 – Nombre d'enregistrements créés et nombre d'étapes de création pour un rayon traversant les scènes de la boîte de Cornell et la scène du couloir. Ces statistiques se réfèrent aux graphiques des figures 2.12 et 2.13.

Nous pouvons constater, au vu de ces résultats, que le paramètre  $\chi$  joue sur la précision de la méthode en forçant l'ajout de nouveaux enregistrements. Pourtant, même avec une erreur relativement faible (inférieure à 1% avec  $\chi = 1\%$ ), le rayon n'est pas complètement recouvert par des enregistrements. Il n'a pas été nécessaire de recouvrir l'ensemble du rayon pour avoir de bons résultats. Les zones les moins influentes ont été mises de côté par la méthode d'ajout qui a privilégié les zones les plus contributives à l'erreur générale de l'estimation de la luminance diffusée et atténuée. Nous pouvons noter une erreur forte pour la scène de la boîte de Cornell avec  $\chi = 5\%$ . Nous avons dit dans le chapitre 2.4.3 page 98 que les probabilités affectées aux zones libres étaient une combinaison entre l'approximation de la luminance sur ce segment et la différence des approximations entre deux étapes successives. C'est principalement sur le segment du milieu (entre 5m. et 6.5m.) que se trouve l'erreur. La différence d'approximation de la luminance sur ce segment entre les deux dernières étapes devait être trop faible pour induire une erreur globale d'approximation (entre les deux étapes) supérieur à 5%. C'est le paramètre  $\gamma$  (introduit dans la section 2.4.3) qui aurait permis de contrôler cette erreur en donnant plus de poids aux segments dont la luminance est plus forte. Nous pouvons aussi voir que l'erreur est largement corrigée avec un paramètre  $\chi$  plus faible.

#### 2.5.4 Comparaison avec des méthodes basées *Photon Mapping*

Il peut être intéressant de comparer notre méthode avec des méthodes existantes notamment en terme de qualité des résultats mais aussi en terme d'efficacité. Nous avons choisi de comparer notre méthode de cache d'éclairage volumique avec des enreg-

istrement adaptatifs avec trois autres méthodes : un tracé de chemins (que nous nommerons *PT* dans la suite de cette section), la méthode de lancer de photons volumiques classique [JC98] (que nous nommerons *VPM* pour *Volume Photon Mapping*) et la méthode de collecte des photons par faisceaux proposée par Jarosz *et al.* [JZ]08a] (nommée *BRE* pour *Beam Radianc Estimate* dans la suite de cette section). Comme pour les résultats concernant la méthode de cache d'éclairage pour les surfaces, aucune restriction n'a été faite sur le nombre de rebonds indirects. Les quantités physiques sont représentées à l'aide de spectres décomposés en 40 longueurs d'onde et les sources de lumière ainsi que leurs caractéristiques photométriques sont définies par des fichiers *IES* [IES02]. Pour une même série de tests, les simulations sont réalisées sur la même machine dans le but de comparer les temps de calcul.

### Résultats pour la scène du couloir

La scène du couloir utilisée ici est en fait un ensemble de deux bureaux séparés par un long couloir en forme de « L ». Le feu se déclare dans un des deux bureaux puis la fumée se propage à l'ensemble de la scène. Chaque bureau est éclairé par une source de lumière et le couloir est composé de cinq sources réparties sur sa longueur. Différents mobiliers de bureau sont placés dans la scène (photocopieuse, étagères, fontaine à eau...) La figure 2.14 montre la configuration de la scène et les positions de l'observateur dans cette scène pour les deux séries de tests étudiées. Les simulations avec un milieu participatif sont réalisées à un instant où la fumée s'est propagée dans presque toute la scène.



FIGURE 2.14 – Configuration de la scène du couloir : représentation en éclairage direct seulement avec la méthode de cache d'éclairage avec enregistrements adaptatifs et sans fumée. Les positions de l'observateur et les directions de visée pour les deux séries de tests réalisées sont représentées en rouge pour la première série et en vert pour la seconde.

Dans la première série de test, l'observateur se trouve dans le couloir et le regarde suivant sa longueur. Les résultats obtenus sont donnés sur la figure 2.15 et les statistiques dans le tableau 2.2.

Les temps de calcul donnés par le tableau 2.2 correspondent seulement aux temps de simulation dans les fumées. Les images ont une résolutions de  $800 \times 800$  pixels. Toutes les méthodes utilisent le même cache d'éclairage avec des enregistrements adaptatifs pour les surfaces. Dans cette première série de test, l'objectif était d'obtenir des résultats visuellement similaires excepté pour la méthode de *PT* où le but était de comparer le résultat avec notre méthode pour un temps de simulation équivalent. Il a été nécessaire d'émettre un très grand nombre de photons pour les méthodes basées *Photon Mapping*.



FIGURE 2.15 – Première série de résultats obtenus dans la scène du couloir avec différentes méthodes de simulation. Ici, l'objectif est d'obtenir des résultats visuellement similaires.

|             | PT              | VPM             | BRE        | Notre méthode          |
|-------------|-----------------|-----------------|------------|------------------------|
|             |                 | $\approx 3,5M.$ | photons    | 2234 enregistrements   |
| pré-calcul  | -               | 5min. 55s.      | 6min. 10s. | <b>1h. 15min. 11s.</b> |
| rendu       | 1h. 23min. 28s. | 4h. 43min.      | 2h. 42min. | <b>7min. 37 s.</b>     |
| temps total | 1h. 23min. 28s. | 4h. 49min.      | 2h. 49min. | <b>1h. 22min. 48s.</b> |

TABLE 2.2 – Statistiques des rendus pour la figure 2.15. Les temps donnés correspondent aux temps de simulation des milieux participatifs (les temps pour les surfaces n'ont pas été intégrés). La phase de pré-calcul correspond à l'émission des photons pour les méthodes VPM et BRE et à la phase de création des enregistrements pour notre méthode (le PT n'a pas de phase de pré-calcul).

Le nombre de photons pour l'estimation de densité est fixé à 1000 et la distance maximum de recherche à  $0,5m$ . Pour la méthode VPM, le pas minimum pour le *Ray Marching* est de  $0.1m$ . Nous pouvons alors constater que la phase de rendu est extrêmement coûteuse pour ces deux méthodes. Pour cette première série de tests, notre méthode est deux fois plus rapide que la méthode de BRE pour la même qualité de résultats. Cependant, la comparaison d'images visuellement similaires, même si elle permet de valider rapidement des résultats, peut ne pas être fiable puisqu'elle revêt un caractère subjectif. Nous avons donc choisi de comparer des résultats obtenus avec notre méthode et les deux méthodes basées sur le *Photon Mapping*, dans des temps de calcul similaires, avec un résultat de référence. Le résultat de référence est calculé avec notre méthode paramétrée avec des critères de précision ( $\chi$  et  $\rho$  notamment) extrêmement forts. Ces critères restrictifs forcent une très forte concentration d'enregistrements volumiques le long des rayons observateur/pixel et une adaptation fine aux variations de l'éclairage. Pour ces résultats l'observateur se trouve dans le bureau où se déclare la fumée (voir la figure 2.14 pour la configuration de la scène). Les images ont une résolutions de  $1024 \times 768$  pixel. Les résultats sont donnés sur la figure 2.16. Pour les méthodes basées *Photon Mapping*, le nombre de photons pour l'estimation de densité est fixé à 500 et la distance maximum de recherche à  $0.13m$ . De plus, pour la méthode VPM, le pas minimum pour le *Ray Marching* est de  $0.1m$ . L'instant de simulation de la fumée pour la seconde série de tests est antérieur à l'instant de simulation de la première série. La fumée est alors un peu moins dense. Pour le même instant que la première série, la visibilité dans le bureau est quasi nulle. Les statistiques des simulations sont données dans le tableau 2.3. La figure 2.16 montre aussi des images en fausses couleurs représentant la différence relative en luminance entre le résultat de référence et le résultat obtenu pour la méthode considérée. La différence relative moyenne est aussi indiquée. Nous pouvons constater que pour des images visuellement semblables, la précision des calculs

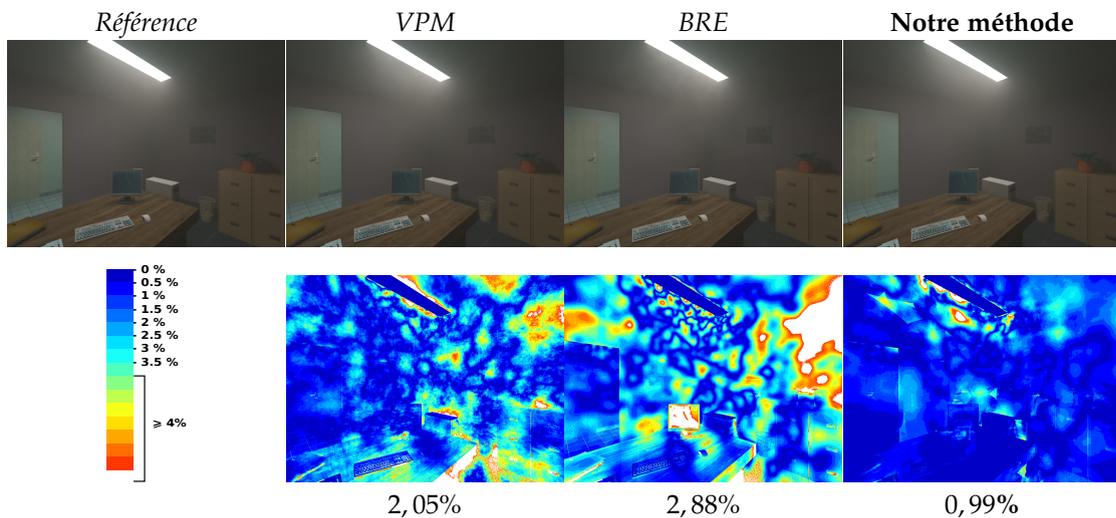


FIGURE 2.16 – Seconde série de résultats obtenus dans la scène du couloir avec différentes méthodes de simulation. L’observateur se trouve dans un bureau (voir la figure 2.14). La seconde ligne représente la différence relative en luminance avec le résultat de référence (l’échelle est donnée à gauche en  $cd.m^{-2}$ ). La différence relative moyenne est donnée pour chaque méthode.

|             | VPM                     | BRE            | Notre méthode       |
|-------------|-------------------------|----------------|---------------------|
|             | $\approx 0,7M.$ photons |                | 888 enregistrements |
| pré-calcul  | 5min.                   | 5min. 12s.     | <b>51min.</b>       |
| rendu       | 1h. 1min.               | 57 min.        | <b>9min. 45 s.</b>  |
| temps total | 1h. 6min.               | 1h. 2min. 12s. | <b>1h. 45s.</b>     |

TABLE 2.3 – Statistiques des rendus pour la figure 2.16.

peut être différente. En effet, pour des temps de simulation similaires, notre méthode a un taux d’erreur deux fois plus faible (inférieur à 1%) que les méthodes basées *Photon Mapping* (supérieur à 2%). Le point de vue dans le bureau semble moins avantageux pour la méthode de *BRE* qui a le taux d’erreur le plus fort. Ceci est principalement dû au fait que la méthode de *BRE* propose des résultats plus « floutés » (voir [JZ]08a)]. Ainsi, dans une scène complexe avec une fumée hétérogène, notre méthode donne des résultats plus précis avec des temps de calcul plus courts.

### Résultats pour la scène du cendrier

Nous avons aussi voulu comparer les méthodes citées précédemment pour une scène relativement simple. La scène du cendrier est en fait une boîte de Cornell dans laquelle les cubes sont remplacés par un cendrier et une cigarette. Cette cigarette est la source de la fumée. La simulation de l’évolution de la fumée est réalisée en prenant en compte une extraction d’air positionnée en hauteur sur le mur rouge. La figure 2.17 montre les résultats obtenus avec les différentes méthodes de simulation. Les temps de calcul et les statistiques de la simulation sont donnés dans le tableau 2.4. Comme pour les résultats dans la scène du couloir, seuls les temps des calculs réalisés dans les milieux participatifs sont indiqués. Toutes les méthodes utilisent le même cache d’éclairage avec des enregistrements adaptatifs pour les surfaces. Les méthodes à base de photons ont un rayon de recherche des photons de  $3cm.$  (la scène a une taille d’environ  $50cm. \times 50cm. \times 50cm.$ ) et 300 photons sont requis pour l’estimation de densité. Pour la méthode *VPM*, le pas

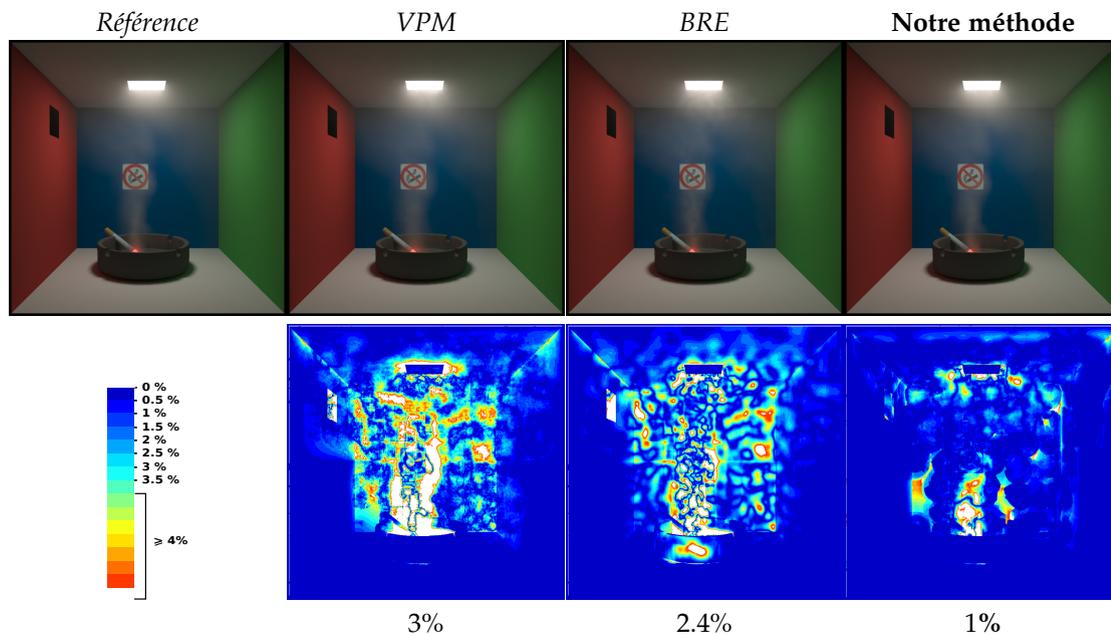


FIGURE 2.17 – Résultats obtenus dans la scène du cendrier avec différentes méthodes de simulation sur la première ligne et sur la seconde ligne la différence relative en luminance avec le résultat de référence. La différence relative moyenne est donnée pour chaque méthode.

|             | VPM              | BRE         | Notre méthode        |
|-------------|------------------|-------------|----------------------|
|             | ≈ 201000 photons |             | 1131 enregistrements |
| pré-calcul  | 1min. 25s.       | 1min. 26s.  | <b>7min. 37s.</b>    |
| rendu       | 10min. 15s.      | 12min. 21s. | <b>3min. 20 s.</b>   |
| temps total | 11min. 40s.      | 13min. 47s. | <b>10min. 57s.</b>   |

TABLE 2.4 – Statistiques des rendus pour la figure 2.17.

minimum du *Ray Marching* est de 4cm. Si l'on s'intéresse dans un premier temps à l'aspect visuel, il semblerait que notre méthode de cache d'éclairage volumique soit moins intéressante pour des scènes relativement simples (une seule source de lumière et une géométrie simple). En effet, pour des temps de calcul du même ordre de grandeur, les résultats sont visuellement très proches au niveau de la qualité. Toutefois, l'étude de la différence relative en luminance avec un résultat de référence montre que notre méthode reste plus précise pour des temps de calcul similaires. Notre méthode se comporte donc très bien dans des scènes simples (un seule source de lumière lambertienne et une géométrie peu complexe) avec des fumées hétérogènes.

### 2.5.5 D'autres résultats

Nous présentons ici quelques résultats obtenus avec notre méthode de cache d'éclairage volumique dans plusieurs scènes et avec diverses configurations d'éclairage. Le cache d'éclairage volumique est combiné à un cache d'éclairage surfacique à enregistrements adaptatifs. La figure 2.18 est un résultat obtenu dans la scène du couloir avec une vue générale. La fumée, issue de la simulation du Département Sécurité, Structures et Feu (*DSSF*) du *CSTB*, est la même que pour la série d'images de la figure 2.15 page 108. L'image en fausse couleur indiquant les niveaux de luminance permet d'il-

lustrer le type de résultat attendue pour l'étude de la visibilité. Nous pouvons voir par exemple que la visibilité est très faible dans le bureau où se trouve le foyer de départ de la fumée (ce bureau est montré dans la figure 2.16 page 109). En effet, la visibilité n'excède pas les  $4 \text{ cd.m}^{-2}$  pour la quasi totalité de la pièce.

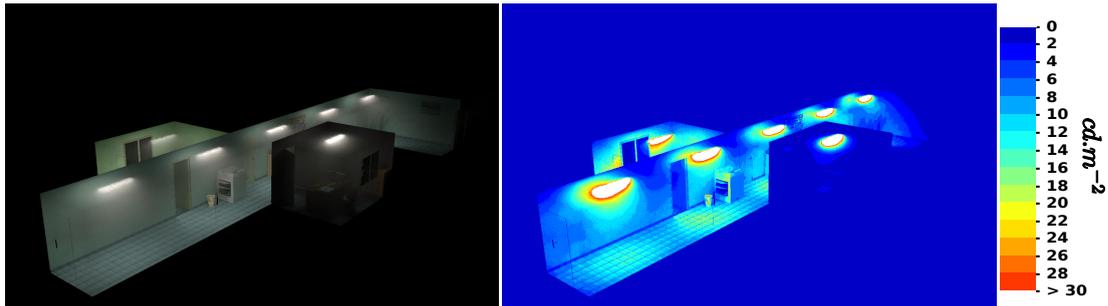


FIGURE 2.18 – Résultat obtenu avec la scène du couloir et l'image en fausse couleur représentant les niveaux de luminance. L'échelle, en  $\text{cd.m}^{-2}$ , est donnée à droite.

La scène de la *villa Arpel* a aussi été rendu avec une fumée hétérogène issue d'une simulation numérique *DSSF* en utilisant notre méthode de cache d'éclairage volumique. La figure 2.19 est une vue intérieure de la *villa Arpel*.



FIGURE 2.19 – Résultat obtenu avec la scène de la *villa Arpel* et une fumée hétérogène obtenue avec une simulation numérique *DSSF*. Dans cette exemple, il n'y a pas d'éclairage naturel.

La figure 2.20 est quant à elle une vue de l'extérieur de la scène de la *villa Arpel* avec une fumée homogène dont les caractéristiques sont  $\alpha = 0,01$  et  $\sigma = 0,06$ . La scène est composée d'éclairage artificiel et d'un modèle de ciel standard CIE clair avec un soleil rasant.



FIGURE 2.20 – Résultat obtenu avec la scène de la villa Arpel vue de l'extérieur et une fumée homogène dont les caractéristiques sont  $\alpha = 0,01$  et  $\sigma = 0,06$ . L'éclairage est composé d'éclairage artificiel et d'un modèle de ciel CIE clair avec un soleil rasant.

Un des inconvénients des méthodes basées sur le *Photon Mapping* est la difficulté à simuler des scènes avec de l'éclairage naturel. En effet, puisque nous utilisons des modèles de ciel standard CIE (voir les standards CIE dans [CIE96]), la question est de savoir comment émettre les photons depuis ce modèle de ciel. Au contraire, avec une méthode de tracé de chemins mono-directionnel, ce type de situation est facile à simuler (si un rayon n'intersecte aucune surface alors on interroge le modèle de ciel). La figure 2.20 est un exemple d'utilisation de notre méthode dans une telle situation. Un autre exemple est illustré dans la figure 2.21 où la scène du temple asiatique est composée d'une fumée homogène et éclairée à la fois par un éclairage artificiel et un éclairage naturel (ciel couvert CIE). Les caractéristiques de la fumée sont  $\alpha = 0,015$  et  $\sigma = 0,06$ .

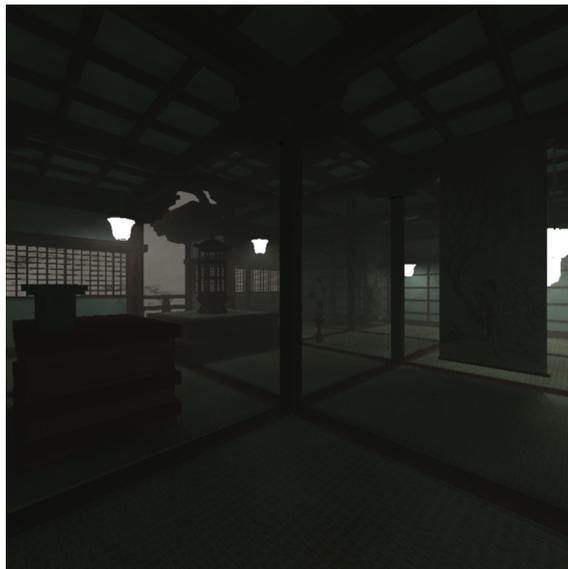


FIGURE 2.21 – Résultat obtenu avec la scène du temple asiatique et une fumée homogène isotrope dont les caractéristiques sont  $\alpha = 0,015$  et  $\sigma = 0,06$ .

Une autre exemple de scène, éclairé par un modèle de ciel clair standard CIE, est montré dans la figure 2.22. Seul l'éclairage naturel est présent. Nous pouvons voir les rayons de soleil passant par la fenêtre.



FIGURE 2.22 – Dans cette scène, seul l'éclairage naturel (modèle de ciel clair standard CIE), avec du soleil, est présent.



---

## Conclusion

L'ÉTUDE APPROFONDIE DE LA PROBLÉMATIQUE de l'illumination globale en présence de milieux participatifs et l'analyse des méthodes de résolution existantes nous ont permis de développer une nouvelle méthode de calcul originale. Cette méthode s'inspire de ce qui a été proposé dans le cadre de nos travaux concernant le rendu des surfaces. L'extension de la méthode de cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs aux milieux participatifs a nécessité la redéfinition des zones d'influence. Ces nouvelles zones volumiques s'adaptent, au même titre que les zones surfaciques, à la géométrie environnante et aux variations de l'éclairage dans le volume. Puisque le cache d'éclairage volumique est tridimensionnel, il peut devenir extrêmement long à alimenter en enregistrements. Afin d'éviter de créer des enregistrements dans des zones du volume peu intéressantes, une nouvelle méthode d'ajout des enregistrements permet de contrôler la création des enregistrements en fonction des caractéristiques du milieu participatif mais aussi des variations de l'éclairage dans le volume. Les zones du volume moins contributives seront moins densément recouvertes par des enregistrements. L'analyse des résultats obtenus avec notre nouvelle méthode de cache d'éclairage volumique à enregistrements adaptatifs montre que cette méthode est efficace dans le cadre de la simulation d'éclairage dans des environnements enfumés. Nous avons montré qu'elle peut être utilisée dans des scènes géométriquement complexes soumises à des éclairages de différentes natures. De plus, lorsque notre méthode pour les milieux participatifs est combinée avec un cache d'éclairage pour les surfaces, seulement deux caches d'éclairage doivent être maintenus facilitant ainsi l'implémentation et la maintenance de l'outil de photo-simulation. En effet, les deux caches, volumique et surfacique, possèdent un nombre non négligeable de concepts en commun. Notre méthode de cache d'éclairage, telle qu'elle a été présentée ici, se limite aux milieux participatifs isotropes. L'extension à la prise en compte de milieux anisotropes nécessite très peu d'adaptations et la plupart des concepts décrits restent valides. L'éclairage devra alors être remplacé par des données directionnelles (la luminance par exemple) qui seront projetées dans une base de fonctions telles que des harmoniques sphériques ou des ondelettes. Enfin, même si la nouvelle méthode offre des temps de calcul raisonnables au vu de la complexité de la problématique, la dimension temporelle (évolution de la fumée dans le temps et déplacement de l'observateur dans l'environnement) n'a pas encore été abordée dans cette partie. Ces aspects temporels influencent aussi les calculs d'éclairage effectués sur les surfaces. L'utilisation des deux caches tels qu'ils sont définis pour le moment, avec des fumées évoluant dans le temps, nécessite un recalcul complet pour chaque nouvelle image de l'animation. En plus d'être très long, ce recalcul pour chaque nouvelle image peut induire des effets de *flickering*. La partie suivante s'intéresse plus particulièrement à ces aspects dynamiques, aux problèmes qu'ils engendrent et à d'éventuelles solutions.





---

## Quatrième Partie

### CONSIDÉRATIONS SUR LES ASPECTS DYNAMIQUES



---

# Théories

**L**E FAIT QUE LA FUMÉE ÉVOLUE dans le temps implique que les conditions d'éclairage évoluent elles aussi. En effet, cette évolution implique pour chaque instant de la simulation de nouvelles interactions lumière/matière qu'il faut prendre en compte. Ces conditions d'éclairage sont différentes en chaque instant à la fois pour les milieux participatifs mais aussi pour les surfaces. Les méthodes présentées précédemment peuvent être utilisées dans le cadre d'une simulation dynamique. Cependant, chaque nouvelle image de l'animation devra faire l'objet d'un recalcul complet de l'éclairage. Cela peut devenir extrêmement coûteux. Cette partie aborde les différents aspects de la simulation d'éclairage au sein de milieux participatifs dont la forme évolue dans le temps.

## 1.1 La problématique d'une simulation dynamique

Dans le cadre de cette thèse, les seuls éléments dynamiques à prendre en compte sont la fumée et l'observateur. L'observateur n'influence pas les interactions lumineuses. Cependant, à chacun de ses déplacements, de nouvelles parties de la scène peuvent devenir visibles et des calculs complémentaires deviennent nécessaires. Toutefois, si les conditions d'éclairage n'ont pas évolué entre deux instants de l'animation, les calculs réalisés restent valables pour le nouvel instant de la simulation. Nous avons vu dans le chapitre 2 page 53 que notre méthode de cache d'éclairage avec des enregistrements adaptatifs était efficace dans ce type de simulation où seul l'observateur se déplace. Le problème de l'animation devient concret lorsqu'un élément constitutif de l'illumination globale évolue : extinction ou allumage d'une source de lumière, déplacement d'un objet, évolution de la fumée... Ces différentes évolutions des composantes de la scène influencent et modifient l'éclairage global en tout instant. Le recalcul complet de l'éclairage global pour chaque pas de temps peut devenir très coûteux notamment dans des environnements complexes. Le temps apparaît alors comme une quatrième dimension pour laquelle certaines informations doivent être stockées puis ré-exploitées pour éviter un trop grand nombre de nouveaux calculs pour chaque image de l'animation. L'objet de notre étude, décrite dans cette partie, n'est pas de proposer une méthode de rendu temps réel qui nécessite de faire des hypothèses et des simplifications concernant les modèles physiques. Le déplacement de l'observateur est une donnée d'entrée ainsi que l'évolution de la fumée. Cette évolution nous est donnée par le logiciel de *DSSF* sous la forme de fichiers décrivant, pour un instant de la simulation, les caractéristiques du milieu participatif. Les pas de temps de la simulation sont réguliers. Connaissant le déplacement de l'observateur et l'évolution de la fumée, l'objectif est donc de proposer une méthode de simulation d'éclairage physiquement réaliste et dynamique dans des environnements complexes et pouvant être enfumés. Le résultat de la simulation devra alors être présenté sous la forme d'une vidéo ou encore d'une séquence d'images.

## 1.2 Travaux connexes

La résolution de la problématique de l'illumination globale dans des scènes animées a fait l'objet de nombreuses études et reste un défi dans le domaine de l'informatique graphique. Un grand nombre des solutions proposées ces dernières années exploitent les possibilités des cartes graphiques. Elles s'appliquent principalement aux domaines ludiques où une impression de réalisme est demandée. Ces méthodes tentent de restituer une illumination globale visuellement plausible en temps interactif voire en temps réel. Ce n'est pas l'objet de notre étude où le réalisme physique est requis pour pouvoir étudier l'éclairage. Une simulation en temps réel ou interactif n'est pas notre objectif. Les études portant sur l'illumination globale physiquement réaliste dans des scènes dynamiques sont beaucoup moins nombreuses. Nous rappelons ici que l'idée de base de ce type de méthode est de ré-exploiter des données dans le temps afin de ne pas devoir recalculer l'ensemble de l'éclairage pour chaque image de l'animation. En effet, la première solution à la problématique d'une simulation dynamique est de choisir une méthode de résolution de l'illumination globale puis de tout recalculer pour chaque nouvelle image de la simulation. Le coût, notamment en terme de temps de calcul, d'une méthode aussi brutale peut rapidement devenir très élevé. Pour accélérer ces temps de calcul, on peut choisir des critères de précision plus faibles pour la méthode choisie (par exemple un nombre d'échantillons plus faible pour les méthodes de type tracé de chemins) mais des effets de scintillement (le terme anglais *flickering* est souvent utilisé) peuvent apparaître dans la séquence résultat. Ces défauts sont dus à des imprécisions de calcul pouvant varier entre deux instants de la simulation. La figure 1.1 illustre ce type de défaut dans le cas d'une simulation avec un milieu participatif.

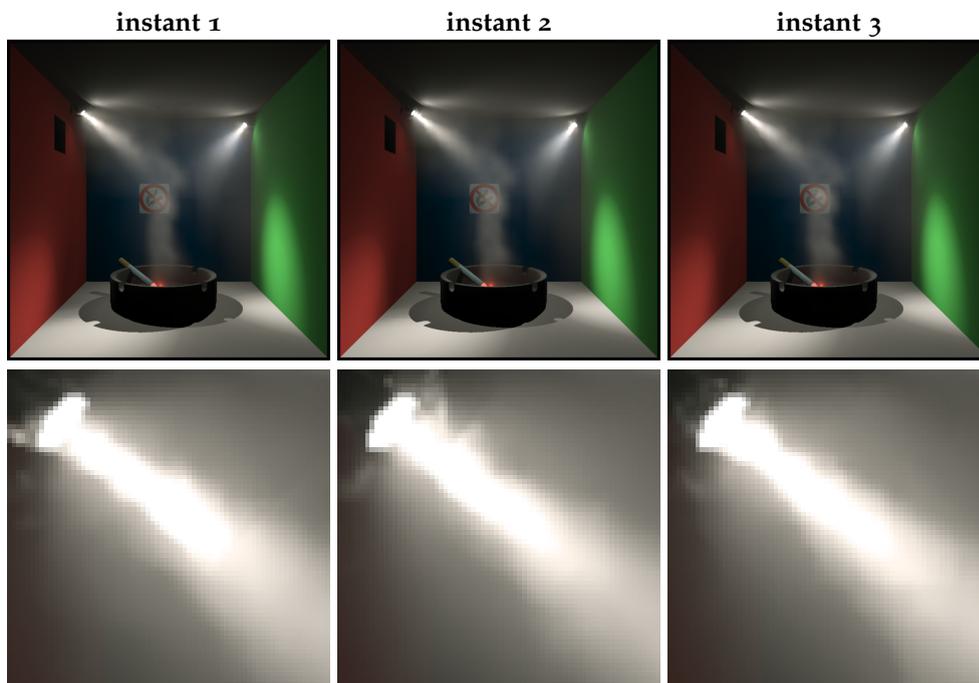


FIGURE 1.1 – Des effets de scintillement (*flickering*) peuvent apparaître dans les simulations dynamiques d'illumination globale dus à des imprécisions de calcul. Ici, avec une méthode de cache d'éclairage volumique imprécise, la frontière du faisceau lumineux (qui devrait être plus régulière) scintille durant le rendu animé. Les instants sont séparés de  $1/25^e$  de seconde.

Sans être exhaustif et sans rentrer dans les détails, nous citons ci-après quelques méthodes existantes de calcul de l'éclairage global dans des scènes animées. Toutefois, nous avons trouvé très peu de travaux traitant de l'illumination globale dans des environnements contenant des milieux participatifs dynamiques<sup>1</sup>. Ces méthodes s'appuient sur certains concepts pouvant être utilisés pour notre problématique particulière. L'état de l'art de Damez *et al.* [DDM03] offre un premier aperçu des méthodes d'illumination globale pour des applications interactives et des rendus animés privilégiant la qualité des résultats (donc non interactives). Le lecteur pourra y trouver quelques descriptions détaillées de méthodes existantes. Cependant, depuis 2003, de nouvelles méthodes de résolution ont été proposées. Dans [HDMS03], Havran *et al.* développent une méthode utilisant un tracé de chemins qui calcule plusieurs images de l'animation à la fois tout en exploitant la cohérence temporelle. Cette ré-exploitation des chemins pour plusieurs images successives de l'animation permet d'éviter les défauts temporels (le scintillement par exemple) tout en évitant des recalculs coûteux (le calcul des visibilitées par exemple). Ils proposent aussi une technique appelée *Animation Buffer Disc* pour éviter une surcharge de la mémoire. L'utilisation d'une méthode de type tracé de chemin reste toutefois très coûteuse pour le calcul d'une seule image d'autant plus si la scène est composée de milieux participatifs. Dans [WMM<sup>+</sup>04], Weber *et al.* utilisent la méthode de *Photon Mapping*. Ils proposent une estimation de densité des photons spatio-temporelle qui utilise un filtrage bilatéral. Tawara *et al.*, dans [TMS04], proposent aussi une méthode exploitant la cohérence temporelle dans la phase de collecte finale (*final gathering*) d'une méthode de type *Photon Mapping* combinée à un cache d'éclairement. Pour cela, ils utilisent une structure de données permettant de stocker les luminances incidentes et leurs directions au point considéré. À chacune de ces directions incidentes, une durée de vie est associée et qui dépendant de l'objet dynamique intersecté. L'inconvénient de la méthode est que le cache et plus particulièrement les enregistrements ne peuvent pas s'adapter aux variations de l'éclairement. Les contributions directes sont recalculées pour chaque image de l'animation. Des défauts peuvent apparaître dans le cas de fortes sources indirectes. Le cache d'éclairement a aussi été utilisé dans les travaux de Smyk *et al.* [SiKDM05] pour prendre en compte la cohérence temporelle. Cette méthode est basée sur une structure de donnée appelée *anchor*. Cette structure de données permet de détecter les changements de visibilité et de luminance pour un enregistrement donné au cours de la séquence animée. Ainsi la valeur d'éclairement des enregistrements peut être mise à jour efficacement. Gautron *et al.* [GBP06] exploitent aussi la méthode de cache d'éclairement ou de luminance dans le cas d'environnements animés. Ils introduisent pour cela des gradients temporels et une fonction de pondération temporelle. Ainsi certaines données peuvent être calculées pour plusieurs images successives de l'animation, ce qui limite ainsi les effets de scintillement. Toutefois, les défauts constatés dans la section 1.3 page 50, inhérents à la méthode de cache d'éclairement, restent présents. Enfin, nous pouvons citer les travaux de Meyer et Anderson [MA06] reposant sur le tracé de chemins. Ils proposent l'utilisation d'un filtrage statistique temporel pour diminuer la variance des images et limiter les effets de scintillement. Pour cela, une première estimation est réalisée avec peu d'échantillons. La variation du bruit résultant de ce sous-échantillonnage est utilisée pour déterminer une « base de lissage » (*smooth basis*). Ensuite, les solutions bruitées sont projetées dans cette « base de lissage » pour produire les images finales. Toutefois, le tracé de chemins restent une méthode relative-

1. Nous pouvons tout de même citer les travaux de Jiménez *et al.* qui proposent une méthode d'illumination globale interactive avec des milieux participatifs dynamiques basée sur la méthode de *Selective Photon Mapping* (voir [DBMS02]).

ment coûteuse, même pour un sous-échantillonnage.

### 1.3 Discussion et perspective de travail

Le problème de l'illumination globale en présence de milieux participatifs animés a fait l'objet de très peu d'études. Les concepts proposés par les méthodes précédentes peuvent être difficiles à utiliser dans le cas d'environnements enfumés. Nous pensons que la méthode de cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs (surfaiques ou volumiques) présentée dans ce document peut être une piste de travail intéressante pour résoudre cette problématique. Les mêmes principes peuvent être utilisés pour les enregistrements surfaiques et volumiques. Nous décrivons dans la partie suivante une nouvelle méthode qui exploite la cohérence temporelle. Le principe des enregistrements adaptatifs temporels est introduit. La durée de vie d'un enregistrement s'adapte aux variations temporelles de l'éclairage reçu. Enfin, la forme des zones d'influence évolue dans le temps en fonction de ces variations d'éclairage.

# Un cache d'éclairage temporel

LA MÉTHODE DE CACHE D'ÉCLAIREMENT à enregistrements adaptatifs, surfaciques ou volumiques, que nous avons développée et décrite dans ce document peut être utilisée dans le cas de scènes dynamiques. Le calcul complet des conditions d'éclairage est alors nécessaire pour chaque image de l'animation. Les temps de calcul peuvent devenir extrêmement longs notamment avec des scènes très complexes. Nous pensons cependant qu'elle offre une piste de travail intéressante pour la simulation d'éclairage en présence de milieux participatifs dynamiques. Dans cette partie, nous décrirons une méthode originale qui réutilise le concept d'enregistrements adaptatifs pour prendre en compte le déplacement de l'observateur et l'évolution des fumées dans l'espace et le temps.

## 2.1 Présentation de la méthode

Nous nous proposons ici d'exploiter les méthodes de cache d'éclairage surfacique et volumique avec des enregistrements adaptatifs pour des scènes dynamiques. Les enregistrements adaptatifs sont étendus à la dimension temporelle. En effet, une durée de vie dépendante des variations temporelles de l'éclairage est associée à chaque enregistrement. Ces variations d'éclairage temporelles sont alors restituées à l'aide de gradients temporels. La forme des enregistrements s'adapte aussi aux variations pour une meilleure restitution des effets lumineux et pour éviter la création d'un trop grand nombre d'enregistrements au cours de la simulation. Puisque les méthodes de cache d'éclairage avec des enregistrements adaptatifs pour les surfaces et les volumes sont basées sur les mêmes principes, les mêmes concepts concernant l'adaptation temporelle peuvent alors être utilisés. Ainsi, deux caches temporels (un pour les surfaces et un pour les volumes) seront utilisés pour l'ensemble de l'animation. Comme pour les méthodes de cache d'éclairage statiques, la méthode de cache d'éclairage temporelle que nous proposons ici opère en deux passes : une passe de précalcul, où les enregistrements spatio-temporels sont créés et stockés dans le cache, suivie par une passe de rendu. Avant de rentrer dans les détails de notre méthode, nous décrirons dans la section suivante les différentes contraintes initiales sur l'espace temps ainsi que la manière dont il est décomposé.

## 2.2 Décomposition de l'espace temps

La décomposition de l'espace temps est contrainte par les données d'entrée fournies par l'outil de simulation numérique *DSSF*. Les données photométriques (coefficients de diffusion et d'absorption) de la fumée sont calculées à des instants régulièrement

répartis sur l'espace temps. Nous appellerons par la suite ces instants de simulation les *instants clés*. La discrétisation temporelle requise pour une animation est de l'ordre de 25 images par seconde. Cependant, les *instants clés* sont distants l'un de l'autre de plus de  $1/25^e$  de seconde. La figure 2.1 montre une schématisation de cette discrétisation de l'espace temps.

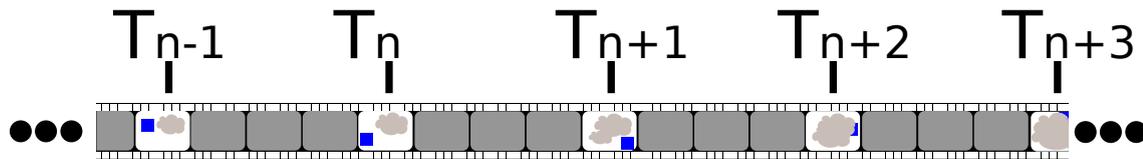


FIGURE 2.1 – La décomposition de l'espace temps (représentée par la pellicule) en des instants clés  $T_n$  pour lesquels les caractéristiques de la fumée (le nuage en gris dans les vignettes) et la position de l'observateur sont connues. Ici, le déplacement de l'observateur est représenté par le changement de position du cube bleu entre chaque instant clé. Les vignettes grises représentent des instants intermédiaires pour lesquels les informations doivent être retrouvées par interpolation.

Il est nécessaire de retrouver les informations concernant la fumée pour les instants intermédiaires. Nous faisons ici l'hypothèse que la fumée évolue linéairement entre deux *instants clés*. Ainsi, les caractéristiques  $C_{T_i}$  (c'est-à-dire la distribution des caractéristiques photométriques) de la fumée pour un instant intermédiaire  $T_i$  situé entre deux instants clés  $T_n$  et  $T_{n+1}$  sont retrouvées à l'aide d'une interpolation linéaire :

$$C_{T_i} = \left(1 - \frac{T_i - T_n}{T_{n+1} - T_n}\right) C_{T_n} + \left(\frac{T_i - T_n}{T_{n+1} - T_n}\right) C_{T_{n+1}}. \quad (2.1)$$

Enfin, notons aussi que le déplacement de l'observateur est connu à l'avance. Son point de vue peut donc être facilement retrouvé pour tout instant de l'animation.

La problématique peut être formulée de la manière suivante : pour chaque image de l'animation (aux instants clés et intermédiaires), l'éclairage doit être calculé sur toutes les surfaces vues depuis l'observateur. Pour les volumes, la luminance atténuée et diffusée doit elle aussi être calculée sur tous les rayons issus de l'observateurs. Puisque les caractéristiques de la fumée (coefficient d'absorption et de diffusion) sont interpolées entre deux instants clés, une première idée serait de calculer ces informations photométriques seulement aux instants clés puis de les interpoler pour les instants intermédiaires. Les inconvénients de cette technique sont de deux types. Le premier est la nécessité de maintenir quatre caches d'éclairage en même temps : deux caches surfaciques et deux caches volumiques pour les deux instants clés encadrant les instants intermédiaires en cours de calcul. Ensuite, recalculer les éclairages pour chaque instant clé peut être très coûteux en temps de calcul. En effet, les simulations fournies par *DSSF* ont souvent une discrétisation de l'ordre de la seconde. Le temps total pouvant être de quelques minutes, plusieurs centaines d'instants clés de simulation peuvent alors être fournis. Il est aussi dommageable de devoir recalculer certaines informations alors que celles-ci peuvent ne pas évoluer pendant plusieurs instants clés (si l'observateur se trouve dans une pièce où l'éclairage est peu influencé par l'évolution de la fumée par exemple). Notre méthode propose donc de maintenir deux caches temporels (un pour les surfaces et un pour les volumes) utilisables pour l'ensemble de l'animation. Les enregistrements peuvent être valides pour plusieurs instants clés. Leur durée de validité dépend de la variation de l'éclairage. Plus cette variation sera forte, plus la durée de validité de l'enregistrement sera faible. Dans une zone où l'éclairage varie très peu, les

enregistrements auront alors une date de validité très longue évitant ainsi des recalculs inutiles (notre méthode reste cependant indépendante de la façon dont l'espace temps est décomposé).

## 2.3 Enregistrements adaptatifs spatio-temporels

Nous introduisons ici des concepts valables à la fois pour les enregistrements adaptatifs surfaciques et volumiques.

### 2.3.1 Durée de vie d'un enregistrement

Comme nous l'avons déjà dit, une durée de vie est assignée à chaque enregistrement. Cette durée de vie est exprimée en nombre d'instant clés pour lesquels l'enregistrement peut être utilisé. Plus précisément, cette durée de vie est exprimée à l'aide d'un instant de début et d'un instant de fin de validité, tous deux positionnés sur des instants clés. Pour tous les instants clés et intermédiaires entre les instants de début et de fin de validité, une interpolation sera nécessaire pour retrouver les valeurs photométriques recherchées. La durée de vie minimum d'un enregistrement est de deux instants clés. En effet, tout instant intermédiaire doit pouvoir, au minimum, retrouver les informations photométriques désirées pour l'interpolation aux instants clés le bornant. Ensuite, il y a peu de chance qu'un enregistrement soit valide pour l'ensemble de l'animation. Une durée de vie maximum est alors définie telle que au delà de cette durée de nouveaux enregistrements devront être créés. Nous verrons plus tard la pertinence de ce choix lorsque nous décrirons les différentes adaptations temporelles. La durée de vie maximum  $\Delta_T^{max}$  est une constante fixée par l'utilisateur. Nous utilisons ici les notations introduites par la figure 2.2.

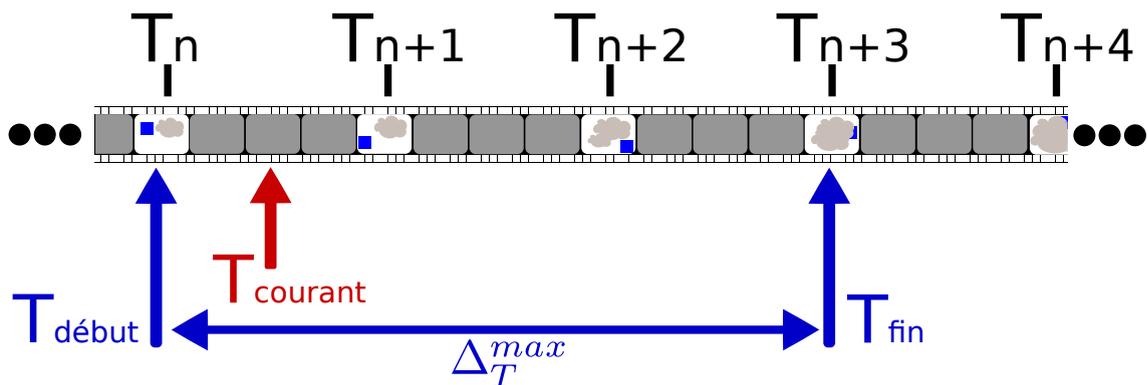


FIGURE 2.2 – La création des enregistrements spatio-temporels. Les enregistrements sont créés pour les instants clés et ont une durée de validité  $\Delta_T^{max}$ . Ici,  $\Delta_T^{max} = 3$  (exprimée en instants clés) et  $T_{courant}$  est l'instant en cours de calcul.  $T_{debut}$  correspond à l'instant de création des nouveaux enregistrements et  $T_{fin} = T_{debut} + \Delta_T^{max}$  à l'instant de fin de validité.

Durant la phase de précalcul, les instants de simulation (les instants clés et les instants intermédiaires) sont traités dans l'ordre chronologique. Lorsque l'instant en cours de calcul est un instant clé, les nouveaux enregistrements spatio-temporels ont pour instant de début  $T_{debut}$  l'instant clé courant. Si, au contraire, l'instant courant est un instant intermédiaire positionné entre les instants clés  $T_n$  et  $T_{n+1}$ , les enregistrements nouvellement créés auront pour instant de début l'instant clé  $T_n$  (voir la figure 2.2).

Cependant, les enregistrements nouvellement créés apparaissent de façon brutale entre l'instant intermédiaire précédant directement l'instant clé  $T_{debut}$ . Ces apparitions brutales entraînent des effets de scintillement. Pour éviter cela, nous introduisons une fonction de pondération temporelle  $w(t)$  permettant une apparition plus douce entre l'instant clé  $T_{n-1}$  précédant directement l'instant de début  $T_{debut} = T_n$  (voir la figure 2.3). Cette fonction permet une pondération temporelle de la contribution, au calcul de l'éclairage, de l'enregistrement dans le temps.

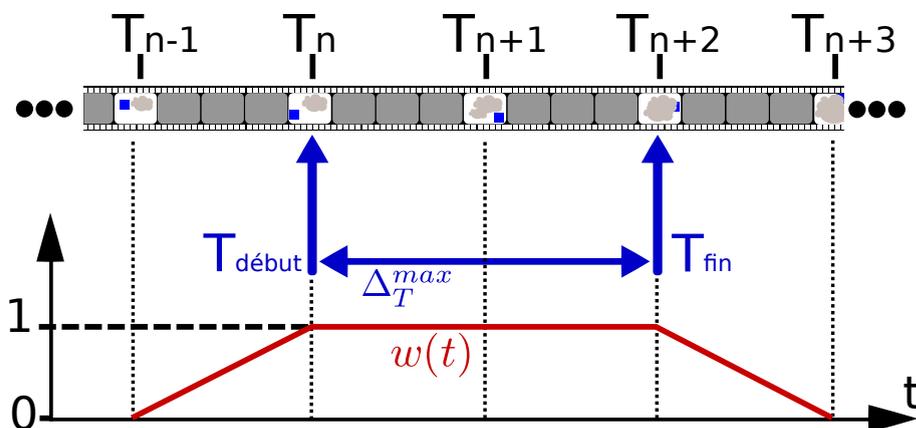


FIGURE 2.3 – Pour éviter les effets de scintillement dus à une apparition brutale des enregistrements, une fonction de pondération est introduite  $w(t)$  (représentée en rouge) : l'enregistrement apparaît doucement entre  $T_{n-1}$  et  $T_{debut} = T_n$  et disparaît doucement entre  $T_{fin}$  et  $T_{n+1}$ .

Cette fonction de pondération  $w(t)$  est une fonction linéaire permettant une apparition douce de l'enregistrement durant l'animation :

$$w(t) = \frac{t - T_{debut-1}}{T_{debut} - T_{debut-1}} \quad (2.2)$$

avec  $T_{debut-1} < t \leq T_{debut}$ . Il faut aussi pouvoir gérer les disparitions brutales des enregistrements. La même fonction de pondération est utilisée

$$w(t) = \frac{t - T_{fin}}{T_{fin+1} - T_{fin}} \quad (2.3)$$

avec  $T_{fin} < t \leq T_{fin+1}$ . Entre  $T_{debut}$  et  $T_{fin}$ , la fonction de pondération vaut 1 (voir la figure 2.3).

### 2.3.2 Description des enregistrements adaptatifs spatio-temporels

Dans la définition précédente des enregistrements adaptatifs spatio-temporels, leur valeur d'éclairage et la forme de leur zone d'influence sont calculées en  $T_{debut}$  et considérées comme constantes tout au long de leur durée de validité. Toutefois, l'éclairage peut varier durant cette durée de validité et il serait plus judicieux d'anticiper ces variations. Pour cela, trois enregistrements adaptatifs classiques (c'est-à-dire non temporels)  $R_{debut}$ ,  $R_{milieu}$  et  $R_{fin}$  sont calculés respectivement aux instants clés  $T_{debut}$ ,  $T_{milieu} = T_{debut} + (T_{fin} - T_{debut})/2$  (soit l'instant clé le plus proche du milieu entre  $T_{debut}$  et  $T_{fin}$ ) et  $T_{fin}$ . Chacun de ces enregistrements adaptatifs non temporels est calculé indépendamment l'un de l'autre en fonction des conditions d'éclairage dépendantes de l'instant clé de calcul. Le principe est schématisé dans la figure 2.4.  $R_{debut}$ ,  $R_{milieu}$

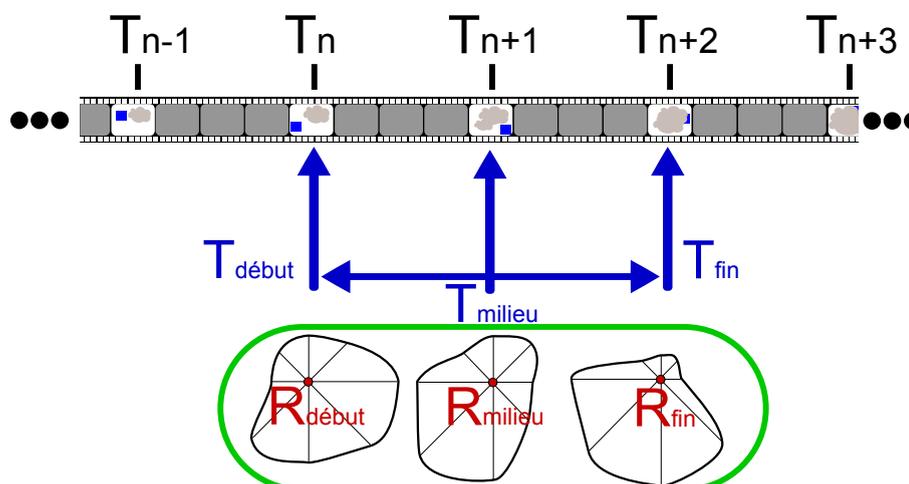


FIGURE 2.4 – Trois enregistrements non temporels  $R_{début}$ ,  $R_{milieu}$  et  $R_{fin}$  respectivement calculés (indépendamment l'un de l'autre) aux instants clés  $T_{début}$ ,  $T_{milieu}$  et  $T_{fin}$ . Ici, l'exemple est donné pour un enregistrement spatio-temporel (représenté en vert) de 3 instants clés de validité regroupant les 3 enregistrements non temporels.

et  $R_{fin}$  ont donc chacun une forme de zone d'influence, des gradients et une valeur d'éclairage différents l'un de l'autre. L'idée est alors de regrouper ces trois enregistrements adaptatifs non temporels, que nous appellerons dorénavant *enregistrements primaires*, pour n'en faire qu'un, spatio-temporel, valide entre  $T_{début}$  et  $T_{fin}$ <sup>1</sup>. Nous proposons d'utiliser une combinaison de formulations de Taylor du second ordre pour retrouver, au cours de la durée de vie de l'enregistrement, les longueurs des axes des enregistrements, les gradients (de translation et de rotation) et les valeurs d'éclairage. Pour un instant intermédiaire (ou un instant clé différent de  $T_{début}$ ,  $T_{milieu}$  et  $T_{fin}$ ), un enregistrement non temporel pourra être reconstruit à l'aide de l'enregistrement adaptatif spatio-temporel. Cette reconstruction est illustrée dans la figure 2.5. Comme pour la méthode de cache d'éclairage non temporel, la luminance dans la direction de l'observateur pourra alors être calculée à partir d'enregistrements reconstitués.

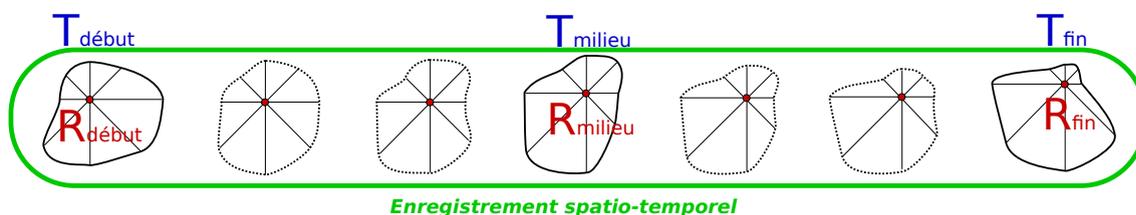


FIGURE 2.5 – Un enregistrement spatio-temporel (en vert) permet de retrouver les enregistrements primaires (en trait plein) et de reconstruire des enregistrements intermédiaires (en pointillés) pour les instants intermédiaires.

### 2.3.3 Combinaison de gradients temporels

La durée de vie réelle d'un enregistrement adaptatif spatio-temporel, créé à partir de trois enregistrements primaires, est  $]T_{début-1}; T_{fin+1}[$ . À l'aide d'une combinaison de

1. Cet enregistrement spatio-temporel sera plus précisément valide dans l'espace temps  $]T_{début-1}, T_{fin+1}[$  grâce à la fonction de pondération décrite dans la section 2.3.1.

gradients temporels, il est possible de définir une interpolation permettant d'anticiper, au cours de cette durée de vie, les variations temporelles de l'éclairage. Pour cela, nos gradients temporels doivent permettre de retrouver les caractéristiques des enregistrements primaires : forme de la zone d'influence, gradients non temporels (de translation et de rotation) et la valeur de l'éclairage (voir la figure 2.5). Cependant, des extrapolations hasardeuses peuvent arriver entre  $]T_{debut-1}; T_{debut}[$  et  $]T_{fin}; T_{fin+1}[$ . En effet, les enregistrements primaires qui contrôlent les gradients temporels ne sont définis que dans l'espace temps  $[T_{debut}; T_{fin}]$  puisqu'ils sont définis à l'aide des enregistrements primaires  $R_{debut}$ ,  $R_{milieu}$  et  $R_{fin}$ . La reconstruction de la variation temporelle de l'éclairage se fera donc en trois temps (voir la figure 2.6). Dans l'espace temps  $]T_{debut-1}; T_{debut}[$ , aucune variation ne sera considérée ; l'enregistrement primaire  $R_{debut}$  sera utilisé. L'interpolation aura réellement lieu dans l'espace temps  $]T_{debut}; T_{fin}[$ . Enfin, aucune variation ne sera considérée dans l'espace  $]T_{fin}; T_{fin+1}[$  ; l'enregistrement  $R_{fin}$  sera utilisé. Le principe est schématisé dans la figure 2.6.

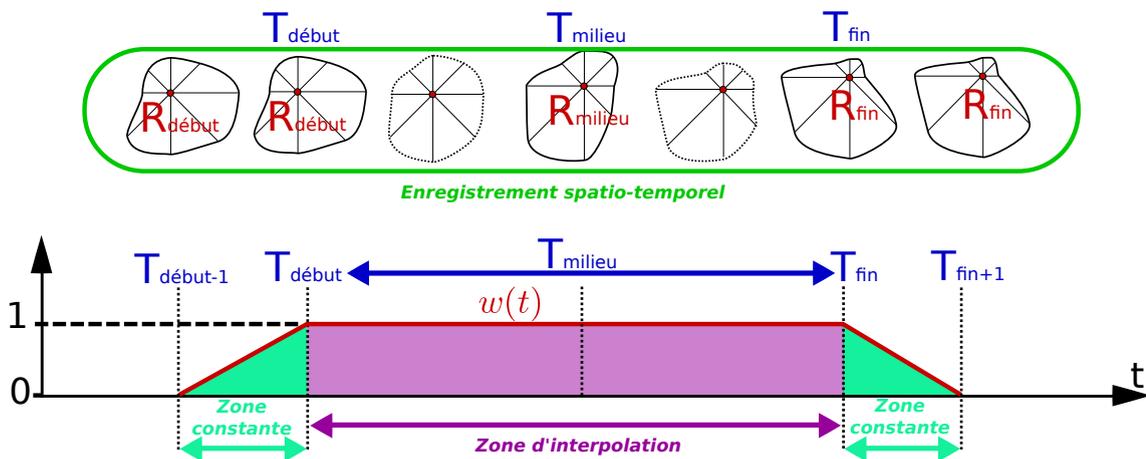


FIGURE 2.6 – L'interpolation en 3 temps dans un enregistrement adaptatif spatio-temporel : dans les zones constantes (en vert), aucune interpolation ne sera faite (seule la fonction de pondération  $w(t)$  jouera un rôle d'interpolation). Dans l'espace temps  $]T_{debut}; T_{fin}[$  (en rose), des enregistrements temporaires (dessinés en pointillés) devront être recalculés à l'aide de gradients temporels. Ces gradients permettent aussi de recalculer les caractéristiques des enregistrements primaires en  $T_{debut}$ ,  $T_{milieu}$  et  $T_{fin}$ .

### Gradients photométriques

Les caractéristiques photométriques recherchées dans la zone d'interpolation d'un enregistrement adaptatif spatio-temporel sont de deux types : l'éclairage au centre de l'enregistrement et les différents gradients pour chacun des axes de la zones d'influence. Ces derniers permettent d'anticiper la variation locale de l'éclairage en un instant précis de la simulation. Nous introduisons ici aussi une formulation de Taylor du second ordre permettant de retrouver exactement ces différentes caractéristiques aux instant  $T_{debut}$ ,  $T_{milieu}$  et  $T_{fin}$ . Si l'on considère une instant  $t \in [T_{debut}; T_{fin}]$ , la formulation de Taylor pour l'interpolation de la valeur de l'éclairage  $\tilde{E}(t)$  est donnée par :

$$\tilde{E}(t) = E(T_{debut}) + G_1^{ecl}(t - T_{debut}) + G_2^{ecl} \frac{(t - T_{debut})^2}{2} \quad (2.4)$$

où  $E(T_{debut})$  est la valeur de l'éclairage de l'enregistrement primaire  $R_{debut}$ .  $G_1^{ecl}$  et  $G_2^{ecl}$  sont les gradients temporels d'éclairage. Ces gradients sont calculés en résolvant

le système :

$$\begin{cases} \tilde{E}(T_{fin}) &= E(T_{debut}) + G_1^{ecl} \Delta_T + G_2^{ecl} \frac{\Delta_T^2}{2} \\ \tilde{E}(T_{milieu}) &= E(T_{debut}) + G_1^{ecl} \Delta_{milieu} + G_2^{ecl} \frac{\Delta_{milieu}^2}{2} \end{cases} \quad (2.5)$$

avec  $\Delta_T = T_{fin} - T_{debut}$  et  $\Delta_{milieu} = T_{milieu} - T_{debut}$ . Concernant les différents gradients (rotation et translation) des axes de la zone d'influence de l'enregistrement, ils nous sont donnés par la formulation suivante :

$$\overline{Grad}_k(t) = Grad_k(T_{debut}) + G_k^{grad1} (t - T_{debut}) + G_k^{grad2} \frac{(t - T_{debut})^2}{2} \quad (2.6)$$

avec  $\overline{Grad}_k$  le gradient considéré (translation ou rotation) sur l'axe  $k$  pour l'instant  $t$ .  $G_k^{grad1}$  et  $G_k^{grad2}$  sont les gradients temporels permettant de retrouver les gradients de translation (pour les enregistrements surfaciques et volumiques) et de rotation (seulement pour les enregistrements surfaciques) pour tout instant  $t \in [T_{debut}; T_{fin}]$  sur l'axe  $k$ . Nous renvoyons le lecteur vers le chapitre 2.3 page 56 concernant la définition et le calcul des différents gradients pour les enregistrements adaptatifs. Les gradients temporels  $G_k^{grad1}$  et  $G_k^{grad2}$  sont calculés en résolvant le système :

$$\begin{cases} \overline{Grad}_k(T_{fin}) &= Grad_k(T_{debut}) + G_k^{grad1} \Delta_T + G_k^{grad2} \frac{\Delta_T^2}{2} \\ \overline{Grad}_k(T_{milieu}) &= Grad_k(T_{debut}) + G_k^{grad1} \Delta_{milieu} + G_k^{grad2} \frac{\Delta_{milieu}^2}{2} \end{cases} \quad (2.7)$$

### Gradients géométriques

La forme de la zone d'influence de l'enregistrement adaptatif spatio-temporel est aussi variable durant la durée de vie de cet enregistrement (voir la figure 2.5 page 127). Si les axes de la zone d'influence restent les mêmes dans le temps, leur longueur varie dans le temps. À l'instar des gradients temporels photométriques, nous utilisons une formulation de Taylor du second ordre pour retrouver exactement les longueurs des enregistrements primaires  $R_{debut}$ ,  $R_{milieu}$  et  $R_{fin}$ . Pour l'axe  $k$  de la zone d'influence, sa longueur  $\tilde{l}_k$  pour l'instant  $t \in [T_{debut}; T_{fin}]$  est définie par la formulation :

$$\tilde{l}_k(t) = l_k(T_{debut}) + G_k^{length1} (t - T_{debut}) + G_k^{length2} \frac{(t - T_{debut})^2}{2} \quad (2.8)$$

avec  $l_k(T_{debut})$  la longueur de l'axe  $k$  pour l'enregistrement primaire  $R_{debut}$  et  $G_k^{length1}$  et  $G_k^{length2}$  les gradients temporels aidant à retrouver la longueur de l'axe  $k$  pendant la durée de vie de l'enregistrement spatio-temporel considéré. Ces gradients temporels peuvent être retrouvés en résolvant le système à deux inconnues suivant :

$$\begin{cases} \tilde{l}_k(T_{fin}) &= l_k(T_{debut}) + G_k^{length1} \Delta_T + G_k^{length2} \frac{\Delta_T^2}{2} \\ \tilde{l}_k(T_{milieu}) &= l_k(T_{debut}) + G_k^{length1} \Delta_{milieu} + G_k^{length2} \frac{\Delta_{milieu}^2}{2} \end{cases} \quad (2.9)$$

## 2.4 Utilisation des enregistrements adaptatifs spatio-temporels

L'utilisation des enregistrements adaptatifs spatio-temporels fonctionne sur le même principe que celui des enregistrements non temporels. Pour l'instant  $t$  (un instant intermédiaire ou un instant clé) en cours de calcul, l'ensemble  $S$  des enregistrements

temporels valides  $R$  pour l'interpolation est donnée par :

$$S = \{R : T_{debut-1}^R < t < T_{fin+1}^R\} \quad (2.10)$$

avec  $T_{debut-1}^R$  et  $T_{fin+1}^R$  respectivement le début et la fin de la durée de validité de l'enregistrement  $R$ . Si  $S = 0$ , alors un nouvel enregistrement adaptatif spatio-temporel doit être créé<sup>2</sup>, sinon l'éclairage  $E(p, t)$  au point  $p$  considéré (sur une surface ou dans le volume) et à l'instant  $t$  est défini par :

$$E(p, t) = \frac{\sum_{R \in S} E_R(p, t) w_R(t)}{\sum_{R \in S} w_R(t)}. \quad (2.11)$$

Comme nous l'avons dit dans la section 2.3.3, l'éclairage interpolé  $E_R(p, t)$  au cours de la durée de vie d'un enregistrement temporel  $R$  se fait en trois étapes dans l'espace temps  $]T_{debut-1}^R; T_{fin+1}^R[$  :

$$E_R(p, t) = \begin{cases} E_R(p, T_{debut}^R) & \text{Si } t \leq T_{debut}^R \\ E_R(p, T_{fin}^R) & \text{Si } t \geq T_{fin}^R \\ E_R^{interp}(p, t) & \text{Sinon.} \end{cases} \quad (2.12)$$

$E_R^{interp}(p, t)$  est l'éclairage interpolé au point  $p$  à l'instant  $t$  en utilisant les gradients temporels définis précédemment (équations 2.4, 2.6 et 2.8). Il n'est pas nécessaire de reconstituer complètement l'enregistrement intermédiaire à l'instant  $t$ . Seuls les axes entourant la position  $p$ , leurs longueurs et leurs différents gradients sont nécessaires (voir le chapitre 2.3 page 56 pour l'interpolation surfacique et le chapitre 2.2 page 91 pour l'interpolation volumique). Une fois que les axes utiles et leurs caractéristiques sont reconstruits, il est possible de savoir si  $p$  est à l'intérieur de la zone d'influence. Si tel est le cas, une interpolation telle qu'elle a été définie pour les caches surfacique et volumique peut alors être effectuée. Avant de réaliser cette reconstruction des axes, la longueur du segment  $\vec{x_R x_p}$  (avec  $x_R$  la position de l'enregistrement  $R$  et  $x_p$  la position du point  $p$ ) doit être inférieure à la longueur de l'axe le plus long de la zone d'influence. Pour un enregistrement adaptatif spatio-temporel, cette longueur maximum est la longueur de l'axe le plus long que peut avoir sa zone d'influence au cours de sa durée de vie (voir la figure 2.7). L'axe le plus long  $l_{max}$  est donné par :

$$l_{max} = \max \left[ l_{max}(R_{debut}), l_{max}(R_{milieu}), l_{max}(R_{fin}) \right] \quad (2.13)$$

avec  $l_{max}(R_i)$  la longueur de l'axe le plus long de l'enregistrement primaire  $i$ . L'interpolation introduite dans la section 2.3.3 ne garantit pas que  $l_{max}$  soit nécessairement la longueur d'un des enregistrements primaires. La longueur obtenue par cette interpolation sera alors limitée à  $l_{max}$  (si  $\tilde{l}_k(t) > l_{max}$  alors  $\tilde{l}_k(t)$  est fixé à  $l_{max}$ ).

## 2.5 Adaptation de la durée de vie

### 2.5.1 Adaptation photométrique

Pour le moment, les enregistrements adaptatifs spatio-temporels ont été présentés avec une durée de vie fixe. Elle est égale à  $\Delta_T^{max}$ , une durée de vie maximum autorisée et fixée

2. Si l'ensemble  $S$  ne contient que des enregistrements spatio-temporels dont la durée de vie vérifie  $T_{debut-1} \leq t < T_{debut}$  (ou  $T_{fin} < t \leq T_{fin+1}$ ), nous pensons qu'un nouvel enregistrement doit être créé car  $t$  n'est borné par aucun enregistrement dont l'interpolation est validée (voir la section 2.5.1).

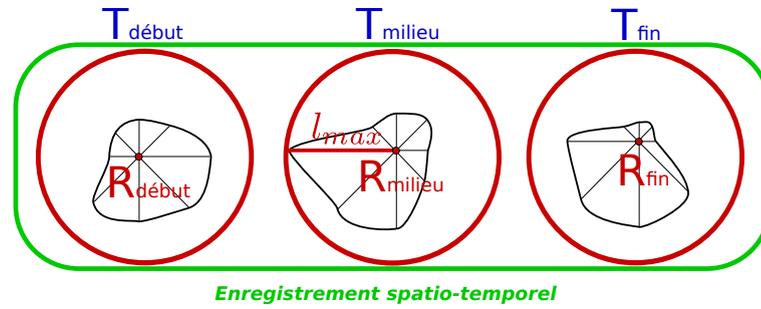


FIGURE 2.7 – L’axe le plus long  $l_{max}$  de la zone d’influence d’un enregistrement adaptatif spatio-temporel : le cercle rouge représente le premier test pour savoir si un point  $p$  est à l’intérieur de la zone d’influence de l’enregistrement adaptatif spatio-temporel.

par l’utilisateur. Ceci peut avoir quelques inconvénients. En effet, les fortes variations d’éclairement dans le temps peuvent être mal restituées malgré l’utilisation de gradients temporels du second ordre. L’idée proposée ici est d’adapter la durée de vie de l’enregistrement en fonction de ces variations d’éclairement. Le processus est illustré dans la figure 2.8. À l’instar de l’adaptation des zones d’influence des enregistrements non temporels en fonction des variations d’éclairement, des instants de contrôle aideraient à vérifier la validité des gradients. Ceci pourrait se faire en comparant une valeur d’éclairement interpolée à une valeur réelle. Cependant, contrairement à l’adaptation des enregistrements non temporels, la valeur réelle doit être recalculée entièrement et nécessite donc un nouveau tracé de chemins et la création d’un nouvel enregistrement primaire. En effet, les conditions d’éclairage ayant potentiellement changées, le tirage réalisé pour des instants différents n’est plus valide. Cette technique est donc trop coûteuse en temps de calcul. Nous nous contenterons de comparer les valeurs d’éclairement calculées pour les enregistrements primaires  $R_{debut}$ ,  $R_{milieu}$  et  $R_{fin}$ . Si les valeurs sont trop différentes les unes des autres, la durée de vie actuelle de l’enregistrement est trop longue et il faut la diminuer. Si l’on se réfère à la figure 2.8, la première étape (lorsque l’on doit créer un nouvel enregistrement spatio-temporel) consiste à créer trois enregistrements primaires  $R_{debut}$ ,  $R_{milieu}$  et  $R_{fin}$  avec  $T_{fin} - T_{debut} = \Delta_T^{max}$ . Leurs valeurs d’éclairement sont comparées deux à deux, le rapport de l’une par rapport à l’autre devant être compris dans une fourchette d’erreur  $[err_{min}; err_{max}]$  autorisée :

$$\begin{cases} err_{min} \leq \frac{E(T_{debut})}{E(T_{milieu})} \leq err_{max} \\ err_{min} \leq \frac{E(T_{debut})}{E(T_{fin})} \leq err_{max} \\ err_{min} \leq \frac{E(T_{milieu})}{E(T_{fin})} \leq err_{max}. \end{cases} \quad (2.14)$$

Si un des rapports n’est pas dans la fourchette d’erreur autorisée, alors il n’est pas possible de créer un enregistrement adaptatif spatio-temporel. L’espace temps  $[T_{fin}; T_{debut}]$  est coupé en deux sous-espaces temps et le processus s’applique aux deux sous-espaces (voir la figure 2.8). Nous pensons qu’un rapport de l’ordre du centième, autrement dit une fourchette d’erreur autorisée  $[0,01; 100]$ , est raisonnable. Ceci reste à valider et à confirmer par l’expérimentation. Enfin, le processus d’adaptation s’arrête lorsque les trois enregistrements primaires sont valides ou bien lorsque l’espace temps  $[T_{fin}; T_{debut}]$  est tel que  $T_{fin} - T_{debut} \leq 2$  (exprimé en nombre d’instant clés).

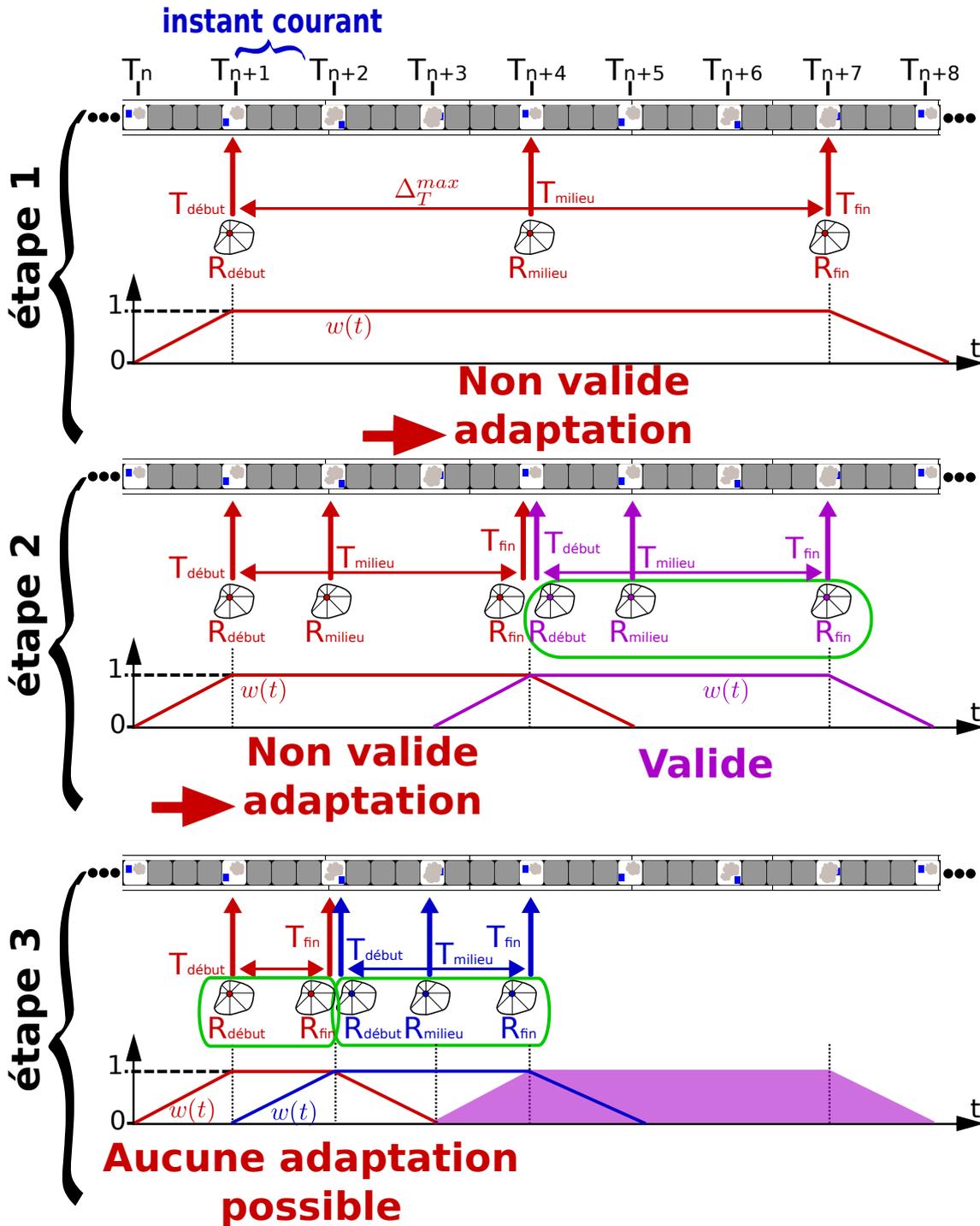


FIGURE 2.8 – La méthode d'adaptation de la durée de vie pour un instant courant compris dans l'espace temps  $[T_{n+1}; T_{n+2}]$  : pour savoir si un enregistrement est valide ou non, les valeurs d'éclairage des enregistrements primaires  $R_{début}$ ,  $R_{milieu}$  et  $R_{fin}$  sont comparées deux à deux. Si les trois valeurs sont valides, alors l'enregistrement adaptatif spatio-temporel est créé à partir des trois enregistrements primaires (étape 2). Si  $T_{fin} - T_{début} \leq 2$  (exprimé en nombre d'instant clés) alors un enregistrement adaptatif spatio-temporel est créé (étape 3). Cette l'exemple illustré ici, le processus crée 3 enregistrements spatio-temporels.

### 2.5.2 Adaptation à la visibilité

Dans le processus de création d'un enregistrement adaptatif spatio-temporel, l'étape la plus coûteuse en temps de calcul est la création des enregistrements primaires. Au départ, la durée de vie est initialisée à  $T_{fin} = T_{debut} + \Delta T^{max}$ . Il serait dommageable de créer un enregistrement primaire en  $T_{fin}$  alors que celui-ci peut ne plus être visible. En effet, l'observateur se déplaçant, le point  $p$  considéré en  $T_{debut}$  et pour lequel on souhaite créer un enregistrement temporel peut ne plus être visible en  $T_{fin}$ . Avant d'adapter la durée de vie aux variations temporelles de l'éclairement et de créer les enregistrements primaires, il est intéressant de définir une durée de vie initiale dépendante de la visibilité potentielle de l'enregistrement primaire  $R_{fin}$ . Pour cela, la visibilité de la zone d'influence potentielle de l'enregistrement primaire en  $T_{fin}$  est testée. Cette zone d'influence potentielle est une sphère de rayon  $d_{max}$ , la taille maximum des enregistrements autorisée par l'utilisateur. Si la zone d'influence potentielle n'est pas visible en  $T_{fin}$ , la durée de vie est alors diminuée d'un instant clé et un nouveau test de visibilité est réalisé en  $T_{fin} - 1$ . L'enregistrement primaire  $R_{fin}$  n'est calculé que lorsque sa zone d'influence potentielle est visible en  $T_{fin}$ . Le processus d'adaptation photométrique de la durée de vie, décrit dans la section 2.5.1, peut alors commencer. La figure 2.9 illustre le principe de l'adaptation à la visibilité.

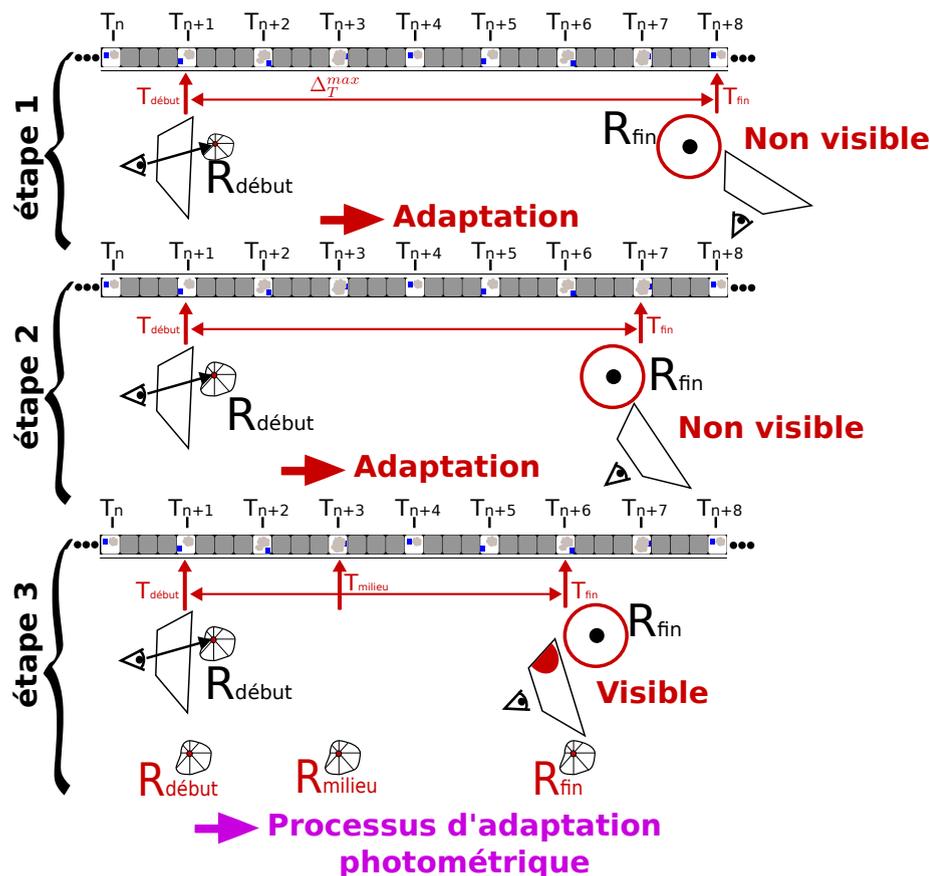


FIGURE 2.9 – Adaptation de la durée de vie à la visibilité : la visibilité de la zone d'influence potentielle (le cercle rouge) est testée en  $T_{fin} = T_{debut} + \Delta T^{max}$  (1<sup>re</sup> étape). Si elle n'est pas visible, la visibilité de cette zone d'influence potentielle est de nouveau testée en  $T_{fin} - 1$  (2<sup>e</sup> étape). Le processus recommence jusqu'à ce que cette zone devienne visible (3<sup>e</sup> étape). Ensuite, le processus d'adaptation photométrique de la durée de vie commence : 3 enregistrements primaires  $R_{debut}$ ,  $R_{milieu}$  et  $R_{fin}$  sont alors créés.



---

## Conclusion

DANS CETTE PARTIE, une nouvelle méthode de simulation d'éclairage en présence de milieux participatifs dynamiques a été présentée. Pour cela, nous avons ré-exploité les méthodes de cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs pour les surfaces et les volumes. Deux caches temporels, un pour les surfaces et un pour les volumes, sont ainsi maintenus tout au long de l'animation pour prendre en compte les variations temporelles de l'éclairage. À chaque enregistrement adaptatif est associée une durée de vie au cours de laquelle ces variations temporelles peuvent être reconstruites. Cette reconstruction est réalisée à l'aide de gradients temporels. Ces nouveaux gradients permettent aussi de faire varier la forme de la zone d'influence d'un enregistrement au cours de sa durée de vie. Ainsi, une meilleure anticipation des effets lumineux temporels est possible. De plus, la durée de vie des enregistrements est adaptée en fonction de la brutalité des variations temporelles de l'éclairage.

Notre méthode de cache d'éclairage temporel est en cours d'implémentation dans le logiciel de photo-simulation *Phanie*. Une phase de validation doit aussi être réalisée afin de vérifier le comportement de cette méthode. Nous pensons pouvoir l'utiliser dans l'étude de dispositif de sécurité incendie. Enfin, nous pensons également que notre méthode peut fonctionner dans le cadre de simulation dynamique en présence d'objets en mouvement. Toutefois, il reste à définir la façon de gérer le cache temporel et ses enregistrements sur de tels objets. Cependant, les variations d'éclairage introduites par ces objets dynamiques sur les objets statiques seront gérées par notre méthode de la même manière que pour les variations dues aux fumées dynamiques. Là encore, une phase de test est nécessaire pour valider l'efficacité de notre méthode.



---

# Conclusion générale et perspectives

**A**U COURS DE CE TRAVAIL de thèse, nous nous sommes focalisés sur la résolution de la problématique de l'illumination globale en présence de milieux participatifs. Cet axe de recherche a abouti au développement de nouvelles méthodes de résolution. Dans ce chapitre, nous concluons ce document en récapitulant les apports de nos travaux et ouvrons des perspectives de recherches futures.

## Rappel des objectifs

L'objectif concret de cette thèse était de développer un outil de simulation pour l'étude de l'éclairage et de la visibilité dans des environnements enfumés. Cet outil devait être intégré au logiciel de photo-simulation *Phanie* du *CSTB*. Il a donc été nécessaire d'étudier les concepts et les lois physiques qui régissent les comportements de la lumière. Cette étude a permis de développer une méthode de résolution réaliste de la problématique d'illumination globale dans une scène composée de milieux participatifs. De plus, ces milieux sont évolutifs dans l'espace et le temps. En même temps, l'observateur virtuel se déplace dans la scène. Puisque la méthode de résolution a pour finalité l'étude de l'éclairage, elle se doit d'être le plus réaliste possible. Nous parlons alors de méthode physiquement réaliste. C'est pour cela que toutes les contraintes devant être prises en compte (l'évolution spatiale et temporelle de la fumée et le déplacement de l'observateur) seront connues à l'avance.

## Travaux réalisés

L'étude préalable de la problématique et des contraintes qui lui sont liées permettait d'aborder le travail de recherche suivant deux axes complémentaires mais distincts : un axe de recherche orienté physique (caractérisation des fumées) et un autre orienté rendu numérique. Concernant le premier axe de recherche, les données de la distribution de la fumée dans l'espace et le temps, fournies par le Département Sécurité, Structures et Feu (*DSSF*) du *CSTB*, pour la simulation d'éclairage, sont assez pauvres en caractéristiques photométriques. Seule la distribution du coefficient d'extinction, dans l'espace et le temps, nous est fournie. Le premier axe de recherche, orienté physique, aurait été

l'étude et la caractérisation photométrique complète (calcul des coefficients d'absorption et de diffusion ainsi que de la fonction de phase) des milieux participatifs tels que la fumée. Le second axe de recherche était le développement d'une méthode de résolution numérique physiquement réaliste de la problématique de l'illumination globale en présence des milieux participatifs. Le travail de thèse se déroulant dans le laboratoire d'étude d'éclairage du CSTB, c'est ce deuxième axe de recherche que nous avons choisi. La méthode développée devra alors être la plus généraliste possible pour ne pas être dépendante des données d'entrée. Ce second axe de recherche est aussi l'occasion d'étendre les possibilités de l'outil de photo-simulation *Phanie*.

A la suite de l'analyse complète de la problématique et l'étude des méthodes de résolution de l'illumination globale existantes, nous avons décomposé le sujet en trois parties dépendantes et complémentaires les unes des autres. Puisque l'outil *Phanie* exploite une méthode de résolution (en l'occurrence la *Radiosité*) difficilement utilisable dans le cadre d'environnements enfumés, nous avons développé une nouvelle méthode basée sur le cache d'éclairage. Cette méthode a d'abord fait l'objet d'une étude pour des environnements sans milieux participatifs. Dans la seconde partie de la recherche, nous proposons de ré-exploiter cette méthode pour la résolution de l'illumination globale en présence de milieux participatifs statiques. Enfin, les aspects dynamiques ont fait l'objet d'une étude dans la troisième partie de nos travaux.

### Cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs

Cette première partie s'intéresse à la problématique de l'illumination globale sans fumée. L'idée est de proposer une nouvelle méthode de résolution permettant de réaliser des études d'éclairage dans des temps de calcul raisonnables. En effet, les études d'éclairage réalisées au CSTB manipulent des scènes à géométrie de plus en plus complexe et aux conditions d'éclairage pouvant faire intervenir un très grand nombre de sources artificielles étendues ainsi que du naturel. La technique de *Radiosité* devient dans de tels cas difficilement utilisable. De plus, cette nouvelle méthode sera la base de nos travaux sur les milieux participatifs. L'étude des méthodes existantes nous a orienté vers la méthode de cache d'éclairage de Ward *et al.* [WRC88]. Nous avons alors développé une méthode qui permet de contrôler la densité du cache en fonction de la géométrie de la scène mais aussi des variations d'éclairage. Pour cela, la forme des zones d'influence a été redéfinie pour pouvoir prendre en compte la géométrie et les changements d'éclairage. Les fortes concentrations d'enregistrements dans les bords des objets de la scène sont ainsi évitées. Ensuite, pour mieux reconstruire ces fortes variations d'éclairage sur les surfaces, de nouveaux gradients de translation et de rotation du second ordre ont été introduits. Toutefois, lorsque ces gradients ne suffisent plus à anticiper les variations de l'éclairage, les zones d'influence sont diminuées dans les directions adéquates. Nous avons aussi montré que ces techniques permettent une anticipation plus fine des effets lumineux et autorisent ainsi l'intégration des apports directs dans l'éclairage stocké par les enregistrements. Ces différentes techniques autorisent un gain de temps non négligeable par rapport aux méthodes existantes et permet à notre méthode d'être utilisée pour des études d'éclairage manipulant des scènes complexes.

## Cache d'éclairage volumique

Notre méthode de résolution de l'illumination globale avec des milieux participatifs exploite les travaux réalisés dans la première partie. L'extension aux milieux participatifs de la méthode de cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs a nécessité la redéfinition des zones d'influence pour des volumes. Ces zones d'influence volumiques s'adaptent aussi à la géométrie et aux variations d'éclairage. Les gradients prennent en compte les atténuations de la lumière dans le volume. Nous proposons aussi une nouvelle technique de création des enregistrements dans le volume afin d'éviter une trop forte densité du cache. Les nouveaux enregistrements seront créés dans les zones les plus contributives du milieu participatif. Les zones du volume de faible intérêt seront ainsi moins densément recouvertes. Nous avons montré que notre méthode permet d'obtenir des résultats plus précis et plus rapidement que les méthodes existantes. Nous avons aussi vu qu'elle pouvait être utilisée dans des environnements complexes soumis à une combinaison d'éclairage artificiel et naturel.

## Cache d'éclairage spatio-temporel

Dans cette quatrième partie, nous nous sommes intéressés aux aspects dynamiques. Nos méthodes de cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs, même si elles ont permis un gain de temps important pour des scènes complexes, restent difficilement utilisables dans le cadre d'une simulation animée. Chaque image de la simulation devra faire l'objet d'un recalcul complet de l'éclairage. De plus, des effets de scintillements, dus à certaines imprécisions de calcul, peuvent apparaître. Nous avons alors proposé une nouvelle méthode de cache d'éclairage temporel qui s'appuie sur nos méthodes de cache d'éclairage à enregistrements adaptatifs. A chaque enregistrement est associée une durée de vie au cours de laquelle les variations d'éclairage peuvent être reconstruites. Cette reconstruction est réalisée à l'aide de nouveaux gradients temporels. Ces derniers permettent aussi de faire varier la zone d'influence de l'enregistrement au cours de sa durée de vie. Enfin, cette durée de vie s'adapte aux fortes variations temporelles de l'éclairage qui ne peuvent être anticipées correctement par les gradients temporels.

## Travaux futurs et perspectives

La simulation d'éclairage en présence de milieux participatifs est un sujet d'étude suffisamment vaste qui offre de nombreuses perspectives de recherches futures. À la suite des travaux réalisés dans cette thèse, nous pouvons classer les travaux futurs et les perspectives de recherches à deux échéances temporelles : les travaux à court terme et les perspectives de recherche pour le moyen ou le long terme.

Concernant les travaux à court voire à très court terme, il s'agit de continuer l'implémentation de la méthode de cache d'éclairage temporel dans le logiciel de photosimulation *Phanie*. Il faudra par la suite tester cette nouvelle méthode et valider les résultats obtenus. Ensuite, il serait intéressant d'étendre nos méthodes de cache d'éclairage aux matériaux brillants (pour la méthode surfacique) et aux milieux participatifs anisotropes (pour la méthode volumique). Cette extension nécessite en fait peu d'aménagement de nos méthodes et la plupart des concepts que nous avons introduits restent valides. L'éclairage stocké par les enregistrements devra alors être remplacé

par des données directionnelles comme la luminance qui seront projetées dans une base de fonctions telles que les ondelettes ou les harmoniques sphériques ou hémisphériques. Dans les travaux de recherche à moyen ou à long terme, nous pouvons mentionner la visualisation en temps interactif des résultats de simulation d'éclairage. En effet, il serait intéressant de pouvoir se déplacer dans un environnement et vérifier en temps réel, ou pour le moins interactif, ces résultats. L'étude de l'éclairage nécessite la manipulation de données complexes. Les temps de calcul restent donc trop longs pour espérer, dans un avenir proche, des simulations interactives. Il est cependant envisageable de précalculer l'ensemble des conditions d'éclairage, de façon la plus réaliste possible, puis de proposer des méthodes de visualisation temps réel (en utilisant les *GPU* par exemple). Des travaux sont en cours au *CSTB* concernant cette problématique et nous pensons que notre méthode peut être un bon début d'approche pour la résolution d'une telle problématique.

Ensuite, le rendu des milieux participatifs peut être abordé suivant un angle de recherche orienté physique. Peu de travaux se sont intéressés à la caractérisation photométrique de la fumée. Toutefois, nous pensons qu'il s'agit d'une lacune des méthodes de simulation d'éclairage puisque les données fournies concernant la fumée restent largement incomplètes. Il est alors difficile de valider les résultats obtenus et de garantir leur fiabilité. Toutefois, cette contrainte de fiabilité est primordiale concernant notamment le domaine de la sécurité incendie qui est pourtant demandeur d'outils de simulation d'éclairage en présence de fumée. Enfin, cette fiabilité des résultats rejoint le problème de restitution des résultats. L'affichage des résultats sur un écran reste limité. Cette problématique de restitution des résultats, même si elle faisait partie intégrante des contraintes de départ du sujet de thèse, a volontairement été mise de côté. Nous pensons qu'elle doit faire l'objet d'une recherche complète afin d'y répondre convenablement.

## Formulation des gradients de translation et rotation

LES GRADIENTS de translation et de rotation sont obtenus en résolvant simplement des systèmes de deux équations à deux inconnues :

$$\begin{cases} \tilde{E}\left(\frac{x}{2}\right) &= E(R) + Grad_1 \frac{x}{2} + \frac{1}{2} Grad_2 \left(\frac{x}{2}\right)^2 \\ \tilde{E}(x) &= E(R) + Grad_1 x + \frac{1}{2} Grad_2 (x)^2 \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

où  $x$  est égal à la longueur de l'axe considéré pour les gradients de translation ou  $x = \alpha_{max}$  pour les gradients de rotation.  $Grad_n$  équivaut à  $G_k^n$  pour les gradients de translation et à  $G_k^{rot\ n}$  pour les gradients de rotation.  $Grad_1$  et  $Grad_2$  sont les inconnues recherchées. Si l'on multiplie par deux la première ligne, le système devient :

$$\begin{cases} 2.\tilde{E}\left(\frac{x}{2}\right) &= 2.E(R) + Grad_1 x + Grad_2 \left(\frac{x}{2}\right)^2 \\ \tilde{E}(x) &= E(R) + Grad_1 x + \frac{1}{2} Grad_2 (x)^2 \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Si l'on soustrait la ligne 2 à la ligne 1 :

$$2.\tilde{E}\left(\frac{x}{2}\right) - \tilde{E}(x) = 2.E(R) - E(R) + Grad_1 x - Grad_1 x + Grad_2 \left(\frac{x}{2}\right)^2 - \frac{1}{2} Grad_2 (x)^2 \quad (\text{A.3})$$

on obtient donc :

$$2.\tilde{E}\left(\frac{x}{2}\right) - \tilde{E}(x) = E(R) - Grad_2 \left(\frac{x^2}{4}\right). \quad (\text{A.4})$$

Ce qui nous donne :

$$Grad_2 \left(\frac{x^2}{4}\right) = E(R) - 2.\tilde{E}\left(\frac{x}{2}\right) + \tilde{E}(x). \quad (\text{A.5})$$

Le gradient de second ordre est alors :

$$Grad_2 = 4. \left( \frac{E(R) - 2.\tilde{E}\left(\frac{x}{2}\right) + \tilde{E}(x)}{x^2} \right) \quad (\text{A.6})$$

Puisque l'on connaît  $Grad_2$ , on retrouve  $Grad_1$  avec la ligne 2 du système A.1 :

$$Grad_1 = \frac{\tilde{E}(x) - E(R) - \frac{1}{2} Grad_2 (x)^2}{x}. \quad (\text{A.7})$$

Pour les gradients de translation, si l'on veut que  $x$  varie entre 0 et 1, on obtient les gradients suivant pour l'axe  $k$  :

$$G_k^1 = E(R') - E(R) - \frac{1}{2} G_k^2 \quad (\text{A.8})$$

avec

$$G_k^2 = 4.E(R) - 8.E(R'') + 4.E(R') \quad (\text{A.9})$$

où  $R'$  est le point en bout de l'axe  $k$  (à une distance  $d_k$  du centre de l'enregistrement) et  $R''$  le point au milieu de l'axe (soit  $d_k/2$ ). Pour pouvoir utiliser la formulation de Taylor exprimant l'éclairement  $\tilde{E}(x)$  en un point  $x$  de l'axe  $k$ , il faut que

$$x = \frac{|x_P - x_R|}{|x_{P''} - x_R|}. \quad (\text{A.10})$$

Nous nous référons ici aux notations introduites dans la figure 2.2 page 55. Pour la rotation, si l'on se réfère aux notations introduites dans la figure 2.6 page 61 et que l'on fixe :

$$x = \frac{\alpha}{\alpha_{max}} \quad (\text{A.11})$$

on obtient les gradients

$$G_k^{rot1} = E(\alpha_{max}) - E(R) - \frac{1}{2}G_k^{rot2} \quad (\text{A.12})$$

et

$$G_k^{rot2} = 4.E(R) - 8.E\left(\frac{\alpha_{max}}{2}\right) + 4.E(\alpha_{max}). \quad (\text{A.13})$$

Le même principe est appliqué pour calculer les différents gradients temporels que nous avons décrits dans la partie 2.3.3 page 127.

# Données d'entrée et implé- mentation des milieux partici- patifs

LES DONNÉES CONCERNANT LA FUMÉE nous sont fournies par le Département Sécurité, Structures, Feu (*DSSF*) du *CSTB*. Nous présenterons dans cette annexe les choix d'implémentation réalisés pour pouvoir importer ces données d'entrée dans l'outil de photo-simulation *Phanie*.

## B.1 Les données d'entrée *DSSF* et les hypothèses de départ

L'outil de simulation numérique d'évolution de la fumée de *DSSF* restitue des résultats sous la forme d'une grille régulière orientée suivant le repère général  $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ . L'espace temps est décomposé en pas de simulation réguliers. Chaque sommet de la grille indique le coefficient d'extinction  $\kappa$  du milieu participatif. Des études sont en cours pour pouvoir distinguer, dans ce coefficient d'extinction, la part de l'absorption et la part de la diffusion. Dans le logiciel *Phanie*, nous attribuons une proportion au coefficient de diffusion  $\sigma$  :

$$\sigma = \rho\kappa. \quad (\text{B.1})$$

avec  $\rho \in [0, 1]$ . Ainsi le coefficient d'absorption  $\alpha$  devient :

$$\alpha = \kappa - \sigma. \quad (\text{B.2})$$

Ensuite, la fonction de phase n'est pas connue. Nous la considérons comme isotrope sur l'ensemble de la grille de décomposition. Un axe de recherche peut ici être dégagé concernant la détermination de la fonction de phase en fonction des combustibles, des particules composantes du milieu... Beaucoup de travaux de recherche restent à réaliser concernant la détermination des caractéristiques photométriques des milieux participatifs.

## B.2 Les choix d'implémentation

Les méthodes de résolution vers lesquelles nous nous sommes orientés font toutes appel, de manière intensive, à un lancer de rayons. Il faut donc pouvoir intersecter rapidement la structure de données concernant les milieux participatifs. De plus, il est nécessaire de pouvoir facilement repérer à quel endroit du milieu se trouve un point donné puis retrouver les caractéristiques de la fumée. La grille régulière que nous avons en entrée peut être composée d'un très grand nombre de cellules en fonction de la finesse de la simulation *DSSF*. De plus, dans les parties de la scène où il n'y a pas de fumée, puisque la décomposition est régulière, de nombreuses cellules peuvent être vides et l'intersection peut encore une fois s'avérer coûteuse. Nous nous sommes donc orienté

vers une grille irrégulière, stockée sous la forme d'un *kd-tree*. Pour plus d'information concernant le *kd-tree* ainsi qu'un exemple d'implémentation, nous renvoyons le lecteur vers le livre de Pharr et Humphreys [PH04]. Le *kd-tree* est efficace dans le cadre d'un algorithme de lancer de rayons et il est facile de savoir dans quelle feuille de l'arbre se trouve un point donné. La construction du *kd-tree* est donnée dans l'algorithme 2.

---

**Algorithm 2** Construire\_KD\_Tree(borne\_mini,borne\_maxi,grille\_DSSF)
 

---

```

1: noeud ← Construire_Noeud(borne_mini,borne_maxi,grille_DSSF)
2: decoupe ← FALSE //savoir si le nœud doit être découpé ou non
3: pour  $x = 0; x < \text{Nb\_Decompositions\_X}(\text{grille\_DSSF}); x++$  faire
4:   //boucle suivant x
5:   pour  $y = 0; y < \text{Nb\_Decompositions\_Y}(\text{grille\_DSSF}); y++$  faire
6:     //boucle suivant y
7:     pour  $z = 0; z < \text{Nb\_Decompositions\_Z}(\text{grille\_DSSF}); z++$  faire
8:       //boucle suivant z
9:       si Valeur_Interpolee(noeud,x,y,z) ≠ Valeur_DSSF(grille_DSSF,x,y,z) alors
10:        decoupe ← TRUE
11:        break //fin de la boucle suivant z
12:      fin si
13:    fin pour
14:  si decoupe alors
15:    break //fin de la boucle suivant y
16:  fin si
17: fin pour
18: si decoupe alors
19:   break //fin de la boucle suivant x
20: fin si
21: fin pour
22: si decoupe alors
23:   //si l'on doit découper, alors appels récursifs
24:   Choisir_Plus_Grande_Dimension(x,y,z)
25:   noeud.fils_gauche ← Construire_KD_Tree(borne_mini,borne_milieu_max,grille_DSSF)
26:   noeud.fils_droit ← Construire_KD_Tree(borne_milieu_min,borne_maxi,grille_DSSF)
27: fin si
28: return noeud

```

---

La fonction *Construire\_KD\_Tree* présentée dans l'algorithme 2 est une fonction récursive qui construit un nœud du *kd-tree* (ligne 1 de l'algorithme) et le découpe si l'interpolation n'est pas valide (ligne 9 de l'algorithme). La racine du *kd-tree* correspond à la boîte englobante du milieu participatif. Les sommets des nœuds contiennent les informations photométriques du milieu au point correspondant. Les sommets des nœuds sont positionnés sur les décompositions de la grille d'entrée. Si les valeurs interpolées, pour les décompositions intermédiaires, obtenues avec les 8 sommets du nœud ne correspondent pas aux valeurs d'entrée, un découpage est nécessaire. Le découpage est réalisé au milieu de la dimension la plus grande.

### B.3 L'interpolation dans une feuille du *kd-tree*

Les feuilles du *kd-tree* sont composées de 8 sommets pour lesquels nous connaissons les caractéristiques du milieu. La figure B.1 illustre l'organisation de ces sommets. Les six faces de la feuille sont donc :

- la première face =  $\{\text{sommet}_1, \text{sommet}_3, \text{sommet}_5, \text{sommet}_7\}$

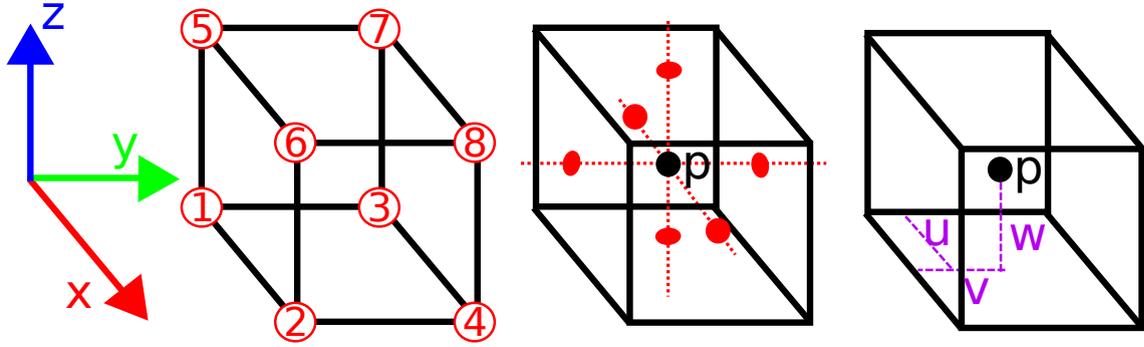


FIGURE B.1 – Organisation des 8 sommets dans la feuille du kd-tree. La valeur au point  $p$  est calculée en interpolant les 6 valeurs des faces (les points rouges) en utilisant les coordonnées locales  $(u, v, w)$  comprises entre 0 et 1.

- la seconde face =  $\{\text{sommet}_2, \text{sommet}_4, \text{sommet}_6, \text{sommet}_8\}$
- la troisième face =  $\{\text{sommet}_1, \text{sommet}_2, \text{sommet}_5, \text{sommet}_6\}$
- la quatrième face =  $\{\text{sommet}_3, \text{sommet}_4, \text{sommet}_7, \text{sommet}_8\}$
- la cinquième face =  $\{\text{sommet}_1, \text{sommet}_2, \text{sommet}_3, \text{sommet}_4\}$
- la sixième face =  $\{\text{sommet}_5, \text{sommet}_6, \text{sommet}_7, \text{sommet}_8\}$

Les caractéristiques de la fumée en un point  $p$  à l'intérieur de la feuille sont calculées à l'aide d'une interpolation avec les valeurs correspondant à chacune des faces (voir la figure B.1). Cette interpolation est réalisée à l'aide des coordonnées locales  $(u, v, w)$  comprises entre 0 et 1 telles que :

$$u = \frac{|x_p - x_{\min}|}{|x_{\max} - x_{\min}|} \quad v = \frac{|y_p - y_{\min}|}{|y_{\max} - y_{\min}|} \quad w = \frac{|z_p - z_{\min}|}{|z_{\max} - z_{\min}|} \quad (\text{B.3})$$

où  $(x_p, y_p, z_p)$  sont les coordonnées du point  $p$  et  $(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min})$  la borne minimum (le sommet 1) et  $(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$  la borne maximum (le sommet 8) de la feuille considérée. Pour calculer la valeur sur chacune des faces, deux des trois coordonnées locales  $(u, v, w)$  sont utilisées :  $v$  et  $w$  pour les faces 1 et 2,  $u$  et  $w$  pour les faces 3 et 4 et enfin  $u$  et  $v$  pour les faces 5 et 6. Si l'on considère une face quelconque avec ces coordonnées  $loc_u$  et  $loc_v$ , la valeur interpolée  $val_{interp}$  pour cette face est donnée par :

$$val_{interp} = \frac{\sum_{i=1}^4 \text{facteur}_i \text{sommet}_i}{\sum_i \text{facteur}_i} \quad (\text{B.4})$$

où

$$\begin{aligned} \text{facteur}_1 &= (1 - loc_u) \cdot loc_v \cdot (1 - loc_w) \\ \text{facteur}_2 &= loc_u \cdot loc_v \cdot (1 - loc_w) \\ \text{facteur}_3 &= loc_u \cdot (1 - loc_u) \cdot (1 - loc_w) \\ \text{facteur}_4 &= loc_u \cdot (1 - loc_u) \cdot loc_w \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

et  $\text{sommet}_i$  la caractéristique du milieu considérée (absorption ou diffusion). Puis la valeur au point  $p$  est calculée à l'aide d'une interpolation entre les 6 valeurs des 6 faces :

$$val(P) = \frac{\sum_{i=1}^6 \text{facteur}_i \text{face}_i}{\sum_i \text{facteur}_i} \quad (\text{B.6})$$

où

$$\begin{aligned}
 \text{facteur}_1 &= (1.0 - u) \cdot v \cdot (1.0 - v) \cdot w \cdot (1.0 - w) \\
 \text{facteur}_2 &= u \cdot v \cdot (1.0 - v) \cdot w \cdot (1.0 - w) \\
 \text{facteur}_3 &= u \cdot (1.0 - u) \cdot v \cdot (1.0 - v) \cdot (1.0 - w) \\
 \text{facteur}_4 &= u \cdot (1.0 - u) \cdot v \cdot (1.0 - v) \cdot w \\
 \text{facteur}_5 &= u \cdot (1.0 - u) \cdot (1.0 - v) \cdot w \cdot (1.0 - w) \\
 \text{facteur}_6 &= u \cdot (1.0 - u) \cdot v \cdot w \cdot (1.0 - w)
 \end{aligned} \tag{B.7}$$

Les caractéristiques du milieu sont intégrées le long d'un rayon traversant la feuille à l'aide d'une décomposition basée sur le même principe qu'un *ray marching*. Pour chaque pas de la décomposition, la valeur est calculée à l'aide de l'interpolation décrite précédemment. Cependant, le nombre de pas de décomposition autorisé dans une feuille du *kd-tree* ainsi que la taille minimum d'un pas sont fixés par l'utilisateur. Nos différents tests ont montrés qu'une décomposition d'une dizaine de pas donne de bons résultats dans la pratique<sup>1</sup>.

---

1. Ceci s'explique notamment par le fait que les feuilles restent relativement petites. Si, au contraire, une feuille du *kd-tree* est grande, cela veut dire que la variation des caractéristiques du milieu est faible et qu'il n'est donc pas nécessaire de sur-décomposer.

## Définition de la bordure des zones d'influence volumiques

LA ZONE D'INFLUENCE des enregistrements volumiques est décomposée à l'aide de 18 axes. Les 6 axes  $-\vec{x}$ ,  $\vec{x}$ ,  $-\vec{y}$ ,  $\vec{y}$ ,  $-\vec{z}$  et  $\vec{z}$  permettent de définir 8 sous-espaces dans lesquels s'inscrivent des triangles unitaires (c'est à dire dont leurs sommets ont comme coordonnées  $x = x_R - 1$  ou  $x_R + 1$ ,  $y = y_R - 1$  ou  $y_R + 1$  et  $z = z_R - 1$  ou  $z_R + 1$  avec  $(x_R, y_R, z_R)$  les coordonnées de la position de l'enregistrement  $R$ ). Le schéma de gauche de la figure 2.2 page 92 illustre cette décomposition. Chaque triangle unitaire est lui-même décomposé en 4 sous-triangles (schéma du milieu de la figure 2.2 page 92) dont les sommets se trouvent chacun sur un des axes de décomposition de la zone d'influence. Considérons maintenant un des 8 triangles unitaires  $ABC$  et ses 4 sous-triangles tels que définis dans la figure C.1.

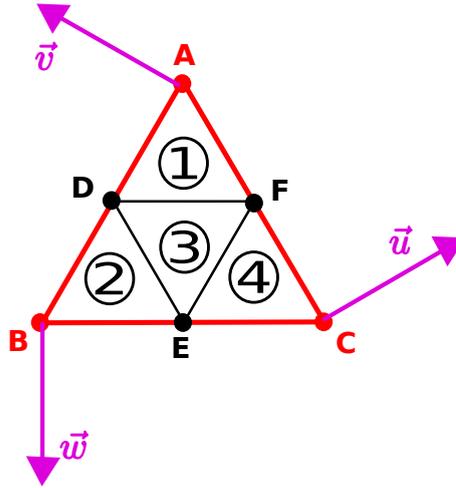


FIGURE C.1 – Décomposition du triangle unitaire  $ABC$  en 4 sous-triangles : les points  $D$ ,  $E$  et  $F$  se trouvent respectivement au milieu des segments  $[AB]$ ,  $[BC]$  et  $[CA]$ . Les vecteurs  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  et  $\vec{w}$  sont des vecteurs de projection normés.

La normale  $\vec{N}_{ABS}$  à ce triangle nous est donnée par le produit vectoriel

$$\vec{N}_{ABS} = \vec{AB} \wedge \vec{BC}. \quad (\text{C.1})$$

Cette normale est par la suite utilisée pour la définition de ce que nous appelons des vecteurs de projection normés :  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  et  $\vec{w}$  dessinés en violet dans la figure C.1. Ces vecteurs de projection sont définis par

$$\vec{u} = \frac{\vec{N}_{ABS} \wedge \vec{DE}}{(\vec{N}_{ABS} \wedge \vec{DE}) \cdot \vec{DF}} \quad \vec{v} = \frac{\vec{N}_{ABS} \wedge \vec{EF}}{(\vec{N}_{ABS} \wedge \vec{EF}) \cdot \vec{ED}} \quad \vec{w} = \frac{\vec{N}_{ABS} \wedge \vec{FD}}{(\vec{N}_{ABS} \wedge \vec{FD}) \cdot \vec{FE}} \quad (\text{C.2})$$

Les vecteurs de projection sont ensuite utilisés pour savoir dans quel sous-triangle se trouve un point  $P'$  positionné dans le triangle unitaire  $ABC$  (et sur son plan).  $P'$  peut être considéré comme la projection sur le triangle  $ABC$  du point  $P$  pour lequel on cherche à savoir s'il est est à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone d'influence de l'enregistrement  $R$ . La projection est donnée par

$$P' = R + \overrightarrow{RP} \frac{1}{\overrightarrow{RP} \cdot \overrightarrow{N_{ABS}}}. \quad (\text{C.3})$$

L'algorithme 3 explique la méthode pour savoir à quel sous-triangle appartient  $P'$  ainsi que les coordonnées barycentriques  $U$ ,  $V$  et  $W$  permettant de déterminer la distance  $|\overrightarrow{RP'}|$  (avec  $R$  la position de l'enregistrement et  $P'$  le point sur la bordure) soit la distance à la bordure de la zone d'influence. Dans l'algorithme, la notation  $longueur_A$  par exemple correspond à la longueur de l'axe sur lequel se trouve le sommet  $A$ .

---

**Algorithm 3** Quel\_Sous\_Triangle( $P'$ )
 

---

```

1: si  $(\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{w}) \leq 0$  alors
2:   sous-triangle 1  $ADF$ 
3:    $U = -(\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{w})$ 
4:    $V = (\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{u}) + (\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{w})$ 
5:    $W = 1 - (\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{u})$ 
6:    $longueur = U \cdot longueur_A + V \cdot longueur_D + W \cdot longueur_F$ 
7: sinon si  $(\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{u}) \leq 0$  alors
8:   sous-triangle 2  $DBE$ 
9:    $U = 1 - (\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{w})$ 
10:   $V = -(\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{u})$ 
11:   $W = (\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{u}) + (\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{w})$ 
12:   $longueur = U \cdot longueur_D + V \cdot longueur_B + W \cdot longueur_E$ 
13: sinon
14:  si  $(\overrightarrow{FP'} \cdot \overrightarrow{v}) \leq 0$  alors
15:    sous-triangle 3  $DEF$ 
16:     $U = 1 - (\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{u}) - (\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{w})$ 
17:     $V = (\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{w})$ 
18:     $W = (\overrightarrow{DP'} \cdot \overrightarrow{u})$ 
19:     $longueur = U \cdot longueur_D + V \cdot longueur_E + W \cdot longueur_F$ 
20:  sinon
21:    sous-triangle 4  $FEC$ 
22:     $U = 1 - (\overrightarrow{FP'} \cdot \overrightarrow{w})$ 
23:     $V = (\overrightarrow{FP'} \cdot \overrightarrow{w}) + (\overrightarrow{FP'} \cdot \overrightarrow{v})$ 
24:     $W = -(\overrightarrow{FP'} \cdot \overrightarrow{v})$ 
25:     $longueur = U \cdot longueur_F + V \cdot longueur_E + W \cdot longueur_C$ 
26:  finsi
27: finsi

```

---



---

## Bibliographie

- [Adr89] W. Adrian. Visibility of targets : Model for calculation. *Lighting Research and Technology*, 21(4) :181–188, 1989.
- [AFO05] Okan Arikan, David A. Forsyth, and James F. O’Brien. Fast and detailed approximate global illumination by irradiance decomposition. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005*. ACM Press, 2005.
- [BGB08] Jonathan Brouillat, Pascal Gautron, and Kadi Bouatouch. Photon-driven irradiance cache. *Computer Graphics Forum*, 27 :1971–1978, 2008.
- [BPPP05] Antoine Boudet, Paul Pitot, David Pratumarty, and Mathias Paulin. Photon splatting for participating media. In *GRAPHITE '05 : Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*, pages 197–204, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [Car98] Samuel Carré. *Outil de conception architecturale pour l’éclairage naturel / artificiel : application à la synthèse d’image pour la prise en compte des notions de confort et d’ergonomie visuels*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 1998.
- [CDGB00] S. Carré, J.M. Deniel, E. Guillou, and K. Bouatouch. Handling dynamic changes in hierarchical radiosity through interaction meshes. *Computer Graphics and Applications, Pacific Conference on*, 0 :40, 2000.
- [Cha60] Subrahmanyan Chandrasekhar. *Radiative Transfer*. Dover Publications, 1960.
- [CIE96] CIE. Spatial distribution of daylight - cie standard overcast sky and clear sky. In *CIE S 003/E-1996*, 1996.
- [CPCP<sup>+</sup>05] Eva Cerezo, Frederic Perez-Cazorla, Xavier Pueyo, Francisco Seron, and François Sillion. A survey on participating media rendering techniques. *the Visual Computer*, 21 :303–328, 2005.
- [CWH93] Michael F. Cohen, John Wallace, and Pat Hanrahan. *Radiosity and realistic image synthesis*. Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA, USA, 1993.
- [DBMS02] Kirill Dmitriev, Stefan Brabec, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel. Interactive global illumination using selective photon tracing. In *EGRW*

- '02 : *Proceedings of the 13th Eurographics workshop on Rendering*, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2002. Eurographics Association.
- [DDM03] Cyrille Domez, Kirill Dmitriev, and Karol Myszkowski. State of the art in global illumination for interactive applications and high-quality animations. *Computer Graphics Forum*, 22(1) :55–77, 2003.
- [EHK<sup>+</sup>06] Klaus Engel, Markus Hadwiger, Joe M. Kniss, Christof Rezk-Salama, and Daniel Weiskopf. *Real-time Volume Graphics*. A K Peters, New York, NY, USA, 1 edition, July 2006.
- [GBP06] Pascal Gautron, Kadi Bouatouch, and Sumanta Pattanaik. Temporal radiance caching. Technical Report 1796, IRISA, Rennes, France, 2006.
- [GKBP05] Pascal Gautron, Jaroslav Křivánek, Kadi Bouatouch, and Sumanta N. Pattanaik. Radiance cache splatting : A gpu-friendly global illumination algorithm. In Oliver Deussen, Alexander Keller, Kavita Bala, Philip Dutré, Dieter W. Fellner, and Stephen N. Spencer, editors, *Rendering Techniques*, pages 55–64. Eurographics Association, 2005.
- [GKPB04] Pascal Gautron, Jaroslav Křivánek, Sumanta N. Pattanaik, and Kadi Bouatouch. A novel hemispherical basis for accurate and efficient rendering. In *Rendering Techniques 2004, Eurographics Symposium on Rendering*, pages 321–330, June 2004.
- [GMAS05] Diego Gutierrez, Adolfo Munoz, Oscar Anson, and Francisco J. Seron. Non-linear volume photon mapping. In *Rendering Techniques 2005 : 16th Eurographics Workshop on Rendering*, pages 291–300, Konstanz, Germany, jun 2005.
- [Gre03] Robin Green. Spherical harmonic lighting : The gritty details. *Archives of the Game Developers Conference*, March 2003.
- [HDMS03] Vlastimil Havran, Cyrille Domez, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel. An efficient spatio-temporal architecture for animation rendering. In *EGRW '03 : Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering*, pages 106–117, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2003. Eurographics Association.
- [HMS09] Robert Herzog, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel. Anisotropic radiance-cache splatting for efficiently computing high-quality global illumination with lightcuts. In Marc Stamminger and Philip Dutré, editors, *Computer Graphics Forum (Proc. EUROGRAPHICS)*, volume 28, pages 259–268, München, Germany, 2009. Wiley-Blackwell.
- [HOJ08] Toshiya Hachisuka, Shinji Ogaki, and Henrik Wann Jensen. Progressive photon mapping. *ACM Trans. Graph.*, 27(5) :1–8, 2008.
- [IES02] IESNA. Iesna standard file format for the electronic transfer of photometric data and related information. In *LM-63-02*, September 2002.
- [JC98] Henrik Wann Jensen and Per H. Christensen. Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps. In *SIGGRAPH '98 : Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 311–320, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [JDZJ08] Wojciech Jarosz, Craig Donner, Matthias Zwicker, and Henrik Wann Jensen. Radiance caching for participating media. *ACM Trans. Graph.*, 27(1) :1–11, 2008.

- [Jen96] Henrik Wann Jensen. Global illumination using photon maps. In Eds. X. Pueyo and P. Schröder, editors, *Proceedings of the eurographics workshop on Rendering techniques '96*, pages 21–30, London, UK, 1996. Springer-Verlag.
- [Jen01] Henrik Wann Jensen. *Realistic image synthesis using photon mapping*. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2001.
- [JZJ08a] Wojciech Jarosz, Matthias Zwicker, and Henrik Wann Jensen. The beam radiance estimate for volumetric photon mapping. *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics EG'08)*, 27(2) :557–566, 4 2008.
- [JZJ08b] Wojciech Jarosz, Matthias Zwicker, and Henrik Wann Jensen. Irradiance gradients in the presence of participating media and occlusions. *Computer Graphics Forum (Proceedings of EGSR 2008)*, 27(4) :1087–1096, 2008.
- [Kaj86] James T. Kajiya. The rendering equation. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 20(4) :143–150, 1986.
- [KBPv06] Jaroslav Křivánek, Kadi Bouatouch, Sumanta N. Pattanaik, and Jiří Žára. Making radiance and irradiance caching practical : Adaptive caching and neighbor clamping. In Tomas Akenine-Möller and Wolfgang Heidrich, editors, *Rendering Techniques 2006, Eurographics Symposium on Rendering*, Nicosia, Cyprus, June 2006. Eurographics Association, Eurographics Association.
- [KE09] Murat Kurt and Dave Edwards. A survey of brdf models for computer graphics. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 43(2) :1–7, 2009.
- [KG09] Jaroslav Křivánek and Pascal Gautron. *Practical Global Illumination with Irradiance Caching*. Morgan and Claypool Publishers, 2009.
- [KGBP05] Jaroslav Křivánek, Pascal Gautron, Kadi Bouatouch, and Sumanta Pattanaik. Improved radiance gradient computation. In *SCCG '05 : Proceedings of the 21st spring conference on Computer graphics*, pages 155–159, New York, NY, USA, 2005. ACM Press.
- [KGPB05] Jaroslav Křivánek, Pascal Gautron, Sumanta Pattanaik, and Kadi Bouatouch. Radiance caching for efficient global illumination computation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 11(5) :550–561, September/October 2005. <http://graphics.cs.ucf.edu/RCache/index.php>.
- [KGW<sup>+</sup>08] Jaroslav Křivánek, Pascal Gautron, Greg Ward, Henrik Wann Jensen, Eric Tabellion, and Per H. Christensen. Practical global illumination with irradiance caching. *ACM SIGGRAPH '08 Class*, 2008. [http://www.graphics.cornell.edu/~jaroslav/papers/2008-irradiance\\_caching\\_class/index.htm](http://www.graphics.cornell.edu/~jaroslav/papers/2008-irradiance_caching_class/index.htm).
- [Kř05] Jaroslav Křivánek. *Radiance Caching for Global Illumination Computation on Glossy Surfaces*. Ph.d. thesis, Université de Rennes 1 and Czech Technical University in Prague, December 2005.
- [LBC94] Eric Languénou, Kadi Bouatouch, and Michael Chelle. Global illumination in presence of participating media with general properties. In *Fifth Eurographics Workshop on Rendering Proceedings*, Darmstadt, 1994.
- [LFTG97] Eric P. Lafortune, Sing-Choong Foo, Kenneth E. Torrance, and Donald P. Greenberg. Non-linear approximation of reflectance functions. In *SIGGRAPH '97 : Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics*

- and interactive techniques*, pages 117–126, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [LW93] Eric P. Lafortune and Yves D. Willems. Bi-directional path tracing. In H. P. Santo, editor, *Proceedings of Third International Conference on Computational Graphics and Visualization Techniques (Compugraphics '93)*, pages 145–153, Alvor, Portugal, 1993.
- [LW96] Eric P. Lafortune and Yves D. Willems. Rendering participating media with bidirectional path tracing. In *Proceedings of the eurographics workshop on Rendering techniques '96*, pages 91–100, London, UK, 1996. Springer-Verlag.
- [MA06] Mark Meyer and John Anderson. Statistical acceleration for animated global illumination. *ACM Trans. Graph.*, 25(3) :1075–1080, 2006.
- [NGD<sup>+</sup>06] Srinivasa G. Narasimhan, Mohit Gupta, Craig Donner, Ravi Ramamoorthi, Shree K. Nayar, and Henrik Wann Jensen. Acquiring scattering properties of participating media by dilution. *ACM Trans. Graph.*, 25(3) :1003–1012, 2006.
- [Noe99] Nicolas Noe. *Étude de fonctions de distribution de la réflectance bidirectionnelle*. PhD thesis, Ecole Normale Supérieure des Mines : Université Jean Monnet, 1999.
- [PH04] Matt Pharr and Greg Humphreys. *Physically Based Rendering : From Theory to Implementation*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2004.
- [PKK00] Mark Pauly, Thomas Kollig, and Alexander Keller. Metropolis light transport for participating media. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques 2000*, pages 11–22, London, UK, 2000. Springer-Verlag.
- [RCGB91] B. Roysam, A. Cohen, P. Getto, and P. Boyce. A numerical approach to the computation of light propagation through turbid media : Application to the evaluation of lighted exitsigns. In *Industry Applications Society Annual Meeting, 1991., Conference Record of the 1991 IEEE*, volume 29, pages 661–669. Industry Applications, IEEE Transactions on, 1991.
- [SiKDM05] Miloslaw Smyk, Shin ichi Kinuwaki, Roman Durikovic, and Karol Myszkowski. Temporally coherent irradiance caching for high quality animation rendering. In *The European Association for Computer Graphics 26th Annual Conference EUROGRAPHICS 2005*, volume 24 of *Computer Graphics Forum*, pages 401–412, Dublin, Ireland, 2005. Blackwell.
- [SK98] László Szirmay-Kalos. Stochastic methods in global illumination - state of the art report. Technical Report TR-186-2-98-23, Institute of Computer Graphics and Algorithms, Vienna University of Technology, Favoritenstrasse 9-11/186, A-1040 Vienna, Austria, August 1998. human contact : technical-report@cg.tuwien.ac.at.
- [SM02] Miłosław Smyk and Karol Myszkowski. Quality improvements for indirect illumination interpolation. In *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Graphics*, 2002.
- [TLo4] Eric Tabellion and Arnauld Lamorlette. An approximate global illumination system for computer generated films. In *SIGGRAPH '04 : ACM SIGGRAPH 2004 Papers*, pages 469–476, New York, NY, USA, 2004. ACM.

- [TMS04] T. Tawara, K. Myszkowski, and H.-P. Seidel. Exploiting temporal coherence in final gathering for dynamic scenes. In *CGI '04 : Proceedings of the Computer Graphics International*, pages 110–119, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [Vea98] Eric Veach. *Robust monte carlo methods for light transport simulation*. PhD thesis, Stanford University, Stanford, CA, USA, 1998. Adviser-Leonidas J. Guibas.
- [VG94] Eric Veach and Leonidas J. Guibas. Bidirectional estimators for light transport. In *Eurographics Rendering Workshop*, pages 147–162, Darmstadt, Germany, June 1994. Springer-Verlag, New York.
- [VG97] Eric Veach and Leonidas J. Guibas. Metropolis light transport. In *SIGGRAPH*, volume 31, pages 65–76, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [WABG06] Bruce Walter, Adam Arbree, Kavita Bala, and Donald P. Greenberg. Multidimensional lightcuts. In *SIGGRAPH '06 : ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, pages 1081–1088, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [WFA<sup>+</sup>05] Bruce Walter, Sebastian Fernandez, Adam Arbree, Kavita Bala, Michael Donikian, and Donald P. Greenberg. Lightcuts : a scalable approach to illumination. *ACM Trans. Graph.*, 24(3) :1098–1107, 2005.
- [WH92] Greg Ward and Paul Heckbert. Irradiance gradients. In *Eurographics Rendering Workshop*, pages 85–98, May 1992.
- [WMM<sup>+</sup>04] Markus Weber, Marco Milch, Karol Myszkowski, Kirill Dmitriev, Przemyslaw Rokita, and Hans-Peter Seidel. Spatio-temporal photon density estimation using bilateral filtering. In *CGI '04 : Proceedings of the Computer Graphics International*, pages 120–127, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [WRC88] Gregory J. Ward, Francis M. Rubinstein, and Robert D. Clear. A ray tracing solution for diffuse interreflection. In *SIGGRAPH '88 : Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 85–92, New York, NY, USA, 1988. ACM.





## Résumé

La simulation d'éclairage peut être utilisée pour l'étude et l'analyse du confort visuel ou de la performance de dispositifs d'éclairage. Pour répondre à de tels objectifs, les méthodes utilisées doivent résoudre de manière précise et réaliste la problématique de l'illumination globale. De plus, les logiciels de simulation d'éclairage doivent souvent manipuler des scènes géométriquement complexes mais aussi exploiter les propriétés photométriques réalistes des sources artificielles étendues, des sources naturelles et des matériaux. L'objectif du travail de thèse est d'étendre les possibilités de ces outils à la prise en compte d'environnements enfumés dans lesquels la densité et la répartition des fumées évoluent avec le temps, tout en considérant le déplacement d'un observateur virtuel dans la scène. De telles possibilités ouvriraient le champ des possibilités de la simulation d'éclairage à des cas d'étude de la vision dans les fumées pour la sécurité incendie par exemple. Suite à une analyse globale du problème (interaction lumière/matériaux, lumière/fumée, évolution de la fumée dans le temps), le travail de recherche est décomposé en trois parties. Nous présentons dans un premier temps une nouvelle méthode de résolution de l'illumination globale pour les objets surfaciques basée sur la méthode de cache d'éclairage avec des enregistrements dont les zones d'influence s'adaptent à la géométrie et aux variations d'éclairage. Nous appelons ces enregistrements des *enregistrements adaptatifs*. Cette technique permet de contrôler plus finement la densité du cache. Par la suite, les travaux s'intéressent en détail à la problématique des milieux participatifs statiques et de leur interaction avec la lumière. Une méthode de résolution, s'appuyant sur les travaux de la première partie, est alors proposée. Les enregistrements adaptatifs sont créés dans l'espace en fonction des caractéristiques de la fumée (coefficients de diffusion et d'absorption) et de son influence sur l'éclairage global. Enfin, l'aspect dynamique est étudié et une extension temporelle de la méthode de simulation d'éclairage en présence de milieux participatifs est alors proposée. Nous introduisons le concept d'enregistrements adaptatifs spatio-temporels (pour les surfaces et les volumes) pour interpoler les variations d'éclairage à la fois dans l'espace et dans le temps.

## Abstract

Light simulation can be used to study and analyse the visual comfort as well as the performance of lighting devices. To meet this objective, the used methods have to provide an exact solution to the global illumination problem. Another complexity is due to the fact that light simulation has to be performed for geometrically complex scenes and realistic photometric properties of light sources (artificial and natural) and materials. The goal of this thesis is to provide fast global illumination solutions for scenes containing participating media such as smoke. The smoke distribution and its density are scalable, and the observer moves through the virtual scene. This kind of solution could be helpful for fire emergency. After a complete analysis of the problem (light interaction with materials and with smoke), our work is divided into three parts. In the first time, we present a new method to solve the global illumination problem for surface objects based on the irradiance cache method. Our method makes use of records with an influence zone which adapts to geometry and lighting variations. We called this records *adaptive records*. With this method, the cache density can be controlled and high lighting variations (represented by irradiance gradients) can be precomputed and stored in the irradiance cache. Then, we address the global illumination problem for scenes containing static participating media. We propose a new method which is an extension to participating media of our work on irradiance cache with adaptive records. Volume records are created in the participating media depending on its scattering coefficients (diffusion and absorption). Finally, we extend this work to dynamics smokes whose shape varies spatially and temporally. To this end, adaptive spatio-temporal surface and volume records are introduced and used for interpolation purpose together with spatial and temporal gradients.