
M2 IGI - UNIVERSITÉ LYON 1

RAPPORT DE STAGE

Rendu réaliste et temps réel pour la réalité augmentée

Auteur :

Hadrien CROUBOIS
M2 IGI – UCBL - ENS de Lyon

Encadrants :

Jean-Philippe FARRUGIA
Maître de conférences, LIRIS / IUTa, université Lyon 1
Jean-Claude IEHL



Remerciements

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	ii
Introduction	1
1 Périphérique d'acquisition	2
1.1 Modèle	2
1.2 Calibration	2
1.3 Détails d'implémentation	2
2 Repérage dans l'espace	3
2.1 Hiérarchie de référentiels	3
2.2 Utilisation de marqueurs	3
2.3 Évaluation des transformations	4
2.3.1 Calibration de la camera	4
2.3.2 Positionnement à partir de marqueurs	4
2.3.3 Models OpenCV / OpenGL	4
3 Les cartes d'environnement	5
3.1 Principe	5
3.2 Reconstruction dynamique	5
3.3 Détails d'implémentation	5
4 Rendu	6
4.1 État de l'art	6
4.2 Éclairage ambiant	6
4.2.1 De la physique aux mathématiques	6
4.2.2 Approximation numérique	7
4.2.3 Discussion	8
4.3 Ombrage	8
4.3.1 Modèle	8
4.3.2 Discussion	9
4.4 Reflets spéculaires	9
4.5 Vers un modèles à micro-facettes	9
4.6 Pipeline	10
4.7 Résultats	10
5 Precalcul	12
5.1 Éclairage ambiant sous forme de texture	12
5.1.1 Intégration statistique	12
5.1.2 Évaluation de la visibilité	12
5.1.3 Post traitement	12
5.2 Décomposition en sphères	13
5.2.1 Échantillonnage du maillage	13
5.2.2 Appareillement de points et calcul de sphère optimale	14

6 L'application	16
6.1 Structure	16
6.1.1 Hiérarchie	16
6.1.2 Modules “videodevice”	16
6.1.3 Modules “scanner”	16
6.2 Configuration	16
6.3 Résultats	16
7 Perspectives d'évolution	17
7.1 Acquisition HDR	17
7.2 BRDF anisotropes	17
7.3 Modèles dynamiques	17
A Annexes	I
Bibliographie	IV
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VI
Liste des algorithmes	VI

Introduction

Le travail détaillé dans ce document a été réalisé de février à juillet 2014 au sein de l'équipe R3AM¹ en vue de l'obtention du Master IGI de l'UCBL². Il a été encadré par Jean-Philippe Farrugia et Jean-Claude Iehl

Ce travail a été financé par l'ENS de Lyon³, au même titre que le reste du M2 IGI, dans le cadre de la troisième année correspondant au statut de normalien.

Ce stage est issue du constat selon lequel les applications orientées temps réel actuellement disponible sur mobile ne correspondent pas à ce que propose l'état de l'art en terme en terme de rendu réaliste. Une autre constatation est que les dispositif mobiles actuelles sont de plus en plus à même d'acquérir leur environnement (notamment au moyen de camera frontales).

L'optique de ce stage est donc d'évaluer les possibilités d'acquisition et de rendu en temps réelle sur une plate-forme mobile et de proposer une solution logicielle complète mettant en œuvre les mécanismes considérés, du repérage à l'étape de rendu en passant par la reconstruction de l'environnement lumineux.

1. <http://liris.cnrs.fr/r3am/>
2. <http://www.univ-lyon1.fr/>
3. <http://www.ens-lyon.eu/>

Périphérique d'acquisition

Partie 1.1

Modèle

Partie 1.2

Calibration

Partie 1.3

Détails d'implémentation

Repérage dans l'espace

Partie 2.1

Hiérarchie de référentiels

Afin de mettre en place les différents mécanismes de repérage, il a été nécessaire de hiérarchiser les repères relatifs aux différents référentiels considérés.

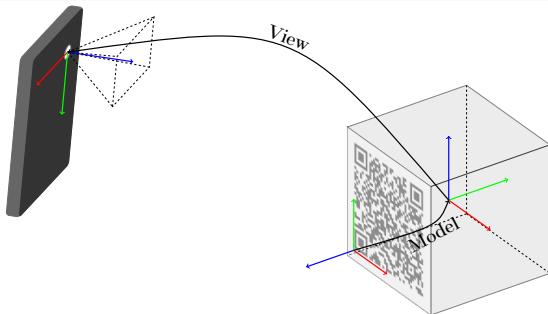
Le référentiel principal est le référentiel du monde. Il est par définition fixe au cours du temps et est défini par rapport à la mire utilisé pour l'acquisition. Ce repère est centré au centre géométrique de la mire et servira aussi bien à positionner l'objet à afficher qu'à définir servir de référentiel de base pour l'enmap.

Les différentes faces de la mire sont elles même fixes dans le repère du monde car lié à l'objet physique (la mire) qui le définit. Les transformation entre le repère de chacune des faces de la mire et le repère du monde sont codées dans les marqueurs présents sur les faces (matrice *model*).

Ainsi, ayant identifier une des faces à l'aide du marqueur présent sur cette dernière, il est possible, en appliquant la transformation codé par ce marqueur, de reconstruire le repère du monde.

L'interface d'acquisition est elle aussi repéré vis à vis du repère principal. La transformation entre ces deux repère est codé par la matrice *view* et changera au cours du temps, l'utilisateur se déplaçant par rapport à la mire.

FIGURE 2.1 Les différents référentiels



Les différentes caméras présentes sur l'interface d'acquisition seront à leur tour positionnées relativement à l'interface d'acquisition. Cette dernière transformation est disponible dans les fichiers de configurations de camera chargés au démarrage.

TABLE 2.1 Hiérarchie des matrices de transformations

QRcode		
	↓	
Face		
$model^{-1}$	↓	$model$
Monde		
$view^{-1}$	↓	$view$
Smartphone		
$orientation^{-1}$	↓	$orientation$
Camera		
$cvToGl^{-1}$	↓	$cvToGl$
Vue OpenGL		
$projection^{-1}$	↓	$projection$
Image rendu		

Partie 2.2

Utilisation de marqueurs

L'évaluation des transformations, qui est nécessaire au positionnement dans la scène et donc à la reconstruction de l'environnement, nécessite la reconnaissance de marqueurs. L'identification de ces marqueurs, fixes dans l'espace du monde, associé à la connaissance de la matrice *model* correspondante permettent suffisent en effet à déduire l'orientation au regard de la scène.

Afin de permettre la reconnaissance de la scène dans sa globalité, il est nécessaire de construire une mire complète, disposant de plusieurs faces parmi lesquelles au moins une devra, pour toute orientation, être lisible. Les marqueurs constitutants cette mire doivent par ailleurs être capables de porter les informations caractéristiques de la matrice *model* associée.

Il est donc nécessaire de choisir un modèle de marqueur permettant à la fois une localisation précise d'au moins trois points (nécessaires au repérage) et portant des informations propres.

Parmi les nombreux modèles de marqueurs répondant au prérequis, le choix d'une implémentation s'est rapidement porté sur un modèle utilisant des QR codes¹. L'adaptation à un autre modèle est particulièrement aisée.

1. <http://www.qrcode.com/>

puisqu'elle ne demande que le développement d'un module de scanner reconnaissant les marqueurs (voir section 6.1.3, page 16).

Sont disponibles en annexe les patrons des mires cubique (figure A.1, page II) et hémisphérique octogonale (figure A.2, page III) construites à base de QR codes.

Partie 2.3

Évaluation des transformations

Compte tenu de la hiérarchie de référentiel décrite dans la section précédente, il est nécessaire, pour décrire complètement le système, de décrire chacune des matrices de transformation.

2.3.1

Calibration de la camera

L'étape de calibration de camera permet de calculer les différents termes de la matrice *projection* propre à l'interface d'acquisition. Cela revient à ajuster le modèle de sténopé considéré dans la section 1.1 avec les paramètres physiques.

La matrice *projection* est de la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_x & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3.1.1)$$

avec

$$\alpha_x = f * m_x$$

$$\alpha_y = f * m_y$$

ou f est la longueur focale, m est la résolution du capteur selon les axes \vec{x} et \vec{y} , u_0 et v_0 sont les coordonnées du centre optique sur le capteur et γ est un coefficient qui décrit la non orthogonalité des axes principaux

Le calcul de cette matrice est résolu par la minimisation d'un système linéaire sur de nombreuses prises de vue du marqueur.

Cette étape de calibration est implementé par la bibliothèque OpenCV².

Une fois déterminés, les paramètres relatifs à la camera sont sauvegardés dans un fichier **xml**.

2.3.2

Positionnement à partir de marqueurs

Une fois la camera calibrée, c'est à dire une fois les paramètres intrinsèques déterminés il est possible d'utiliser la connaissance de la matrice *projection* et des dimensions du marqueur pour reconstruire, à partir des coordonnées du marqueur dans l'espace image, la matrice de transformation *extrinseque* correspondant au passage de l'espace du QR code (face de la mire) à l'espace de la camera.

Les matrices *model* et *orientation* étant connues, la première grâce aux informations écrites sur le QR code et la seconde étant pré-enregistrées (fixe, lié à la géométrie du téléphone), il est possible d'en déduire la matrice *view* qui caractérise le positionnement dans la scène :

2. <http://opencv.org/>

$$view = orientation^{-1}$$

\times extrinseque

\times model⁻¹

(2.3.2.1)

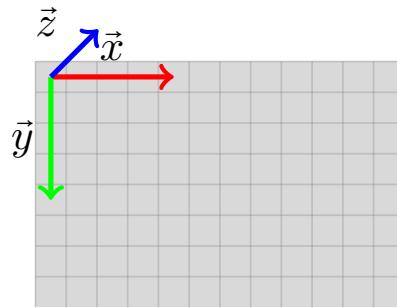
2.3.3

Models OpenCV / OpenGL

Les différentes bibliothèques ont chacune leur approche qui résultent dans des différences de conventions.

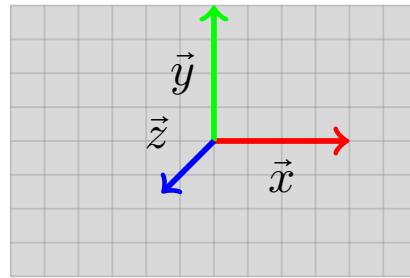
OpenCV considère les images comme des matrices. À ce titre l'origine est placée en haut à gauche, avec le \vec{x} pointant vers la gauche et le vecteur \vec{y} pointant vers le bas. Ainsi regarder une image revient à regarder selon l'axe des \vec{z} croissants.

FIGURE 2.2 Convention d'orientation OpenCV



À l'inverse OpenGL s'intéresse à des espaces 3D complets et oriente donc naturellement le vecteur \vec{y} vers le haut. L'utilisateur regarde donc selon l'axe des \vec{z} décroissants.

FIGURE 2.3 Convention d'orientation OpenGL



Afin d'utiliser conjointement les deux bibliothèques, il convient de faire les transformations adéquates.

$$cvToGl = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (2.3.3.1)$$

Les cartes d'environnement

- Partie 3.1 **Principe**
- Partie 3.2 **Reconstruction dynamique**
- Partie 3.3 **Détails d'implémentation**

Rendu

Partie 4.1

État de l'art

Partie 4.2

Éclairage ambiant

4.2.1

De la physique aux mathématiques

Le calcul de l'énergie reçue en un point de l'objet revient à intégrer le flux lumineux sur l'ensemble des directions visibles.

$$\mathcal{E}(p, \vec{n}) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{H}^2(\vec{n})} \mathcal{L}(p, \vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \quad (4.2.1.1)$$

L'intégrale selon $\int_{\mathcal{H}^2(\vec{n})} d\vec{\omega}$ correspond à une intégrale suivant l'hémisphère visible et pondéré par l'angle solide en supposant qu'il n'y a pas d'occultation. Afin de modéliser les phénomènes d'auto-occultation on devra utiliser la formule suivante

$$\mathcal{E}(p, \vec{n}) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{V}(p, \vec{n})} \mathcal{L}(p, \vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \quad (4.2.1.2)$$

Où $\mathcal{V}(p, \vec{n})$ est la restriction de l'hémisphère suivant le vecteur \vec{n} à l'espace effectivement visible depuis le point p (ce qui renvoie à considérer $\mathcal{H}^2(\vec{n})$ privée des directions correspondantes à de l'auto-occultation).

Ici on fait d'abord la supposition que l'éclairage selon une direction $\vec{\omega}$ est indépendant du point considéré. Cette approximation, est nécessaire pour utiliser, sans reconstruction 3D complexe, l'enmap reconstruite dynamiquement.

On obtient donc l'équation

$$\mathcal{E}(p, \vec{n}) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{V}(p, \vec{n})} \mathcal{L}_{glob}(\vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \quad (4.2.1.3)$$

On fait alors la supposition que les phénomènes d'auto-occultation influencent de manière moyenne et globale l'énergie reçue en un point. Cela nous permet de revenir à une intégration sur tout le demi espace $\mathcal{H}^2(\vec{n})$ en ajoutant simplement un coefficient de $\mathcal{P}_{\mathcal{V}}(p)$ valant 1 en l'absence d'auto-occultation et 0 pour une auto-occultation totale.

Ce coefficient définit sur la surface de l'objet pourra être pré-calculé et fournit sous forme de texture (voir section 5.1, page 12).

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{\mathcal{V}}(p) &= \frac{\int_{\mathcal{V}(p, \vec{n})(p)} \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega}}{\int_{\mathcal{H}^2(\vec{n})(p)} \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega}} \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{V}(p, \vec{n})(p)} \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \end{aligned} \quad (4.2.1.4)$$

d'où

$$\mathcal{E}(p, \vec{n}) = \frac{\mathcal{P}_{\mathcal{V}}(p)}{\pi} \int_{\mathcal{H}^2(p, \vec{n})} \mathcal{L}_{glob}(\vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \quad (4.2.1.5)$$

Enfin, on fera une dernière approximation suivant la méthode proposée dans [Mcguire et al., 2013] : on considère la fonction \mathcal{L}_{glob} (décrise par l'enmap) comme constante sur chaque face de l'enmap. Le niveau de mipmap le moins détaillé nous donne en effet une valeur moyenne pour la face considérée.

Si l'on oublie un instants les problèmes d'auto-occultation et que l'on s'intéresse à l'angle solide décrit par une face du cube centrée au point de vue, un rapide calcul permet d'évaluer l'angle solide décrit par une face complètement visible comme étant

$$\Omega_F = \iint_F \frac{1}{\|\vec{\omega}\|^3} d\omega = \frac{2\pi}{3} \quad (4.2.1.6)$$

L'angle solide sur une face partiellement visible (selon une demi sphère caractérisée par l'hyperplan de vecteur \vec{n}) est alors défini par

$$\Omega_F(\vec{n}) = \iint_F \frac{\text{HS}(\vec{\omega} \cdot \vec{n})}{\|\vec{\omega}\|^3} d\omega \quad (4.2.1.7)$$

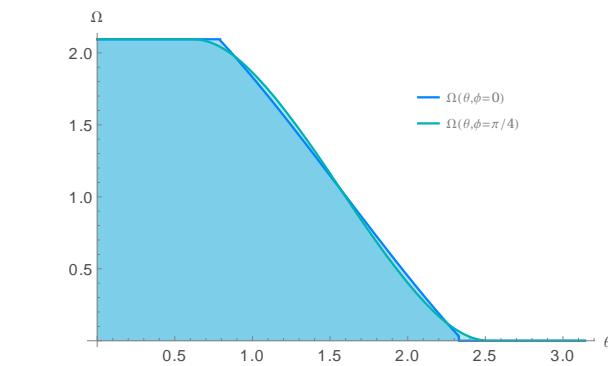
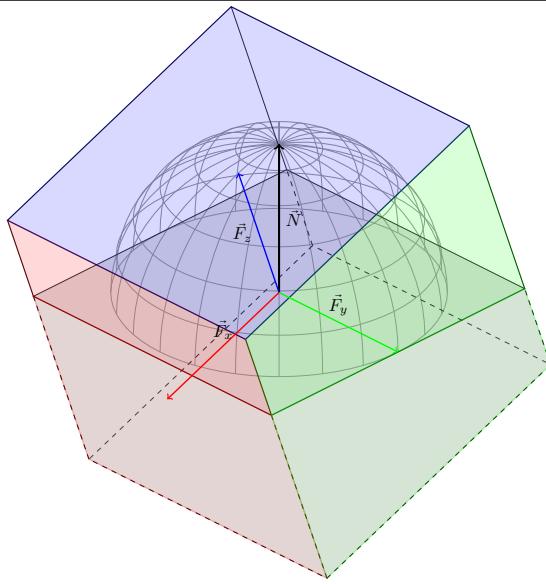
Avec HS la fonction de HeavySide définie par :

$$\text{HS}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$$

La figure 4.1 retrace l'évolution de $\Omega_F(\vec{n})$ selon l'angle θ pour des orientations de $\phi = 0$ et $\phi = \frac{\pi}{2}$

Les poids affectés aux valeurs de chaque face de l'enmap sont donc l'intégration du produit scalaire normalisé $\frac{\vec{\omega} \cdot \vec{n}}{\|\vec{\omega}\|}$ par rapport à l'angle solide sur la face considérée

$$\begin{aligned} W_F(\vec{n}) &= \iint_F \frac{\vec{\omega} \cdot \vec{n}}{\|\vec{\omega}\|} \times \frac{\text{HS}(\vec{\omega} \cdot \vec{n})}{\|\vec{\omega}\|^3} d\omega \\ &= \iint_F \frac{\vec{\omega} \cdot \vec{n} \times \text{HS}(\vec{\omega} \cdot \vec{n})}{\|\vec{\omega}\|^4} d\omega \end{aligned} \quad (4.2.1.8)$$

FIGURE 4.1 Évolution de $\Omega_F(\vec{n})$ selon l'orientation de \vec{n}

FIGURE 4.2 Intégration de l'enmap par rapport à une facette


On notera qu'on a bien

$$\sum_{F \in Faces} \Omega(F) = 4\pi \quad (4.2.1.9a)$$

$$\nabla_{\vec{n}} \sum_{F \in Faces} \Omega(F, \vec{n}) = 2\pi \quad (4.2.1.9b)$$

$$\forall \vec{n} \sum_{F \in Faces} W_F(\vec{n}) = \pi \quad (4.2.1.9c)$$

Dès lors, l'approximation selon laquelle \mathcal{L} est constante sur chaque face nous donne

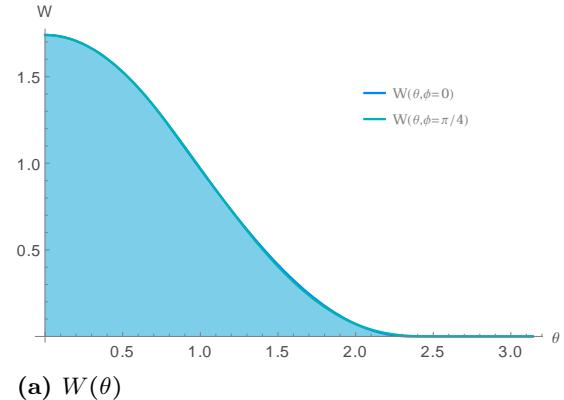
$$\begin{aligned} \mathcal{E}(p, \vec{n}) &= \frac{\mathcal{P}_V(p)}{\pi} \sum_{F \in Faces} \mathcal{L}_{glob}(\vec{F}) W_F(\vec{n}) \\ &= \frac{\mathcal{P}_V(p)}{\pi} \sum_{F \in Faces} \mathcal{L}_{glob}(\vec{F}) \iint_F \frac{\vec{\omega} \cdot \vec{n} \times HS(\vec{\omega} \cdot \vec{n})}{\|\vec{\omega}\|^4} d\omega \end{aligned} \quad (4.2.1.10)$$

4.2.2 Approximation numérique

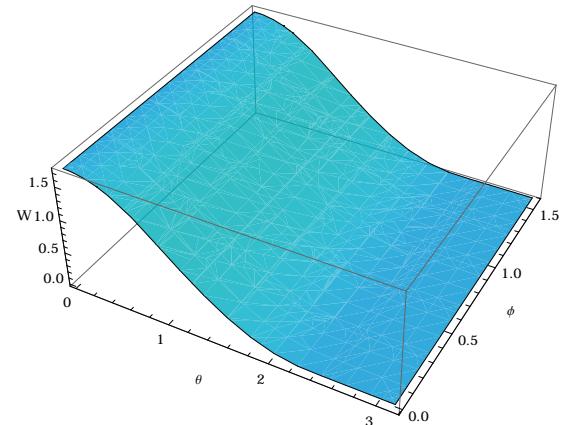
En considérant la face F_{Z^+} on obtient (sans perte de généralité)

$$W_{F_{Z^+}}(\vec{n}) = \iint_{[-1;1]^2} \left[\frac{(x \cdot \vec{n}_x + y \cdot \vec{n}_y + \vec{n}_z)}{(x^2 + y^2 + 1)^2} HS(x \cdot \vec{n}_x + y \cdot \vec{n}_y + \vec{n}_z) dx dy \right] \quad (4.2.2.1)$$

Le problème est alors de trouver un moyen de calculer, ou au moins d'approcher, la fonction $W_F(\vec{n})$. Ce calcul étant par ailleurs fait en chaque noeud du maillage, il est primordial de le faire en utilisant un minimum de ressource, quitte à évaluer une valeur approchée qui affectera le résultat de manière faible comparativement avec l'approximation faite précédemment et selon laquelle \mathcal{L} est constante sur chacune faces.

FIGURE 4.3 Évolution de $W_F(\vec{n})$ selon l'orientation de \vec{n}


(a) $W(\theta)$



(b) $W(\theta, \phi)$

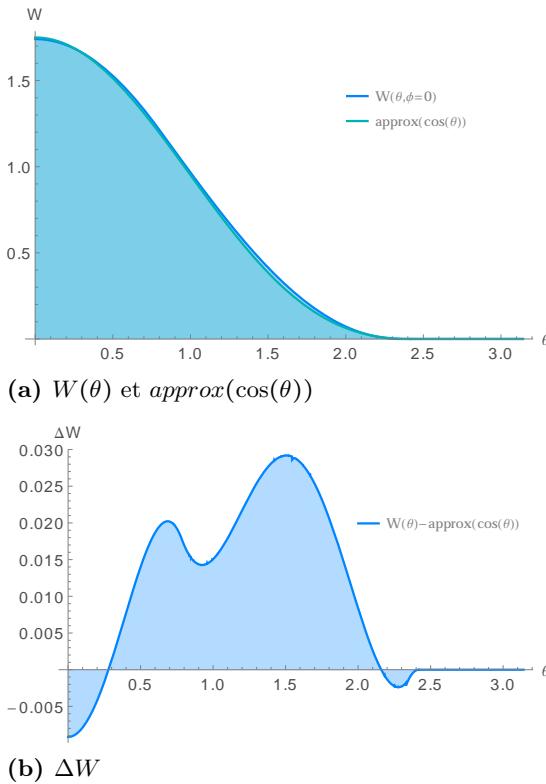
Comme le montre la figure 4.3, la fonction W_F dépendant principalement de θ on tentera de l'approximer par une fonction de $\vec{n} \cdot \vec{F} = \cos(\theta)$

Une approximation simple est la fonction

$$approx : \cos(\theta) \mapsto \frac{[\max(.75 + \cos(\theta), 0)]^2}{1.75} \quad (4.2.2.2)$$

Comme le montre la figure 4.4, cette fonction est, malgré sa grande simplicité proche de la fonction $W_F(\vec{n})$.

FIGURE 4.4 Comparaison entre $W_F(\vec{n})$ et $\text{approx}(\cos(\theta))$



Partie 4.3

Ombrage

4.3.1

Modèle

Un indice visuel primordiale à la vraisemblance visuel des images produites est la présence d'ombres portées provoquées par l'ajout de l'objet .

La modélisation de l'impact d'un tel ajout peut théoriquement être calculé qu'en connaissant la géométrie de la scène et la nature des matériaux qui la compose.

On fera ici plusieurs hypothèses dans le but d'obtenir un modèle qui soit calculable en temps réels tout en donnant des résultats vraisemblables.

Le calcul d'ombre douces est alors fait en décomposant l'objet en une hiérarchie de sphère comme présenté dans [Iwanicki, 2013] et en sommant les contribution des différentes sphères.

Pour évaluer l'ombre douce projeté par une sphère il suffit alors d'évaluer le manque d'illumination. On rappelle les formules suivantes

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{ambiant}(p, \vec{n}) &= \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{H}^2(\vec{n})} \mathcal{L}_{glob}(\vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \\ \mathcal{E}_{ombre}(p, \vec{n}) &= \mathcal{E}_{ambiant}(p, \vec{n}) - \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{S}(p)} \mathcal{L}_{glob}(\vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega}\end{aligned}$$

avec $\mathcal{S}(p)$ la portion de sphère visible depuis le point considéré.

L'ombre est rendu en assombrissant le pixel associé ce point d'un facteur

$$\begin{aligned}\mathcal{F}(p) &= \frac{\mathcal{E}_{ombre}(p, \vec{n})}{\mathcal{E}_{ambiant}(p, \vec{n})} \\ &= 1 - \frac{\int_{\mathcal{S}(p)} \mathcal{L}_{glob}(\vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega}}{\int_{\mathcal{H}^2(\vec{n})} \mathcal{L}_{glob}(\vec{\omega}) \times \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega}}\end{aligned}\quad (4.3.1.1)$$

Les différents niveaux de détail de l'enmap nous permettant d'obtenir des approximations de $L(p, \vec{\omega})$ sur $\mathcal{S}(p)$ et sur $\mathcal{H}^2(\vec{n})$ on peut simplifier la formule en :

$$\mathcal{F}(p) = 1 - \frac{\mathcal{L}_{glob}(\mathcal{S}(p))}{\mathcal{L}_{glob}(\mathcal{H}^2(\vec{n}))} \left(\frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{S}(p)} \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \right) \quad (4.3.1.2)$$

Le calcul de l'angle solide formé par la sphère, et pondéré par un cosinus est détaillé dans [Snyder and Report, 1996]. On retiendra que dans notre cas où la sphère est supposée au dessus du plan sur lequel se projettent les ombres :

$$\int_{\mathcal{S}(p)} \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} = \cos(\omega) \sin^2(\alpha) \quad (4.3.1.3)$$

avec α le demi angle sous lequel est vu la sphère et ω l'angle entre la vertical (normale à la surface sur laquelle se projettent les ombres) et la direction de la sphère.

On obtient ainsi :

$$\mathcal{F}(p) = 1 - \cos(\omega) \sin^2(\alpha) \frac{\mathcal{L}_{glob}(\mathcal{S}(p))}{\mathcal{L}_{glob}(\mathcal{H}^2(\vec{n}))} \quad (4.3.1.4)$$

4.2.3

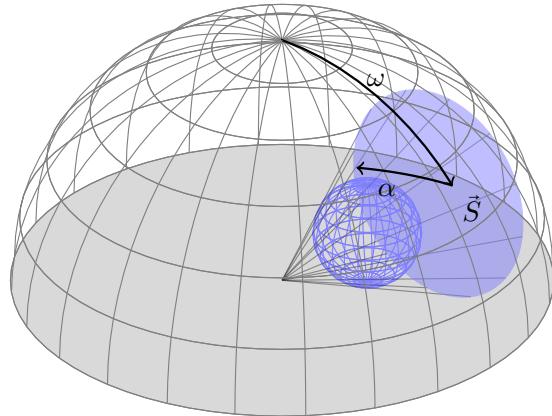
Discussion

La méthode développée ici repose sur l'approximation de la formule (4.2.1.10) et plus particulièrement de l'intégrale présenté dans la formule (4.2.1.8). La complexité de cette intégrale réside dans le domaine effectif d'intégration, conditionné à la fois par la forme carré des faces de l'enmap et la présence d'un terme caractéristique de l'hémisphère visible.

Plusieurs formules ont été étudiée pour des domaines d'intégration hémisphériques ou partiellement hémisphérique ainsi que pour des polygones entièrement visibles [Snyder and Report, 1996] (ce qui fait disparaître le terme de HS).

Il aurait été possible d'adapter un modèle polygonal évoqué dans [Snyder and Report, 1996] mais les polygones sur lesquels il aurait fallu intégrer variant selon les conditions de visibilités il aurait été nécessaire d'effectuer de coûteux calculs de géométrie.

L'objectif principal étant ici une grande vitesse d'exécution, l'inexactitude des résultats étant de toute façon largement oubliée au regard des approximations faites précédemment on préférera utiliser une fonction grossièrement approché mais simple à calculer.

FIGURE 4.5 Obstruction par une sphère

4.3.2

Discussion

La ou il est habituel de segmenter l'environnement pour en extraire une hiérarchie de sources lumineuses, la méthode proposée ici permet d'évaluer des ombres douces à partir de données d'environnement sans étape de segmentation ni calcul de visibilité.

Un développement intéressant serait de construire une décomposition hiérarchique, potentiellement intégrée dans un octree, et de l'évaluer plus ou moins profondément selon la distance considérée.

Partie 4.4

Reflets spéculaires

Le calcul de l'éclairage ambiant revient à considérer une BRDF purement lambertienne. Afin d'améliorer le réalisme du rendu il convient d'adopter un modèle de Phong en ajoutant une part d'éclairage spéculaire.

Cet éclairage spéculaire permet de rendre de manière intéressante des surfaces métallique, dans la limite d'un seul reflet. Le modèle adopté ici est par ailleurs isotrope, ce qui ne permet par le rendu de matières comme du métal brossé pour lesquels on retrouve des directions privilégiées.

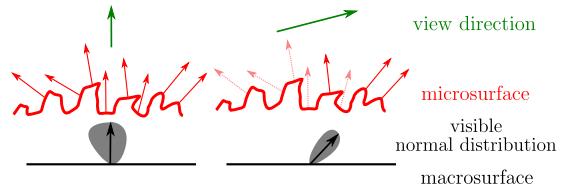
Dans notre cas l'évaluation du reflet se fait naturellement en calculant la réflexion du rayon incident, donné par la position du point considéré dans l'espace de la caméra, relativement à la normale de l'objet dans ce même espace. On accédera ensuite à la valeur d'éclairage directement dans l'envmap.

Une fois de plus on pourra utiliser les différents niveaux de mipmap à notre avantage, la considération du niveau de mipmap revenant la considérer l'angle d'un cône autour de l'axe du reflet. Un tel cône permet ainsi de caractériser le caractère spéculaire de l'objet, cette dernière pouvant varier d'un reflet parfait –miroir– à un reflet plus diffus –plastique–. On utilisera également l'ombre projeté calculé précédemment afin de moduler les reflets.

Partie 4.5

Vers un modèles à micro-facettes

Les modèles employés ici permettent un rendu rapide mais présentent des limitations en terme de qualité. Il serait

FIGURE 4.6 Mézo-normales et point de vue
(source [Dupuy et al., 2012])

intéressant, dans l'optique améliorer encore la qualité du rendu, de considérer un modèle à micro-facette. Le principe des modèles à micro-facette est de considérer la surface de l'objet comme un ensemble de petites faces orientées selon des normales propres à chacune (micro-normales). La distribution statistique des micro-normales autour de la normale géométrique du maillage (macro-normal) permet de déterminer les mécanismes de réflexion. Parmi les nombreux avantages d'un telle méthode il y a la possibilité de caractériser des surfaces anisotropes par le biais de directions privilégiés dans la distribution de facettes.

L'auto-occultation entre facettes, variable selon le point de vue, permet par ailleurs de calculer une normal intermédiaire entre la normale géométrique et les micro-normales des facettes (mézo-normal) qui correspond à l'intégration des micro-normales sur l'ensemble des facettes visibles [Bruneton et al., 2010] [Dupuy et al., 2012] [Heitz et al., 2013b].

Cette mézo-normal, utilisée à la place de normale géométrique, permet de corriger les reflets sur des surfaces vues sous un angle important.

L'intégration complète d'un tel modèle a été envisagé de la manière suivante :

1. Choix d'une distribution de normale (gaussienne) et étude du modèle associé ;
2. Ajout aux objets 3D d'une texture (optionnelle) caractérisant localement la direction privilégiée et la force de l'anisotropie associée ;
3. Évaluer, dans le fragment shader, la distribution de direction reflétées en fonction de l'angle de vue et des caractéristiques stockées dans la texture ;
4. Évaluer la lumière incidente selon la distribution calculée précédemment.

Au delà des calcul complexes, mais heureusement déjà documentées, du premier point [Heitz et al., 2013a], l'évaluation de l'envmap selon des distributions anisotropes nécessite de lourds calculs. Il serait possible de les réduire fortement via un pré-calcule (convolution) mais dans notre cas le caractère dynamique de l'environnement ne permet pas une telle approche.

Dans notre cas, il serait nécessaire d'évaluer, sans pré-calcul, l'intégration anisotrope de l'envmap. Les outils de filtrages anisotropes ne sont ici pas exploitable en l'état car une filtre anisotrope est défini entre autre par le facteur d'anisotropie qui le caractérise. Le nombre d'unité de texture étant grandement limité, il n'est pas possible de charger plusieurs fois l'envmap avec des filtrages différents qui couvrirraient toutes nos attentes.

Les outils de lecture de texture par gradient¹ mis en place dans OpenGL ne conviennent pas non plus car même

1. `textureGrad()`

si les vecteurs fournis (dX et dY) sont caractéristique d'une forte anisotropie, le filtrage anisotropique est en l'état limité aux faces constituant l'envmap cubique. Il en résulte des défauts aux jonctions entre les faces.

Il conviendrait donc, pour permettre en place les mécanismes d'évaluation anisotrope voulus, d'approximer l'intégration vis de multiples accès à la texture, le long de la direction privilégié d'anisotropie pour procéder à une intégration implicite.

Partie 4.6

Pipeline

Compte tenu des méthodes décrites précédemment, le pipeline de rendu se décompose en différentes parties (voir figure 4.7)

1. L'étape de pré-calculation permet l'évaluation de données propres au modèle. Ces données n'étant pas influencées par la localisation dans l'espace ni par les caractéristiques d'environnement lumineux, il n'est pas nécessaire de les recalculer en temps réel et on préférera donc stocker les résultats pré-calculés.

Ambiant : information d'auto-occultation ($\mathcal{P}_V(p)$), stocké dans une `texture2D` ;

Sphères : décomposition de l'objet comme union de sphères, stocké sous forme de `vec4[]`.

2. L'étape de calcul temps réel, qui évalue des résultats temporaires nécessaires à la réalisation du rendu final. Ces résultats doivent être réévalués dynamiquement car ils dépendent de paramètres dynamiques tel que les données d'environnement.

Ombre : ombre douce projetée par l'objet, elle dépend de l'environnement lumineux décrit par l'envmap.

3. L'étape de rendu qui produit l'image telle qu'elle est vue par l'utilisateur.

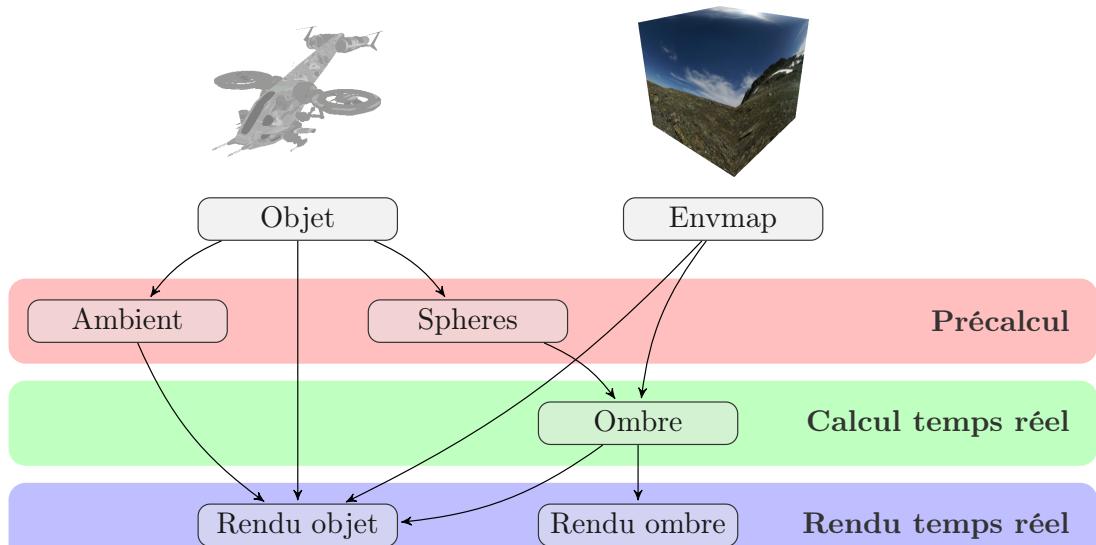
Rendu objet : affichage de l'objet, en tenant compte de l'éclairage ambiant, et des reflets spécifiques ;

Rendu ombre : affichage des ombres en surimpression afin d'intégrer l'objet de manière plus réaliste.

Partie 4.7

Résultats

FIGURE 4.7 Pipeline développé



Precalcul

Nous avons détaillés dans le chapitre précédent les différentes étapes de rendu pour l'intégration d'un objet 3D dans une scène dynamique acquise en temps réel. Certaines des données nécessaires à un tel rendu étant indépendantes de la scène nous nous sommes proposés de les pré-calculer.

Partie 5.1

Éclairage ambiant sous forme de texture

Nous avons vu dans la section 4.2, page 6, le calcul de l'éclairage ambiant. Dans ce calcul intervenait un terme d'auto-occultation propre à l'objet 3D considéré.

$$\mathcal{P}_V(p) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{V}(p, \vec{n}(p))} \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \quad (5.1.0.1)$$

5.1.1

Intégration statistique

Si s'agit donc d'évaluer, en tout point de l'objet, l'intégrale du produit scalaire entre le vecteur d'intégration et la normale à l'objet, pour un vecteur d'intégration parcourant l'espace visible.

On peut alors reformuler le calcul comme suit.

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_V(p) &= \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{V}(p, \vec{n}(p))} \vec{\omega} \cdot \vec{n} d\vec{\omega} \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{H}^2(\vec{n}(p))} \vec{\omega} \cdot \vec{n} \times \text{visible}(p, \vec{\omega}) d\vec{\omega} \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{S}} \vec{\omega} \cdot \vec{n} \times \text{HS}(\vec{\omega}, \vec{n}) \times \text{visible}(p, \vec{n}) d\vec{\omega} \quad (5.1.1.1) \end{aligned}$$

Pour évaluer une telle intégrale, on procède par une intégration statistique (Monte Carlo). Pour cela on simule le domaine d'intégration sur l'espace de définition en tirant n points uniformément sur une sphère. Ces points représentent les vecteurs $\vec{\omega}$.

Pour chacun de ces points il s'agit d'évaluer :

$$\vec{\omega} \cdot \vec{n} \times \text{HS}(\vec{\omega}, \vec{n}) \times \text{visible}(p, \vec{n})$$

Le terme $\text{HS}(\vec{\omega}, \vec{n})$ est en fait inutile car tout point pour lequel $\text{visible}(p, \vec{n})$ sera non nul sera assuré d'être dans l'hémisphère décrit par $\text{HS}(\vec{\omega}, \vec{n})$. La fonction à intégrer peut donc se résumer à :

$$\vec{\omega} \cdot \vec{n} \times \text{visible}(p, \vec{n})$$

5.1.2

Évaluation de la visibilité

L'évaluation de la visibilité est faite à l'aide d'une shadowmap. Étant donné un point de vue (vecteur $\vec{\omega}$ aléatoire) il s'agit d'effectuer une première étape de rendu, avec une projection orthographique pour en conserver que les informations de profondeurs retenus dans le Z-buffer (voir figure 5.1).

FIGURE 5.1 Z-buffer issue de la première étape de rendu (shadowmap)



Ces données de profondeurs permettent ensuite d'évaluer si un texel est visible ou non, simplement en comparant la profondeur du texel considéré et celle retenue dans la texture et qui caractérise le texel le plus proche selon le rayon associé.

La seconde étape de rendu consiste alors à écrire, dans l'espace texture associé à l'objet, les informations de visibilité qui auront été calculé (voir figure 5.2). À cette étape, il est important de s'assurer que la texture est bien écrite, y compris au niveau des jointures entre les différents éléments qui peuvent demander un ajustement. [Aila, 2005] [Manson and Schaefer, 2012]

5.1.3

Post traitement

Une fois évalué pour une source, les résultats sont ajoutés à une texture qui somme les contributions des diffé-

FIGURE 5.2 Rendu en espace texture pour une source

rentes sources. Cette texture contient ainsi le résultat de l'intégration considérée.

Une fois toutes les sources évaluées, il reste quelques étapes de post traitement :

- L'intégration étant normalisé, les valeurs calculées sont théoriquement entre 0.0 et 1.0. Cependant du fait de la distribution aléatoire des sources utilisées pour l'intégration, il peut arriver qu'en certains points ne pressentant pas d'auto-occultation la valeur dépasse 1.0. Les valeurs sont alors seuillés afin de ne pas poser de problème au moment du stockage au format .png.

Les données étant quantifiées entre 0 et 255, un dépassement de la valeur flottante à stocker peut provoquer une traduction en un entier supérieur à 255. Ces nombres étant stockés sous forme de caractère ASCII, un dépassement à 256 ou 257 peut alors provoquer une évaluation modulo 256 soit un stockage sous forme de 0 ou de 1.

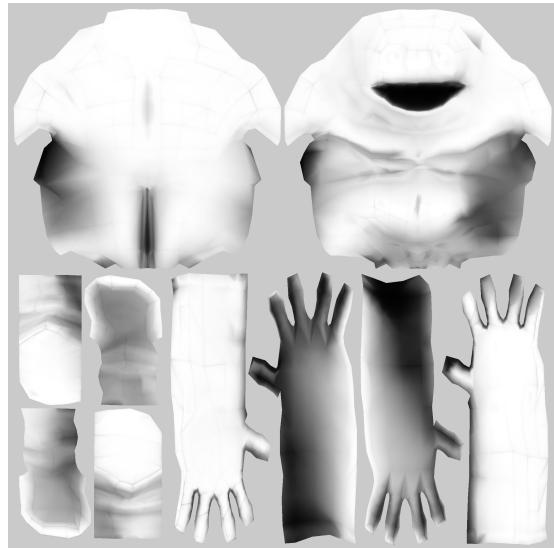
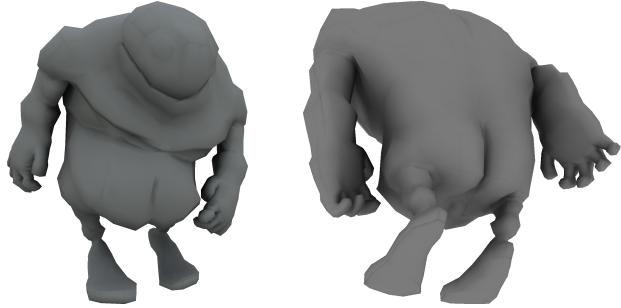
- Les parties de l'image ne correspondant pas à des coordonnées de textures valides étant jusqu'à vides. L'évaluation des niveaux de mipmap pour la texture considérée risque de prendre en compte des éléments qui ne sont pas représentatives de la réalité géométrique de l'objet. Afin de limiter ce biais dans l'évaluation des niveaux de mipmap, on remplit les parties vides et non représentative avec la valeur moyenne calculée sur les parties représentatives. Ainsi on limite l'incohérence des données considérée en bordure de patch pour les niveaux de mipmap les plus élevés.

A l'issue de ces différents post-traitement, il ne reste qu'à exporter la textures sous forme d'image (voir figure 5.3) qui sera chargée le moment voulu.

Partie 5.2

Décomposition en sphères

La section 4.3, page 8, traite du rendu d'ombres portées issus de l'objet 3D ajouté à la scène. Cette étape nécessite

FIGURE 5.3 Données pré-calculées en espace texture après post-traitement (1000 sources)**FIGURE 5.4** Utilisation des données d'éclairage ambiant lors du rendu

une représentation de l'objet en question comme union de sphères.

Le pré-calcul étudié ici consiste donc à construire, étant donné un maillage, un ensemble limité de sphère qui s'approche au mieux de la surface correspondant au maillage.

Ce problème d'optimisation est longuement développée dans la littérature [Marshall and Martin, 1997] [Gross, 2003], notamment pour la reconstruction de surface implicite à partir de points (orientées ou non). La plupart des méthodes consistent à ajuster des surfaces contraintes à l'aide d'outils statistiques. Ces méthodes présentent cependant le défaut d'être mathématiquement complexe et numériquement complexes.

Le choix s'est donc porté sur une méthode simple et inexacte mais suffisante au regard de l'utilisation des résultats par l'algorithme de calcul des ombrages.

5.2.1

Échantillonnage du maillage

Afin d'obtenir une distribution uniforme de points à la surface de l'objet, on procède à un échantillonnage par importance¹.

Pour construire un point uniformément à la surface du maillage on sélectionne d'abord une face proportionnelle-

1. Importance sampling

Algorithme 5.2.1 : Ajustement de sphères à un maillage

```

Entrées : Maillage  $m$ , int  $n$ , int  $s$ 
/* Échantillonnage du maillage */ 
1 Point  $pts[s]$ ;
2 pour  $i \leftarrow [1..s]$  faire
3    $pts[i] \leftarrow$  EchantillonageUniforme( $m$ );
4 /* Initialisation des sphères */ 
5 pour  $i \leftarrow [1..n]$  faire
6    $sphs[i] \leftarrow pts[i]$ ;
7 tant que  $sphs$  n'est pas stable faire
8   Point  $clsts[n][]$ ;
9   pour  $i \leftarrow [1..n]$  faire
10     $clsts[i] \leftarrow$  Appareillement( $pts, sphs[i]$ );
11    pour  $i \leftarrow [1..n]$  faire
12      $sphs[i] \leftarrow$  SphereOptimale( $clsts[i]$ );
12 retourner  $sphs$ ;
    
```

ment à sa surface avant de choisir un point uniformément sur la face considérée.

En répétant cette opération un grand nombre de fois on obtient un nuage de points qui représente correctement les grandes faces. Ce sont ces points qui seront utilisés par la suite pour la construction des sphères représentatives.

5.2.2

Appareillement de points et calcul de sphère optimale

La phase d'appareillement de l'algorithme consiste à organiser les points en clusters relatifs aux sphères déjà construites. Il s'agit donc d'établir une métrique qui caractérise la proximité d'un point à une sphère. De la même manière, la phase de calcul de sphère optimale consiste à calculer la sphère qui minimisera la métrique considérée précédemment sur le cluster qui lui a été associé.

La principale difficulté ici est de construire un métrique représentative des critères de qualités voulus, pour laquelle le calcul d'un élément optimal n'est pas trop complexe et qui converge vers un état stable.

Première approche

Une métrique envisagée est d'évaluer la distance d'un point à la surface de la sphère associé :

$$\begin{aligned}
 f(P, S) &= \|P - S\|^2 - S.r^2 \\
 &= (P.x - S.x)^2 + (P.y - S.y)^2 + (P.z - S.z)^2 - S.r^2 \\
 &= (P.x^2 + P.y^2 + P.z^2) + (S.x^2 + S.y^2 + S.z^2) \\
 &\quad - 2(P.xS.x + P.yS.y + P.zS.z) - S.r^2 \\
 &= \|P\|^2 + \|S\|^2 - 2(P.xS.x + P.yS.y + P.zS.z) - S.r^2
 \end{aligned} \tag{5.2.2.1}$$

Ce calcul de la sphère optimale associée à un cluster peut ensuite se faire par l'optimisation d'un système matriciel $AX - B$, la matrice A représentant les données en entrée (points échantillonnes), le vecteur X représentant la solution à optimiser et le vecteur B étant l'objectif à atteindre.

L'équation 5.2.2.1 nous indique comment construire A , X et B :

$$A = \begin{pmatrix} -2P_1.x & -2P_1.y & -2P_1.z & 1 \\ -2P_2.x & -2P_2.y & -2P_2.z & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -2P_n.x & -2P_n.y & -2P_n.z & 1 \end{pmatrix} \tag{5.2.2.2a}$$

$$X = \begin{pmatrix} S.x \\ S.y \\ S.z \\ \|S\|^2 - S.r^2 \end{pmatrix} \tag{5.2.2.2b}$$

$$B = \begin{pmatrix} -\|P_1\|^2 \\ -\|P_2\|^2 \\ \vdots \\ -\|P_n\|^2 \end{pmatrix} \tag{5.2.2.2c}$$

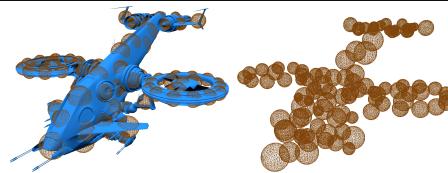
Ainsi on a :

$$A.X - B = \begin{pmatrix} f(P_1, S) \\ f(P_2, S) \\ \vdots \\ f(P_n, S) \end{pmatrix} \tag{5.2.2.2d}$$

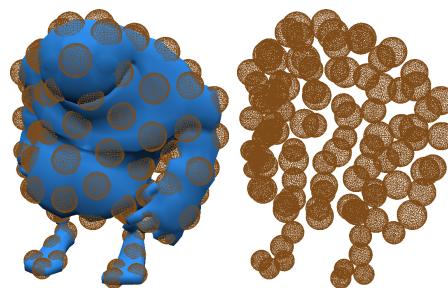
Cette première considération géométrique n'est cependant pas satisfaisante. La simple proximité entre un point et la surface d'une sphère ne prend pas en compte les différences d'orientation de normale entre une face du maillage et la sphère qui le modélise, lesquels sont des éléments de qualité essentiels dans notre cas. Au delà de ce problème d'orientation, cette métrique fait aussi face au problème des outliers présents sur les modèles non convexes. Si quatre points extrêmaux se retrouvent loin de tout, il est possible qu'une sphère viennent les adopter comme point d'attache, englobant alors tout le modèle et cachant la géométrie que l'on voulait représenter.

Par ailleurs la métrique proposée précédemment ne garantit pas la convergence du système.

FIGURE 5.5 Décomposition en sphères d'objets 3D (100000 échantillons, 100 sphères)



(a) MRX22 (157781 sommets, 287776 triangles)



(b) Bigguy (1754 sommets, 2900 triangles)

Méthode adoptée

Finalement la solution adoptée, bien que géométriquement pauvre, nous donne des résultats visuellement acceptables tout en garantissant une convergence rapide. L'idée est de pavier la surface du maillage à l'aide de sphères de rayon uniforme, ce qui correspond à la minimisation de la distance entre les points et le centre des sphère qui leur sont associés (voir figure 5.5).

La distance considérée

$$f(P, S) = \|P - S\| \quad (5.2.2.3)$$

s'optimisant trivialement sur un cluster C par

$$\overline{S} = \left\{ \left(\bar{p}, \overline{\|p - s\|} \right) \mid p \in C \right\} \quad (5.2.2.4)$$

L'application

- Partie 6.1 **Structure**
 - 6.1.1 Hiérarchie
 - 6.1.2 Modules “videodevice”
 - 6.1.3 Modules “scanner”
- Partie 6.2 **Configuration**
- Partie 6.3 **Résultats**

Perspectives d'évolution

Partie 7.1 **Acquisition HDR**

Partie 7.2 **BRDF anisotropes**

Partie 7.3 **Modèles dynamiques**

Annexes

FIGURE A.1 Patron de mire cubique

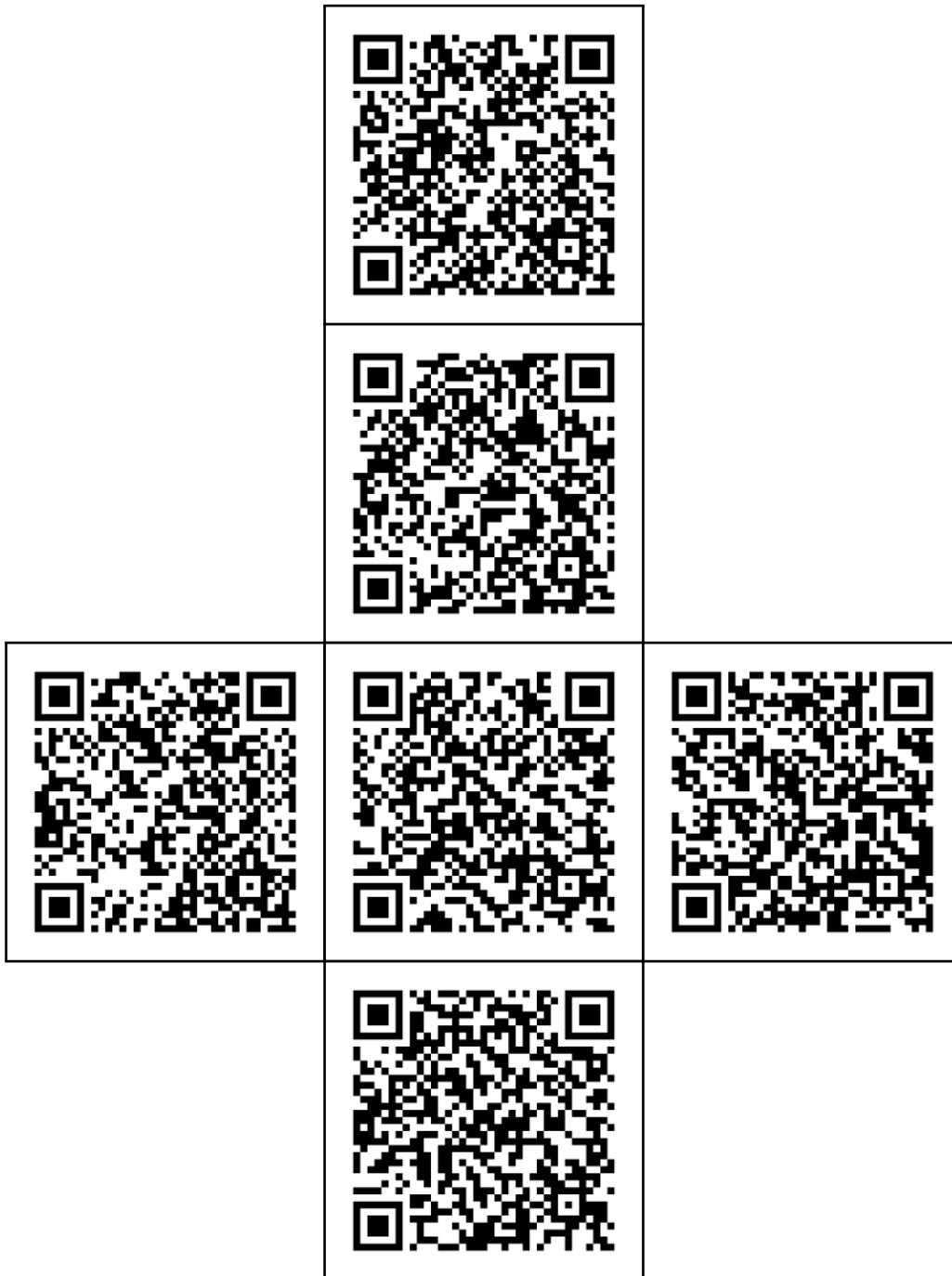
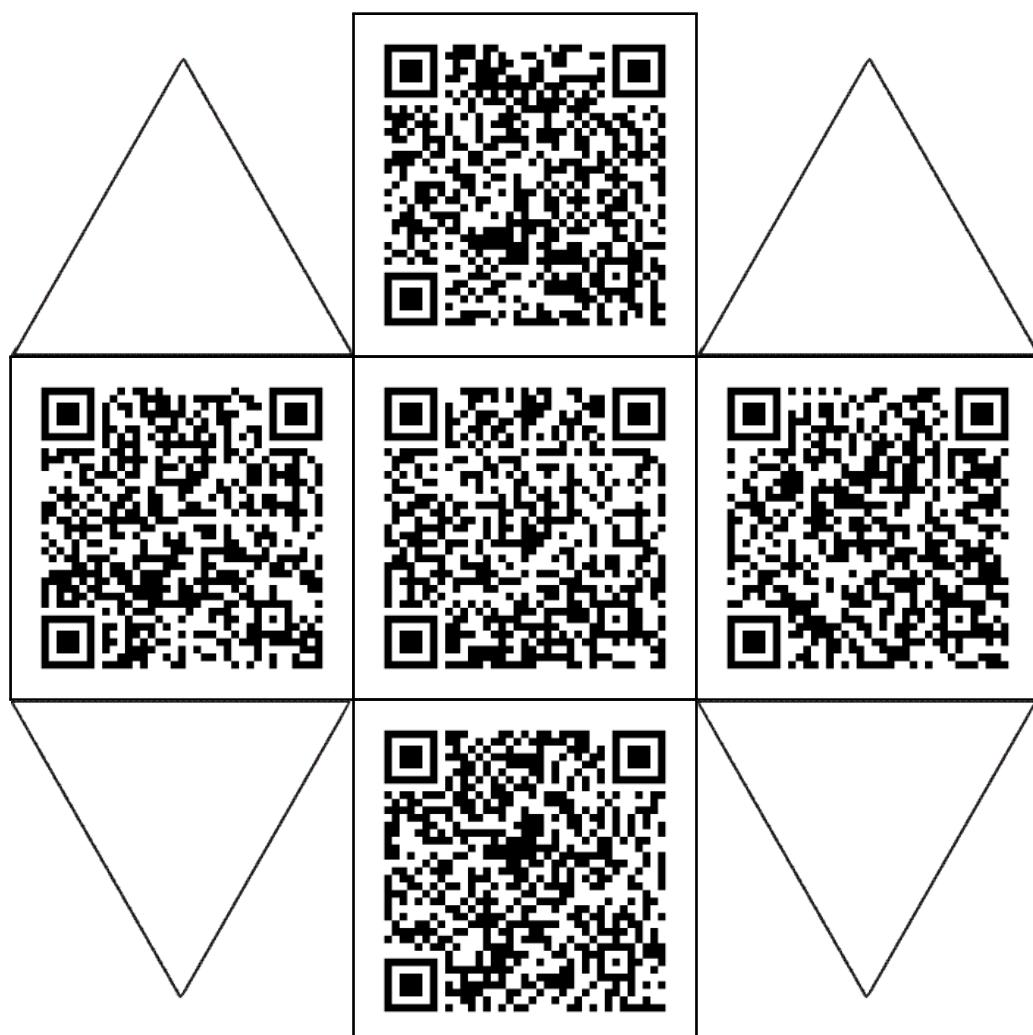


FIGURE A.2 Patron de mire hémisphérique octogonale



Bibliographie

- [Aila, 2005] Aila, T. (2005). Conservative and Tiled Rasterization Using a Modified Triangle Setup. 10(3) :1–7.
- [Akerlund et al., 2007] Akerlund, O., Unger, M., and Wang, R. (2007). Precomputed Visibility Cuts for Interactive Relighting with Dynamic BRDFs. *15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG'07)*, pages 161–170.
- [ATI,] ATI. ATI Technologies Inc. Diffuse Cube Mapping. pages 4–6.
- [Blinn, 1977] Blinn, J. F. (1977). Models of light reflection for computer synthesized pictures. pages 192–198.
- [Brennan, 2002] Brennan, C. (2002). Accurate Environment Mapped Reflections and Refractions by Adjusting for Object Distance. pages 1–6.
- [Bruneton et al., 2010] Bruneton, E., Neyret, F., and Holzschuch, N. (2010). Real-time Realistic Ocean Lighting using Seamless Transitions from Geometry to BRDF. *Computer Graphics Forum*, 29(2) :487–496.
- [Dupuy et al., 2012] Dupuy, J., Heitz, E., Iehl, J.-c., Poulin, P., Neyret, F., and Ostromoukhov, V. (2012). Linear Efficient Antialiased Displacement and Reflectance Mapping. 32(6) :1–11.
- [Gibson et al., 2003] Gibson, S., Cook, J., Howard, T., and Hubbold, R. (2003). Rapid Shadow Generation in Real-World Lighting Environments.
- [Gibson et al., 2001] Gibson, S., Howard, T., and Hubbold, R. (2001). Flexible Image-Based Photometric Reconstruction using Virtual Light Sources. *Computer Graphics Forum*, 20(3) :203–214.
- [Gross, 2003] Gross, M. (2003). Algebraic Point Set Surfaces.
- [Havran et al., 2005] Havran, V., Smyk, M., Krawczyk, G., and Myszkowski, K. (2005). Interactive System for Dynamic Scene Lighting using Captured Video Environment Maps.
- [Havran et al., 2003] Havran, V., Smyk, M., Krawczyk, G., Myszkowsky, K., and Seidel, H.-P. (2003). Importance Sampling for Video Environment Maps. (*Eurographics*) :2003.
- [Heitz et al., 2013a] Heitz, E., Nowrouzezahrai, D., Poulin, P., and Neyret, F. (2013a). Filtering color mapped textures and surfaces. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games - I3D '13*, page 129.
- [Heitz et al., 2013b] Heitz, E., Nowrouzezahrai, D., Poulin, P., and Neyret, F. (2013b). Filtering Non-Linear Transfer Functions on Surfaces. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, XX(X) :1–14.
- [Heymann et al., 2005] Heymann, S., Smolic, A., and Froehlich, B. (2005). Illumination reconstruction from real-time video for interactive augmented reality. pages 1–4.
- [Igehy, 1999] Igehy, H. (1999). Tracing ray differentials. *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '99*, pages 179–186.
- [Isidoro, 2005] Isidoro, J. R. (2005). Filtering Cubemaps, Angular Extent Filtering and Edge Seam Fixup Methods.
- [Iwanicki, 2013] Iwanicki, M. (2013). Lighting technology of The Last of Us.
- [Khan et al., 2002] Khan, E. A., Reinhard, E., and Fleming, R. W. (2002). Image-Based Material Editing 1.
- [Křivánek and Colbert, 2008] Křivánek, J. and Colbert, M. (2008). Real-time Shading with Filtered Importance Sampling. *Computer Graphics Forum*, 27(4) :1147–1154.
- [Laffont et al., 2012] Laffont, P.-Y., Bousseau, A., and Drettakis, G. (2012). Rich Intrinsic Image Decomposition of Outdoor Scenes from Multiple Views. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, pages 1–16.
- [Lopez-Moreno et al., 2010] Lopez-Moreno, J., Hadap, S., Reinhard, E., and Gutierrez, D. (2010). Compositing images through light source detection. *Computers & Graphics*, 34(6) :698–707.
- [Madsen and Laursen, 2003] Madsen, C. B. and Laursen, R. (2003). A scalable gpu-based approach to shading and shadowing for photorealistic real-time augmented reality.
- [Manson and Schaefer, 2012] Manson, J. and Schaefer, S. (2012). Parameterization-Aware MIP-Mapping. *Computer Graphics Forum*, 31(4) :1455–1463.
- [Marshall and Martin, 1997] Marshall, A. D. and Martin, R. R. (1997). Geometric least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori. pages 1–20.
- [Mcguire et al., 2013] Mcguire, M., Evangelakos, D., Wilcox, J., Donow, S., and Mara, M. (2013). Plausible Blinn-Phong Reflection of Standard Cube MIP-Maps. pages 1–8.
- [Mercier et al., 2006] Mercier, B., Meneveaux, D., and Fournier, A. (2006). A Framework for Automatically Recovering Object Shape, Reflectance and Light

- Sources from Calibrated Images. *International Journal of Computer Vision*, 73(1) :77–93.
- [Oat and Sander, 2006] Oat, C. and Sander, P. (2006). Ambient aperture lighting. *ACM SIGGRAPH 2006 Courses on - SIGGRAPH '06*, page 143.
- [P. Debevec, 2005] P. Debevec (2005). A Median Cut Algorithm for Light Probe Sampling.
- [Parker et al., 1999] Parker, S., Martin, W., Sloan, P.-P. J., Shirley, P., Smits, B., and Hansen, C. (1999). Interactive ray tracing. *Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics - SI3D '99*, pages 119–126.
- [Rempel et al., 2006] Rempel, A. G., Trentacoste, M., Seetzen, H., Young, H. D., Heidrich, W., Whitehead, L., and Ward, G. (2006). Ldr2Hdr : On-the-fly Reverse Tone Mapping of Legacy Video and Photographs. pages 2–7.
- [Sloan and Corporation,] Sloan, P.-p. and Corporation, M. Stupid Spherical Harmonics (SH) Tricks.
- [Snyder and Report, 1996] Snyder, J. M. and Report, T. (1996). Area Light Sources for Real-Time Graphics.
- [Unger et al., 2008] Unger, J., Gustavson, S., Larsson, P., and Ynnerman, a. (2008). Free Form Incident Light Fields. *Computer Graphics Forum*, 27(4) :1293–1301.
- [Wang and Å kerlund, 2009] Wang, R. and Å kerlund, O. (2009). Bidirectional Importance Sampling for Unstructured Direct Illumination. *Computer Graphics Forum*, 28(2) :269–278.

Liste des figures

2.1	Les différents référentiels	3
2.2	Convention d'orientation OpenCV	4
2.3	Convention d'orientation OpenGL	4
4.1	Évolution de $\Omega_F(\vec{n})$ selon l'orientation de \vec{n}	7
4.2	Intégration de l'enmap par rapport à une facette	7
4.3	Évolution de $W_F(\vec{n})$ selon l'orientation de \vec{n}	7
4.4	Comparaison entre $W_F(\vec{n})$ et $approx(\cos(\theta))$	8
4.5	Obstruction par une sphère	9
4.6	Mézo-normales et point de vue (source [Dupuy et al., 2012])	9
4.7	Pipeline développé	11
5.1	Z-buffer issue de la première étape de rendu (shadowmap)	12
5.2	Rendu en espace texture pour une source	13
5.3	Données pré-calculées en espace texture après post-traitement (1000 sources)	13
5.4	Utilisation des données d'éclairage ambiant lors du rendu	13
5.5	Décomposition en sphères d'objets 3D (100000 échantillons, 100 sphères)	14
A.1	Patron de mire cubique	II
A.2	Patron de mire hémisphérique octogonale	III

Liste des tableaux

2.1	Hiérarchie des matrices de transformations	3
-----	--	---

Liste des algorithmes

5.2.1	Ajustement de sphères à un maillage	14
-------	---	----