

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département d'informatique



## Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de docteur en sciences

Option : Informatique

---

### **Ombre volumique basé occultation ambiante pour une visualisation interactive de volume de données scientifiques**

---

Par :

**BAHI Naima**

Soutenue le: 16/09/2017

Devant le jury:

CHERIF Foudil	Professeur	Université de Biskra	Président
BABAHENINI M <sup>ed</sup> Chaouki	Professeur	Université de Biskra	Rapporteur
BENMOHAMED Mohamed	Professeur	Université de Constantine 2	Examineur
BATOUCHE M <sup>ed</sup> Chaouki	Professeur	Université de Constantine 2	Examineur
TIGHIOUART Bornia	Professeur	Université d'Annaba	Examineur
DJEROU Leila	MCA	Université de Biskra	Examineur

---

## Résumé

---

Obtenir une visualisation convaincante des données scientifiques par l'utilisation d'ombrage est prohibitif dans les applications interactives à cause du nombre important d'effets liés aux phénomènes d'occultation et d'éclairage. Bien que l'occultation ambiante (OA) nous permette de comprendre ce type de données via les ombres douces, elle exige souvent avec un coût de prétraitement important, ce qui limite son utilisation spécialement dans les applications basées sur le changement interactif de la fonction de transfert.

Dans cette thèse, nous proposons une nouvelle formule pour l'ombrage volumique du champ scalaire 3D statique qui peut être appliquée dans le rendu volumique direct. Pour cela nous suggérons une définition d'OA basée sur une approximation exponentielle, qui simule l'illumination globale, produit de manière interactive une haute qualité visuelle de rendu et permet un filtrage accéléré sur GPU de haute qualité. A partir des données scalaires initiales, nous utilisons une seule variable pour définir l'OA ce qui offre une réduction considérable de l'espace mémoire. Cette variable permet d'éviter les artefacts visuels et le coût de calculs causés par le test binaire réalisé par la définition classique de l'occultation.

Les expérimentations faites sur des séries d'images médicales démontrent que l'algorithme proposé fournit un ombrage doux qui produit des résultats de haute qualité dans un temps interactif avec une consommation restreinte de mémoire.

**Mots clés**— Visualisation scientifique 3D; Données scientifiques; Visualisation des champs scalaires ; Application interactive; Rendu volumique; rendu volumique direct ; Ombrage; Occultation ambiante; Filtrage basé GPU; Images médicales;

---

# Abstract

---

Using shading to get a convincing visualization of scientific data is prohibitive in interactive applications due to the large number of occlusion and lighting effects. Although ambient occlusion allows us to understand this kind of data via soft shadows, it often requires a high pre-processing cost, which limits its use especially in applications based on the interactive edition of transfer function.

In this thesis, we propose a new formula for the volumetric shading of static 3D scalar field which can be applied in direct volume rendering. For this purpose, we suggest a definition of ambient occlusion based on an exponential approximation, which simulates global illumination, produces interactively a high visual rendering quality and allows fast accelerated filtering on high quality GPUs. From the initial scalar data, we define a single variable to calculate the occlusion factor, which offers a considerable decreasing in memory space. Also, the chosen variable helps to avoid visual artifacts and the cost of computing caused by the binary test based occlusion.

Evaluation of our contribution on a series of medical images demonstrates that the proposed algorithm provides smooth shading, produces high quality results, achieves an interactive rate and consumes less memory.

**Keywords**— scientific 3D visualization; scientific data sets; scalar field visualization; interactive application; volume rendering; shading; ambient occlusion; GPU based filtering; medical images;

---

## ملخص

---

يعد استخدام التظليل للحصول على تصور مقنع للمعطيات العلمية في التطبيقات التفاعلية صعبا نظرا لوجود عدد كبير من الظواهر الضوئية و آثار التعتيم. على الرغم من أن تقنية حجب الإضاءة المحيطة تسمح لنا أن نفهم هذا النوع من المعطيات عبر الظلال الناعمة، فإنه غالبا ما يتطلب تكلفة معالجة كبيرة، الأمر الذي يحد من استخدامها وخاصة في التطبيقات القائمة على التغيير التفاعلي لوظيفة التحويل.

في هذه الأطروحة، نقترح صيغة جديدة لتظليل حجم ثلاثي  $\square$  بعدد متكون من حقل سلمي ثابت و التي يمكن تطبيقها في التصور الحجمي المباشر. لهذا فإننا نقترح تعريفا لتقنية حجب الإضاءة المحيطة، و الذي يحاكي الإضاءة العامة، يعتمد على تقريب أسي يمكننا من الحصول بشكل تفاعلي على جودة بصرية عالية و يسمح بتصفية سريعة عالية الجودة على GPU. انطلاقا من المعطيات السلمية الأولية، نستعمل متغيرا واحدا لضبط عامل الحجب مما يساعدنا على تخفيض كبير في مساحة الذاكرة. كما أن هذا المتغير يجنبنا التكررات البصرية و تكلفة الحسابات الناجمة عن  $\square$  اختبار الثنائي للتعريف الكلاسيكي لهذه التقنية.

مكننا تطبيق الخوارزمية المقترحة على مجموعات من الصور الطبية من تبين أنها توفر الظلال الناعمة التي تعطي نتائج عالية الجودة في زمن تفاعلي مع استهلاك محدود للذاكرة.

**الكلمات المفتاحية**— الرؤية العلمية ثلاثية الأبعاد؛ المعطيات العلمية؛ إظهار الحقل السلمي؛ تطبيق تفاعلي؛ الإظهار الحجمي للمعطيات؛ الإظهار الحجمي المباشر؛ التظليل؛ لتقنية حجب الإضاءة المحيطة ؛ تصفية تعتمد على وحدة المعالجة البيانية؛ الصور الطبية؛

---

## Remerciements

---

Remercier est un exercice délicat. On souhaiterait n'oublier personne et exprimer en quelques mots ce que les autres nous ont apporté à différentes étapes de ce long voyage que représente un travail de thèse. Un mélange de relations personnelles et professionnelles, parfois les deux, avec des moments très forts.

J'ai été exceptionnellement bien entouré durant toute la durée de cette thèse et je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail. Je remercie tout particulièrement mon directeur de thèse: Pr BABAHENINI Mohamed Chaouki. Toutes les idées contenues dans ce manuscrit proviennent de nos nombreuses discussions. Il m'a soutenu du début à la fin (et continue de le faire) et a toujours tout fait pour me faire avancer.

Je tiens à remercier les membres du jury:

- Professeur FOU DHIL cherif qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.
- Professeur BENMOHAMED Mohamed, Professeur BATOUCHE M<sup>ed</sup> Chaouki et Professeur TIGHIOUART Bornia d'avoir accepté le rôle d'examineur et d'avoir fait le déplacement malgré leur temps chargé.
- Docteur Djarou Leila d'avoir accepté de rejoindre le jury en tant qu'un examineur.

Je tiens à remercier toute ma famille qui m'a toujours guidé et soutenu dans tout ce que j'ai pu entreprendre plus particulièrement mon père et ma mère pour leur soutien indéfectible et sans qui je ne serai jamais arrivé là. Ils m'ont permis de grandir et d'avancer même dans les moments les plus difficiles.

---

## Acronymes-Liste des abréviations

---

<b>OA</b>	Occultation Ambiante
<b>OAV</b>	Occultation Ambiante Volumique
<b>CDF</b>	Cumulative Distribution Function
<b>CPU</b>	Central Processing Unit
<b>GPU</b>	Graphics Processing Unit
<b>IRM</b>	Imagerie par Résonance Magnétique nucléaire
<b>CT</b>	Computed Tomography
<b>RVD</b>	Rendu Volumique Direct
<b>VTK</b>	Visualization Toolkit
<b>SM</b>	Shadow Map
<b>SMg</b>	Shadow Mapping
<b>fps</b>	Frame Per Seconde: Taux d'affichage

---

## Table de figures

---

Figure 2—1: Visualisation du champ vectoriel.....	3
Figure 2—2: Visualisation du champ tensoriel.....	3
Figure 2—3: Représentation cellulaire d'un ensemble de données scalaires.....	4
Figure 2—4: Luminance et éclairage (Vivanloc, 2008). ....	6
Figure 2—5: Comportements possibles de la lumière lorsqu'elle arrive à un voxel dans le volume. ....	7
Figure 2—6: Types de scattering (image adaptée de (Jönsson et al., 2014)).....	8
Figure 2—7: Visualisation de données par (A) méthodes basée-tranches et par (B) iso-surfaces. ....	9
Figure 2—8: Rendu volumique direct (RVD).....	10
Figure 2—9: Rendu volumique par la technique du "splatting".....	11
Figure 2—10: Rendu volumique par la technique du "shear-warp". ....	11
Figure 2—11: Rendu volumique direct basé ray casting.....	14
Figure 2—12: Variété de visualisation de mêmes données volumiques selon la fonction de transfert utilisée. ...	17
Figure 2—13: Comparaison de qualité d'images entre la pré-classification (Gauche) et la post-classification (Droite). ....	18
Figure 2—14: Le modèle émission-absorption.....	19
Figure 2—15: Emission de l'intensité lumineuse par les différents points le long du rayon. $g(s)$ est la lumière émise par le point $s$ . ....	19
Figure 2—16: Ray casting. Méthode de composition d'avant en arrière.....	21
Figure 2—17: Ray casting par composition d'arrière en avant.....	22
Figure 2—18: Ombre et ses éléments. ....	23
Figure 2—19: Importance des ombres pour la compréhension d'une scène. (a) Scène sans ombre, laquelle des deux sphères est la plus proche? Celle de droite (b) ou celle de gauche (c). ....	24
Figure 2—20: Différentes ombres présentes dans une scène. ....	24
Figure 2—21 : Ombre dure vs ombre douce.....	25
Figure 2—22: Méthode des cartes d'ombres (SMg). Gauche: vu de la caméra. Droite: tampon de profondeur vu de la lumière (Hasenfratz et al., 2003). ....	25
Figure 2—23: Rendu d'une image en utilisant SMg (St-Amour, 2004). ....	26
Figure 2—24: SMg exploite une seule texture qui sauvegarde les informations de visibilité à partir de la source lumineuse. ....	27
Figure 2—25: Le rendu d'un ensemble de données de $256 \times 256 \times 512$ voxels avec les ombres dures (à gauche) et des ombres douces en utilisant le SMg exploitant le PCF (à droite). ....	28
Figure 2—26: Splatting pour le rendu et le calcul d'ombre (Nulkar and Mueller, 2001). ....	29
Figure 2—27 : Rendu avec (Droite) et sans (Gauche) ombres (Nulkar and Mueller, 2001). ....	30
Figure 2—28: Détermination de la valeur d'opacité d'un pixel (Droite) par un modèle d'atténuation de la lumière basé splatting (Gauche) (Zhang and Crawfis, 2002). ....	31
Figure 2—29: Un exemple des ombres chromatiques. La flèche pointe vers la région où les caractéristiques ne sont visibles que dans l'ombre chromatique (Šoltészová et al., 2011). ....	33
Figure 2—30: Exemple d'OA. ....	34
Figure 2—31: Accessibilité d'un point par obscurance.....	36
Figure 2—32: Degré d'ouverture des points de surface: les rayons des régions grises sont non occultés et ceux des régions en blanc sont occultés. $P$ est complètement visible, $Q$ et $O$ sont partiellement visibles. ....	37
Figure 3—1: Occultation Tout_ou_Rien et le calcul de la radiance.....	43

Figure 3—2: Occultation partielle et le calcul de la radiance.....	44
Figure 3—3: Une ligne discrète est pivoté de telle sorte les voxels non occulteurs du voxel correspondant apparaissent au dessous de voxel (Stewart, 2003). .....	45
Figure 3—4: Un exemple d'une scène avec l'application de l'illumination directe (gauche) et color bleeding (droite). .....	46
Figure 3—5: L'application de la méthode de Vicinity shading sur un cortex cérébral en utilisant 1272 rayons (Stewart, 2003). .....	46
Figure 3—6: Ensemble de données visualisé par l'application de: (Gauche) Wyman et al. (2006), (Milieu) Vicinity shading (Stewart, 2003) et (droite) Phong.....	47
Figure 3—7: OA géométrique basée Ray-casting pour les données volumiques: Visibilité tout-ou-rien. (Gauche) x est partiellement visible. (Droite) x est complètement invisible.....	49
Figure 3—8: OA géométrique basée Ray-casting pour les données volumiques. Visibilité partielle: l'estimation de la lumière atténuée le long de chaque rayon.....	49
Figure 3—9: Emission de la lumière le long du rayon: La lumière est effectuée seulement à la frontière de la sphère.....	50
Figure 3—10: Contribution de lumière est effectuée uniformément le long du rayon.....	51
Figure 3—11: Comparaison entre l'application de (a) Dirac delta et (b) l'émission uniforme. Dirac delta cause des ombres dures qui ne sont pas obtenues par l'émission uniforme de la lumière. ....	51
Figure 3—12: Rendu des données CT d'un corps humain en utilisant un modèle d'illumination basé obscurance en considérant différentes fonctions $\rho$ .....	53
Figure 3—13: OA est le pourcentage de voisinage situé dans l'isosurface (en gris) (Penner and Mitchell, 2008).53	53
Figure 3—14: Comparaison du problème du SMg avec celui de l'OA statistique de Penner et al. (2008). ....	55
Figure 3—15: OA basée histogrammes de Ropinski et al. (2008). ....	57
Figure 3—16: Un exemple montre l'amélioration de la structure 3D grâce à la méthode de (Ropinski et al., 2008). ....	57
Figure 3—17: Rendu d'un volume de données de $244 \times 124 \times 257$ voxels en utilisant (b) OA dynamique (Ropinski et al., 2008) en comparant avec (a) l'ombrage de Blinn-Phong.....	58
Figure 3—18: Génération des histogrammes locaux <b>H</b> Ls sur GPU. Les ensembles des distances et des blocs sont établis sur CPU mais la génération des <b>H</b> Ls est réalisée sur GPU. ....	59
Figure 3—19: Clustering basé GPU des histogrammes locaux: le premier ensemble de <b>cb</b> est initialisé sur CPU copié dans la mémoire globale des GPU.....	60
Figure 3—20: Des artefacts obtenus durant la passe de rendu à cause d'échantillonnage des rayons et l'interpolation tri-linéaire. Les points blancs (Droite-zoom) sont des artefacts (Ancel et al., 2010). ....	61
Figure 3—21: Combinaison basée-moyenne en utilisant 26 voisins (Ancel et al., 2010). ....	62
Figure 3—22: Utilisation d'opérateur de maximum (Ancel et al., 2010).....	62
Figure 3—23: La perte d'une information importante lorsqu'un échantillonnage constant est utilisé (Gauche). L'échantillonnage adaptatif optimise le nombre des pas (Droite). ....	65
Figure 3—24: Schéma générale de l'algorithme des cartes d'occultation de voisinage (Diaz et al., 2008).....	66
Figure 3—25: Rendu des données volumiques par la méthode de Schott et al. (2009). ....	67
Figure 3—26: Comparaison entre l'éclairage local (a, d), le ray tracing (b, e), et l'OA sur l'espace objet (c, f) (Grottel et al., 2012).....	68
Figure 3—27: Le spectre d'occultation pour un ensemble de données IRM.....	69
Figure 3—28: La cavité de surface du site actif d'enzyme dit désaminase (dans le cercle). Une grande partie de la cavité est occultée par la surface extérieure (Borland, 2011). ....	69
Figure 3—29: La cavité est extraite par un seuillage d'OA (Borland, 2011).....	70
Figure 4—1: Schéma général de la technique proposée. ....	77
Figure 4—2: OA. Approximation globale (gauche) vs approximation locale (droite). ....	78
Figure 4—3 : Voisinage du voxel. Gauche: hémisphère détermine l'OA; la partie pointillée ne bloque pas la lumière. À droite: l'ombrage volumétrique est basé sur une sphère entière. ....	78
Figure 4—4: Une définition non géométrique de l'OA. ....	80



<i>Figure 4—5 : Détermination des voxels occulteur <math>p</math> dans un voisinage représenté par une région sphérique <math>\Omega(x)</math> centrée à <math>x</math>: les voxels en noir sont des occulteurs (<math>v \geq vx</math>), tandis que les blancs ne sont pas (<math>v \leq vx</math>).</i>	85
<i>Figure 4—6: Filtrage ordinaire vs PCF.</i>	91
<i>Figure 5—1: Les modalités stockent les images dans des archives digitales qui sont accessibles par les radiologues afin de visualiser les images sur des stations.</i>	101
<i>Figure 5—2 : Format DICOM.</i>	102
<i>Figure 5—3: Quelques images de la série DS1. Les images données ici ont respectivement le numéro 3/250, 194/250 et 227/250.</i>	103
<i>Figure 5—4: Quelques images de la série DS2. Les images données ici ont respectivement le numéro 1/350, 30/350 et 265/350.</i>	104
<i>Figure 5—5: Quelques images de la série DS3. Les images données ici ont respectivement le numéro 1/361, 253/361 et 360/361.</i>	104
<i>Figure 5—6 : Taxinomie des représentations cellulaires en fonction de leur topologie.</i>	105
<i>Figure 5—7: Méthode de détection du non respect de l'hypothèse.</i>	108
<i>Figure 5—8: Visualisation de DS1. L'image gauche est obtenue sans l'utilisation de notre OA où celle droite est calculée avec la notre.</i>	110
<i>Figure 5—9 : Illustration de DS2 visualisation sans (à gauche) et avec notre OA (à droite).</i>	110
<i>Figure 5—10: Illustration de DS3 visualisation sans (à gauche) et avec notre OA (à droite).</i>	110
<i>Figure 5—11: Application de diverses fonctions de transfert.</i>	112
<i>Figure 5—12 : Application de diverses fonctions de transfert (Exemple2).</i>	113
<i>Figure 5—13: Impact de la taille du voisinage sur le rendu final de volume.</i>	114
<i>Figure 5—14: D'autres exemples sur l'impact de la taille du voisinage sur le rendu final de volume.</i>	115
<i>Figure 5—15 : L'influence du seuil sur la qualité visuelle obtenue (exemple 1).</i>	116
<i>Figure 5—16 : L'influence du seuil sur la qualité visuelle obtenue (exemple 2).</i>	117
<i>Figure 5—17 : Consommation d'espace mémoire en octets.</i>	118
<i>Figure 5—18 : Exigences de filtrage.</i>	119

---

## Liste des tableaux

---

<i>Tableau 1: Différents formats de pondération de l'obscurance en fonction de la distance.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 2 : Notion d'effectif statistique.....</i>	<i>86</i>
<i>Tableau 3 : Temps de rendu (en seconde) de trois ensembles de données avec et sans notre méthode d'ombrage.....</i>	<i>119</i>

---

## Liste des Algorithmes

---

<i>Algorithme 3-1: OA d'une classe</i> .....	63
<i>Algorithme 3-2: Combinaison des OA de toutes les classes</i> .....	64
<i>Algorithme 4-1: OA statistique basée filtrage</i> .....	81

---

# Table de matières

---

<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>I</b>
1.1 Problématique et contexte de la thèse	I
1.2 Objectifs et motivations de la thèse	IV
1.3 Plan de la thèse	VII
<hr/>	
<b>2 CHAPITRE 2 — RENDU ET OMBRAGE DES DONNEES VOLUMIQUES</b>	<b>1</b>
2.1 Introduction	1
2.2 Données volumiques	1
2.3 Radiométrie	4
2.3.1 Radiométrie et photométrie .....	4
2.3.2 Energie et flux .....	5
2.3.3 Intensité et luminance.....	5
2.3.4 Eclairage et radiosité .....	6
2.3.5 Illumination .....	6
2.3.6 Illumination globale .....	6
2.3.7 Répartition de la lumière ou ombrage .....	7
2.3.8 Comportements lumière-Volume.....	7
2.4 Méthodes de visualisation volumique des champs scalaires	8
2.4.1 Méthodes indirectes.....	8
2.4.1.1 Visualisation de tranches 2D	8
2.4.1.2 Iso-surfaces	9
2.4.2 Méthodes directes.....	9
2.4.2.1 Calcul de l'image finale par object-order	10
2.4.2.1.1 Splatting	10
2.4.2.1.2 Shear-Warp	11
2.4.2.2 Calcul de l'image finale par image-order	13
2.4.2.2.1 Rendu basé sur l'utilisation de textures	13
2.4.2.2.2 Raycasting	13

<b>2.5</b>	<b>Modèles d'interactions lumière-volume</b>	<b>14</b>
<b>2.6</b>	<b>Fonction de transfert</b>	<b>16</b>
2.6.1	<i>Définition</i> .....	16
2.6.2	<i>Types</i> .....	17
<b>2.7</b>	<b>Simulation du trajet de la lumière en RVD</b>	<b>18</b>
2.7.1	<i>Intégral du RVD</i> .....	18
2.7.2	<i>Numérisation de l'intégral du RVD</i> .....	20
2.7.2.1	Méthode d'avant en arrière	21
2.7.2.2	Méthode d'arrière en avant	22
<b>2.8</b>	<b>Les ombres pour améliorer la qualité visuelle du rendu volumique</b>	<b>23</b>
2.8.1	<i>Ombre: Notions et généralités</i> .....	23
2.8.1.1	Définition	23
2.8.1.2	Éléments d'ombre	23
2.8.1.3	Utilité	23
2.8.1.4	Types	24
2.8.2	<i>Génération d'ombre en rendu surfacique</i> .....	25
2.8.2.1	Méthode basée sur le tampon de profondeur: Shadow Mapping	25
2.8.3	<i>Quelques travaux antérieurs: ombre et rendu volumique</i> .....	26
<b>2.9</b>	<b>Occultation ambiante</b>	<b>34</b>
2.9.1	<i>Idée</i> .....	34
2.9.2	<i>Obscurance</i> .....	35
2.9.3	<i>Occultation Ambiante</i> .....	37
<b>2.10</b>	<b>Conclusion</b>	<b>38</b>
	<hr/>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>CHAPITRE 3 — OCCULTATION AMBIANTE VOLUMIQUE</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Critères de classification des travaux antérieurs</b>	<b>40</b>
<b>3.3</b>	<b>Intégration de l'OA dans la visualisation volumique</b>	<b>40</b>
3.3.1	<i>Idée et Origine</i> .....	41
3.3.1.1	Discretisation du domaine de voisinage hémisphérique $\Omega$	42
3.3.1.2	Définitions de $L_i$ et <i>Limax</i>	43
3.3.1.3	Optimisation du calcul de $L_i$ et <i>Limax</i>	44
3.3.1.3.1	Couvrir le volume avec des lignes discrètes disjointes	44
3.3.2	<i>OA pour l'ombrage volumique</i> .....	46
3.3.2.1	Méthodes avec phase de pré-calcul	46
3.3.2.2	Méthodes avec calcul à la volée	66
3.3.3	<i>La génération de la fonction de transfert et la segmentation 3D à l'aide de l'OA</i> .....	68

<b>3.4 Conclusion</b>	<b>70</b>
<b>4 CHAPITRE 4 — OCCULTATION AMBIANTE BASEE FILTRAGE POUR UN OMBRAGE VOLUMIQUE.</b>	<b>72</b>
<b>4.1 Introduction</b>	<b>72</b>
<b>4.2 Objectifs et motivation</b>	<b>73</b>
<b>4.3 Algorithme: Description générale</b>	<b>75</b>
4.3.1 <i>Rappel</i> .....	75
4.3.1.1 Filtrage	75
4.3.1.2 Filtres de convolutions	75
4.3.1.3 Filtres séparables	76
4.3.2 <i>Vision générale sur notre méthode</i> .....	76
<b>4.4 OA comme une information statistique</b>	<b>82</b>
4.4.1 <i>Rappel mathématique</i> .....	82
4.4.1.1 Théorie de probabilité	82
4.4.1.2 Nature des Variables	83
4.4.1.3 Loi de probabilité d'une variable aléatoire	83
4.4.1.4 Fonction de densité de probabilité	83
4.4.1.5 Fonction de distribution cumulative CDF	83
4.4.2 <i>Définition statistique d'OA</i> .....	84
<b>4.5 Test d'occultation comme une fonction en escalier exponentielle</b>	<b>86</b>
4.5.1 <i>Rappel mathématique</i> .....	86
4.5.1.1 Effectif et fréquence	86
4.5.1.2 Fonction d'escalier	87
4.5.1.3 Fonction de Heaviside	87
4.5.1.4 Filtrage séparable	87
4.5.2 <i>Test d'occultation</i> .....	88
<b>4.6 Occultation et filtrage</b>	<b>89</b>
4.6.1 <i>Percentage closer filtering</i> .....	89
4.6.2 <i>Cartes d'occultation exponentielles filtrables</i> .....	92
4.6.2.1 Rappel mathématique	92
4.6.2.1.1 Esperance mathématique	92
4.6.2.1.2 Inégalité de Markov	92
4.6.2.2 Ombres douces: des SMs vers l'OA	92
4.6.2.3 Cartes d'occultation	93
4.6.2.3.1 Etape 1: Définir une région de filtre pour chaque voxel.	93
4.6.2.3.2 Etape 2: Relation entre le filtrage de texture et la probabilité d'occultation d'un voxel.	94
4.6.2.4 Cas d'erreur	95
<b>4.7 Conclusion</b>	<b>95</b>

<b>5</b>	<b>CHAPITRE 5 — MISE EN ŒUVRE, RESULTATS ET BILAN</b>	<b>97</b>
<b>5.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>97</b>
<b>5.2</b>	<b>Outils et matériels utilisés</b>	<b>97</b>
<b>5.3</b>	<b>Données</b>	<b>98</b>
5.3.1	<i>Type de données initiales utilisées</i> .....	98
5.3.1.1	Dicom	98
5.3.1.1.1	Généralité	98
5.3.1.1.2	Pourquoi un format spécifique pour les images médicales?	99
5.3.1.2	Les sources d'images ou modalités	100
5.3.1.2.1	Modalité CT ( scanner )	100
5.3.1.2.2	Modalité MR ( IRM )	100
5.3.1.3	Description des ensembles de données DICOM utilisés	102
5.3.2	<i>Structuration volumique</i> .....	104
<b>5.4</b>	<b>Détails de la mise en œuvre</b>	<b>105</b>
5.4.1	<i>Le calcul d'ombrage</i> .....	105
5.4.1.1	Rappel	105
5.4.1.1.1	Filtre de Gauss	105
5.4.1.1.2	MIP-mapping	105
5.4.1.2	OA basée filtrage	106
5.4.2	<i>Rendu</i> .....	108
5.4.2.1	Méthode de rendu	108
5.4.2.2	Optimisation	108
5.4.2.3	Fonctions de transfert et classification	109
<b>5.5</b>	<b>Résultats visuels</b>	<b>109</b>
<b>5.6</b>	<b>Espace mémoire : Discussion et comparaison</b>	<b>117</b>
<b>5.7</b>	<b>Limites</b>	<b>119</b>
<b>5.8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>120</b>
	<hr/>	<b>121</b>
	<b>CHAPITRE 6 — CONCLUSION GENERALE</b>	<b>121</b>
	<hr/>	<b>121</b>
	<b>ACTIVITES SCIENTIFIQUES: COMMUNICATIONS ET PUBLICATIONS</b>	<b>124</b>
	<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>126</b>





---

# Chapitre 1 — Introduction générale

---

## 1.1 Problématique et contexte de la thèse

Les ordinateurs sont maintenant largement utilisés dans la science, l'ingénierie et la médecine. Les progrès de la modélisation géométrique, de l'imagerie et de la simulation géométrique permettent aux chercheurs de construire et de manipuler des modèles de complexité croissante et de générer plus de quantité de données. Plus particulièrement, les données scientifiques, des divers domaines sont le fruit d'une simulation numérique ou d'une acquisition par un appareil de mesure. La manipulation et la mise en évidence d'information de ce type de données deviennent efficaces et rapides grâce à l'informatique. Dans ce contexte, la visualisation est considérée comme l'un des moyens d'extraction d'informations d'un ensemble de données en offrant aux utilisateurs une représentation graphique d'un ensemble de données numériques. Ce genre de représentation donne l'interprétation de l'information de sorte qu'elle soit étudiée et transmise.

Du fait que la représentation graphique peut être sous forme d'un texte ou d'une image, le travail présenté dans cette thèse s'insère dans le domaine de la visualisation scientifique à base d'images, qui vise à produire des représentations visuelles exploitables pour analyser et comprendre des données complexes. Il s'agit d'une branche de l'informatique graphique dont elle partage certaines méthodes, mais avec un support, un objet représenté, qui est de nature bien spécifique, parfois non tangible. Cette discipline est profondément motivée par la nécessité des différentes communautés scientifiques de disposer d'outils efficaces (Lichtenberg et al., 2016; Preim et al., 2016) pour exploiter des masses de données de plus en plus importantes. De plus, les modes de la représentation utilisés peuvent être soumis à certaines conventions directement liées au domaine d'application auquel la visualisation est consacrée, en d'autres termes la nature d'une visualisation dépend fortement du domaine scientifique concerné, tant du point de vue de la nature des objets à analyser que des outils utilisables en pratique pour atteindre le but recherché. En médecine, le praticien visualisant une angiographie possède une connaissance forte des vaisseaux sanguins présents à l'image, et l'examen consiste par exemple à rechercher une anomalie dans la structure physique de ces vaisseaux. La visualisation doit ici aider à distinguer clairement les tissus numérisés. Si on souhaite analyser les résultats d'une simulation numérique de mécanique des fluides relative

au refroidissement d'une centrale, la situation est profondément différente. Certes, l'ingénieur connaît la structure physique sur laquelle le calcul a été réalisé, et peut avoir une première idée des principaux phénomènes en jeu. Cependant, il doit analyser les différents champs enregistrés afin de détecter d'éventuelles anomalies ou singularités, et poursuivre son exploration dans l'ensemble de données afin d'appréhender la structure et les causes de ces phénomènes.

De nombreuses applications scientifiques, telle l'imagerie médicale, la sismologie, la géologie ou la microscopie électronique construisent et utilisent des données numériques sous la forme d'une grille à trois dimensions qui sont des grands tableaux tridimensionnels de données. Ces données s'appellent des données volumiques qui sont produites par une multitude d'appareils comme l'imagerie par résonance magnétique (IRM), scanner, ultrasons, microscopes... . A noter que ces appareils offrent ce type de données via un ensemble d'images représentant une série des coupes 2D d'un objet. L'organisation des données selon une grille régulière facilite d'une manière importante l'ensemble des traitements réalisés.

La visualisation doit permettre la segmentation visuelle des éléments clés constituant l'ensemble de données, et la modification interactive du point de vue pour aider à comprendre les relations spatiales au sein du volume construit (la grille). Le terme d'interactivité est souvent utilisé en informatique mais son sens peut varier selon le contexte d'application. L'interaction désigne la capacité d'un système à réagir aux commandes de l'utilisateur en fournissant une réponse à ses différentes actions effectuées. L'interactivité effective d'un système dépend du temps intervenant entre la commande de l'utilisateur et la réponse du système. Dans le cas d'un système 3D, l'interactivité désigne un taux d'affichage d'au moins quatre images par seconde (4 fps). Pour mieux comprendre ce qui est affiché, le praticien ou l'ingénieur doivent pouvoir changer rapidement le point de vue, c'est-à-dire naviguer dans la scène affichée, et accéder aussi vite que possible à des représentations explicites des champs volumiques à analyser. Cette interactivité devient plus critique avec des volumes de données à explorer ayant des tailles importantes et donc l'espace à explorer est large.

Les données scientifiques généralement constituent des volumes où chacun offre une discrétisation complète de l'objet et de son intérieur qui peut contenir plusieurs Méga-octets. Les volumes ne sont pas directement utilisables par une personne où les formes 3D du volume sont difficiles à interpréter. Les scientifiques ont appliqué principalement le rendu surfacique (Preim and Botha, 2014), qui consiste à décrire un objet 3D par ses bords à l'aide d'un

ensemble des polygones. La visualisation des données volumiques à l'aide des techniques de ce type de rendu peut perdre une quantité importante d'information. Pour cette raison, les techniques de rendu volumique (RV) (Klein et al., 2008, 2009; Preim and Bartz, 2007; Preim and Botha, 2014) ont été développées pour arriver à l'intégralité des données 3D dans une seule image 2D. Cette nouvelle forme de visualisation 3D qui est aussi dite la visualisation volumique est apparue avec la forte demande émanant du domaine médical (Johnson and Tricoche, 2009). Le RV est une action qui regroupe souvent deux catégories de méthodes, la première catégorie est constituée d'algorithmes dits de rendu volumique direct (RVD) et la seconde est constituée d'autres algorithmes dits de rendu volumique indirect (RVI).

Quand on parle de la visualisation de champs scalaires par le RVI, l'exploration du volume nécessite de calculer au préalable certaines primitives géométriques par l'extraction des surfaces clés: des plans de coupe ou des iso-surfaces. Dans ce cas, la quantité d'information présente sur une image est limitée par les nombreuses occultations introduites par ces surfaces. Le RVD réfère aux techniques qui produisent une image directement à partir des données sans appliquer des transformations et des constructions intermédiaires c.à.d. elles utilisent les données originelles du volume. Ce type de rendu consiste à considérer l'ensemble entier des données pour l'affichage contrairement aux méthodes de rendu surfacique ou celles du RVI.

Nous nous sommes intéressés ici uniquement par l'un des algorithmes de RVD dit Raycasting. Il évalue la couleur de chaque pixel de l'image finale en traçant un rayon à travers le volume à partir de la position de l'observateur. Si le rayon frappe le volume, la couleur du pixel est calculée en échantillonnant les valeurs de données le long du rayon en un nombre fini de positions dans le volume et en les combinant ensemble. La projection d'une séquence de points 3D sur un écran 2D pour déterminer la couleur de chaque pixel est considérée comme une cause principale de l'ambiguïté des images obtenues par toutes les méthodes de l'informatique graphique mais beaucoup plus par le RVD vu la transparence des données. Les valeurs de transparence correspondant aux données initiales ainsi leurs couleurs sont définies en spécifiant une fonction de transfert appropriée qui présente un déterminant principal de la perception de données dans le rendu final. Donc, son objectif est d'attribuer des propriétés optiques aux données volumiques où la transparence ou l'opacité présente l'absorption tandis que la couleur présente l'intensité. La fonction de transfert permet d'obtenir les structures significatives composant un volume et les visualiser selon les besoins des utilisateurs, mais

elle reste difficile à définir même par les utilisateurs experts constituant un véritable défi de recherche en rendu volumique (Tzeng et al., 2005).

## **1.2 Objectifs et motivations de la thèse**

Du fait qu'une image est physiquement le résultat de la lumière, elle devient plus réaliste proportionnellement au nombre des propriétés optiques de la lumière prises en considération. En infographie les modèles d'illumination ont pour objectifs de décrire l'interaction de la lumière avec les objets d'une scène virtuelle jusqu'à ce qu'elle atteigne l'œil. La méthode naïve pour effectuer le rendu d'une surface consiste à calculer l'illumination à chaque point visible par l'observateur mais elle est extrêmement coûteuse en termes de temps. Une solution alternative est l'ombrage qui se réfère à la perception de la profondeur dans les modèles 3D ou des illustrations par différents niveaux d'obscurité. Ces différentes méthodes permettent de diminuer le coût en calculant l'illumination à un nombre limité de points mais elles sont limitées aux surfaces directement éclairées par une source lumineuse sans prendre en considération les interactions entre objets: réflexions d'une surface sur une autre et l'occultation de la lumière par une surface (ombres). Ces interactions nécessitent un modèle d'illumination globale qui est couvert par deux classes de méthodes: La première classe concerne les algorithmes de lancer de rayons qui remplacent les illuminations locales: ambiante, diffuse et spéculaire par un modèle à base de réflexion spéculaire et transmission globale. La deuxième classe concerne les méthodes de radiosité qui modélisent toutes les interactions entre objets par des sources lumineuses dans une étape préliminaire. Ensuite, une image est déterminée pour un point de vue donné en appliquant des algorithmes classiques d'élimination des parties cachées et d'interpolation d'ombrages.

Le domaine de rendu surfacique s'intéresse aussi aux ombres qui présentent l'un des critères permettant d'évaluer la qualité d'une image. Dans ce cadre des images de très grande qualité sont créées par des méthodes plus spécifiques permettant de traiter les ombres particulièrement avec les incessants progrès matériels. Cependant cela a aussi engendré une demande de plus en plus exigeante sur ces images, au niveau de la qualité bien sûr mais aussi au niveau du temps de calcul. Or, la création d'images réalistes impose encore des coûts de calcul et de stockage des données très importants. C'est pourquoi des travaux sont effectués (Kolivand et al., 2015) afin de diminuer les coûts de calcul de ces simulations et d'obtenir une bonne maîtrise des coûts de stockage. Il existe des propositions diverses pour appliquer des ombres dans le rendu volumique (Tarini et al., 2006) bien que le processus de génération

puisse différer. Les ombres volumiques améliorent des éléments critiques dans les applications médicales (Klein et al., 2009): la perception de la profondeur et la compréhension spatiale des données.

L'éclairage indirect aide aussi à améliorer la visualisation de contours, des structures intérieures du volume et du contraste de l'image finale en évitement d'avoir des régions très sombres. L'éclairage indirect prend en compte toutes les interactions possibles entre un rayon lumineux et un volume ce qui permet de simuler des effets compliqués tel que les ombres, les réfractions et les caustiques. Dans ce contexte, les algorithmes d'illumination globale sont ceux qui, en déterminant la lumière tombant sur une surface, tiennent compte non seulement de la lumière qui a pris un chemin partant directement d'une source lumineuse (illumination directe), mais également la lumière ayant subi la réflexion d'autres surfaces dans la scène à 3 dimensions (illumination indirecte). Par conséquent ils sont très coûteux en termes de calcul lors de l'exploitation par le rendu volumique qui est souvent utilisé dans la visualisation scientifique, où l'objectif principal est de créer des images informatives, plutôt que de créer de réalisme. Pour cela, l'utilisation de l'occultation ambiante OA est adéquate pour le rendu volumique car elle permet d'améliorer la compréhension des données en apportant des ombres douces, consistant à atténuer la lumière en considérant l'occultation résultante de la présence des structures voisines. Visuellement, elle permet d'assombrir les zones naturellement difficiles d'accès à la lumière. Cela a pour effet de faire apparaître le relief des objets, là où les objets sans l'application de cette technique apparaîtraient entièrement plats.

Nous nous sommes intéressés à l'ombrage des données médicales qui se composent de divers tissus où chacun est caractérisé par sa propre valeur ou intervalle de densité qui influence le trajet de la lumière de différentes manières. Les interactions lumineuses dans ce type de volume sont comparables avec celles d'un nuage composé de particules d'eau. Certaines régions sont caractérisées par une faible distribution des particules permettant à une grande quantité de la lumière de pénétrer à l'inverse d'autres régions qui causent l'atténuation de la lumière ce qui crée l'ombrage dans le volume. La lumière peut être aussi réfléchi et réfractée par les particules d'eau créant des effets de scattering où leur simulation demande beaucoup de calculs. Dans ce contexte, plusieurs méthodes balancent entre la qualité d'image et le taux d'affichage désiré.

Les modèles d'ombrage définis dans la littérature du rendu polygonal tel que l'OA utilisent le vecteur de la normale comme une description de l'orientation de la surface. Pour

adapter un tel modèle au rendu volumique, la normale est remplacée par le vecteur gradient normalisé. L'utilisation de ce dernier mène à un ensemble de problèmes visuels causés par l'inexactitude numériques donnant des images bruitées. Ainsi, le gradient est mal défini dans le cas des données médicales qui se composent des larges régions homogènes.

Les images doivent remplir certains objectifs de visualisation pour faciliter la compréhension des données scientifiques. Dans le cas des données médicales 3D, la visualisation devient une aide efficace au diagnostic, à la préparation d'opérations chirurgicales, au choix et au suivi thérapeutique, ... . Pour arriver à un fps interactif lors de la simulation d'ombrage des volumes médicaux avec une échelle large, il est nécessaire de trouver des approximations adéquates ce qui présente notre motivation principale au cours de cette thèse. Nous prenons en compte la nature discrète du volume dans le but d'utiliser quelques opérations connues au domaine de traitement d'images afin d'éviter la définition géométrique d'OA basée sur le ray-casting. En exploitant les GPUs, nous proposons une nouvelle approximation d'OA pour le RVD d'une manière indépendante au gradient afin de faciliter la perception de la forme et de la profondeur d'un volume donné. Car nous utilisons des informations disponibles dans les données brutes, notre méthode ne demande aucun recalcul vu sa dépendance de la fonction de transfert.

Les données médicales sont larges et occupent un grand espace mémoire lors du calcul de leur ombrage, c'est la raison qui nous pousse à définir une nouvelle formule d'OA qui n'augmente pas l'espace mémoire pour stocker les calculs intermédiaires et les variables nécessaires. Dans ce contexte, notre travail se compose de trois contributions principales. Comme une première contribution, nous utilisons un nombre restreint des quantités nécessaires au calcul des valeurs d'accessibilité. Alors, nous fournissons une représentation de l'information sur le voisinage d'un voxel en faisant un bon choix des paramètres de notre algorithme afin d'obtenir une meilleure performance en matière d'espace mémoire sans compromettre la qualité d'image. Pour appliquer notre définition de l'OA, un paramètre unique présenté par les valeurs de densité du volume est suffisant sans appliquer une fonction de transfert ou calculer une autre valeur. Les variables nécessaires à notre définition du facteur d'occultation sont considérées comme une autre contribution telle que nous choisissons à utiliser un seul terme obtenu par l'application d'une fonction exceptionnelle sur la variable d'entrée. Maintenant, pour bénéficier des deux précédentes contributions, nous proposons une idée d'accélération basée filtrage sur GPU qui nécessite moins de calculs, en économisant le temps et l'espace de stockage. Cette contribution nous permet d'appliquer des formules de probabilité convenables à notre problématique. Finalement, nous avons choisi

une formule mathématique appropriée pour calculer la valeur finale de l'OA, en se basant sur les inégalités probabilistes plus particulièrement celle de Markov.

### **1.3 Plan de la thèse**

En plus des deux chapitres de l'introduction générale et de la conclusion générale, la présente thèse est structurée en quatre chapitres de la manière suivante:

Le deuxième chapitre présente quelques éléments relatifs à la visualisation volumique, et la manière dont ces connaissances sont déjà exploitées dans le domaine de l'infographie. Nous dégageons les problématiques principales relatives à l'exploration visuelle de gros volumes de données, en nous concentrant plus particulièrement sur les difficultés de l'ombrage. Ce chapitre nous permet de bien définir le contexte de travail courant et situer la problématique élaborée par notre méthode qui concerne l'ombrage pour le rendu volumique.

Le chapitre 3 introduit ensuite des travaux sur les différentes méthodes de l'OA proposées pour les deux classes de rendu volumique: RVI et RVD. Pour la première classe, les définitions d'OA sont applicables dans le cas des volumes rendus par les iso-surfaces où il n'y a aucune information sur l'intérieur du volume, seulement une information sur les surfaces qui le composent. A propos des définitions d'OA pour le RVD, le volume entier est défini par les valeurs de densités initiales qui sont utilisées dans des différentes manières pour calculer l'occultation, il n'y a plus la notion des surfaces. Notons que dans ce chapitre, nous citons d'abord les différents critères que nous pouvons utiliser pour classer les méthodes d'OA existantes. Ces dernières sont ensuite classées selon leur utilisation et leur but de conception: pour ombrage, pour automatiser la fonction de transfert ou pour la segmentation 3D mais nous donnons plus d'importance aux méthodes d'ombrage basées OA.

Après ces deux chapitres théoriques, les deux chapitres 4 et 5 décrivent nos contributions du point de vue de la théorie et de l'expérimentation. Ainsi le chapitre 4 concerne notre nouvelle définition de l'OA en se basant sur des notions statistiques pour exploiter la nature discrète des données volumiques. Le Chapitre 5 s'intéresse à la mise en œuvre de la méthode proposée, à la présentation des résultats obtenus et une comparaison avec d'autres méthodes, ce qui nous a permis notre démarche de manière qualitative et quantitative.

Finalement, cette thèse s'achève par une conclusion générale récapitulant et traçant les perspectives potentielles que nous envisageons d'entreprendre dans des travaux futurs.

## **Chapitre 2 — Rendu et ombrage des données volumiques**

---

### **2.1 Introduction**

L'expression «rendu volumique» désigne un ensemble de techniques qui permettent la visualisation de données 3D sous la forme d'images 2D (projection de données volumiques). L'objectif du rendu volumique est de simuler les interactions entre la lumière et un volume de particules. Le volume est souvent donné sous forme d'une grille régulière de densité, cette interaction est décrite par l'équation de transport volumique de lumière. Les modèles optiques approximent cette équation complexe, en la réduisant seulement à un petit ensemble de propriétés optiques. Le modèle optique le plus utilisé prend en compte l'émission et l'absorption pour construire l'intégrale du rendu volumique. Pratiquement, cette intégrale est évaluée numériquement à l'aide de ray-casting (Max, 1995).

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter les grands concepts, les éléments nécessaires et les enjeux du problème, après que nous aurons préalablement exposé les notions de base attachées aux données volumiques. Nous verrons ensuite les principales techniques de visualisation volumique classées en méthodes directes et indirectes. Finalement, nous étudierons la théorie de la technique de l'OA que nous exploitons dans le présent travail pour permettre de visualiser de plus grandes quantités de données.

### **2.2 Données volumiques**

Depuis des années, des chercheurs focalisent leurs travaux sur les techniques de visualisation 3D. Ces techniques sont utilisées dans différents domaines scientifiques notamment dans le domaine de l'imagerie médicale. En effet, une bonne prise en charge de l'aspect visuel permettra de mieux traiter et interpréter les données médicales et de même pour les autres disciplines. Les deux principaux domaines d'application du rendu volumique sont la visualisation scientifique (physique, chimie, biologie, etc...) et l'imagerie médicale (tomographie (reconstruction volumique) puis détection de tumeurs, diagnostics, planification d'une opération chirurgicale etc...). D'une manière globale, le rendu volumique (Elvins, 1992; Ikits et al., 2007; Preim and Bartz, 2007) est utilisé dans des applications ou la navigation



interactive est essentielle. C'est pourquoi la communauté scientifique développe des méthodes et des outils pour optimiser le rendu volumique.

Les données volumiques ont des origines et des significations variées suivant le domaine d'application concerné et elles peuvent avoir des formes diverses. Il y a des nuages de points 3D associés à un scalaire qui proviennent de scanners (rayons-X), de CT (Computed Tomography), de PET (Positron Emission Tomography), d'ultrasons, d'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique), ou de modèles mathématiques (qui intègrent en général des propriétés physiques comme en mécanique des fluides). Donc, elles sont obtenues aussi bien par simulation (écoulement de fluide, évolution d'un plasma au cours du temps, ...) que par mesure (imagerie par résonance magnétique, tomographie, ...).

Les techniques de visualisation scientifique sont caractérisées en utilisant une taxinomie associée à la dimensionnalité du champ physique à visualiser. Soient  $f$  (Équation 2.1) la fonction de visualisation, les variables  $v, d$  et  $n$  sont des entiers :

$$f = \begin{cases} \mathbb{R}^v \rightarrow \mathbb{R}^d, \mathbb{R}^v \text{ et } \mathbb{R}^d \subseteq \mathbb{R}^n \\ u \rightarrow f(u) \end{cases} \quad \text{Équation 2.1}$$

La variable  $v$  peut prendre trois différentes valeurs:

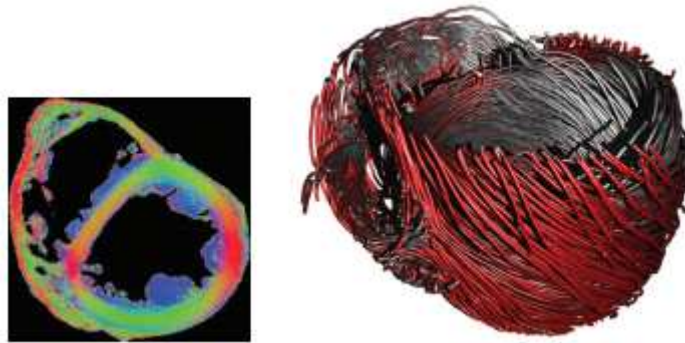
1.  $v = 1$ , nous parlons des données linéiques,
2.  $v = 2$ , veut dire la manipulation des données sous forme des surfaces où les techniques de rendu surfacique sont convenables pour les visualiser.
3.  $v = 3$ , présente le cas de la visualisation volumique qui nous intéresse dans cette thèse.

D'un autre côté, selon la spécificité de chaque domaine, la visualisation scientifique manipule de gros volumes de données de types de variés dépendamment à la valeur de la variable  $d$  (Équation 2.1):

- Si  $d = 1$ , un champs scalaire définit notre ensemble de données issu de la science, de l'ingénierie ou de la médecine. Les champs scalaires figurent parmi les ensembles de données les plus courants dans la visualisation scientifique et représentent une quantité associée à un seul nombre (scalaire), tel que la tension, la température, la densité, l'amplitude de la vitesse, magnitudes des champs vectoriels, etc. Notre travail présent est conçu pour visualiser ce type de champs.

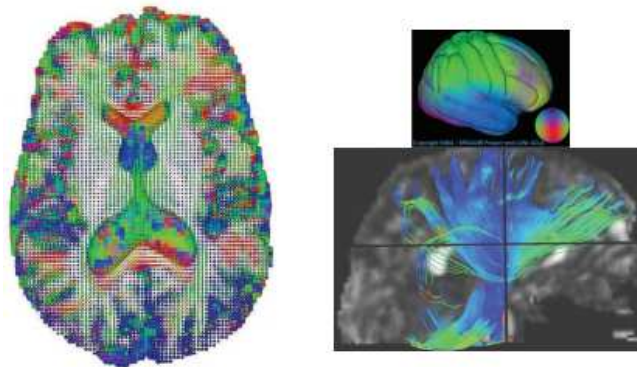
- Si  $d = 2$ , l'ensemble de données qu'on va visualiser (Figure 2—1) est présenté par un champ vectoriel qui est une quantité fondamentale décrivant les structures de flux continu des processus physiques (pression des fluides, vitesse, champ électrique, les forces associées à

la mécanique, champ magnétique, courbure). Ce type de données apparaît également sous forme de dérivés de champs scalaires.



**Figure 2—1: Visualisation du champ vectoriel.**

- Si  $d = 3$  c'est le champ de tension (diffusion, conductivité électrique et thermique, contrainte, données d'image de tenseur de diffusion). Un exemple de la visualisation d'un champ de tension est illustré dans la figure suivante.

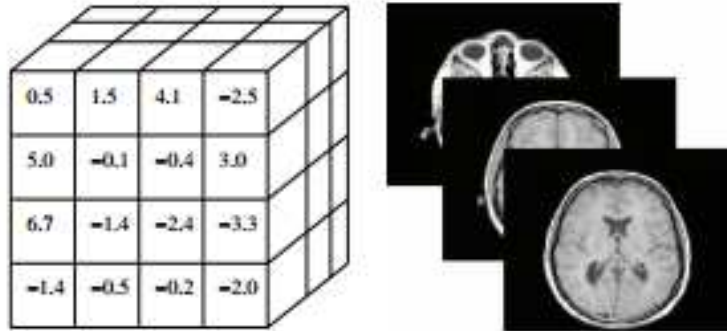


**Figure 2—2: Visualisation du champ tensoriel.**

Ces données 3D sont représentées sous la forme d'un couple (Position 3D, Valeur scalaire ou champ de vecteurs), les valeurs scalaires pouvant être des intensités ou des couleurs, des densités de matière ou d'autres propriétés (salinité d'un sol, concentration d'un composant,...). Il est clair que la signification de cette valeur scalaire est à la base du type de visualisation qui va être réalisé.

Dans la suite de cette thèse, nous parlerons des champs scalaires. Il s'agit de représenter un champ scalaire  $S$  défini dans un volume de l'espace. On peut se restreindre au cas des représentations discrètes, également appelées représentations cellulaires, grilles ou encore maillages volumiques (Figure 2—3). Dans ce mode de représentation, un ensemble de  $N$  valeurs discrètes  $s_i$  du champ scalaire est connu en des points  $x_i$  de l'espace (Équation 2.2):

$$S(x_i) = s_i, i = 1 \dots N \mid x_i \in \mathbb{R}^3 \text{ et } s_i \in \mathbb{R} \quad \text{Équation 2.2}$$



**Figure 2—3: Représentation cellulaire d'un ensemble de données scalaires**

Donc, les données volumiques sont des entités 3D (éventuellement variables dans le temps) pouvant contenir des informations à leur intérieur. Les relations de voisinage définies entre les points constituent la topologie de la grille: structurée ou non structurée. La définition d'une grille régulière est liée à la notion de voxel (volume element ou volumetric pixel).

Les échantillons peuvent être choisis à des positions aléatoires dans l'espace. Soient  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  et  $\Delta z$  respectivement des intervalles réguliers entre les échantillons le long de trois axes orthogonaux  $x$ ,  $y$  et  $z$ , nous distinguons deux types de grilles:

1. Si  $\Delta x \neq \Delta y$  ou  $\Delta z \neq \Delta y$  ou  $\Delta z \neq \Delta x$  alors le volume est anisotrope
2. Si  $\Delta x = \Delta y = \Delta z$  alors le volume est isotrope

Si nous ne pouvons pas définir un pas constant le long de l'un des axes orthogonaux, le volume est une collection de cellules dont la connectivité doit être spécifiée explicitement. Ces cellules peuvent être d'une forme quelconque telle que des tétraèdres, des hexaèdres ou des prismes.

## 2.3 Radiométrie

Dans cette section, nous définissons les quantités radiométriques mises en jeu dans cette thèse.

### 2.3.1 Radiométrie et photométrie

La radiométrie est le domaine qui étudie la mesure des paramètres physiques, c'est à dire les caractéristiques énergétiques des rayonnements électromagnétiques, y compris la lumière visible. Elle s'intéresse à la quantification de l'énergie émise ou incidente sur une surface.

En optique, la photométrie est la science qui étudie le rayonnement lumineux du point de vue de la luminosité perçue par l'œil humain, plutôt que l'énergie totale du rayonnement.

Les appareils de mesure en photométrie, sont étalonnés en fonction de la courbe de sensibilité relative de l'œil humain.

La différence entre les deux, c'est que la radiométrie prend en compte la totalité de l'énergie du rayonnement émis par un corps alors que la photométrie étudie seulement la partie du rayonnement émis par un corps qui est visible par l'œil humain et en plus la photométrie pondère les mesures en tenant compte de la sensibilité de l'œil humain.

### **2.3.2 Energie et flux**

L'énergie est une grandeur mesurée en joules [J] qui permet de quantifier les interactions entre des phénomènes issus de contextes très différents comme la mécanique, la thermodynamique, l'électromagnétisme, la mécanique quantique ou la chimie. Dans le contexte de la synthèse d'image, nous nous intéressons à la lumière sous la forme d'une onde ou d'un flux de particules, en l'occurrence des photons. L'énergie lumineuse en joules peut alors être associée à l'amplitude de la variation du champ électromagnétique ou aux quanta d'énergie de chaque photon. La notion d'énergie lumineuse reste toute fois insuffisante lorsqu'il est nécessaire de circonscrire un phénomène d'éclairage dans le temps et l'espace. Il est alors nécessaire d'introduire des variables dépendant des dimensions spatio-temporelles. La puissance désigne la capacité à fournir une quantité d'énergie en un temps donné en [J.s<sup>-1</sup>] ou en watts [W]. Pour une ampoule, la puissance est définie comme le flux d'une source lumineuse. De manière plus formelle, la puissance est la quantité d'énergie émise par un corps par unité de temps dans toutes les directions ou reçue par un corps par unité de temps et provenant de toutes les directions. Une ampoule n'est pas une source lumineuse isotrope : la quantité d'énergie émise dépend de sa taille et de son orientation vis-à-vis de l'observateur. Il faut donc mettre en jeu des dimensions spatiales afin de compléter un modèle d'éclairage.

### **2.3.3 Intensité et luminance**

L'intensité correspond à une puissance émise par une source lumineuse ponctuelle ou reçue par une surface ponctuelle par unité d'angle solide (stéradian) [W.Sr<sup>-1</sup>] (Figure 2—4). Toutefois, les sources ne sont jamais purement ponctuelles, il est donc nécessaire d'introduire une notion d'aire. La luminance (radiance) est la puissance émise ( $dW$ ) par unité d'angle solide ( $d\omega$ ) et par unité de surface apparente ( $ds \cdot \cos\theta$ ) d'une source étendue dans une direction donnée ( $\theta$ ), elle est exprimée en [W.Sr<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>].

### 2.3.4 Eclairage et radiosité

L'éclairage (irradiance) [W.m<sup>-2</sup>] d'un point p d'une surface défini par sa normale N correspond à la puissance reçue par unité de surface en provenance de toutes les directions  $\omega_i$  d'un demi-espace ( quation 2.3), en d'autres termes, c'est l'intégrale sur l'hémisphère  $\Omega$  de toutes les luminances incidentes  $L_i(p, \omega_i)$  (Figure 2—4).

$$E(p) = \int_{\Omega} L_i(p, \omega_i) (N \cdot \omega_i) d\omega_i$$

 quation 2.3

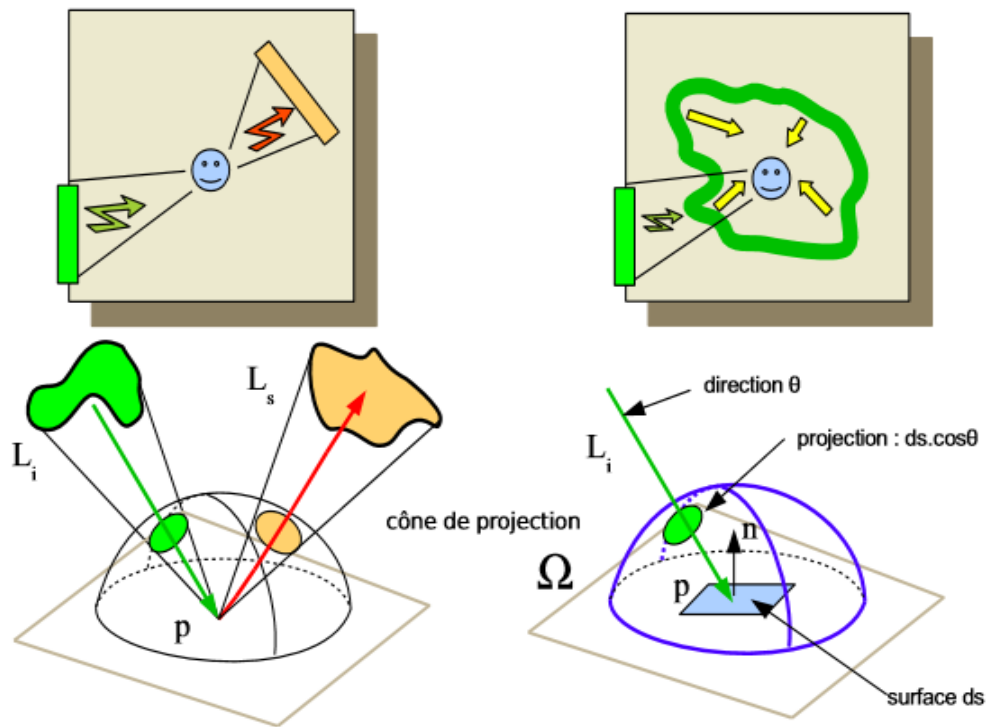


Figure 2—4: Luminance et éclairage (Vivanloc, 2008).

### 2.3.5 Illumination

Lors de la formation d'une image, le calcul de la couleur et de l'intensité lumineuse s'effectue généralement en deux étapes. Une première étape qui consiste à estimer globalement les échanges lumineux dans le volume, afin de connaître la quantité de lumière parvenant jusqu'à chaque voxel. Une seconde étape qui calcule localement la manière avec laquelle le volume réagit à la lumière reçue. Ce calcul est effectué par le modèle d'illumination locale qui utilise les propriétés locales des voxels (transparence, couleur, ...).

### 2.3.6 Illumination globale

La lumière provient directement des sources de lumière ainsi que de la lumière distribuée entre les voxels (lumières secondaires) (Vivanloc, 2008). La recherche d'un modèle représentant l'illumination globale d'un volume passe par la modélisation de toutes les

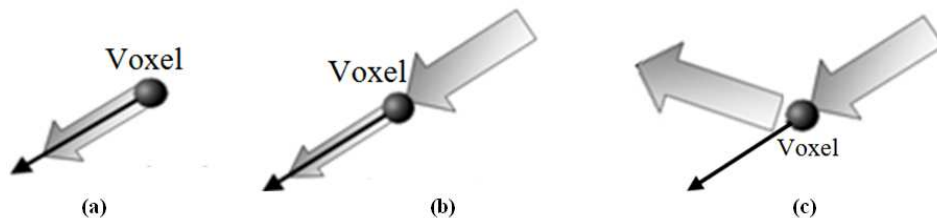
interactions entre ses voxels. Ces interactions sont dépendantes de la réaction locale d'un voxel face à une onde lumineuse. La formulation du modèle représentant l'illumination globale d'un volume en des termes physiques est assez lourde. Aussi, une formulation plus abstraite du problème est nécessaire, surtout si l'on veut en développer une solution algorithmique. Pour des exemples d'algorithmes utilisés dans l'illumination globale, on peut citer notamment: la radiosité, le lancer de rayon et l'ambient occlusion. Prendre en compte l'éclairage global d'un volume permet d'améliorer son aspect visuel avec des ombres, des réflexions, des réfractions et plus généralement un éclairage indirect. Ainsi, des ombres permettent de mieux appréhender la disposition spatiale des différents éléments d'un volume.

**2.3.7 Répartition de la lumière ou ombrage**

L'ombrage est un terme trompeur en synthèse d'images. Dans un contexte d'illumination, il désigne la méthode de remplissage des polygones en fonction des normales utilisées.

**2.3.8 Comportements lumière-Volume**

L'introduction de l'éclairage améliore fortement la perception des structures dans les données. La lumière émise par la source lumineuse est atténuée par les structures volumiques avant d'arriver à l'observateur. Si la lumière n'intercepte aucun voxel non vide, elle continue dans la direction initiale, sinon elle se comporte donc de trois façons: l'absorption, l'émission et le scattering comme illustré respectivement dans les images (a), (b) et (c) de la Figure 2—5.



**Figure 2—5: Comportements possibles de la lumière lorsqu'elle arrive à un voxel dans le volume.**

L'absorption est un phénomène qui diminue la quantité de la lumière en transformant celle absorbée par un voxel en une chaleur ou une intensité. La chaleur peut être utilisée pour générer la lumière qui cause l'émission d'un voxel augmentant sa quantité de lumière sortante. Le scattering signifie que la lumière change sa direction lorsqu'elle arrive à un voxel. Le nombre des changements de direction qu'un rayon lumineux peut subir avant d'enrichir l'observateur indique le type de scattering (Figure 2—6): une seule fois présente le scattering simple tandis que plusieurs fois présente le scattering multiple.

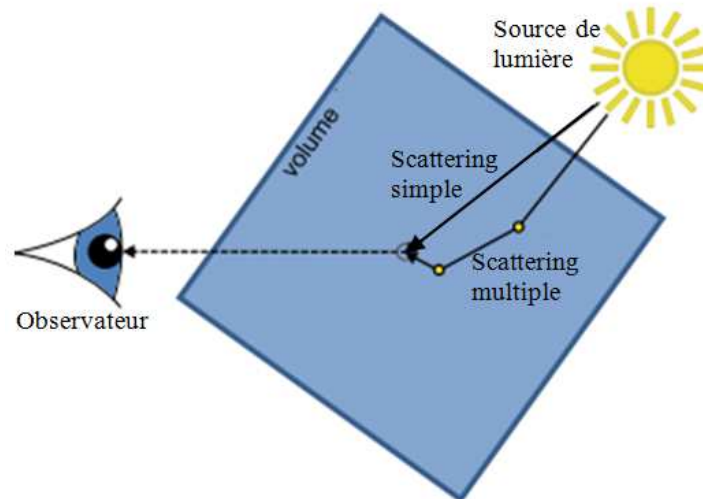


Figure 2—6: Types de scattering (image adaptée de (Jönsson et al., 2014)).

## 2.4 Méthodes de visualisation volumique des champs scalaires

Les techniques permettant de visualiser un champ scalaire volumique sont regroupées en deux grandes familles (Max et al., 1990): les méthodes indirectes ou le RVI et les méthodes directes qui sont dites aussi RVD. La distinction porte sur l'extraction préalable ou non d'un sous-ensemble de données brutes pour les visualiser indépendamment.

### 2.4.1 Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes portent également le nom de méthodes d'extraction. Il est ainsi fait référence à l'ensemble des techniques de visualisation d'un champ scalaire par extraction préalable d'un sous-ensemble des données brutes. Ce sous-ensemble, généralement extrait sous forme surfacique et représenté par un ensemble de polygones, est alors visualisé indépendamment des données volumiques à l'aide des techniques conventionnelles de rendu polygonal. Ces méthodes supposent donc une étape de prétraitement des données pour en extraire l'information recherchée. Parmi les méthodes indirectes pour le rendu volumique, nous citons la visualisation de tranches 2D et les surfaces d'isovaleur (Figure 2—7).

#### 2.4.1.1 Visualisation de tranches 2D

Elle consiste à extraire une tranche arbitraire de données, et à la visualiser. On peut comparer cette approche à celle des médecins qui examinent des images obtenues par résonance magnétique (IRM), ils disposent pour cela d'un certain nombre de clichés correspondant directement à des tranches successives d'un corps humain.

*2.4.1.2 Iso-surfaces*

Cette méthode consiste à représenter les parties d'intérêt (limites) par des surfaces et rendre ces surfaces. On cherche à reconstruire la (les) surface(s) composant les bords de l'objet en se basant sur la notion d'iso-valeur, définie comme le lieu des points de l'espace où la fonction scalaire est constante (Équation 2.4). Mathématiquement, si la fonction  $f$  est celle dont on souhaite représenter l'iso-surface en la valeur  $c$ , celle-ci est définie par:

$$\{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 | f(x, y, z) = c\} \quad \text{Équation 2.4}$$

La compréhension de sa structure tridimensionnelle est facilitée par l'utilisation de méthodes d'illumination dépendantes de la normale en chacun des points de la surface et de sources lumineuses. La difficulté principale des méthodes d'extraction de surfaces d'isovaleur réside dans la conversion des données volumiques brutes en une représentation surfacique à base de polygones exploitable par le matériel graphique.

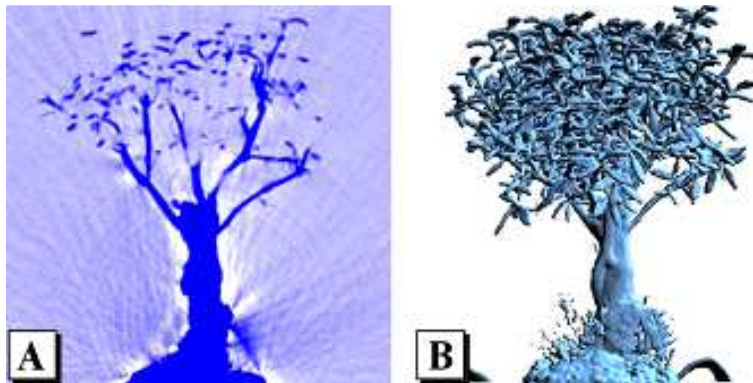


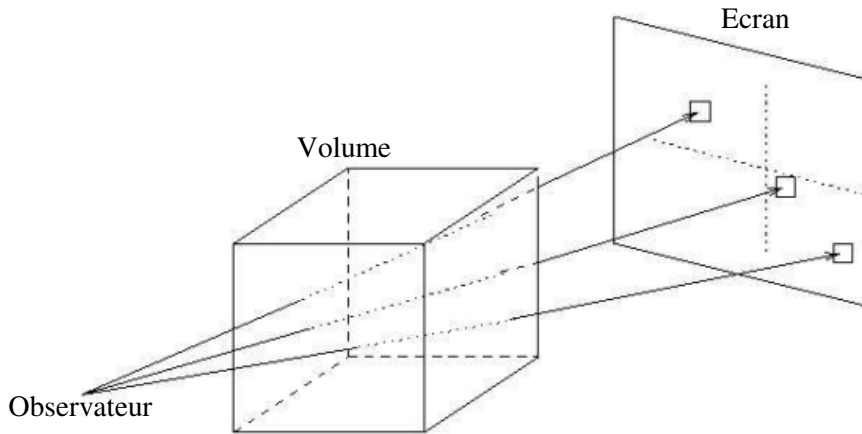
Figure 2—7: Visualisation de données par (A) méthodes basée-tranches et par (B) iso-surfaces.

*2.4.2 Méthodes directes*

Par opposition aux méthodes indirectes, les méthodes directes utilisent les données brutes et originelles du volume dans leur ensemble sans procéder à l'extraction préalable d'un sous-ensemble. On considère généralement le volume comme un corps participatif auquel on va associer des propriétés optiques, notamment de transparence. Cette approche permet d'obtenir une vraie vue d'ensemble des données.

Chaque pixel de l'image est considéré comme un rayon qui traverse un volume (voir Figure 2—8). La complexité de l'algorithme réside ici dans la manière dont le rayon va interagir avec les échantillons (ou voxels) du volume. Ainsi, tous les algorithmes de rendu volumique direct fonctionnent en échantillonnant des valeurs le long du rayon et en calculant la contribution de ces valeurs, suivant un modèle de rendu, à la couleur finale du pixel.





**Figure 2—8: Rendu volumique direct (RVD).**

Il existe en fait deux manières possibles de calculer l’image finale: object-order et image-order.

#### 2.4.2.1 Calcul de l’image finale par object-order

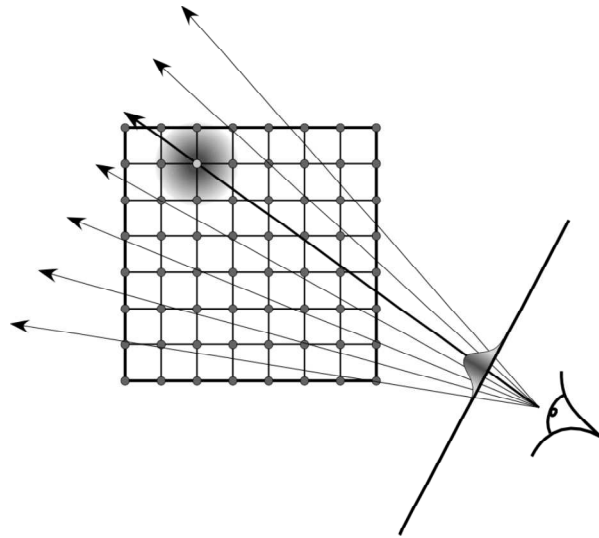
Cette manière consiste à calculer la contribution de chaque élément du volume sur les pixels de l’image en passant les voxels en revue un par un dans un ordre de visibilité donné. Il existe deux grandes méthodes: splatting et Shear-Warp.

##### 2.4.2.1.1 Splatting

Comme un voxel ne se projettera pas exactement sur un pixel, un filtre est utilisé pour calculer une contribution en couleur et en transparence aux pixels voisins. Comme cet algorithme itère sur le volume, il peut parcourir celui-ci selon son ordre naturel de stockage. En revanche, le calcul du filtre de rééchantillonnage est très coûteux. En théorie, cet algorithme peut fournir les mêmes images qu’avec l’algorithme du lancer de rayon. En pratique, du fait que le calcul des paramètres des filtres est difficile, des approximations sont utilisées, qui permettent soit d’obtenir une exécution efficace, soit des images de qualité, mais jamais les deux simultanément.

Cette approche, illustrée à la Figure 2—9, consiste à projeter voxel par voxel le volume sur le plan image pour calculer indépendamment leurs contributions. Ainsi, les voxels sont successivement composés au niveau des pixels qu’ils affectent. L’extension sur l’image de l’empreinte (“footprint” en anglais) du voxel projeté détermine les pixels affectés. Elle dépend d’un noyau de convolution 3D appliqué au voxel avant projection. Il s’agit généralement d’un noyau Gaussien, équivalent à une petite sphère diffuse autour du voxel. La symétrie du noyau permet une réintégration de son empreinte 2D une seule fois pour tous les

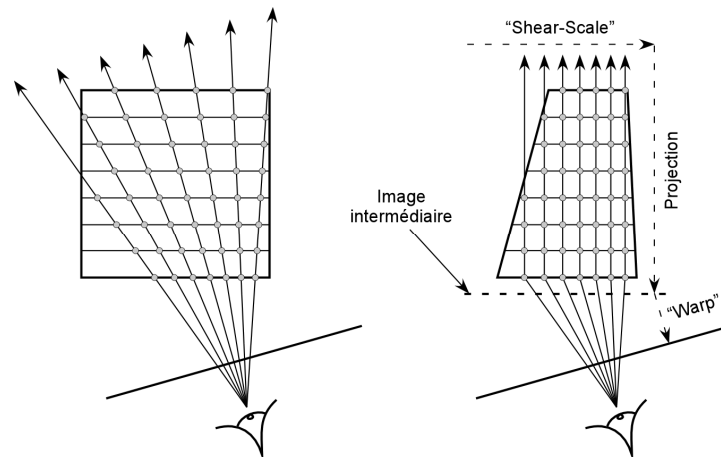
voxels indépendamment du point de vue. Il suffit ensuite de multiplier cette empreinte générique par la valeur du voxel projeté, ce qui fait l'efficacité de la méthode. En projection parallèle, l'empreinte d'un voxel sur ce plan de vue est constante pour tous les voxels.



**Figure 2—9: Rendu volumique par la technique du “splatting”.**

#### 2.4.2.1.2 Shear-Warp

Cette méthode est basée sur la factorisation de la transformation liée au point de vue pour simplifier la projection du volume vers l'image. Elle part du principe que l'élément coûteux dans le lancer de rayons est le grand nombre d'interpolations trilinéaires impliquées lors de la discrétisation de chaque rayon. Ainsi, l'idée originale est de remplacer ces interpolations trilinéaires dans le volume de la grille par des interpolations bilinéaires dans ses plans.



**Figure 2—10: Rendu volumique par la technique du “shear-warp”.**

Cependant, la complexité des algorithmes de splatting est évitée en décomposant la projection des voxels sur le plan image en deux étapes:

1. Tout d'abord, une projection des voxels effectuée sur un plan objet parallèle à l'une des faces du volume à visualiser.

2. Ensuite, le plan objet est projeté sur le plan image, à un coût très bas car il ne s'agit plus de projections d'informations volumiques mais bidimensionnelles.

La factorisation shear-warp consiste à considérer un système de coordonnées intermédiaires. Dans cet espace objet transformé, les rayons liés au point de vue sont parallèles au troisième axe de coordonnées. Un algorithme basé sur cette transformation dans l'espace objet intermédiaire a deux étapes:

1. Dans une première étape de composition appelée "shear", les données volumiques obtenues lors de la discrétisation le long du rayon sont accumulées intelligemment sur les plans de la grille les plus perpendiculaires au plan de l'image. Comme le montre la Figure 2—10, la composition le long du rayon est calculée sur une image intermédiaire correspondant à l'espace objet transformé par cisaillement/cisaillement homothétique ("shear"/"shear-scale" suivant le mode de vision parallèle ou perspective) le long de ces mêmes plans. L'alignement des voxels qui résulte de cette transformation permet d'effectuer la composition par une simple projection des plans de la grille sur l'image intermédiaire, avec interpolation bilinéaire dans les plans.

2. Une deuxième étape appelée "warp", transformant l'image intermédiaire par un plaquage ("warp") sur l'image finale par une transformation 2D.

Passer par une image intermédiaire permet aux lignes de balayage des données du volume d'être alignées avec les lignes de balayage de l'image intermédiaire. On balaye alors l'objet et l'image simultanément dans leur ordre de stockage. Cet algorithme combine les avantages des algorithmes d'ordre objet et des algorithmes d'ordre image. Les conditions d'utilisation des techniques d'optimisation séquentielles telles que l'exploitation de la cohérence de données et la terminaison précoce de rayon sont réunies grâce à ce parcours simultané des deux structures de données (objet et image).

Une dernière remarque sur le "shear-warp" est la nécessité de trier les voxels selon l'axe de cisaillement. Cet axe peut être amené à varier lorsque le point de vue est modifié. Ainsi, pour une manipulation optimale il est nécessaire de stocker trois copies du volume de données chacune organisée selon un axe particulier. Les structures d'encodage proposées dans l'implantation originale permettent cependant de réduire le coût mémoire occasionné par cette copie.

#### *2.4.2.2 Calcul de l'image finale par image-order*

Elle consiste à calculer chacun des pixels de l'image un par un. Il faut alors pour chaque rayon traverser le volume afin de trouver les voxels qui contribuent à la couleur finale. Le lancer de rayons type ray casting et le rendu basé sur l'utilisation de textures sont Deux méthodes classées dans cette catégorie.

##### *2.4.2.2.1 Rendu basé sur l'utilisation de textures*

L'idée est de considérer le volume comme une texture 3D. L'utilisation de l'application de textures en rendu volumique implique une contrainte forte sur la structure des données volumiques: les données doivent être sous la forme d'une grille cartésienne de voxels. Toute autre structuration impose un ré-échantillonnage des données vers une grille cartésienne pour la visualisation. Cette contrainte est due au fait que les textures sont des tableaux, ils correspondent donc parfaitement au maillage cartésien.

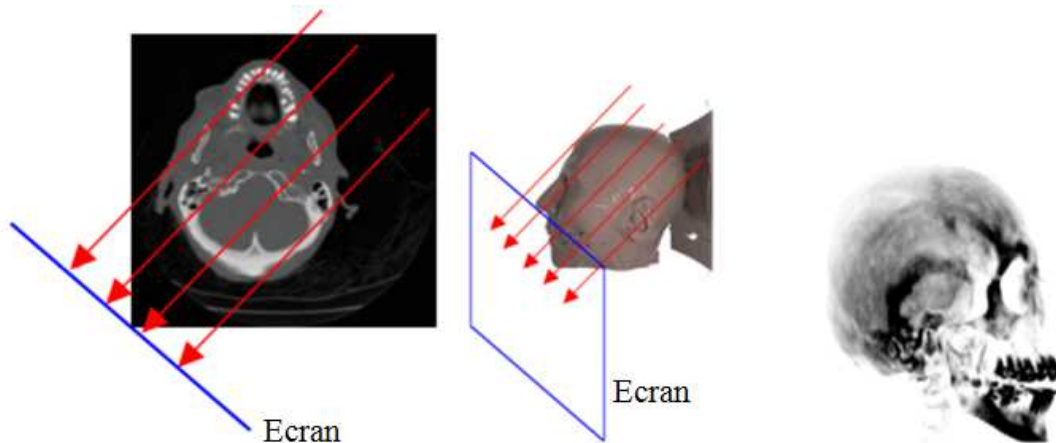
Des coupes parallèles au plan image et interpolées tri-linéairement peuvent alors être extraites de cette texture. Les textures 3D permettent d'effectuer la majorité des calculs par les GPU qui possèdent des mémoires généralement plus performantes que la mémoire centrale de l'ordinateur. Mais, le volume entier est traité alors que généralement seule une petite partie du volume contient l'information nécessaire au rendu. D'autre part, le nombre de plans à extraire pour avoir une bonne qualité de rendu est assez grand. Enfin le volume ne tient pas tout le temps dans la mémoire vidéo, ce qui force alors des échanges entre cette mémoire et la mémoire centrale et ralentit considérablement les temps de rendu.

##### *2.4.2.2.2 Raycasting*

Le but de ray casting est de prendre en compte la transparence. Il consiste à émettre des rayons à partir du point de vue jusqu'au plan de l'image pour chaque pixel en traversant le volume (Figure 2—11). Lorsqu'un rayon traverse le volume, ce dernier est échantillonné selon un certain nombre d'intervalles, en général, un ou deux par voxel. La valeur à chaque point d'échantillonnage est obtenue par une interpolation trilinéaire des valeurs voisines de ce point. Les contributions de ces échantillons sont accumulées jusqu'à ce que le rayon ait quitté le volume. La valeur finale est alors calculée suivant la formule d'accumulation et placée sur le pixel que le rayon atteint (Levoy, 1988).

L'avantage principal de cet algorithme est la qualité du rendu. Cependant, cet algorithme étant un algorithme de type image-order, il n'accède pas aux données du volume dans l'ordre naturel du stockage, puisqu'il le traverse dans des directions arbitraires. De fait, il

Il passe plus de temps à calculer les positions des points d'échantillonnage et à effectuer les calculs d'adresses qu'à calculer le rendu. De plus, les rayons peuvent passer plusieurs fois par le même voxel, et ainsi il est nécessaire de recharger des données déjà chargées précédemment. Enfin, l'élimination des régions vides du volume, bien que faisable, est moins facile qu'avec des méthodes de type object-order, et donc plus coûteuse.



**Figure 2—11: Rendu volumique direct basé ray casting.**

Il existe trois principales méthodes pour définir l'intensité lumineuse qui parvient à l'observateur: la méthode de projection de l'intensité maximale, la méthode dite Rayons X et la méthode d'accumulation. Cette dernière est utilisée lors de notre contribution et implémentation.

## **2.5 Modèles d'interactions lumière-volume**

La quantité de la lumière qui arrive à chaque particule à partir d'une source lumineuse peut être estimée des différents niveaux de complexité. L'approche la plus simple est d'ignorer complètement l'effet d'atténuation de la lumière entre la source lumineuse et la particule, ce qui signifie que l'intensité n'est pas influencée par d'autres particules dans le volume. Si on considère l'émission et l'absorption, les particules que le rayon intercepte peuvent seulement augmenter ou diminuer la radiance selon leurs capacités d'absorber ou d'envoyer la lumière. Dans ce cas la source lumineuse peut créer des ombres, ce qui améliore la qualité visuelle. Maintenant, l'interaction lumineuse la plus compliquée à simuler est le scattering multiple où la lumière incidente à chaque point dans le volume peut arriver de plusieurs directions. Quand le rayon quitte le volume, la radiance restante est assignée au pixel dans l'image finale.

Le calcul du rendu ne doit négliger aucun phénomène du volume (absorption, émission ou scattering) pour que le rendu final soit plus convaincant, mais coûteux en termes de temps de calcul et ne permet pas d'avoir une visualisation interactive. Les modèles d'illumination locale du volume tiennent compte seulement des effets de scattering simple c.à.d. la lumière interagit une seule fois avec le milieu.

En visualisation surfacique, on utilise l'éclairage défini par Phong, qui consiste à calculer le facteur d'illumination d'un point en fonction de la normale de la surface sur laquelle il se trouve, et des directions de la lumière et de l'observateur par rapport à ce point. Mais en visualisation volumique, on utilise le gradient car la notion de normale n'existe pas ainsi le gradient peut être défini comme étant un vecteur décrit la direction dans laquelle les valeurs varient de façon significative, il peut poser des problèmes qui mènent à un faux calcul d'illumination; si les données sont bruitées. Le gradient devient incorrect et non fiable ainsi la dépendance du calcul du gradient aux transitions entre les couches des valeurs rend difficile son estimation dans les régions homogènes. Autrement, les volumes médicaux contiennent souvent des régions homogènes larges avec des transitions douces entre les différents types de tissus et par conséquent entre les différentes valeurs scalaires à l'inverse de l'utilisation de la normale qui a pour but de décrire la condition lumineuse à un point appartenant à une surface.

Les modèles d'illumination locale améliorent les propriétés des surfaces et la perception des relations spatiales dans une certaine mesure, mais ils négligent encore la plupart des interactions lumière-matière. Ils ne représentent que l'absorption entre un échantillon et l'observateur. L'absorption le long d'un rayon, qui est proportionnelle aux densités de volume qui sont traversées, il en résulte des ombres, ou plus précisément auto-ombrage des particules du volume.

L'utilisation des ombres améliore la qualité d'image et ajoute des indices importants sur la profondeur mais les ombres seules ne donnent pas un rendu réaliste. Il manque la contribution de la lumière indirecte. Il existe plusieurs recherches particulièrement dans le rendu basé maillages pour obtenir des images photoréalistes.

L'éclairage global traite des ombres et de la lumière indirecte. Il existe des approches spécialisées dans les méthodes de l'illumination globale dans les milieux participatifs pour faire le rendu, par exemple une chambre pleine de fumée. Une étude complète est donnée par (Max, 1995).

Des méthodes calculent interactivement les effets atmosphériques en utilisant le matériel graphique, l'illumination globale (Zhang et al., 2013) permet d'inclure des

estimations très compliquées des interactions lumineuses entre les particules dans le milieu participatif. L'émission, l'absorption et le scattering sont des paramètres pouvant influencer la contribution de la radiance en un point ce qui améliore beaucoup la perception des relations spatiales avec une l'illumination résultante qui devient plus réaliste en comparant avec l'illumination locale.

## 2.6 Fonction de transfert

### 2.6.1 Définition

Le rendu volumique cherche à explorer les données volumiques à l'aide des outils visuels. Ce processus a pour objectif de découvrir et de mettre en évidence des structures et des phénomènes intéressants incorporés dans les données en écartant les structures d'occultation qui ne sont pas actuellement importantes. Les données volumiques sont définies par un maillage portant des valeurs scalaires, il est alors important de pouvoir attribuer des propriétés optiques à ce maillage, afin de pouvoir visualiser les informations qu'il porte. Donc, le RVD nécessite une étape dite la classification qui consiste à transformer l'ensemble de voxels en des voxels visualisables c.à.d. à spécifier la relation entre les données scalaires et les caractéristiques optiques (absorption et émission).

La fonction de transfert  $T$  (voir Équation 2.5) est l'outil qui permet de réaliser cette opération en associant à une valeur scalaire  $s$ , portée par le maillage, un quadruplet  $(r, g, b, \alpha)$  pour rouge, vert, bleu, alpha où le triplet  $(r, g, b)$  est choisi, car il correspond à l'espace de couleur additif, le dernier élément  $\alpha$  permet d'associer une notion de transparence/opacité au scalaire  $s$ . Donc, la classification en rendu volumique est l'étape qui permet de passer de l'espace des scalaires ( $\in \mathbb{R}$ ) à l'espace des couleurs et de transparence ( $\in \mathbb{R}^4$ ) par la définition d'une fonction de transfert qui est toujours stockée sous la forme d'une texture 1D (tableau unidimensionnel de valeurs discrètes) où pour un scalaire  $s$ :

- $c(s)$  représente la couleur, soit un triplet  $(r, g, b)$ .
- $\alpha(s)$  représente la transparence (aussi appelé coefficient d'extinction).

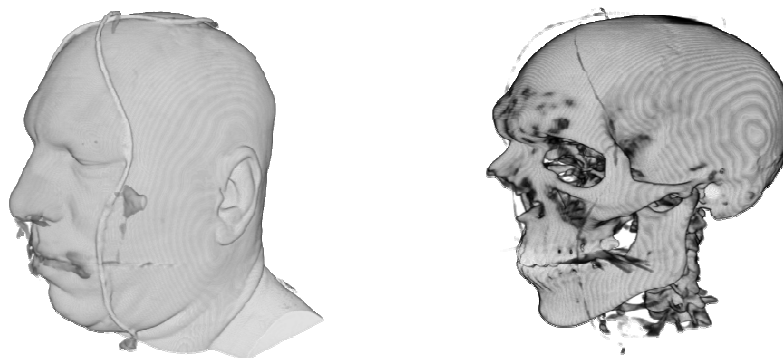
$$T(f(x, y, z)) = \{R, G, B, \alpha\} \quad \text{Équation 2.5}$$

où  $f(x, y, z)$  dénote une fonction scalaire sur  $\mathbb{R}^3$  qui retourne une valeur de densité  $s$  à une position  $(x, y, z)$ .

Les fonctions de transfert utilisées dépendent du type de données traité et de l'effet visuel recherché. Par exemple, pour les données volumiques d'un arbre, l'utilisation d'une fonction de transfert permet de changer la couleur des feuilles ou les feuilles peuvent devenir

totallement transparentes pour ne rendre que le tronc de l'arbre. Le rendu volumique offre beaucoup de possibilités grâce à la prise en compte de la transparence. D'une manière générale, le choix de la fonction de transfert est difficile et souvent contre-intuitif. Il existe des méthodes de génération automatique de fonctions de transfert qui permettent de visualiser par exemple les frontières entre différents matériels et de générer les normales associées aux voxels. Les normales sont utilisées pour le calcul de l'ombrage, c'est-à-dire la prise en compte des différentes sources de lumière pour le rendu final. Elles sont généralement déterminées par le calcul du gradient.

Donc, une bonne fonction de transfert (Nguyen et al., 2012) consiste à faire ressortir des données, à un instant donné de l'exploration de l'information, et cacher les détails inutiles. Elle est donc d'une importance capitale en termes de visualisation. Tout champ scalaire volumique peut être visualisé d'une infinité de façon (Figure 2—12) selon la valeur de la couleur et de la transparence qu'on affecte à chacune des valeurs scalaires.



**Figure 2—12: Variété de visualisation de mêmes données volumiques selon la fonction de transfert utilisée.**

Notons aussi que lors de l'échantillonnage le long du rayon pour le Ray-Casting, il est préférable d'utiliser une interpolation, car la plupart du temps on ne sera pas sur un point de la grille.

### **2.6.2 Types**

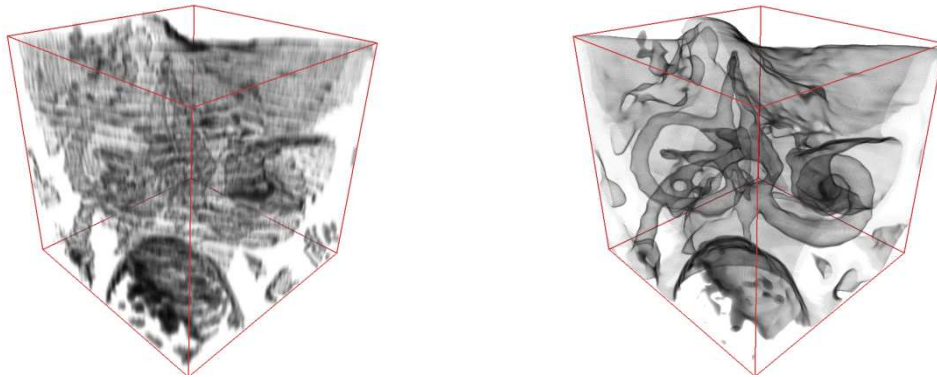
On rétablit la continuité dans les données à visualiser en réalisant une interpolation. L'ordre d'application de l'interpolation et de la fonction de transfert donne ainsi lieu à deux classifications différentes, car ces deux opérations ne commutent pas (à moins que la fonction de transfert soit une fonction constante ou identité). Autrement, à partir d'une fonction de transfert, il est possible de traiter les échantillons voxels de deux façons :

– par pré-classification : la fonction de transfert est appliquée pour chaque échantillon avant l'interpolation trilineaire. On dit alors que l'on travaille dans l'espace des couleurs, les



couleurs étant interpolées. Les hautes fréquences de la fonction de transfert (zones à forte variation d'intensité de couleur et de transparence pour deux scalaires rapprochés) peuvent ne pas être reproduites en conséquence, ce qui se traduit par l'introduction de défauts visuels.

– par post-classification: la fonction de transfert est appliquée après interpolation, donc au niveau du champ de données. La visualisation qui en découle permet de rendre tous les détails de la fonction de transfert. Cependant cette approche est moins performante que la précédente vu l'application de la fonction de transfert à toutes les valeurs issues de l'interpolation linéaire inter-échantillons.



**Figure 2—13: Comparaison de qualité d'images entre la pré-classification (Gauche) et la post-classification (Droite).**

## **2.7 Simulation du trajet de la lumière en RVD**

### **2.7.1 *Intégral du RVD***

Équation 2.6 présente l'intégral du rendu volumique utilisée dans le cas du ray casting (Hadwiger et al., 2009) afin d'estimer l'intensité d'un pixel de l'image finale et qui simule le transport de la lumière d'un point à un autre le long du rayon. Le but est de modéliser une acquisition par transparence, mais le problème est que les humains sont peu habitués à voir par transparence. Le principe général est de lancer des rayons puis affecter une couleur en fonction du trajet parcouru et des obstacles rencontrés. La perception de ce milieu par un observateur est alors formée par l'ensemble des rayons de lumière qui vont le traverser et atteindre l'observateur. Dans ce modèle, chacune des particules du volume émet un rayonnement lumineux dans son environnement et absorbe une partie du rayonnement incident, le reste étant transmis sans modification. Équation 2.6 représente le modèle d'émission-absorption (Figure 2—14).

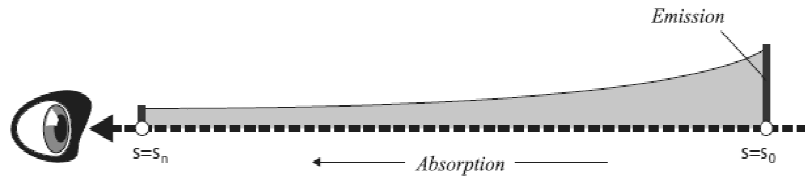


Figure 2—14: Le modèle émission-absorption.

$$I(s_n) = I(s_0).T(s_0, s_n) + \int_{s_0}^{s_n} g(s).T(s_0, s_n) \quad \text{Équation 2.6}$$

où  $I(s_n)$  est l'intensité finale qu'on doit associer à un pixel,  $I(s_0)$  est l'intensité de l'arrière plan,  $T(s_0, s_n)$  est l'absorption de la lumière entre  $s_0$  et  $s_n$  et  $g(s)$  est un terme qui décrit l'émission d'un point  $s$  (Figure 2—15). Il existe plusieurs manières pour définir le terme  $g(s)$  tel que plus  $g(s)$  est complexe plus les images deviennent plus réalistes. Cependant, on utilise souvent une approximation locale pour évaluer rapidement l'illumination.

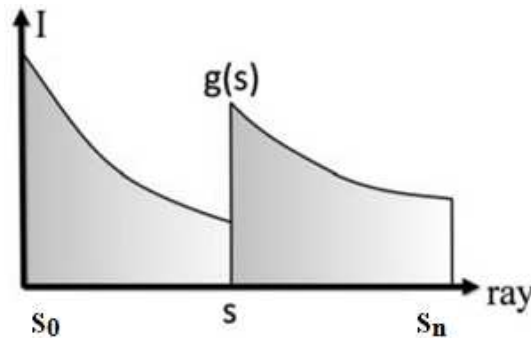


Figure 2—15: Emission de l'intensité lumineuse par les différents points le long du rayon.  $g(s)$  est la lumière émise par le point  $s$ .

La différence principale entre l'illumination globale et locale réside dans l'intervention d'autres particules dans le volume. L'information disponible à chaque point (la position, la normale de la surface, la direction d'observation, la direction de la source lumineuse) est suffisante pour l'évaluation de la lumière locale. Mais, la limite de cette illumination est l'impossibilité d'avoir des effets plus réalistes à cause de l'absence de l'influence des autres voxels du volume qui peuvent occulter la lumière.

Dans les approximations locales, comme le modèle d'éclairage Blinn-Phong,  $g(s)$  contient trois composants: les réflexions diffuse et spéculaire, et la lumière ambiante:

$$g(s) = \begin{matrix} A(s) & + & D(s) & + & S(s) \\ \text{Ambiante} & & \text{Diffuse} & & \text{Spéculaire} \end{matrix} \quad \text{Équation 2.7}$$

La lumière ambiante simule les deux types d'illuminations directe et indirecte; c.à.d. la lumière arrivant directement de la source lumineuse et la lumière réfléchiée par les autres voxels. Les particules totalement occultées de la source lumineuse deviennent noires à l'observateur rendant invisible une information importante. En utilisant un coefficient de réflexion ambiante  $\kappa_a$  tel que  $0 \leq \kappa_a \leq 1$ , l'intensité ambiante est donc simplifiée comme suit:

$$A(s) = \kappa_a \cdot c(s) \quad \text{Équation 2.8}$$

où  $c(s)$  est la couleur d'un échantillon/voxel  $s$ . Le coefficient  $\kappa_a$  est une propriété matérielle qui caractérise l'apparence du tissu dont un échantillon (ou voxel) est constitué.

Comme nous avons mentionné dans la section 2.4.2.2.2, le RVD par ray-casting possède trois méthodes principales pour définir l'intensité lumineuse qui parvient à l'observateur, parmi elles la méthode par accumulation que nous allons utiliser dans la suite de la thèse. Alors, il est possible d'accumuler la contribution de chaque particule (échantillon ou voxel) du volume le long d'un rayon lumineux issu de l'œil d'un observateur et de mesurer ainsi l'intensité lumineuse qui lui parvient.

Après l'application d'une fonction de transfert, la nouvelle forme de l'intégral présentée par l'Équation 2.6 est définie dans l'équation suivante:

$$I(s_n) = I(s_0) \cdot e^{-\int_{s_0}^{s_n} \alpha(t) dt} + \int_{s_0}^{s_n} c(s) \cdot \alpha(s) \cdot e^{-\int_s^{s_n} \alpha(t) dt} ds \quad \text{Équation 2.9}$$

La quantité  $e^{-\int_{s_0}^{s_n} \alpha(t) dt}$  décrit la transparence du milieu entre  $s_0$  et  $s_n$ .  $c(s)$  est la couleur propre de l'échantillon  $s$  qui présente son émission primaire,  $\alpha(s)$  est sa valeur d'opacité qui varie de 0 (transparent) à 1 (totalement opaque) présentant l'absorption primaire.

### 2.7.2 Numérisation de l'intégral du RVD

L'intégrale de l'Équation 2.9 doit être calculée pour chaque pixel de l'écran en considérant un rayon virtuel qui passe par le pixel et qui traverse le volume dans la direction d'observation. Ce calcul repose sur une discrétisation et procède récursivement à l'aide de l'un des opérateurs de composition suivant le sens de parcours le long du rayon.

Un rayon doit être discrétisé en le divisant à  $n$  segments de largeurs identiques, on peut calculer  $I(s_n)$  récursivement par sa forme finale suivante:

$$I(s_n) = \sum_{i=0}^n c(s_i) \prod_{j=i+1}^n \alpha(s_j), \quad c(s_0) = I(s_0) \quad \text{Équation 2.10}$$

Cette composition des échantillons peut être effectuée de deux manières différentes: d'avant en arrière ou d'arrière en avant.

### 2.7.2.1 Méthode d'avant en arrière

Une composition d'avant en arrière parcourt les échantillons dans l'ordre  $0 \dots n - 1$  de la manière décrite sur le schéma suivant.

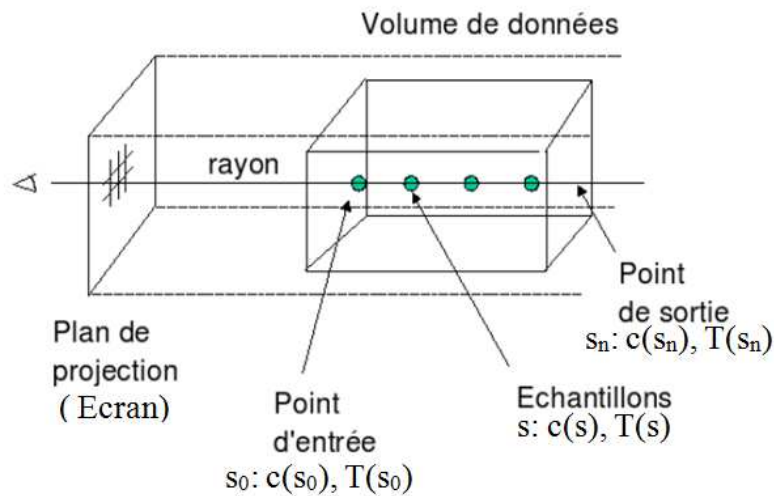


Figure 2—16: Ray casting. Méthode de composition d'avant en arrière.

Ce qui nous donne la formule de composition suivante (avec  $I(s_n) = c(s_n)$ ):

$$\acute{c}(s_i) = \acute{c}(s_{i-1}) + (1 - \acute{\alpha}(s_{i-1})) \cdot c(s_i) \quad \text{Équation 2.11}$$

$$\acute{\alpha}(s_i) = \acute{\alpha}(s_{i-1}) + (1 - \acute{\alpha}(s_{i-1})) \cdot \alpha(s_i) \quad \text{Équation 2.12}$$

avec  $c(s_0)$  et  $\alpha(s_0)$ , valeurs initiales respectivement égales à  $(0, 0, 0)$  et  $0$ .  $\acute{c}(s_i)$  et  $\acute{\alpha}(s_i)$  sont respectivement la couleur et l'opacité accumulées le long du rayon à partir de  $s_0$  jusqu'au l'échantillon  $s_i$ .

On doit dans cette méthode disposer d'un tampon supplémentaire pour l'accumulation des opacités  $\alpha(s_i)$ .

L'avantage majeur de cette approche est le fait de pouvoir arrêter de traiter des échantillons une fois que l'opacité a atteint 1 lors du parcours. En effet, si l'opacité est maximale, le facteur  $1 - \alpha(s_{i-1})$  vaudra toujours 0 et les échantillons suivant ne contribueront pas à la couleur finale. Ainsi si après avoir parcouru  $j$  échantillons, l'opacité cumulée a atteint le maximum, on peut alors éviter de traiter les  $n - j$  échantillons restants.

2.7.2.2 *Méthode d'arrière en avant*

La seconde technique de composition prend le problème dans l'autre sens : on combine les échantillons  $n - 1$  à  $0$ , comme schématisé avec la figure suivante.

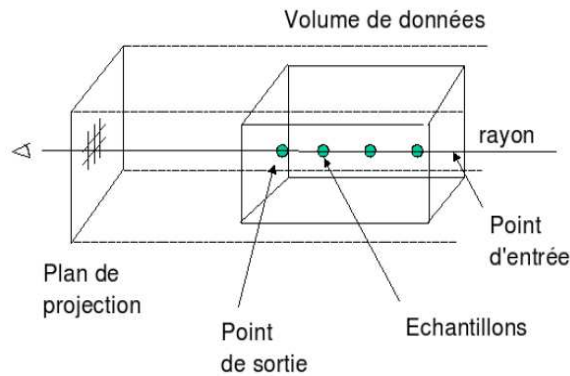


Figure 2—17: Ray casting par composition d'arrière en avant

La formule de composition diffère alors de la composition d'avant en arrière (avec  $I(s_n) = c(s_0)$ ):

$$c(s_i) = c(s_i) + (1 - \alpha(s_i)) \cdot c(s_{i+1}) \quad \text{Équation 2.13}$$

avec  $c(s_n)$ , valeur initiale égale à  $(0, 0, 0)$ .

Cette technique présente un inconvénient par rapport à l'autre méthode de composition: on doit traiter l'ensemble des  $n$  échantillons pour obtenir un résultat. En effet, du fait que l'on parcourt les échantillons d'arrière en avant, on ne pourra savoir si l'échantillon le plus en avant est totalement opaque (Il annule par conséquent la contribution des échantillons précédents) uniquement si on l'a traité.

Les étapes de composition sont associatives mais non commutatives. Conséquence de l'associativité, il est possible de composer des groupes de segments séparément puis de composer les résultats. En revanche, la non commutativité implique que l'ordre de composition ne peut être modifié. Ces deux points ont des conséquences importantes sur les techniques de rendu volumique.

## 2.8 Les ombres pour améliorer la qualité visuelle du rendu volumique

### 2.8.1 Ombre: Notions et généralités

#### 2.8.1.1 Définition

Une ombre se définit comme l'obscurité que cause un corps opaque en interceptant la lumière. Elle fait partie intégrante de notre environnement et est présente dans beaucoup de scènes naturelles, dès qu'une source de lumière est prédominante par rapport à la lumière ambiante. Alors, l'ombre est le résultat d'une interaction entre une composante géométrique et une composante photométrique.

#### 2.8.1.2 Eléments d'ombre

Les objets directement éclairés sont appelés des bloqueurs ou occulteur, car ils bloquent la lumière des objets derrière eux qui sont les receveurs (Figure 2—18). Il est à noter que cette distinction n'est pas binaire: un objet peut être à la fois bloqueur et receveur. Par exemple, un même objet faisant de l'ombre sur lui-même (auto-ombre) est ainsi à la fois bloqueur et receveur.

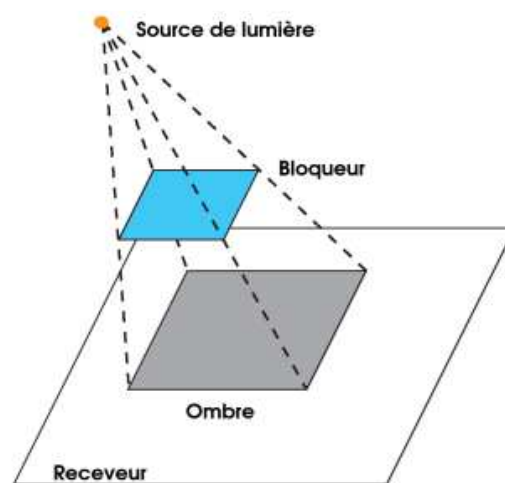


Figure 2—18: Ombre et ses éléments.

#### 2.8.1.3 Utilité

La présence des ombres dans une image fournit des informations essentielles pour la compréhension d'une scène et notamment sur la position relative des objets entre eux et des sources lumineuses (Figure 2—19).

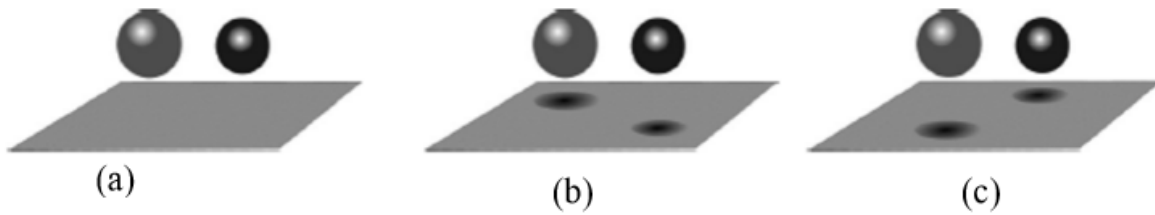


Figure 2—19: Importance des ombres pour la compréhension d’une scène. (a) Scène sans ombre, laquelle des deux sphères est la plus proche? Celle de droite (b) ou celle de gauche (c).

#### 2.8.1.4 Types

Les ombres se classent tout d’abord en trois catégories bien distinctes (Figure 2—20):

- **Les ombres propres** sont les parties des objets non éclairées par une source lumineuse;
- **Les ombres portées** sur une surface sont le résultat de l’obstruction de la lumière par un objet;
- **La pénombre** se situe à la périphérie des ombres portées, quand un point n’est éclairé que par une partie de la source lumineuse. Elle constitue la transition entre une zone éclairée et une ombre.

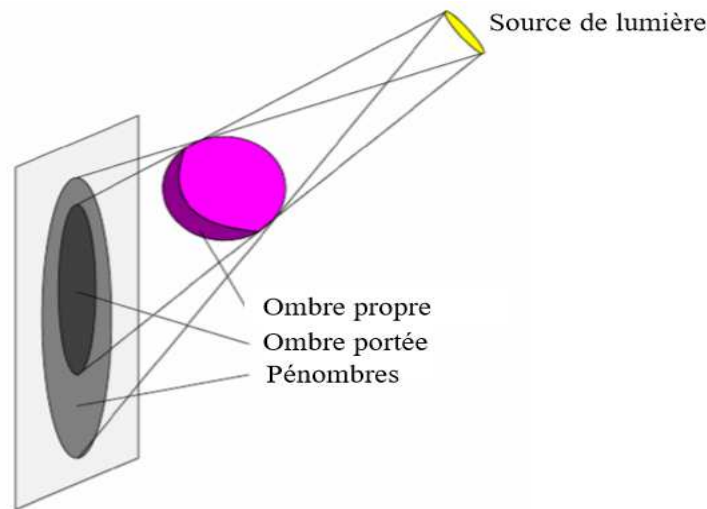


Figure 2—20: Différentes ombres présentes dans une scène.

On peut encore différencier deux types d’ombres ():

- **Les ombres dures:** Le concept d’ombre est souvent vu comme un concept binaire, i.e., un point est dans l’ombre ou il ne l’est pas, ceci correspond à des ombres dures.
- **Les ombres douces** qui n’utilisent pas la distinction binaire des ombres dures. Il existe trois cas: la source est totalement visible, la source est partiellement visible (zone de pénombre), la source est complètement occultée (zone d’ombre).

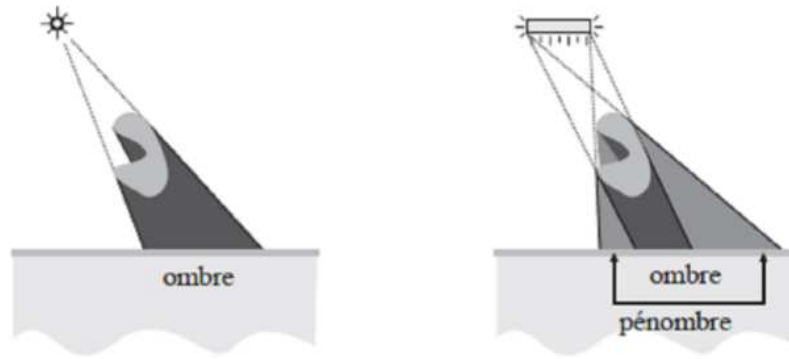


Figure 2—21 : Ombre dure vs ombre douce.

### 2.8.2 Génération d'ombre en rendu surfacique

Le calcul d'ombre consiste à identifier les parties de la scène qui sont cachées de la source de lumière. Cela revient donc intrinsèquement à un calcul de visibilité selon le point de vue de la lumière.

#### 2.8.2.1 Méthode basée sur le tampon de profondeur: Shadow Mapping

L'algorithme des cartes d'ombre (Williams, 1978) se fait en deux passes de rendu:

1. Premièrement, la scène est rendue du point de vue de la source de lumière en sauvegardant les valeurs dans une carte d'ombre.
2. Ensuite, un rendu de la scène est fait du point de vue de la caméra, en utilisant la carte d'ombre pour déterminer les parties éclairées ou dans l'ombre. Pour déterminer si un point est dans l'ombre, on le projette dans la carte d'ombre de la lumière et on compare la profondeur résultant de cette projection à la profondeur contenue dans la carte d'ombre. Si la profondeur de la carte d'ombre est plus petite, le point est dans l'ombre, sinon il est éclairé (voir figure 2.7).



Figure 2—22: Méthode des cartes d'ombres (SMg). Gauche: vu de la caméra. Droite: tampon de profondeur vu de la lumière (Hasenfratz et al., 2003).



Le problème majeur de l'algorithme est la possibilité qu'un aliassage très visible apparaisse au niveau des contours des ombres (Figure 2—23). Plusieurs techniques ont donc été proposées pour atténuer ce problème. Comme cet aliassage ne sera présent qu'aux frontières de l'ombre, un réflexe intuitif serait de filtrer le résultat du SM, de façon à masquer l'aliassage. Reeves et al. proposent leur algorithme de filtrage, le Percentage Closer Filtering (PCF) (Reeves et al., 1987), qui effectue le test de la profondeur sur plusieurs pixels voisins du SM, de façon à obtenir des tons de gris aux frontières de l'ombre. Le PCF diminue de beaucoup l'aliassage, mais pour des tailles de filtre assez coûteuses. Le matériel graphique moderne implante une version simplifiée de cet algorithme, sous la forme de filtrage bilinéaire des textures de profondeur.



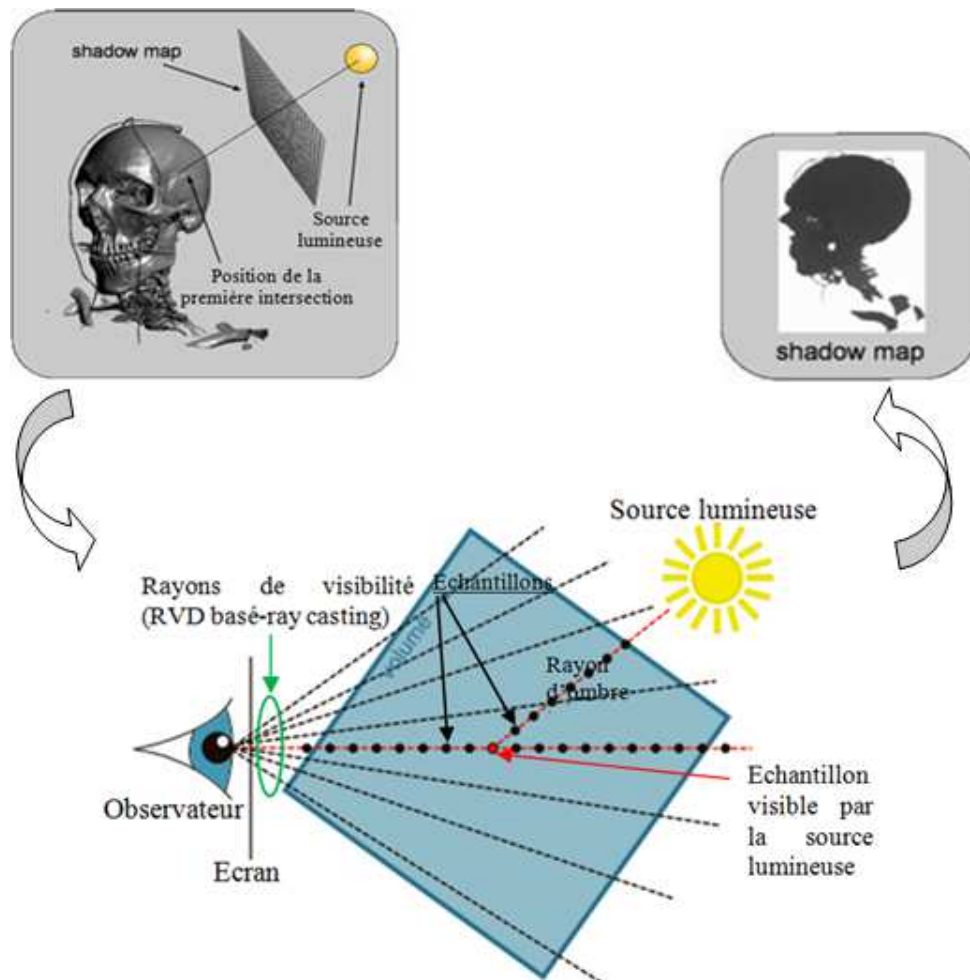
**Figure 2—23: Rendu d'une image en utilisant SMg (St-Amour, 2004).**

### **2.8.3 Quelques travaux antérieurs: ombre et rendu volumique**

Divers algorithmes de calcul d'ombre ont été développés dans le domaine de l'infographie. Crow a proposé une technique de volume d'ombre pour générer des ombres pour des scènes contenant des données polygonales (Crow, 1977). Pour calculer les ombres d'un objet, sa silhouette est extraite et extrudée dans la direction des rayons lumineux afin de générer des polygones d'ombre qui forment le volume d'ombre d'un objet. Pendant le rendu, chaque objet est testé s'il se trouve à l'intérieur ou non d'un volume d'ombre, et donc on peut déterminer si l'objet est ombré.

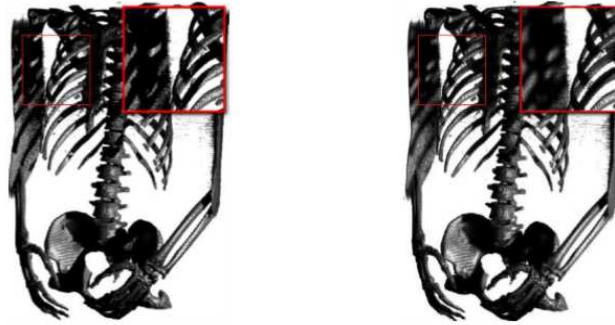
En raison de la nature polygonale de cet algorithme, il n'est pas adapté au rendu volumique, une autre approche de génération d'ombres pour le rendu de données polygonales

est SMg qui a été présentée en 1978 par Williams (Williams, 1978). MSg est une approche basée sur l'image qui exploite une passe de rendu supplémentaire dans laquelle la scène est rendue du point de vue de la source lumineuse afin de déterminer les structures les plus proches de la source lumineuse (voir Figure 2—24).



**Figure 2—24: SMg exploite une seule texture qui sauvegarde les informations de visibilité à partir de la source lumineuse.**

L'un des avantages de SMg est la possibilité d'approximer les ombres douces exploitant le PCF. La Figure 2—25 illustre le rendu d'ensemble de données médicales avec les ombres dures et les ombres douces obtenues par l'application du PCF.



**Figure 2—25:** Le rendu d'un ensemble de données de  $256 \times 256 \times 512$  voxels avec les ombres dures (à gauche) et des ombres douces en utilisant le SMg exploitant le PCF (à droite).

Mais le SM n'est pas toujours efficace pour réaliser un rendu volumique car les données volumiques sont de nature discrète qui n'est pas toujours surfacique. Les deux travaux (Nulkar and Mueller, 2001; Zhang and Crawfis, 2002) utilisent le splatting pour produire des ombres en rendu volumique. La méthode de Nulkar and Mueller utilise un algorithme de splatting de deux étapes pour ajouter les ombres (Figure 2—26): la première consiste à construire un volume de lumière pour stocker la lumière arrivante à chaque voxel et ne doit pas être recalculée sauf dans le cas de déplacement de la source lumineuse. Pour réaliser cette étape, le volume est divisé rapport à la source lumineuse en utilisant l'algorithme de splatting aligné image et stockent les valeurs d'opacité de chaque pixel pour chaque tranche. Le pipeline de rendu forme la deuxième étape en divisant le volume par rapport à l'observateur, mais l'interpolation de la contribution de lumière est réalisée à partir du volume de lumière au lieu d'utiliser l'intensité constante de la source lumineuse.

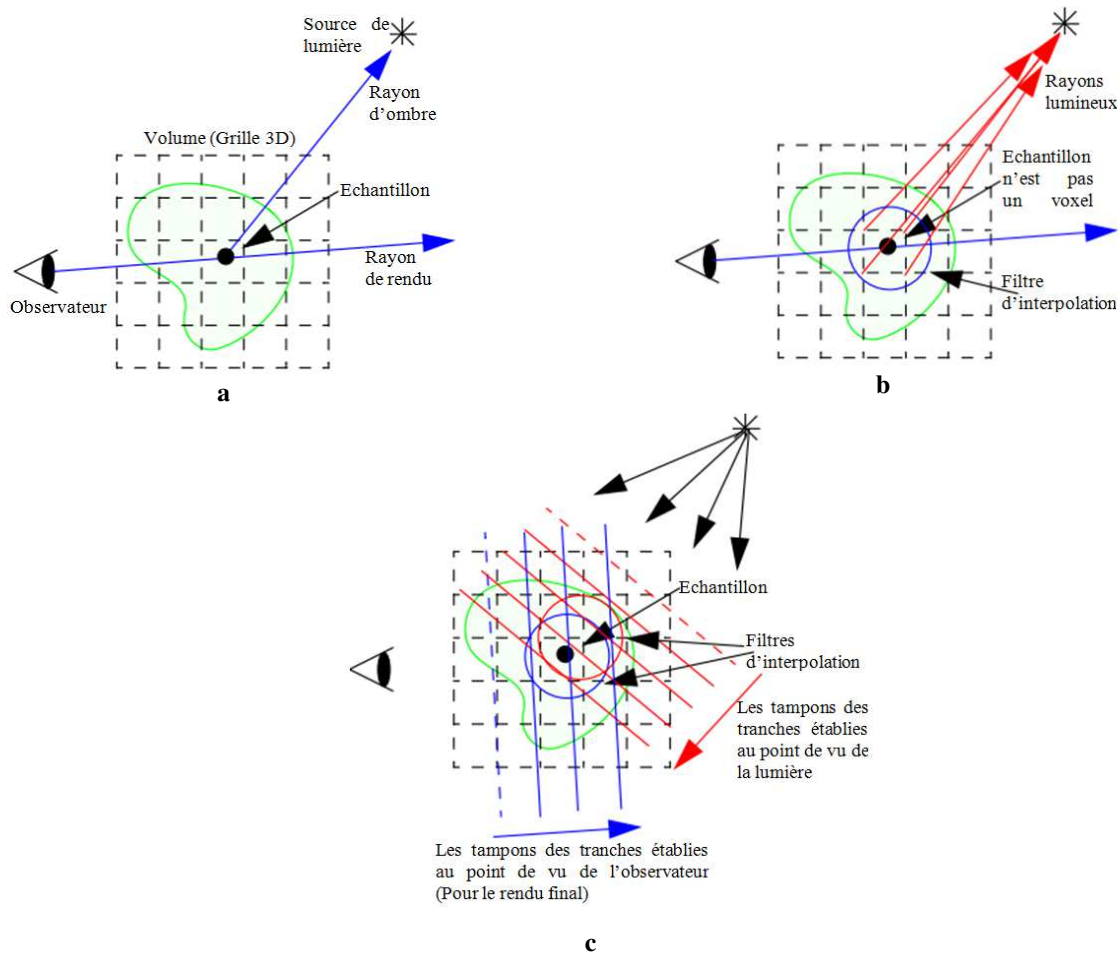


Figure 2—26: Splatting pour le rendu et le calcul d'ombre (Nulkar and Mueller, 2001).

Le pré-calcul d'un volume de lumière en utilisant ray-casting consiste à construire préalablement un volume lumineux, dans lequel chaque voxel contient la quantité de lumière reçue. Le deuxième volume à générer par cette méthode est un volume d'ombre qui stocke les atténuations, ce volume d'ombre n'est pas binaire comme le cas des approches polygonales, mais chaque voxel peut prendre des valeurs varie de 0 à 1. La construction du volume de lumière nécessite l'envoi d'un rayon de chaque voxel à la source lumineuse, mesurant l'atténuation de la lumière sur son chemin vers le voxel selon l'équation suivante:

$$C_l(x) = C. \prod_{j=1}^{T/\Delta s} (1 - \alpha(s_j)) \quad s_j = x + r_l \cdot j \cdot \Delta s \quad \text{Équation 2.14}$$

où

- $x$  est un voxel,
- $C_l(x)$  est une fonction appliquée sur les voxels  $x$ ,
- $l$  est une source lumineuse,
- $r_l$  est le vecteur unitaire de la direction qui part de  $x$  vers  $l$

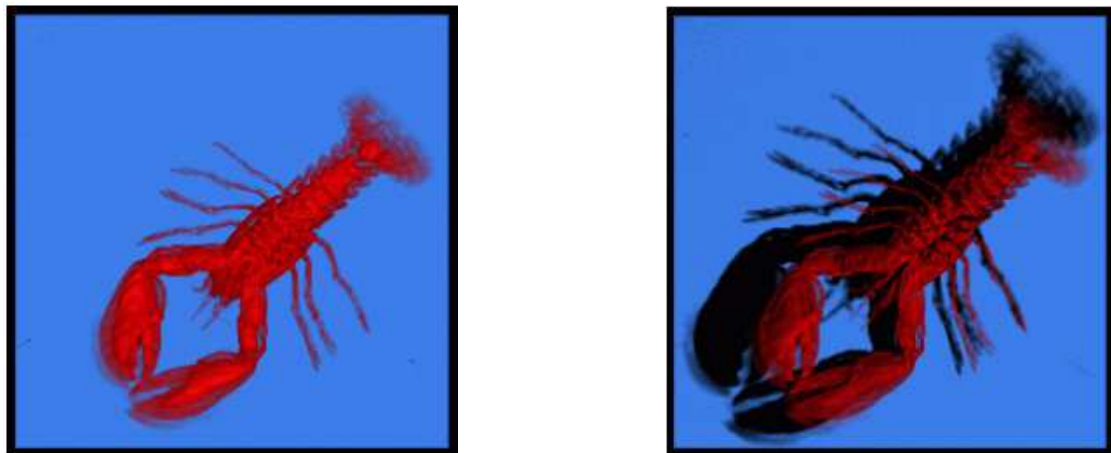
- $C$  est la couleur de  $l$ ,
- $T$  est la distance entre  $x$  et  $l$ ,
- $\Delta s$  est l'intervalle d'échantillonnage du rayon,
- $\alpha(s_j)$  est l'opacité d'un voxel,

Le splatting aide considérablement à réduire la complexité de la construction du volume de la lumière ainsi pour la génération d'image. En appliquant le splatting aligné-image (Figure 2—26 (c)), tous les échantillons  $s_j$  pour tous les rayons sont disponibles dans un seul tampon de tranche et composés d'avant en arrière. Par conséquent, Équation 2.14 devient:

$$C_l(x) = C \cdot \frac{\sum_{l,m} \prod_{k=1}^{l-1} (1 - \bar{\alpha}(s_k)) \cdot \bar{h}(s_{l,m} - x)}{\sum_{l,k} \bar{h}(s_{l,m} - x)} \quad \begin{array}{l} s_l = \text{Position}(l) - r_m \cdot l \cdot \Delta s \\ m = 0, 1, \dots, \text{res} \cdot N^2 \end{array} \quad \text{Équation 2.15}$$

où

- $s_{l,m}$  est l'échantillon numéro  $m$  sur le tampon de la tranche loin de de  $L$  par  $l \cdot \Delta s$ ,
- $h$  est le noyau de l'interpolation,
- $\bar{h}$   $h$  est écrit  $\bar{h}$  car le splatting stocke (sur une ligne de longueur  $\Delta s$ ) la moyenne des valeurs du noyau



**Figure 2—27 : Rendu avec (Droite) et sans (Gauche) ombres (Nulkar and Mueller, 2001).**

Mais cette méthode rend difficile le calcul d'ombres vu la résolution limitée du volume généré pour stocker les opacités.

Zhang and Crawfis ont amélioré le travail précédant en utilisant l'une des méthodes de rendu volumique par splatting dite splatting basé-tranches alignées-image (Mueller and Crawfis, 1998) afin de modéliser l'atténuation de la lumière pour les deux points de vue: l'observateur et la source lumineuse. Les voxels sont classés par tranches alignées parallèlement à l'axe de l'image et, dans chaque tranche, par ordre croissant de leur distance à

l'œil de l'observateur. Après la projection de chaque tranche indépendamment sur le plan de l'image, toutes les tranches sont composées.

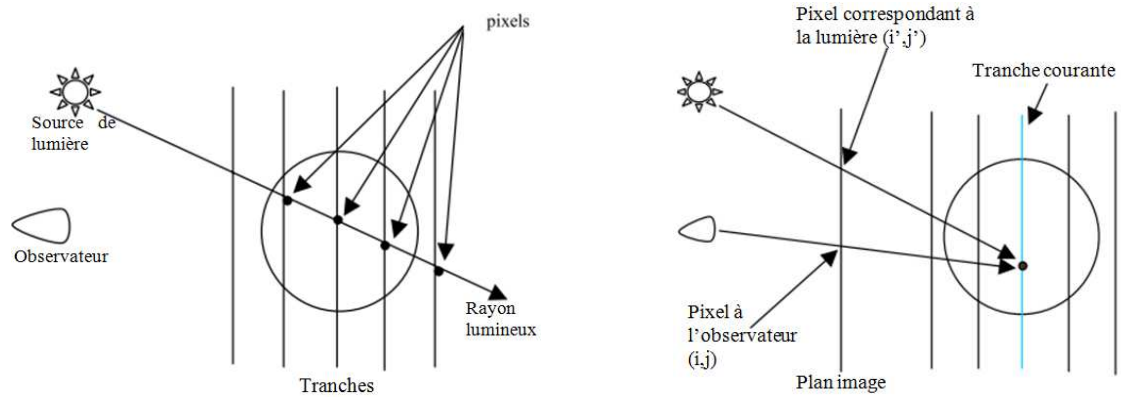


Figure 2—28: Détermination de la valeur d'opacité d'un pixel (Droite) par un modèle d'atténuation de la lumière basé splatting (Gauche) (Zhang and Crawfis, 2002).

La source de lumière est considérée derrière l'observateur, la lumière passant à travers les tranches frontales sera atténuée et générera des ombres sur les tranches arrière le long des rayons lumineux (Figure 2—28, gauche). L'opacité par rapport à la source lumineuse peut également être accumulée en utilisant le ray casting par accumulation.

Pendant le rendu, lorsque l'illumination est calculée pour un pixel sur la tranche courante, l'opacité accumulée de ce pixel est déterminée à partir du tampon d'ombre en plaquant le pixel sur ce tampon. Le pixel sur la tranche courante est d'abord transformé vers l'espace de l'observateur, et ensuite reprojété sur le tampon d'ombre aligné-image comme vu de la source de lumière (Figure 2—28, droite).

Le pixel  $(i, j)$  sur le tampon de la tranche courante peut être plaqué au pixel  $(i', j')$  sur le tampon d'ombre en utilisant la transformation suivante:

$$\begin{pmatrix} i' \\ j' \end{pmatrix} = M_2 M_1^{-1} \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} \quad \text{Équation 2.16}$$

où  $M_1$  est la matrice qui transfère le pixel  $(i, j)$  sur le tampon de la tranche courante au point  $x$  dans l'espace observateur et  $M_2$  est la matrice qui transfère le point  $x$  dans l'espace observateur vers le pixel  $(i', j')$  sur le tampon d'ombre.

Alors, l'intensité de la lumière incidente au point  $x$  est:

$$I(x) = (1.0 - \alpha(x)) * I_{Lumière} \quad \text{Équation 2.17}$$

avec  $\alpha(x)$  est l'opacité accumulée en  $x$  qui est la valeur de la position  $(i', j')$  sur le tampon d'ombre,  $I_{Lumière}$  est l'intensité originale de la source lumineuse.

Cette méthode peut être facilement étendue à plusieurs sources de lumière en utilisant plusieurs tampons d'ombre.

Quoique que les ombres douces améliorent considérablement la perception, les algorithmes traditionnels de calculs d'ombre réduisent la luminance dans les régions de volume dans l'ombre menant à une perte d'information. C'est la raison qui pousse les illustrateurs médicaux à diminuer la réduction de la luminance dans les zones d'ombre en ajoutant une couleur dite composant chromatique afin de compenser les régions de faible luminance. Pour résoudre un tel problème dans le rendu illustratif (Grabli, 2005; Thollot, 2009), Šoltészová et al. (2011) introduisent un attribut scalaire  $so$  pour chaque voxel représentant une ombre calculée en utilisant un algorithme quelconque de calcul d'ombre, pour cela ils définissent deux fonctions de transfert  $FT_1$  et  $FT_2$ :

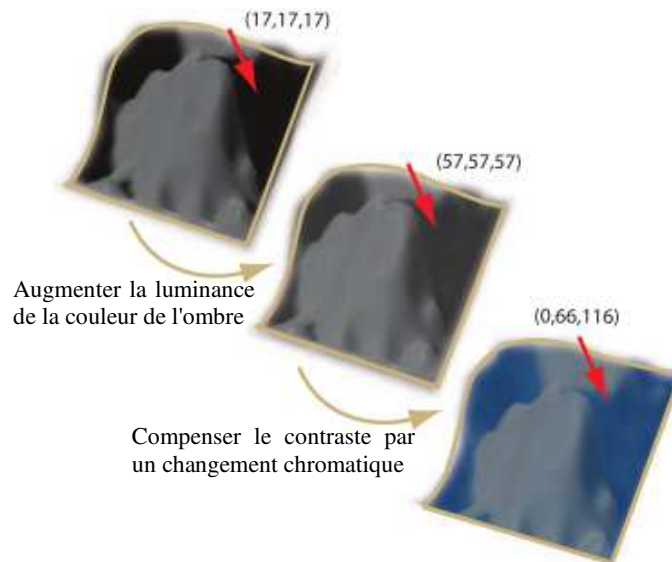
- $FT_1$  (voir Équation 2.18) plaque la valeur scalaire initiale  $s$  de chaque voxel à un paire couleur et opacité  $(c_1, \alpha_1)$ ,
- $FT_2$  (Équation 2.19) plaque l'ombre  $so$  de chaque voxel à une couleur  $c_2$  et un facteur de mélange  $\alpha_2$  qui est linéairement proportionnel avec  $so$ .

$$FT_1: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^4, FT_1(s) = (c_1, \alpha_1) \text{ et } c_1 \in \mathbb{R}^3 \quad \text{Équation 2.18}$$

$$FT_2: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^4, FT_2(so) = (c_2, \alpha_2) \text{ et } c_2 \in \mathbb{R}^3 \quad \text{Équation 2.19}$$

Ensuite, la couleur finale de chaque voxel est obtenue en mélangeant sa couleur  $c_1$  avec sa couleur d'ombre  $c_2$  en fonction de sa valeur de  $\alpha_2$ , comme il est indiqué dans Équation 2.20.

$$c = (1 - \alpha_2)c_1 + \alpha_2c_2 \quad \text{Équation 2.20}$$



**Figure 2—29: Un exemple des ombres chromatiques. La flèche pointe vers la région où les caractéristiques ne sont visibles que dans l'ombre chromatique (Šoltészová et al., 2011).**

En infographie, les techniques approxinant les ombres utilisent la multiplication de la couleur:  $r, g, b \in [0, 1]$  par le degré de leur ombre  $so \in [0, 1]$ .  $so = 0$  signifie l'obscurité totale où les couleurs deviennent noires et  $so = 1$  signifie qu'aucune ombre existe; les couleurs restent inchangées. Par conséquent, les zones d'ombre deviennent plus sombres ce qui améliore la perception de la profondeur. Malheureusement, l'assombrissement est contrôlé uniquement par la scène et la configuration de la lumière, ce qui ne permet pas d'assurer que les zones dans l'ombre ne deviennent pas complètement noires et masquent toute l'information visuelle. Lorsque la scène ne contient pas des ombres, les informations visuelles dans des zones resteront, mais les indices de la profondeur des ombres sont perdus. Dans la visualisation volumique, les deux aspects sont importants: la quantité d'informations communiquées à partir de l'image est cruciale et ainsi des indices de profondeur pour une meilleure compréhension de données 3D.

Šoltészová et al. ont observé que les illustrateurs évitent toujours d'exprimer les ombres en mélangeant la couleur de l'objet avec une couleur noire. Alors, ils ont suggéré une fonction de transfert d'ombre  $FT_2$  spécifique conçue avec un illustrateur médical qui déplace la couleur de l'ombre  $c_2$  vers le bleu. Leur illustrateur médical a indiqué que la couleur bleue est un choix optimal car elle utilise partiellement le contraste de luminance.



## 2.9 Occultation ambiante

### 2.9.1 Idée

Le système visuel humain ne peut pas détecter les erreurs de faibles variations de la lumière, par conséquent, des approximations visuellement convaincantes de l'illumination globale peuvent être réalisées avec des simplifications de transport de la lumière. Certains scientifiques se sont attachés à savoir quelles étaient les meilleures conditions environnementales pour la perception humaine. La contribution de la lumière du voisinage apporte des informations importantes à l'œil humain (Langer and Bülthoff, 2000). L'éclairage indirect peut donc être approximé en considérant que la géométrie voisine peut bloquer la lumière incidente. Cette technique est appelée l'occultation ambiante OA, elle calcule l'accessibilité de la lumière en un point et mesure combien ce point est exposé à son environnement. Elle peut capturer les ombres créées par la lumière indirecte qui est bloquée de manière uniforme dans toutes les directions (lumière ambiante).

Une source lumineuse influe sur l'éclairage d'une surface suivant les objets présents dans son environnement. Les zones bénéficiant davantage de lumière sont très lumineuses, par contre un objet qui ne bénéficie de pratiquement aucune source lumineuse, est très assombri. C'est ce que l'on appelle l'occultation à la lumière ambiante. De plus, un objet peut réfléchir la lumière et devenir lui-même une source venant éclairer son environnement, ce phénomène est l'illumination globale. Prenons pour exemple (Figure 2—30) ce modèle 3D où l'OA permet d'afficher plusieurs nuances de clarté.

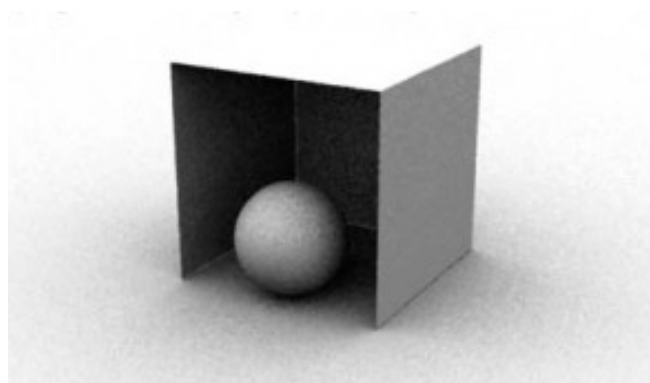


Figure 2—30: Exemple d'OA.

La face supérieure du cube est blanche, on déduit la présence d'une source lumineuse venant du dessus. La face du cube, à droite de l'image, est plus sombre car la perspective empêche l'accès de la lumière dans sa totalité. La sphère contient des nombreuses nuances de

gris issues de la réflexion du sol. L'intérieur du cube est sombre et seulement éclairé par la réflexion du sol et de la sphère.

Pour un point d'une surface, OA atténue la lumière incidente dans toutes les directions dans l'espace en mesurant les occultations dans le voisinage local du point considéré. Afin de réaliser cette technique, l'occultation est calculée en échantillonnant le voisinage de chaque voxel pour avoir plusieurs directions.

### **2.9.2 Obscurance**

La notion d'obscurance a été introduite par Zhukov et al (1998) et Iones et al. (2003). L'objectif de leur travail était d'illuminer une géométrie polygonale et réaliser une illumination ambiante plus convaincante que celle offerte par l'éclairage Blinn-Phong dans le cas où les méthodes coûteuses en temps de calcul comme la radiosité devraient être évitées. L'obscurance permet d'obtenir cet effet qu'on ne pouvait jusqu'alors obtenir qu'en calculant l'illumination globale et qui consistait en une représentation des objets éclairés de manière diffuse. L'effet de cet éclairage permet de présenter des zones plus occultées, plus assombries.

En modélisation surfacique, le calcul de l'obscurance (Figure 2—31 (a)) consiste simplement à évaluer combien la géométrie avoisinante d'un point lui bloque la lumière. En pratique, un point très bloqué par la géométrie avoisinante est perçu comme sombre, alors qu'un point ouvert sur l'extérieur recevra plus de lumière. Le fait que le calcul dépende uniquement de la géométrie avoisinante est un grand avantage pour cette technique, en effet une fois l'obscurance calculée pour une scène, elle va rester la même pour n'importe quelle variation des conditions d'éclairage directe ou ambiante. Zhukov et al ont proposé principalement cette technique pour les jeux vidéo, où les facteurs d'obscurance étaient pré-calculés, puis stockés dans des textures associées aux objets.

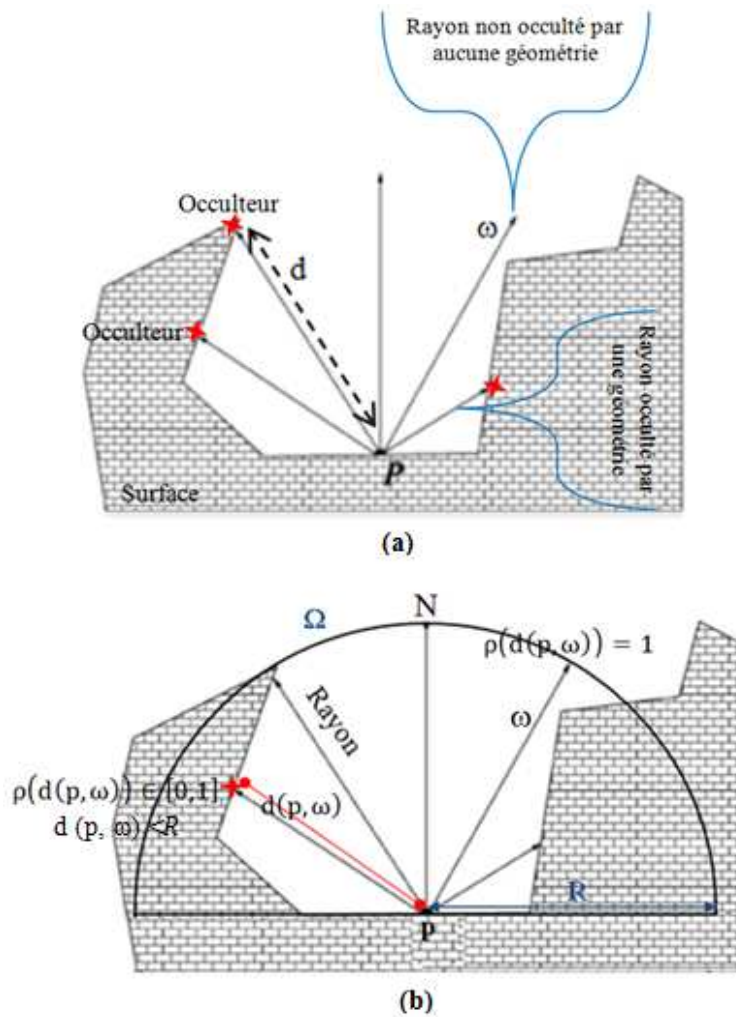


Figure 2—31: Accessibilité d'un point par obscurance.

La technique consiste à analyser la géométrie représentant le voisinage point d'un  $p$  en tenant en compte la distance  $d$  (Figure 2—31 (b)). Cette distance influence l'éclairage de  $p$ : si  $d$  est petite,  $p$  reçoit moins de lumière, et vice-versa si  $d$  est grande. La fonction  $Obs_p$  (Équation 2.21) implique l'information d'occultation (ou l'ouverture) de l'environnement du point  $p$ . Les deux cas extrêmes sont  $Obs_p = 0$  et  $Obs_p = 1$  où la valeur de obscurance 1 signifie que le point est complètement ouvert c.à.d. non occulté et la valeur 0 signifie qu'il est complètement occulté.

$$Obs_p = \frac{1}{\pi} \int_{\omega \in \Omega} \rho(d(p, \omega)) (N \cdot \omega) d\omega \quad \text{Équation 2.21}$$

Où :  $\Omega$  est l'hémisphère centré à  $p$  construite selon la normale  $N$ .  $\Omega$  représente toutes les directions entrantes possibles  $\omega$ .  $\Omega$  est définie par son centre  $p$  et son rayon  $R$ .

$d(p, \omega)$  est la distance entre  $p$  et la première intersection d'un rayon lancé avec comme origine le point  $p$  dans la direction  $\omega$ .  $d(p, \omega)$  varie de 0 vers une certaine valeur prédéfinie  $d_{max}$ ,

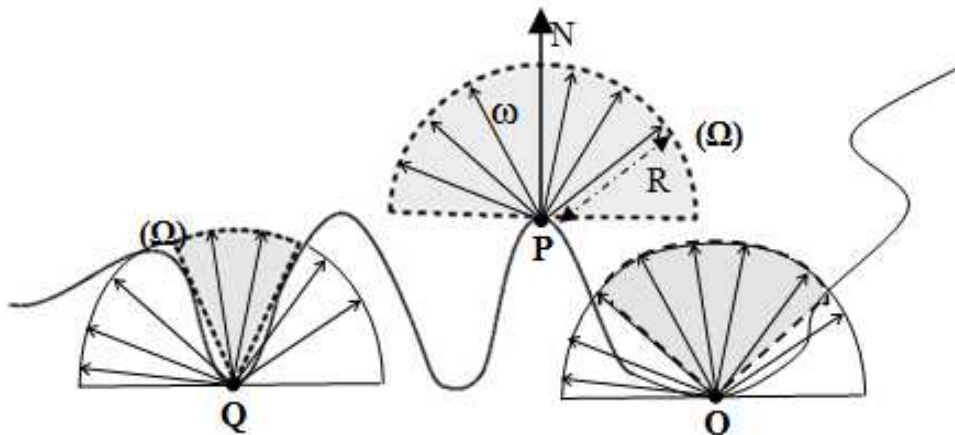
$\rho(d(p, \omega))$  est une fonction continue de distance variant entre 0 et 1, elle indique l'intensité de la lumière entrante à la direction  $\omega$ ,  $\rho(d(p, \omega))$  diminue de 1 à 0. Du fait qu'uniquement le voisinage de  $p$  est considéré,  $\rho$  prend 1 pour toutes les distances supérieures à  $d_{max} = R$ .

$(N \cdot \omega)$  est le produit scalaire entre la normale  $N$  sur point  $p$  et la direction  $\omega$ . L'intégration est effectuée dans l'hémisphère  $\Omega$  orienté selon  $N$ .

### 2.9.3 Occultation Ambiante

OA a été présentée par Bredow (2002) et Landis (2002) pour le moteur de rendu Renderman. Cette technique diffère de l'obscurance dans le sens où l'OA représente simplement un pourcentage d'ouverture d'un point (Figure 2—32), alors que l'obscurance tient compte de la distance à laquelle se trouve l'objet occulteur.

Pour l'approximation de la lumière ambiante, on suppose que la lumière soit uniforme, comme l'obscurance, le calcul de l'OA d'une scène s'effectue typiquement en pré-calcul par lancer de rayons. Le principe de base d'OA est d'estimer la lumière incidente à un point  $p$  en lançant dans toutes les directions de l'hémisphère qui entoure la surface où le point  $p$  appartient. Si les rayons interceptent des occulteurs, alors la radiance est réduite. Un objet illuminé par l'OA avec une surface matte et apparaît comme s'il est illuminé dans un jour couvert.



**Figure 2—32: Degré d'ouverture des points de surface: les rayons des régions grises sont non occultés et ceux des régions en blanc sont occultés. P est complètement visible, Q et O sont partiellement visibles.**

L'effet principal de ce facteur est l'amélioration du réalisme par l'ajout des ombres douces et des auto-ombres. De plus, ce calcul permet d'obtenir un effet intéressant à moindre coût par rapport au calcul de l'illumination globale avec des méthodes de radiosité ou de lancer de rayon type raytracing. Cependant, le coût nécessaire est plus important en

comparant avec celui du terme ambiant classique. OA (Méndez-Feliu and Sbert, 2009) effectue l'approximation des ombres sur une surface en supposant que la lumière émise dans toutes les directions est constante, en mesurant le pourcentage des directions d'éclairage possibles qui sont visibles à partir d'un point de surface donnée, et d'atténuer dépendamment la couleur de surface à ce point. OA est représentée par une valeur réelle positive définie pour chaque point pour montrer la proportion de ses voisins occulteurs. Cette valeur est ensuite utilisée pour remplacer le terme ambiant constant dans les modèles d'ombrage directs.

Formellement, la formule d'obscurance est simplifiée en remplaçant la fonction  $\rho$  par une fonction binaire de visibilité  $V$  comme suit:

$$AO_p = \frac{1}{\pi} \int_{\omega \in \Omega} V(p, \omega) (N \cdot \omega) d\omega \quad \text{Équation 2.22}$$

où  $N$  est la normale de la surface. Cette approche utilise le principe de tout ou rien à cause de la définition de la fonction de visibilité  $V$  donnée dans l'équation suivante:

$$V(p, \omega) = \begin{cases} 0, & \text{p est occulté par une géométrie dans la direction } \omega \\ 1, & \text{sinon (la lumière arrive au point p dans la direction } \omega) \end{cases} \quad \text{Équation 2.23}$$

$AO_p$  varie de 0 à 1 grâce au facteur de normalisation  $1/\pi$ . Lorsque  $AO_p$  est 0,  $p$  est totalement bloqué de la lumière; quand il est égal à 1,  $p$  est totalement exposée. Donc, OA correspond à la quantité visible de  $\Omega$ . Pour cette raison, les zones concaves, telles que les trous, apparaissent plus foncées que les zones exposées.

## 2.10 Conclusion

Ce chapitre nous a donc permis d'exposer les notions fondamentales du rendu volumique en commençant tout d'abord par la définition de l'élément-clé de ce domaine: les données volumiques, suivie par quelques concepts radiométriques très utilisés dans cette thèse. Après, nous avons présenté les méthodes de rendu des données volumiques du type scalaire que nous utilisons dans notre travail. Etant donné que les ombres jouent un rôle critique à l'amélioration de la qualité du rendu volumique, nous avons étudié ses différents types et composants en détaillons principalement l'une des méthodes de génération d'ombres très connue en rendu surfacique dite SM, nous avons aussi présenté quelques travaux effectués pour intégrer les ombres dans le rendu volumique. Enfin, la technique d'OA est décrite profondément en laissant son utilisation en rendu volumique dans le prochain chapitre.

---

## Chapitre 3 — Occultation ambiante volumique

---

### 3.1 Introduction

Dans la visualisation scientifique des champs scalaires 3D, l'amélioration de la perception est un objectif majeur pour de nombreux chercheurs. Le but d'un modèle d'illumination, dans les deux types de rendu surfacique et volumique, est la simulation des interactions lumineuses du monde réel. L'utilisation d'un modèle d'illumination a un impact majeur sur la compréhension spatiale (Langer and Bühlhoff, 2000). Dans ce contexte, l'ombrage est d'une importance primordiale, car il facilite la compréhension en permettant à l'œil humain de percevoir les positions relatives des objets dans l'espace. Le modèle d'illumination du Phong est un modèle d'illumination locale qui considère uniquement l'illumination directe c.à.d. l'illumination venant directement à partir de la source lumineuse et néglige l'influence de l'illumination indirecte provoquée par l'interaction de la lumière avec les autres objets. Cependant, pour approximer aussi les effets de l'illumination indirecte, le terme *ambient* est souvent utilisé. La lumière ambiante est une lumière sans origine et sans direction qui a un effet identique sur tous les objets de la scène, même les objets qui ne sont pas directement face à la lumière (par exemple le soleil) finissent par être éclairés. OA permet d'assombrir les zones naturellement difficiles d'accès à la lumière et de faire apparaître le relief des objets, là où les objets sans l'application de cette technique (ou une autre technique plus élaborée), apparaissent entièrement plats. Comme cette méthode est proche de solutions physiquement correctes comme l'illumination globale, elle plait en générale aux yeux et donne une impression naturelle.

L'objectif de ce chapitre est d'établir un état de l'art en matière d'ombrage basé OA pour le rendu volumique. Nous décrivons les différentes méthodes basées sur des modèles volumiques ou des ensembles de données. Nous proposerons tout d'abord les critères de classification des principaux travaux basés sur la technique d'OA dans le rendu volumique, nous présenterons ensuite les travaux antérieurs qui proposent des différentes formes d'OA pour réaliser un ombrage volumique interactif. Finalement, nous aborderons les recherches essentielles lesquelles orienteront la suite du travail.

### **3.2 Critères de classification des travaux antérieurs**

Avant de présenter les méthodes existantes, nous exposons un récapitulatif sur les différentes caractéristiques qui nous permettent de les catégoriser. Le fait que le calcul dépend ou non de la fonction de transfert est considéré comme l'un des critères d'évaluation d'une méthode, cela implique le recalcul des facteurs d'occultation en cas de changement de la fonction de transfert. Le deuxième critère concerne le type d'implémentation réalisée, c'est-à-dire est ce que l'approche est mise en œuvre sur CPU, GPU ou les deux à la fois on parle alors d'une approche hybride. Le type de calcul représente le troisième critère, il s'agit de vérifier si l'approche nécessite une étape de précalcul ou si le calcul se fait à la volé. L'espace de travail est un autre critère pour classer les méthodes, il signifie qu'une méthode utilise l'espace objet où on travaille sur les données directement ou l'espace écran qui indique le travail se fait lors la génération de l'image. Finalement, le type d'échantillonnage utilisé à un rôle important pour classer les travaux.

La majorité des méthodes de calcul de l'OA que nous allons présenter dépendent de la fonction de transfert, ce qui implique que la modification de cette dernière provoque un nouveau calcul des facteurs d'occultation. C'est pour cela que ce temps de calcul doit être minimisé. Les méthodes calculant à la volée ne sont quant à elles pas touchées par ce phénomène, car le calcul de d'occultation est directement intégré dans la phase de rendu et c'est donc sur ce plan que l'impact de performance se fait. Certaines méthodes ont essayé d'éviter l'utilisation de la fonction de transfert en se basant sur les densités, mais elles induisent des temps de calcul plutôt de l'ordre des minutes, voire de la dizaine de minutes.

Concernant le type d'échantillonnage réalisé (Humphreys and Pharr, 2004; Kratz et al., 2011; Krüger, 2010; Lin et al., 2013; Vivanloc, 2008), il y a plusieurs approches pour les méthodes travaillant en espace objet. Certaines se basent sur le lancer de rayons et permettent de conserver la position relative des voxels dans le voisinage d'un voxel considéré.

### **3.3 Intégration de l'OA dans la visualisation volumique**

Plusieurs recherches sont réalisées pour simuler l'illumination. Cependant, les volumes médicaux sont souvent des ensembles de données larges ce qui nécessite de concevoir une méthode d'illumination de tel sorte les calculs peuvent être réalisés à un

fps interactif. Le besoin de percevoir correctement les volumes médicaux implique une forte demande sur les techniques utilisées.

Après avoir introduit l'origine de l'exploitation de l'OA dans le rendu volumique, nous présentons les différentes recherches sur l'utilisation de cette technique (Jönsson et al., 2014; Krone et al., 2016; Peters, 2014; Rostamzadeh et al., 2013) pour réaliser l'une des tâches suivantes sur les données volumiques: le calcul d'ombrage, la classification automatique afin d'avoir des fonctions de transfert plus efficaces et la segmentation 3D.

### **3.3.1 Idée et Origine**

Vicinity shading ou ombrage de proximité, présenté par Stewart (2003) est la première approche de l'utilisation de l'OA dans le domaine de la visualisation volumique. Pour lui, tant que les facteurs d'occultation permettent d'améliorer la perception des surfaces en visualisation surfacique, ils peuvent jouer le même rôle dans le cas des isosurfaces en visualisation volumique. Dans une étape de prétraitement, un volume d'ombrage est calculé sur CPU en utilisant un lancer de rayons et stocké dans une texture pour être accédée pendant le rendu. Chaque rayon est lancé en utilisant un algorithme de Bresenham (Bresenham, 1965, 1977; Jia et al., 2008; Pitteway and Watkinson, 1980) étendu en 3D, afin de garantir que chaque voxel n'est utilisé que pour un seul rayon.

Ce travail se base sur l'idée d'obscurances vue dans la section 2.9 du chapitre précédent où le voisinage de chaque voxel est limité à une sphère de rayon  $r$ . Pour déterminer si un voxel  $x$  est occulté, Stewart utilise les valeurs de densité associées aux voxels rencontrés le long de chaque rayon lancé où un voxel de densité supérieure à celle de  $x$  est considéré comme un occulteur de la lumière incidente à  $x$ . Une pondération basée sur la distance du voxel initial au voxel occultant (Obscurance) est utilisée.

En se basant sur la méthode de l'ombrage volumique de Levoy (1988), Stewart suppose que la lumière arrive à chaque point sans aucune atténuation dans l'espace du voisinage, mais la lumière réfléchiée d'une surface peut subir des atténuations le long de son trajet vers l'observateur.

L'objectif est de calculer pour  $x$  un seul coefficient entre 0 et 1 qui représente la réduction de la lumière à  $x$  due aux occultations dans le voisinage. Le volume de la lumière constitué de tous ces coefficients sera utilisé ensuite lors de rendu.



En appliquant l'équation de rendu de Kajiya (1986), l'éclairement  $E(x)$  arrivant à  $x$  est calculé comme suit:

$$E(x) = \int_{\Omega} N \cdot L(\omega) d\omega \quad \text{Équation 3.1}$$

La normale  $N$  de  $x$  prend la valeur du gradient normalisé de champs de densités à  $x$ .  $L(\omega)$  est la luminance incidente dans la direction  $\omega$  écrite sous forme un vecteur ayant une magnitude identique à la luminance.  $\Omega$  est l'ensemble des directions sur une surface tel que  $N \cdot \omega > 0$ .

Pour calculer cette équation, le domaine  $\Omega$  est discrétisé à  $k$  secteurs avec un angle solide identique  $\Delta\omega$  (Équation 3.2).

$$E(x) \approx \sum_{i=1}^k N \cdot L(\omega_i) \Delta\omega \quad \text{Équation 3.2}$$

Maintenant l'Équation 3.3 normalise  $E(x)$  afin d'obtenir un coefficient entre 0 et 1 qui représente la fraction de l'éclairement total arrivant à  $x$ .

$$\begin{aligned} \tilde{E}(x) &= \frac{\sum_{i=1}^k N \cdot L(\omega_i) \Delta\omega}{\sum_{i=1}^k N \cdot L_{max}(\omega_i) \Delta\omega} \\ \tilde{E}(x) &= \frac{\sum_{i=1}^k L_i \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^k L_i^{max} \cos \theta_i} \end{aligned} \quad \text{Équation 3.3}$$

Où  $\cos \theta_i = N \cdot \omega_i$ ,  $L_i$  es la valeur scalaire de  $L(\omega_i)$ ,  $L_i^{max}$  est la valeur maximale possible  $L(\omega_i)$  et  $\tilde{E}(x)$  est la valeur de vicinity shading que doit être calculé.

### 3.3.1.1 Discrétisation du domaine de voisinage hémisphérique $\Omega$

Stewart propose une technique que nous décrivons ci-dessous et qui est basée sur la définition d'un ensemble de directions  $\omega_i$  dans l'hémisphérique  $\Omega$ :

- (a) Initialement, construire un icosaèdre  $I$  dont les sommets sont situés sur la sphère unitaire,
- (b) Subdiviser chaque face triangulaire en quatre triangles plus petits, dont les nouveaux sommets sont projetés vers l'extérieur sur la sphère unitaire,
- (c) Si troisième itération n'est pas atteinte alors aller à (a)

Par cette procédure, le domaine  $\Omega$  est discrétisé en produisant un ensemble de directions correspondant aux sommets du polyèdre obtenu. Chaque direction  $\omega_i$  correspond à un seul secteur  $\Delta\omega_i$ . Pour un voxel  $x$ , Stewart considère uniquement les secteurs  $i$  qui vérifie la condition suivante:  $N \cdot \omega_i > 0$ .

3.3.1.2 Définitions de  $L_i$  et  $L_i^{max}$

Le calcul de la radiance  $L_i$  pour chaque secteur  $i$  est réalisé en prenant en compte que la lumière est uniforme et diffuse. Donc, si  $L_i$  n'est obscurée ou réfléchiée, elle arrive à  $i$  d'une manière identique dans toutes les directions.

Le voisinage (vicinity) contient un nombre des voxels où chacun est classé à l'intérieur ou à l'extérieur de la surface incluant  $x$  ( $surf(x)$ ). Donc, deux ensembles sont construits:  $I(x)$  et  $E(x)$  tel que:

$$I(x) = \{p \in \Omega, p \text{ est à l'intérieure de } surf(x)\}$$

$$E(x) = \{p \in \Omega, p \text{ est à l'extérieure de } surf(x)\}$$

$I(x)$  peut être écrit en fonction de  $I_i(x)$  qui contient les voxels rencontrés par un rayon dans une direction  $\omega_i$ .

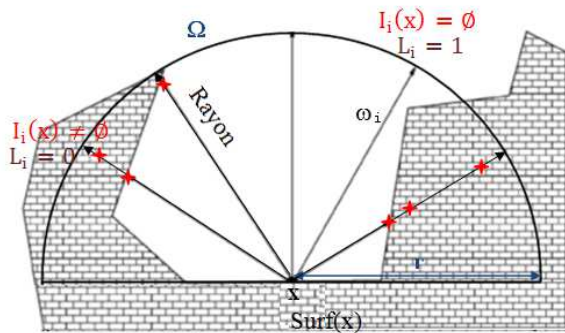
$$I(x) = \bigcup_i I_i(x)$$

Tous les éléments de  $I(x)$  occultent la lumière arrivante à  $x$ .

Pour déterminer la quantité de la lumière qui arrive à  $p$  dans la direction  $\omega_i$ , les voxels situés dans cette direction sont échantillonnés jusqu'à une distance  $r$  à partir de  $x$ . Il y a au moins deux méthodes pour estimer  $L_i$ :

1. *Méthode tout\_ou\_rien* (Figure 3—1) cumule uniquement la lumière qui n'est pas occultée (Équation 3.4) par aucun voxel lorsqu'elle traverse la distance  $r$  à partir de la frontière du voisinage jusqu'à  $x$ . Dans ce cas  $L_i^{max} = 1$ .

$$L_i = \begin{cases} 1, & I_i(x) = \emptyset \\ 0, & I_i(x) \neq \emptyset \end{cases} \quad \text{Équation 3.4}$$



$x$ : Voxel.  
 $Surf(x)$ : Surface où  $x$  appartient.  
 $\Omega$ : Voisinage de  $x$  sous forme d'hémisphère avec une origine  $x$  et un rayon  $r$ .  
 $\omega_i$ : Direction d'un rayon.  
 $I_i(x)$ : Ensemble des voxels intérieurs rencontrés dans la direction  $\omega_i$ .  
 $L_i$ : la radiance dans la direction  $\omega_i$ .

Figure 3—1: Occultation Tout\_ou\_Rien et le calcul de la radiance.

Car l'application de cette méthode donne des images sombrées, Stewart a pensé à estimer  $L_i$  selon une distance non obscurée  $d_o(x, \omega_i)$  à partir de  $x$  dans la direction  $\omega_i$ . Cette méthode dite occultation partielle illumine les espaces trop petits ou fermés, ce qui n'est pas offert avec la méthode tout\_ou\_rien.

2. Avec la méthode d'occultation partielle (Figure 3—2)  $L_i$  prend la valeur de  $d_o(x, \omega_i)$  qui présente la distance à partir de  $x$  au voxel intérieur le plus proche dans la direction  $\omega_i$ .  $L_i^{max}$  est la distance au voxel le plus lointain appartenant au voisinage de  $x$  dans la direction  $\omega_i$ . Notant que  $L_i^{max} \leq r$  mais généralement n'égale pas  $r$ .

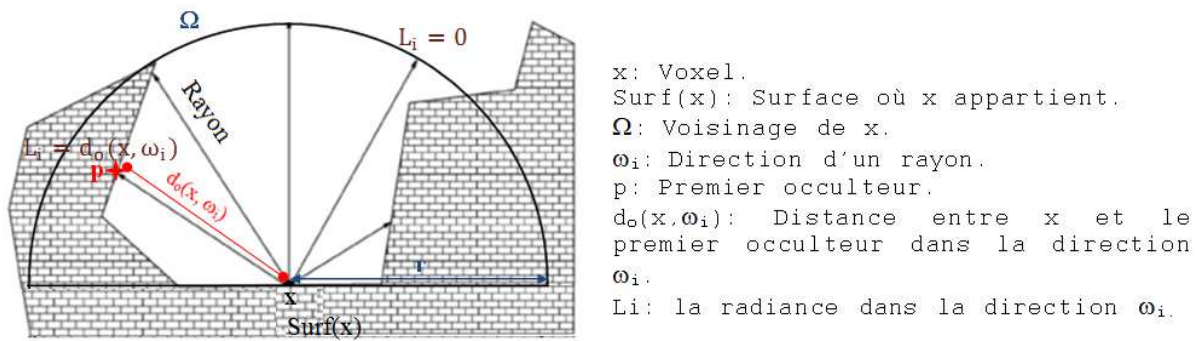


Figure 3—2: Occultation partielle et le calcul de la radiance.

### 3.3.1.3 Optimisation du calcul de $L_i$ et $L_i^{max}$

Dans l'approche de Stewart, la notion de la transparence n'est pas utilisée ce qui signifie que la lumière traversant le volume vers un voxel donné peut soit être bloquée soit continuer son trajet. La lumière incidente à un voxel  $x$  avec une valeur de densité  $d(x)$  est bloquée par tous les voxels  $p$  ayant une valeur de densité  $d(p)$  tel que  $d(p) \geq d(x)$ .

Pour calculer  $\tilde{E}(x)$  (Équation 3.3), les directions  $\omega_i$  sont échantillonnées dans l'espace de  $\Omega$ .  $\omega_i$  est occultée lorsqu'elle intercepte un voxel  $p$  tel que  $d(p) \geq d(x)$ ,  $L_i$  et  $L_{max}^i$  sont déterminées par la méthode d'occultation partielle.

Mais cette méthode est très coûteuse en termes de temps de calcul car elle nécessite pour construire le volume de la lumière d'itérer tous les voxels  $x_i$  afin de calculer leurs éclaircissements  $\tilde{E}(x_i)$  ce dernier à son tour demande d'itérer toutes les directions. Pour  $n$  voxels et  $s$  directions, la complexité de temps d'exécution est  $O(n.s.r)$ .

#### 3.3.1.3.1 Couvrir le volume avec des lignes discrètes disjointes

Le nouvel algorithme exploite l'observation suivante: pour une ligne donnée à travers le volume dans la direction  $\omega_i$ , un voxel dans cette ligne peut être occulté dans la direction  $\omega_i$  seulement par un autre voxel situé sur cette ligne. Il est possible de couvrir le volume avec un ensemble des lignes parallèles à la direction  $\omega_i$  tel que

chaque voxel peut apparaître dans une seule ligne. Donc, chaque ligne peut être traitée indépendamment pour calculer  $L_i$  pour tous les voxels sur cette ligne. On répète ce processus pour chaque direction  $\omega_i$  et cumule les résultats selon Équation 3.3.

La direction dominante d'une ligne est l'axe  $x, y$  ou  $z$  à lequel il elle est plus parallèle. Avec la nature discrète du volume, la ligne discrète dans la direction  $\omega_i$  est l'ensemble fini des voxels énumérés par l'algorithme de Bresenham qui commence par un angle de volume et progresse dans la direction  $\omega_i$  jusqu'à ce qu'elle quitte le volume. L'angle est choisi pour maximiser le nombre des voxels énumérés.

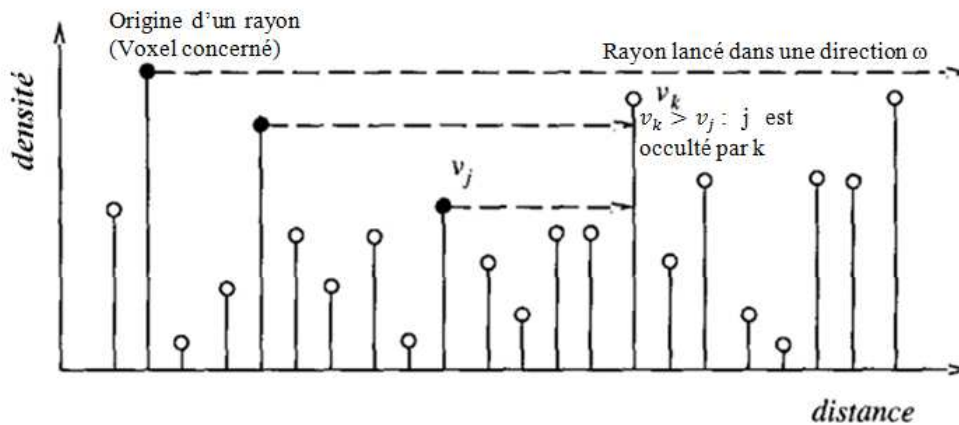


Figure 3—3: Une ligne discrète est pivoté de telle sorte les voxels non occulteurs du voxel correspondant apparaissent au dessous de voxel (Stewart, 2003).

Chaque voxel est considéré comme occulté dès que l'on rencontre un voxel de densité supérieure le long de cette ligne, prenant l'exemple de  $v_j$  qui est occulté par  $v_k$ .

La méthode possède un ensemble d'inconvénients:

- Elle ne supporte pas le color bleeding (Figure 3—4) qui est un terme utilisé en infographie pour décrire comment la couleur d'une surface illuminée influence les surfaces voisines.
- Elle est relativement coûteuse, puisque les résultats présentés pour un jeu de données de taille 2563 annoncent un temps de pré-calcul d'environ 2.7 secondes pour chaque direction  $\omega_i$ .
- Elle nécessite un nouveau prétraitement lié aux modifications des paramètres de rendu.

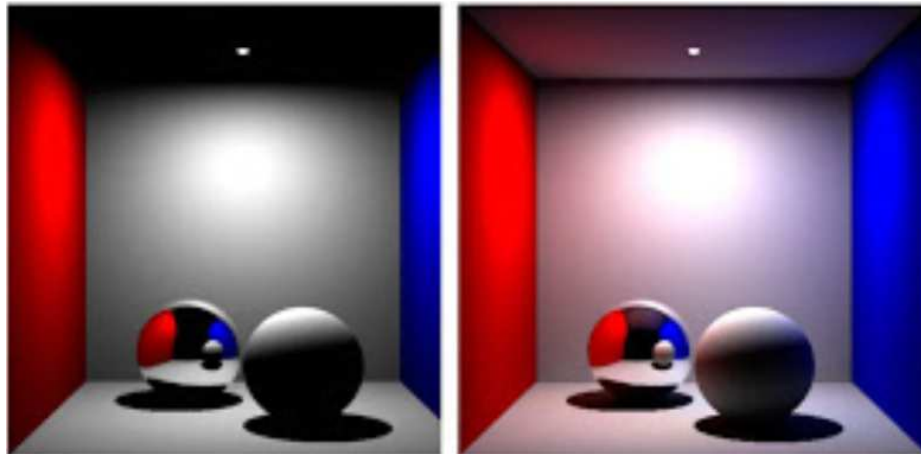


Figure 3—4: Un exemple d’une scène avec l’application de l’illumination directe (gauche) et color bleeding (droite).

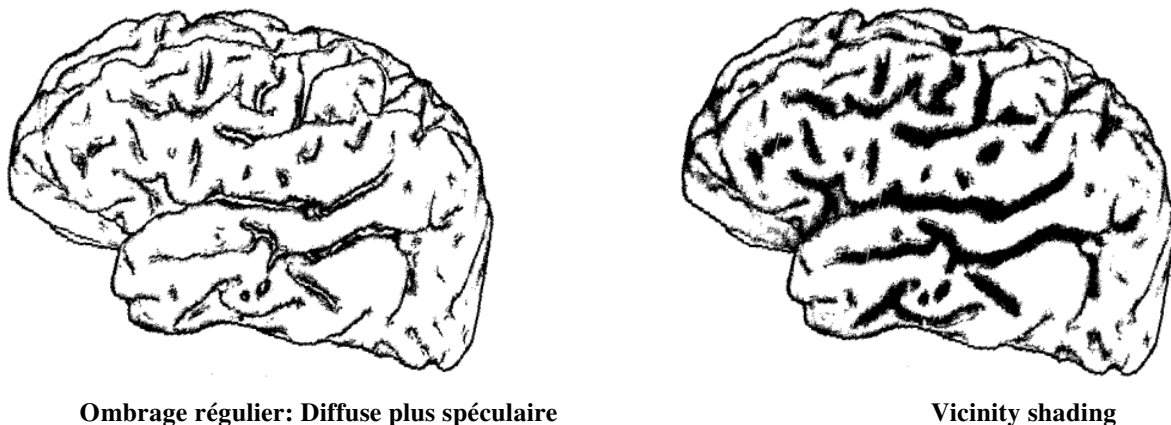


Figure 3—5: L’application de la méthode de Vicinity shading sur un cortex cérébral en utilisant 1272 rayons (Stewart, 2003).

### 3.3.2 OA pour l’ombrage volumique

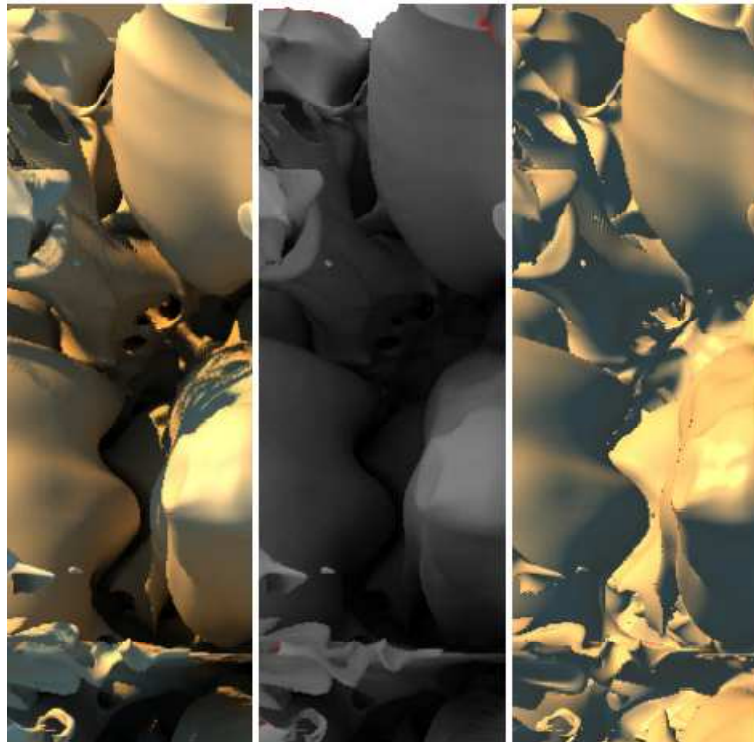
Nous nous introduisons d’abord les méthodes qui calculent l’ombrage dans une phase de pré-calcul, puis les méthodes qui le font à la volée.

#### 3.3.2.1 Méthodes avec phase de pré-calcul

Les méthodes suivantes se basent sur un pré-calcul des facteurs d’OA/Obscurance. Les facteurs sont placés dans un volume de taille identique à la taille des données appelé volume de lumière, puis utilisés pour pondérer la couleur lors de la phase de rendu volumique.

Vicinity shading décrite dans la section précédente présente la base de plusieurs modèles afin d’approximer l’OA pour les iso-surfaces. Wyman et al. (2006) ont présenté une technique pour pré-calculer ou calculer à la volée l’illumination globale pour le rendu interactif d’isosurfaces extraites de données volumiques. Ce travail est motivé par le fait que le rendu des isosurfaces repose uniquement sur un modèle

d'illumination local, tel que l'ombrage de Phong qui peut être couplé à des ombres simples. Pour les régions concaves partiellement éclairées, ces modèles d'ombrage n'arrivent pas à simuler les effets venant de la lumière interrèfléchissante. Ces régions sont généralement dominées par un terme ambiant local qui n'offre aucun effet de la visibilité environnementale ou de la réflexion des surfaces voisines ce qui nous donne des images avec des régions très sombrées (Figure 3—6).



**Figure 3—6: Ensemble de données visualisé par l'application de: (Gauche) Wyman et al. (2006), (Milieu) Vicinity shading (Stewart, 2003) et (droite) Phong.**

Un autre volume sous forme une texture 3D est utilisée pour sauvegarder les valeurs pré-calculées incluant les informations d'illumination du volume à savoir: l'éclairage direct, les ombres et les interrèflexions. Pour une illumination et un volume statiques, une texture scalaire contenant l'éclairement (irradiance) stocke l'illumination globale nécessaire pour toutes les iso-surfaces. Pour la lumière dynamique, des valeurs multiples sont utilisées par texel selon la méthode de Sloan et al. (2002). L'utilisation de ce volume permet d'avoir une manipulation dynamique de point de vue et d'iso-valeur.

Dans (Beason et al., 2006) la méthode présentée peut traiter la translucidité et les caustiques, ne se fonctionne que dans l'éclairage statique. À cet effet, ils extraient des différents iso-surfaces d'un ensemble de données volumiques, pour les illuminer par un ray tracing où les résultats sont sauvegardés dans un nouveau volume. Pendant le rendu,

ils peuvent changer de façon interactive l'iso-valeur et accéder à l'illumination précalculée.

Afin d'accélérer le précalcul, Ritschel (2007) exploite les GPU pour évaluer la fonction de visibilité. L'obtention de cette dernière en utilisant les harmoniques sphériques donne des ombres douces mais nécessite un recalcul pour chaque changement de la fonction de transfert.

Desgranges et Engel (2007) décrivent une approximation de la lumière ambiante moins coûteuse que l'OA en utilisant une combinaison linéaire des volumes d'opacités. L'occultation est approximée par l'application d'une méthode de flou sur l'opacité dans le voisinage de chaque voxel en utilisant différentes tailles de filtre. Pour cela, ils parcourent l'ensemble du volume en utilisant des lignes de balayage, afin de compter les sauts (un nombre  $n$  de voxels supérieur à 0) entre chaque paire de voxels pleins, i.e. un voxel au-dessus d'une certaine opacité après l'application de la fonction de transfert. Ces données sont placées dans un histogramme, et les sauts les plus fréquents sont détectés. Chaque taille de saut  $t$  significative est ensuite utilisée pour générer le "volume de lumière" correspondant. Pour chaque voxel, les voxels contenus dans la boîte englobant la sphère de rayon  $t$  sont sommés. Les différents "volume de lumière" sont finalement combinés par "blurring" pour obtenir un volume d'occultation. Une pondération est appliquée pendant cette phase, afin d'éviter de perdre trop en détails. Au niveau des performances, ils traitent un volume de 5123 en 0.7 secondes. Bien que le temps de prétraitement soit considérablement réduit, le volume d'OA doit toujours être recalculé chaque fois que la fonction de transfert est modifiée.

Hernell et al. (2007) proposent une méthode basée GPUs afin d'estimer l'OA pour le RVD. Pour ne pas obtenir des régions totalement noires et des ombres dures causées par l'application de la fonction de visibilité tout-ou-rien lors de calcul de l'OA (Figure 3—7), la transparence/semi transparence des voxels est prise en compte. Il s'agit de l'OA partielle (Figure 3—8) avec une fonction de visibilité  $V$  prenant sa valeur dans l'intervalle  $[0,1]$  au lieu d'avoir soit 1 soit 0.



Figure 3—7: OA géométrique basée Ray-casting pour les données volumiques: Visibilité tout-ou-rien. (Gauche)  $x$  est partiellement visible. (Droite)  $x$  est complètement invisible.

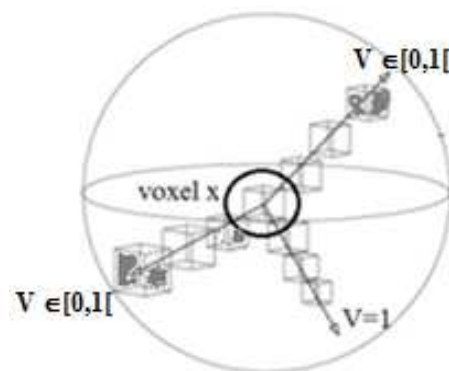


Figure 3—8: OA géométrique basée Ray-casting pour les données volumiques. Visibilité partielle: l'estimation de la lumière atténuée le long de chaque rayon.

Des ombres dures peuvent être aussi obtenues par l'illumination globale, ce qui mène Hernall et al. à suivre la méthode de Stewart concernant un voisinage local mais cette fois sous forme une sphère car l'hémisphère est adéquate seulement aux représentations surfaciques. La définition d'un voisinage local aide à obtenir des ombres douces générées par les voisins en écartant les voxels distants pour ne pas obtenir des régions noires ou très sombrées qui peuvent cacher une information importante.

Hernall et al. implémentent leur méthode sur GPU par un lancer de rayon qui doit être ré-effectué à chaque changement de la fonction de transfert mais avec un temps réduit relativement à la méthode de Stewart grâce à l'utilisation des GPUs et le stockage des données sous plusieurs résolutions selon les techniques de Ljung et al. (Ljung, 2006; Ljung et al., 2006a, 2006b).

Pour avoir le facteur de la visibilité d'un voxel  $x$ , Hernall et al. calculent  $A^L(x)$  la lumière incidente à  $x$  qui peut être estimée en fonction de l'émission  $e_A^L$  de chaque échantillon  $s$  le long des rayons.  $A^L(x)$  nécessite avoir connaissance sur la distribution de la lumière dans son voisinage tel que  $A^L$  égale à 1. Au premier lieu,  $e_A^L$  est configuré par un Dirac delta  $\delta$  (Équation 3.7), qui (Hassani, 2009; Khuri, 2004; Towers, 2007) prend une valeur infinie en 0,



et la valeur zéro partout ailleurs (Équation 3.5), et dont l'intégrale sur  $\mathbb{R}$  est égale à 1 (Équation 3.6). D'autre part,  $\delta$  correspond à la « dérivée » de la fonction de Heaviside (au sens des distributions). Mais cette fonction de Dirac n'est pas une fonction, elle étend la notion de fonction.

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases} \quad \text{Équation 3.5}$$

$$\int_{t_1}^{t_2} dt \delta(t) = \begin{cases} 1, & 0 \in [t_1, t_2] \\ 0, & 0 \notin [t_1, t_2] \end{cases} \quad \text{Équation 3.6}$$

$$e_A^L(s) = \delta(s - R_\Omega) \quad \text{Équation 3.7}$$

La distribution des densités dans  $\Omega$  est considéré comme une distribution de Dirac (Équation 3.7). Avec cette approche la lumière est calculée seulement aux frontières de la sphère ce qui implique qu'aucune radiance n'est émise le long du rayon (Figure 3—9). L'ombre obtenue est dure ce qui demande un nombre significatif des rayons pour créer une apparence douce (Figure 3—11).

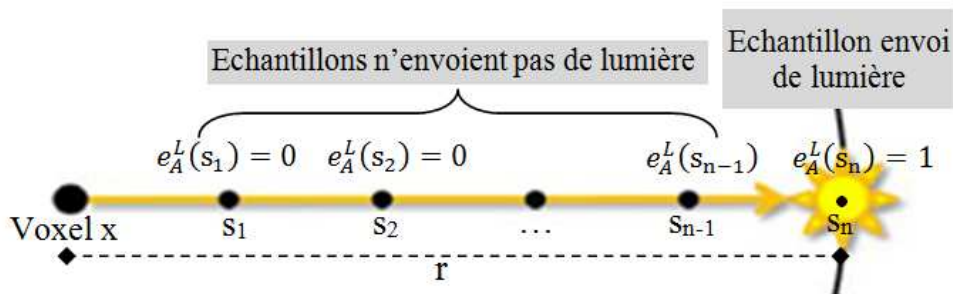


Figure 3—9: Emission de la lumière le long du rayon: La lumière est effectuée seulement à la frontière de la sphère.

Ensuite, une autre définition du terme d'émission  $e_A^L(s)$  est donnée par ce travail en considérant que la lumière peut être émise tout le long du rayon (Figure 3—10). La distribution de la lumière est effectuée uniformément (Équation 3.8) par la division de chaque rayon à  $M$  segments égaux, chaque échantillon  $m$  possède une radiance émise de  $1/M$ . Cette nouvelle formule offre des ombres douces et elle est moins sensible au nombre des rayons utilisés (Figure 3—11).

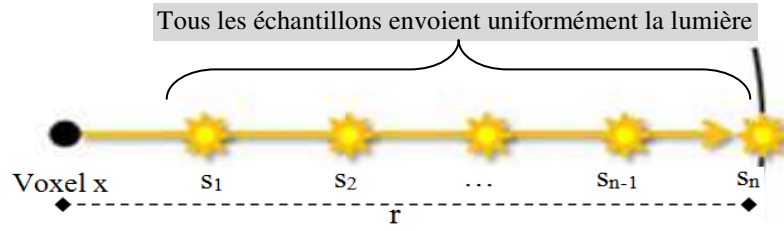


Figure 3—10: Contribution de lumière est effectuée uniformément le long du rayon.

$$e_A^L(\Delta s) = \frac{1}{M}$$

Équation 3.8



(a)



(b)

Figure 3—11: Comparaison entre l'application de (a) Dirac delta et (b) l'émission uniforme. Dirac delta cause des ombres dures qui ne sont pas obtenues par l'émission uniforme de la lumière.

Le terme ambiant  $A_K^L(x)$  (Équation 3.9) présente l'estimation de l'intensité d'un seul rayon  $k$  en fonction des valeurs de la transparence des segments  $i$ . L'intensité finale d'un voxel est obtenue par l'accumulation des intensités estimées pour tous les rayons incidents (Équation 3.10).

$$A_k^L(x) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \prod_{i=1}^{m-1} T_i \quad \text{Équation 3.9}$$

$$A^L(x) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K A_k^L(x) \quad \text{Équation 3.10}$$

où  $K$  est le nombre des rayons ayant un origine le voxel  $x$ .

Une faible transparence implique que la lumière est absorbée difficilement ce qui rend difficile la compréhension des formes dans les régions larges. Afin d'améliorer la perception des détails d'un volume et de permettre la séparation de ses différents tissus, Hernall et al. ajoutent une composante émissive permettant aux voxels d'émettre de la lumière selon leurs valeurs scalaires (Équation 3.11).

$$e(\Delta s) = e_A^l(\Delta s) + c_E(\Delta s) \quad \text{Équation 3.11}$$

Où  $c_E(\Delta s)$  est l'émission propre ou la couleur d'un segment  $\Delta s$  obtenue par l'application d'une fonction de transfert.

La méthode ignore les espaces vides et nécessite moins de traitement avec les régions à faible résolution. Cependant elle ne permet pas toujours le changement interactif de la fonction de transfert.

Hernell et al. (2008) ont ensuite fait une extension de l'approche précédente pour inclure une propagation globale de la lumière et les effets de dispersion (scattering) simple avec l'utilisation de plusieurs sources lumineuses. Dans la première étape de ce travail, un volume d'ombre global lié à une source lumineuse donnée et à une fonction de transfert et contenant des opacités est construit. La méthode consiste à inclure la dispersion du premier ordre de la lumière incidente à chaque voxel par l'intégration de la lumière dispersée dans un voisinage local sous forme d'une sphère centrée à chaque voxel. Dans la dernière étape, un ray casting d'une seule passe est utilisé pour réaliser le rendu de l'image finale. Cette application permet de simuler un modèle d'illumination réaliste en changeant interactivement la position de la lumière et la fonction de transfert.

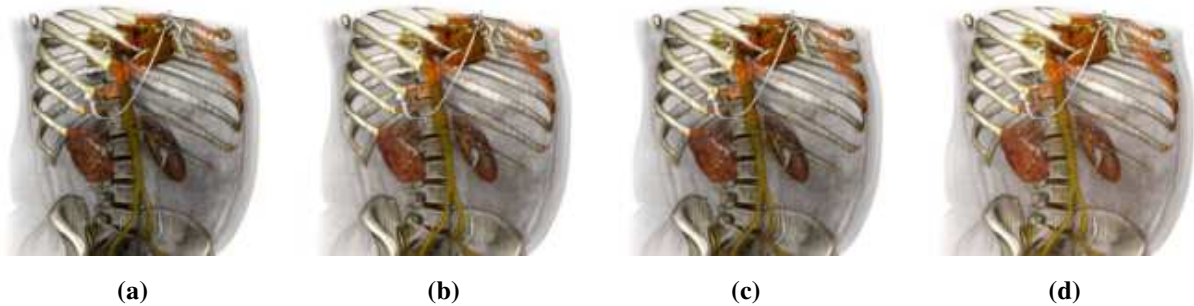
Ruiz et al. (2008) ont fait une extension de l'approche de Stewart en utilisant la distance au premier occulteur comme un facteur d'obscurance. Ils ont étudié l'impact de différentes fonctions (

Tableau 1) de pondération en fonction de la distance. Leur méthode est conçue pour être appliquée dans le cadre d'un rendu illustratif (Bartz et al., 2005; Ebert and Rheingans, 2000; Treavett and Chen, 2000) et des cartes de saillance (Fecteau and Munoz, 2006; Petit et al., 2009).

Nom de la fonction	Formule
Tout ou rien	$\rho(d) = 0$
Linéaire	$\rho(d) = \frac{d}{d_{\max}}$
Exponentielle	$\rho(d) = 1 - \exp\left(-\frac{d}{d_{\max}}\right)$
Racine carrée	$\rho(d) = \sqrt{\frac{d}{d_{\max}}}$

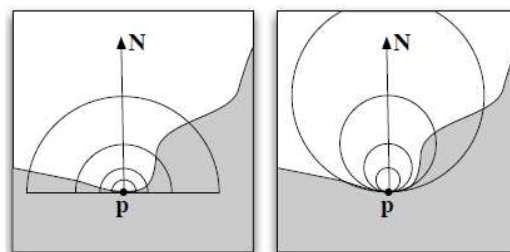
**Tableau 1: Différents formats de pondération de l'obscurance en fonction de la distance.**

Selon eux, les fonctions tout-ou-rien et exponentielles (voir respectivement Figure 3—12 (a) et (c)) produisent des résultats similaires. La fonction linéaire (Figure 3—12 (b)) lisse le résultat en comparant à la fonction tout ou rien, mais elle considère un nombre de voxels trop important. La fonction racine carrée semble selon eux le meilleur compromis, car elle permet d'obtenir les meilleurs résultats en termes de perception. Elle permet de limiter l'assombrissement en prenant en compte le voisinage avec un petit espace (Figure 3—12 (d)).



**Figure 3—12: Rendu des données CT d'un corps humain en utilisant un modèle d'illumination basé obscurance en considérant différentes fonctions  $\rho$ .**

Penner et Mitchell (2008) ont proposé une méthode de calcul de l'OA pour les iso-surfaces qui se base sur une information statistique sur le voisinage des voxels. Le voisinage peut être défini par un hémisphère et une sphère tangente de différentes tailles pour mieux localiser les occultations (Figure 3—13). Leur travail se base sur une hypothèse indiquant que le pourcentage de voxels voisins qui sont des occulteurs d'un point de surface donne une bonne approximation au pourcentage. Le nombre des rayons qui peuvent être bloqués lorsqu'ils traversent l'espace de voisinage est approximé par le calcul des voxels occulteurs dans le même espace. Sous cette hypothèse, ils ont utilisé l'inégalité de Tchebychev pour calculer les voxels occulteurs à l'aide des cartes d'occultations basées variance. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne traite pas les matériaux transparents.



**Figure 3—13: OA est le pourcentage de voisinage situé dans l'isosurface (en gris) (Penner and Mitchell, 2008).**

Eric Penner et al. exploitent les propriétés de la représentation basée image de l'ensemble de données volumiques pour accélérer le calcul de l'OA en permettant d'extraire rapidement l'information sur le nombre de voxels occulteurs sans utiliser un grand nombre de rayons. Dans ce cas, la définition géométrique de l'OA est remplacée par une approximation statistique qui peut être calculée en utilisant les opérations de traitements d'images.

Penner et al. proposent cette nouvelle définition de l'OA pour simplifier le calcul de l'éclairement d'un voxel  $x$  (Équation 3.1 et Équation 3.2). En exploitant la nature discrète du volume, la définition de l'éclairement à un voxel  $x$  devient:

$$E(x) = \frac{1}{|V|} \int_V \hat{L}(v) dv \quad \text{Équation 3.12}$$

où  $V$  est le voisinage du voxel  $x$  et  $v$  est un voisin tel que  $v \in V$ . Soient  $c_x$  et  $c_v$  les iso-valeurs respectivement de  $x$  et  $v$ , la luminance  $\hat{L}(x)$  devient une fonction binaire définie par:

$$\hat{L}(v) = \begin{cases} 1: \text{si } v \leq c \text{ (} p \text{ n'est pas occulteur)} \\ 0: \text{sinon (} p \text{ est un occulteur)} \end{cases} \quad \text{Équation 3.13}$$

Par la discrétisation de  $V$  à  $k$  voxels, la luminance est donnée par:

$$E(x) = \sum_{i=0}^k \hat{L}(v_i) \Delta i \quad \text{Équation 3.14}$$

où  $v$  est un voxel. L'approximation de l'éclairement dans Équation 3.14 est indépendante à la normale  $N$  ou les directions  $\omega$ . Cependant, calculer l'OA d'un voxel par cette fonction reste coûteux vu qu'on doit tester tous les voxels dans le voisinage.

En utilisant la connaissance sur la distribution des valeurs dans le voisinage d'un voxel, Penner et al. ont remplacé l'ensemble des tests binaires par un seul sur la distribution en choisissant la CDF comme une fonction optimale pour en réaliser. Cependant, l'OA devient maintenant un problème d'évaluation et de stockage des CDFs, ce qui demande beaucoup d'espace mémoire pour les sauvegarder.

Pour résoudre cette nouvelle forme de problème, Eric Penner et al. ont choisi d'utiliser une technique décrite par Donnelly et al (2006) pour représenter une distribution des valeurs d'image et calculer la CDF (Figure 3—14). Noter que le travail de Donnelly a été proposé dans le but de réduire l'aliasing dans les SMs de fait qu'elles ne peuvent pas être filtrées par les techniques des textures standards. Alors, Eric Penner et al. définissent deux variables pour chaque voxel d'une distribution donnée: la valeur de l'iso-valeur  $c$  et son carrée  $c^2$  suivi par le calcul de deux valeurs  $M_1$  et  $M_2$  (Équation 3.15 et Équation 3.16) en appliquant un filtrage.

Ces deux dernières valeurs sont utilisées pour obtenir l'espérance représentant la moyenne de la variable iso-surfaces  $\mu$  et la variance  $\sigma^2$  (Équation 3.17 et Équation 3.18).

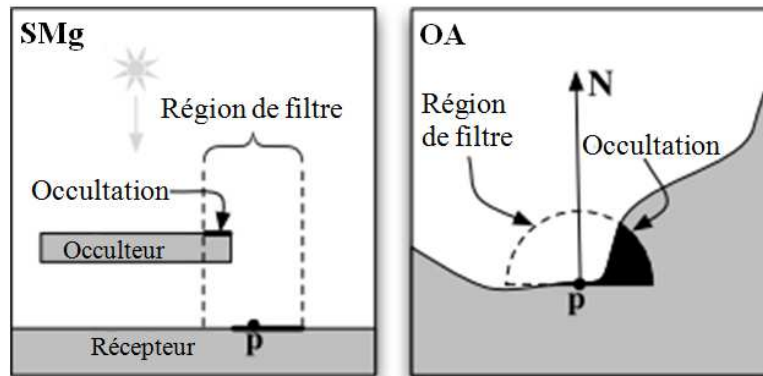


Figure 3—14: Comparaison du problème du SMg avec celui de l'OA statistique de Penner et al. (2008).

$$M_1 = E(c) = \int_{-\infty}^{+\infty} c p(c) dc \quad \text{Équation 3.15}$$

$$M_2 = E(c^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} c^2 p(c) dc \quad \text{Équation 3.16}$$

$$\mu = E(c) = M_1 \quad \text{Équation 3.17}$$

$$\sigma^2 = E(c^2) - E(c)^2 = M_2 - M_1^2 \quad \text{Équation 3.18}$$

$\mu$  et  $\sigma^2$  sont utiles pour appliquer l'inégalité de chebychev comme montrée dans Équation 3.19 et qui offre une approximation à la valeur de PCF puisqu'elle présente la fraction des pixels dans une région de filtrage au lieu de comparer une par une les profondeurs avec une profondeur fixe  $t$ . Le  $t$  dans le cas des isosurfaces présente l'iso-valeur du voxel dont on calcule son occultation.

$$P(c \leq t) \leq p_{\max}(t) = \begin{cases} 1: si t \leq \mu \\ \frac{\sigma^2}{(\sigma^2 + (t - \mu)^2)} : sinon \end{cases} \quad \text{Équation 3.19}$$

OA dynamique est une approche proposée par Ropinski et al. (2008) dans le but d'approximer l'OA pour le RVD ainsi que les iso-surfaces. En plus de changement interactif des paramètres de la camera, cette approche arrive à modifier interactivement l'iso-valeur dans le cas des iso-surfaces et la fonction de transfert dans le cas de RVD grâce à l'indépendance du calcul des paramètres. La méthode se base sur l'utilisation des histogrammes locaux basés sur les densités pour décrire la distribution des intensités entourant chaque voxel où un histogramme est établi pour chaque hémisphère.

L'étape de prétraitement (Figure 3—15) se compose de deux étapes nécessaires à la détection des interactions lumineuses des structures voisines. L'environnement de chaque voxel  $x$  est analysé et stocké pour permettre de calculer interactivement une couleur environnementale  $E_{env}(x)$  pendant le rendu tel que  $E_{env}(x)$  présente une approximation de l'influence de voxels voisins. Pour obtenir la couleur environnementale  $E_{env}(x)$  d'un voxel  $x$ , son histogramme local  $HL(x)$  (Équation 3.20 et Équation 3.21) est exploité vu que les histogrammes locaux sont adéquats, selon Ropinski et al., car l'éclairage indirect pour un point donné peut être calculé correctement en considérant uniquement les objets proches (Dachsbacher and Stamminger, 2006).

$$HL(x) = (HL_0(x), \dots, HL_{n-1}(x)) \quad \text{Équation 3.20}$$

$$HL_k(x) = \sum_{\substack{p \in \Omega(x) \\ p \neq x}} f_{dist} \left( \frac{|x-p|}{d_{min}} \right) \cdot g(f(p), k) ; 0 \leq k < b \quad \text{Équation 3.21}$$

où  $\Omega(x)$  est le voisinage local de  $x$  sous forme une sphère centrée à  $x$  avec un rayon  $r$ ,  $p$  est un voxel voisin de  $x$  contribuant à  $HL(x)$  avec une pondération  $f_{dist}(\ )$  selon sa distance à  $x$ .  $f(x) \in [0, 2^b]$  avec  $b \in \{8, 12, 16\}$ ,  $HL$  assigne à chaque  $x$  un n-tuple avec  $n = 2^b$ .  $d_{min}$  est la distance minimale entre deux voxels quelconques dans le volume.  $g(i, k)$  présente la valeur de l'intensité telle que:

$$g(i, k) = \begin{cases} 1, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases} \quad \text{Équation 3.22}$$

$HL_k(x)$  présente l'influence des voxels voisins ayant une intensité  $k$  sur  $x$ .

Dans cette méthode il n'y a plus de notion de l'information spatiale sauf  $f_{dist}$  la pondération basée distance ayant pour objectif de capturer l'influence de chaque voxel voisin sur le voxel courant. Par conséquent, la méthode ne considère pas l'atténuation causée par les voxels situés entre un voxel donné et ses voisins. Pour obtenir aussi l'information directionnelle, deux hémisphères sont obtenus par la division de  $\Omega(x)$  autour de chaque voxel  $x$  selon son gradient. Donc, deux histogrammes locaux  $H_f(x)$  et  $H_b(x)$  sont calculés respectivement pour l'hémisphère frontal et l'hémisphère latéral.

Après la génération des histogrammes, leur nombre est réduit en utilisant une méthode de "clustering", puis les histogrammes restant sont utilisés pour moduler la couleur de chaque voxel pendant la phase de rendu. La mise à jour de la couleur environnementale d'un voxel  $x$   $E_{env}(x)$  utilisée durant le rendu est liée au changement de la fonction de transfert prenant en compte (Équation 3.23) de la fonction de transfert utilisée et des histogrammes locaux qui présentent les clusters pré-calculés (voir l'étape

3 de la Figure 3—15).

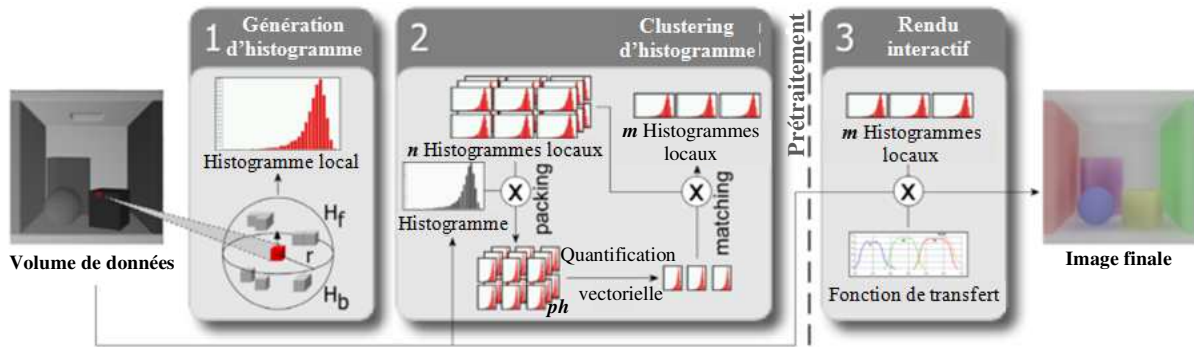


Figure 3—15: OA basée histogrammes de Ropinski et al. (2008).

$$E_{env}(x) = \frac{1}{\frac{2}{3}\pi r^3} \sum_{0 \leq j \leq 2^b} \tau_\alpha(j) \cdot \tau_{rgb}(j) \cdot HL_j(x) \quad \text{Équation 3.23}$$

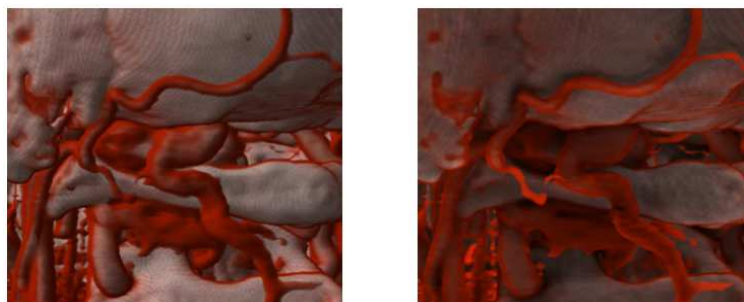
Dans cette équation,  $\tau_{rgb}(j)$  et  $\tau_\alpha(j)$  sont respectivement la couleur émissive et l'opacité des voxels possédant une intensité  $j$ . Si aucune color bleeding est désirée alors l'occultation de voisinage  $O_{env}$  est prise en considération uniquement (Équation 3.24).

$$O_{env}(x) = \frac{1}{\frac{2}{3}\pi r^3} \sum_{0 \leq j \leq 2^b} \tau_\alpha(j) \cdot HL_j(x) \quad \text{Équation 3.24}$$

La méthode permet de réaliser des effets d'OA et de “color bleeding” en diffusant la couleur sur les structures avoisinantes (Figure 3—16). Si les iso-surfaces sont utilisées, les voxels ayant une intensité identique à l'iso-valeur sont visibles lors de rendu. La color bleeding n'est pas perceptible ce qui ne demande pas d'être calculée. Par conséquent, le facteur d'occultation  $O_{env}$  est nécessaire pour le rendu en effectuant une modification du terme ambiant du modèle de Blinn-Phong (voir Figure 3—17) comme montrée dans l'équation suivante:

$$I_\alpha(x) = 1.0 - O_{env}(x) \cdot Col_{iso} \quad \text{Équation 3.25}$$

où  $Col_{iso}$  est la couleur associée à la iso-valeur considérée.



(a) Illumination diffuse

(b) OA de Ropinski et al.

Figure 3—16: Un exemple montre l'amélioration de la structure 3D grâce à la méthode de (Ropinski et al., 2008).



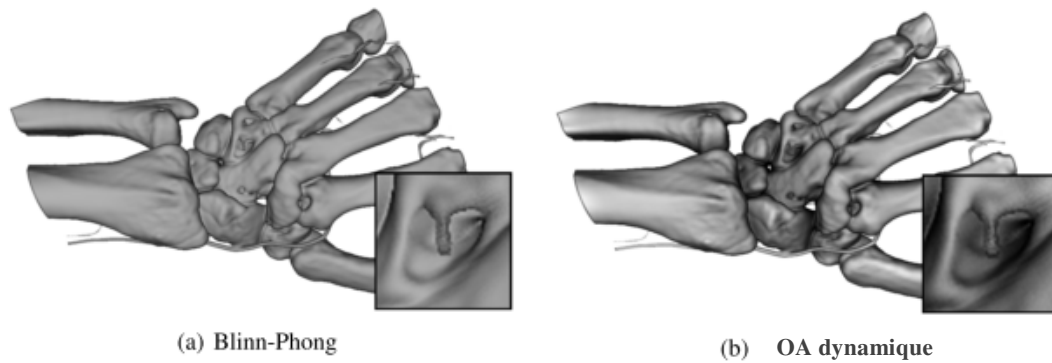


Figure 3—17: Rendu d'un volume de données de  $244 \times 124 \times 257$  voxels en utilisant (b) OA dynamique (Ropinski et al., 2008) en comparant avec (a) l'ombrage de Blinn-Phong.

La méthode de Ropinski et al. ne peut pas obtenir les effets de l'illumination globale elle en exploite seulement les histogrammes locaux. Ainsi, l'opération de clustering introduit des temps de pré-calculs importants.

Les modèles d'illumination de surface (Beason et al., 2006; Desgranges and Engel, 2007; Penner and Mitchell, 2008; Ropinski et al., 2008; Wyman et al., 2006) ne s'appliquent qu'aux isosurfaces représentant une seule intensité dans l'ensemble de données, mais ne permettent pas d'envisager plusieurs surfaces correspondant à des intensités différentes. Donc, il n'est pas possible de représenter l'ensemble entier des données volumiques, considérant que les intensités variantes sont l'un des principaux avantages par rapport aux modèles polygonaux par exemple dans le cas de la représentation des différents types de tissus.

Meß and Ropinski (2010) accélèrent ce dernier travail en se basant sur CUDA. Ils déportent la génération des histogrammes (Figure 3—18) et une partie de la phase de "clustering" pour réduire les temps de pré-calcul induits par la méthode. Un  $HL(x)$  (Équation 3.20) consiste de  $b$  classes où chaque classe  $HL_k(x)$  (Équation 3.21) est pondérée par les distances entre  $x$  et ses voisins  $p$ . Meß and Ropinski calculent un masque qui contient la distance Euclidienne entre tous les couples des voxles  $(x, p)$  sur CPU et le transfèrent à la mémoire constante de GPU. Après avoir divisé le volume en blocs, un thread est attribué au calcul d'un histogramme local d'un seul voxel  $x$  en allouant un espace sur la mémoire partagée du CUDA. A la fin de cette étape, chaque thread normalise l'histogramme calculé et le copie sur la mémoire globale.

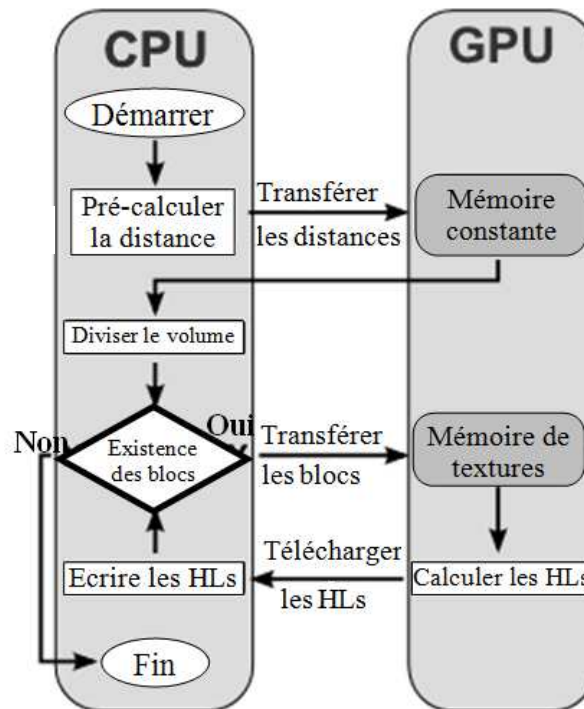


Figure 3—18: Génération des histogrammes locaux *HLs* sur GPU. Les ensembles des distances et des blocs sont établis sur CPU mais la génération des *HLs* est réalisée sur GPU.

L’interactivité de rendu peut être influencée vu que la taille des histogrammes générés peut dépasser la mémoire globale. Ce problème est abordé par l’utilisation d’une méthode de clustering, dite k-means, qui donne trois ensembles à savoir:

- (a) Un ensemble réduit des histogrammes locaux,
- (b) Les centres de processus de clustering, notés (*cb*),
- (c) et un volume d’étiquetage qui contient des paires (voxel, cluster) pour attribuer un voxel pour chaque cluster.

Les différentes phases de l’algorithme sont illustrées dans Figure 3—19. Noter que la première étape consiste à générer sur CPU un ensemble initial des *cb* en choisissant aléatoirement *n* histogrammes locaux de l’ensemble total *HL*. Les histogrammes choisis sont considérés comme les vecteurs de code *cv* des *cb*. Après avoir divisé les *cb* en blocs, ils sont transférés à la mémoire globale pour les traiter par k-means.

Selon eux, le processus est accéléré jusqu’à 10 fois.

Ancel et al. (2010) ont proposé d’aborder le problème de l’obscurance et les couleurs sombrées ou noires causées par le calcul d’OA qui dépendent des classes des matières composant le volume. Ils ignorent les inter-occultations entre ces classes sans perdre leurs auto-occultations qui offrent plus d’informations sur la forme 3D. Ils ont utilisé une approche basée-blocs implémenté sur GPU pour accélérer les calculs de leur

méthode d'OA. Leur travail ne s'intéresse pas à la création des fonctions de transfert ni à l'identification des classes et des couches mais il s'occupe de leur ombrage et rendu.

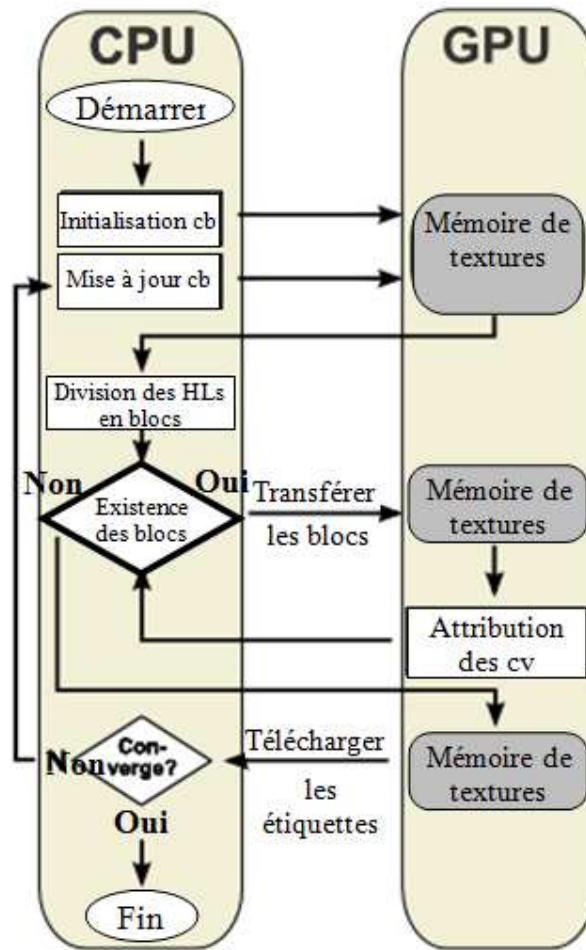


Figure 3—19: Clustering basé GPU des histogrammes locaux: le premier ensemble de *cb* est initialisé sur CPU copié dans la mémoire globale des GPU

Ancel et al. ont proposé deux contributions: la première concerne l'introduction d'une nouvelle formulation d'OA prenant en compte des classes distinctes composant le volume et l'accélération du calcul en utilisant les GPU est leur deuxième contribution. Ils utilisent la méthode d'OA de Hernell et al. (2007) décrit précédemment et qui se base sur le ray-casting (Équation 3.9 et Équation 3.10).

Après avoir divisé le volume en un ensemble de classes  $c_{k=1,n_c}$  où  $n_c$  est le nombre des classes, ce travail se compose des quatre étapes suivantes:

**Étape 1: Le calcul d'une OA séparée pour chaque classe;**

Pour calculer le facteur d'OA d'une classe  $k$  (voir Algorithme 3-1) en ignorant les autres classes  $k' \neq k$ , ces dernières sont considérées totalement transparentes lors de calcul. Le sauvegarde des facteurs d'occultation dans des textures a pour but de réduire

les artefacts qui sont produits sur les frontières des classes lorsqu'il y a une région connexe menant à un changement brusque de la valeur d'OA (Figure 3—20).

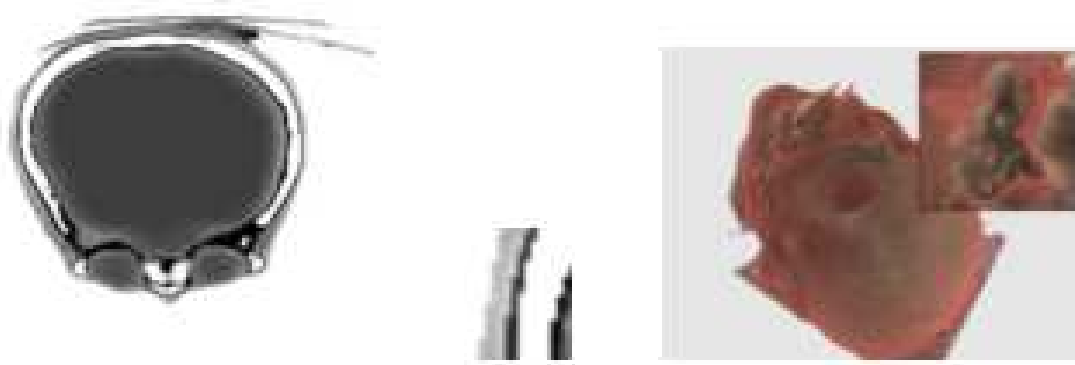


Figure 3—20: Des artefacts obtenus durant la passe de rendu à cause d'échantillonnage des rayons et l'interpolation tri-linéaire. Les points blancs (Droite-zoom) sont des artefacts (Ancel et al., 2010).

**Étape 2: Combinaison des textures d'occultation;**

Du fait que les régions sont pratiquement chevauchées, Ancel et al. proposent d'utiliser un bon opérateur de combinaison de toutes les textures obtenues dans un seul volume d'OA. Par conséquent, le calcul de la lumière incidente à un voxel  $x$  indiqué dans Équation 3.10 devient comme suit:

$$A^L(x) = \Theta_{k=1}^{n_c} A_k^L(x) \tag{Équation 3.26}$$

où  $\Theta$  est un opérateur de combinaison.

Les frontières des classes présentent une difficulté pour choisir  $\Theta$  particulièrement lorsqu'une classe de faible occultation a une frontière avec une autre de haute occultation. Dans ce contexte, trois solutions sont proposées:

*Solution 1:* est une solution naïve qui consiste à calculer la moyenne des valeurs obtenues pour chaque classe individuelle  $k$  (la moyenne de la texture  $Texture_k$ ), mais elle donne des valeurs d'OA non exactes.

*Solution 2:* La combinaison (Algorithme 3-2) prend en compte toutes les valeurs de  $Texture_k$  et  $\Omega(x)$ . Deux cas sont distingués selon l'existence des voisins appartenant à d'autres classes différentes à celle de  $x$  ( $k$ ). Si c'est le cas, les occultations des voisins et toutes les valeurs de  $Texture_k$  correspondent à  $x$  sont utilisées dans une somme pondérées (Équation 3.27) afin de rendre les transitions douces. Sinon, seulement les valeurs des textures d'occultations sont utilisées.

$$OA(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n_v} \alpha_i \cdot Texture_{c(i)}(i)}{\sum_{i=1}^{n_v} \alpha_i} \tag{Équation 3.27}$$

$c(i)$  est la classe où appartient  $i$  et  $\alpha_i$  sa valeur d'opacité calculée par la fonction de transfert. Un exemple de ce type de combinaison est illustré dans la Figure 3—21 qui

montre que les artefacts (les points blancs) de la Figure 3—20 sont réduits mais pas totalement éliminés.



Figure 3—21: Combinaison basée-moyenne en utilisant 26 voisins (Ancel et al., 2010).

*Solution 3:* elle consiste uniquement à prendre en compte des textures d’occultation sans aucune information de voisinage. Vu l’insuffisance de la solution précédente, Ancel et al. pensent à garder le maximum selon l’équation suivante:

$$OA(x) = \text{Max}(\text{Texture}_k(x) | \forall k \in [1, n_c]) \quad \text{Équation 3.28}$$

Cette solution offre des résultats meilleurs que ceux de la précédente en réduisant les artefacts et améliorant le contraste car la valeur d’OA devient plus grande lorsqu’elle est obtenue plus proche à une classe donnée. Ainsi, elle est plus efficace en termes de temps de calcul et ne demande aucun paramètre sur le voisinage. Mais, avec l’utilisation de la valeur maximale de l’OA, les classes opaques influencent celles moins opaques qui peuvent être associées à des fausses valeurs d’OA.

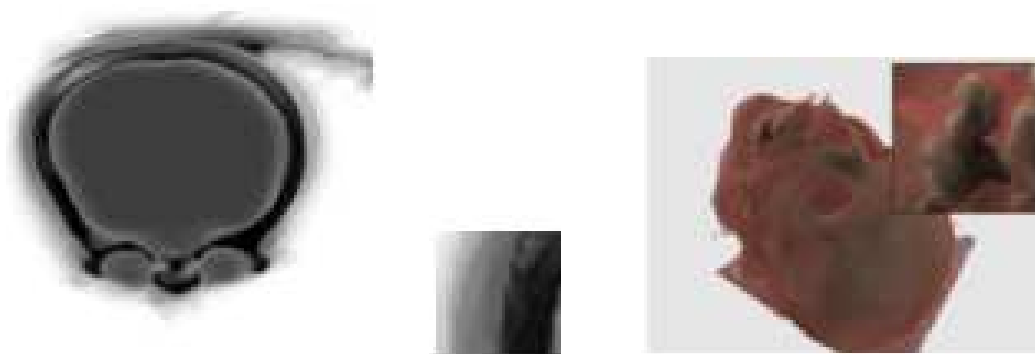


Figure 3—22: Utilisation d’opérateur de maximum (Ancel et al., 2010).

**Etape 3:** Optimisation du calcul en utilisant les blocs afin d’éviter le traitement des voxels vides lors de la combinaison. Dans une étape de prétraitement, le volume est

divisé à un ensemble des blocs avec des tailles identiques. Ensuite, un test est effectué sur chaque bloc pour chercher s'il contient uniquement des voxels vides en sauvegardant cette information dans un booléen.

**Etape 4: Passe de rendu final**

L'avantage de la méthode de Ancel et al. est son indépendance au nombre des rayons utilisés.

**Algorithme 3-1: OA d'une classe**

**Entrées**

Vol: Volume;  
 Texture<sub>k</sub>: Texture;  
 k: classe;

**Variables**

NbV: Entier;  
 x, p : Voxel;  
 A<sub>k</sub><sup>L</sup>(x): Lumière incidente à un voxel x;  
 Ω(x): Voisinage de x;  
 Sphère(o, r): Une sphère ayant un origine o et un rayon r;

**Début**

NbV ← Résolution(Vol); // NbV est le nombre des voxels constituant le volume

**Pour** x=1 à NbV faire // x est un voxel

**Si** x ∈ k **alors**

**Début**

            Ω(x) ← {p / p ∈ Sphère(x, r);

**Pour** chaque p ∈ Ω(x) faire

**Si** p ∉ k **alors** Vol[p].T ← 1; // Rendre p transparent

            Calculer A<sub>k</sub><sup>L</sup>(x) selon Équation 3.9;

            Sauvegarder A<sub>k</sub><sup>L</sup>(x) dans Texture<sub>k</sub>;

**Fin si**

**Fin**

**Sortie**      Texture<sub>k</sub>;

**Algorithme 3-2: Combinaison des OA de toutes les classes**

**Entrées**

x: Voxel;  
 $\Omega(x)$ : Voisinage de x;  
 Texture[n<sub>c</sub>]: tableau des Textures;

**Variables**

p: Voxel;  
 n<sub>v</sub>, i, k: Entier;

**Début**

n<sub>v</sub> ← Taille( $\Omega(x)$ ); // n<sub>v</sub> est le nombre des voxels constituant  $\Omega(x)$

k ← Classe(x); // La classe où appartient x

**Pour** i=1 à n<sub>v</sub> **faire**

**Début**

p ← Extraire\_voisin( $\Omega(x)$ );

**Si** p ≠ k **alors** // Existence d'autres classes voisines différentes à k;  
     Sortir de la boucle ;

**Fin pour**

**Si** i > n<sub>v</sub> **alors** // Tous les voisins appartiennent à la même classe k

    A<sup>L</sup>(x) ← Valeur(Texture[k], x); // A<sup>L</sup>(x) prend la valeur du texel ayant les coordonnées de x dans la texture Texture[k] qui correspond aux occultations de la classe k,

**Sinon**

    Calculer une moyenne pondérée en appliquant Équation 3.27

**Fin si**

**Fin**

**Sortie** A<sup>L</sup>(x);

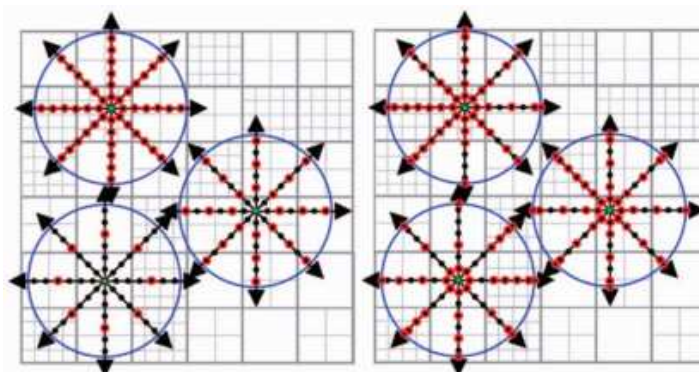
Ancel et al. (2012) ont exploré des solutions parallèles pour atteindre l'interactivité avec l'utilisation d'une configuration multi-GPU. Pour conserver l'interactivité du rendu final, ils ont proposé de conserver le calcul de l'OA comme une étape de prétraitement. Les GPU et les CPU doivent être pris en compte avec précaution, car ces deux types de processeur peuvent affecter la performance du processus entier.

Pour paralléliser le calcul d'OA sur une telle configuration, Ancel et al. ont proposé de distribuer ce calcul à plusieurs GPUs en bien choisissant la manière de division des données aux différentes machines et en assurant un bon équilibre de la charge avec la réduction du transfert de données entre les différents GPUs. Ils ont introduit également deux schémas de répartition: un schéma statique qui divise l'ensemble de données à un nombre de blocs identiques à celui des GPUs et un schéma dynamique qui divise l'ensemble de données en blocs plus petits et les distribue en utilisant un mode consommateur producteur.

La stratégie statique se déroule en deux étapes, la première consiste à diviser l'ensemble de données à l'aide d'un arbre BSP et dans la deuxième étape l'équilibrage de charge est affiné en déplaçant les plans de division précédemment calculés.

Avec la méthode de Hernell et al. (2010), une haute interactivité est obtenue en exploitant une méthode basée multi-résolution, même lors de l'édition de la fonction de transfert. Dans une étape de prétraitement, le volume est divisé à un ensemble des petits blocs de  $16^3$  voxels, chaque bloc est codé avec tous les niveaux de détails qui sont  $8^3$  voxels,  $4^3$  voxels,  $2^3$  voxels et  $1^3$  voxels. Ces niveaux de détails sont modifiés dépendamment au changement de la fonction de transfert ou au coupement du volume.

La résolution de chaque bloc est choisie selon son contenu défini par la fonction de transfert. Ainsi, une priorité est associée à chaque bloc selon leurs variations dans le domaine de la fonction de transfert; les blocs qui possèdent des hautes variations sont les plus prioritaires, ceux avec une variation moyenne ou faible sont moins prioritaires et les blocs vides peuvent être ignorés. La priorité est utilisée pour appliquer un échantillonnage adaptatif des rayons lors de calcul de l'OA (Figure 3—23).



**Figure 3—23: La perte d'une information importante lorsqu'un échantillonnage constant est utilisé (Gauche). L'échantillonnage adaptatif optimise le nombre des pas (Droite).**



3.3.2.2 Méthodes avec calcul à la volée

Ces méthodes n'utilisent pas le précalcul pour obtenir l'occultation en rendu volumique mais le calcul est effectué à la volée pendant la phase de rendu en utilisant des méthodes en espace image.

Une méthode dite les cartes d'occultation de voisinage (Diaz et al., 2008) est une nouvelle structure de données qui présente une carte de profondeur sur deux tableaux; un contenant la profondeur cumulée dans le voisinage d'un pixel et l'autre le nombre des valeurs utilisées dans la somme. Cette méthode est utilisée dans les modèles de rendu basé ray-casting sur GPU et elle est adaptée à la visualisation d'isosurfaces. Elle réalise en deux passes de rendu (Figure 3—24) où la première utilise le ray-casting pour générer une carte de couleur et une carte de profondeur en transférant cette dernière au CPU pour construire une carte d'occultation de voisinage. La génération d'une carte de profondeur à partir d'un rendu initial permet de définir le bord des données à visualiser. L'ombrage est la deuxième passe de rendu qui utilise la carte d'occultation de voisinage pour produire le résultat final.

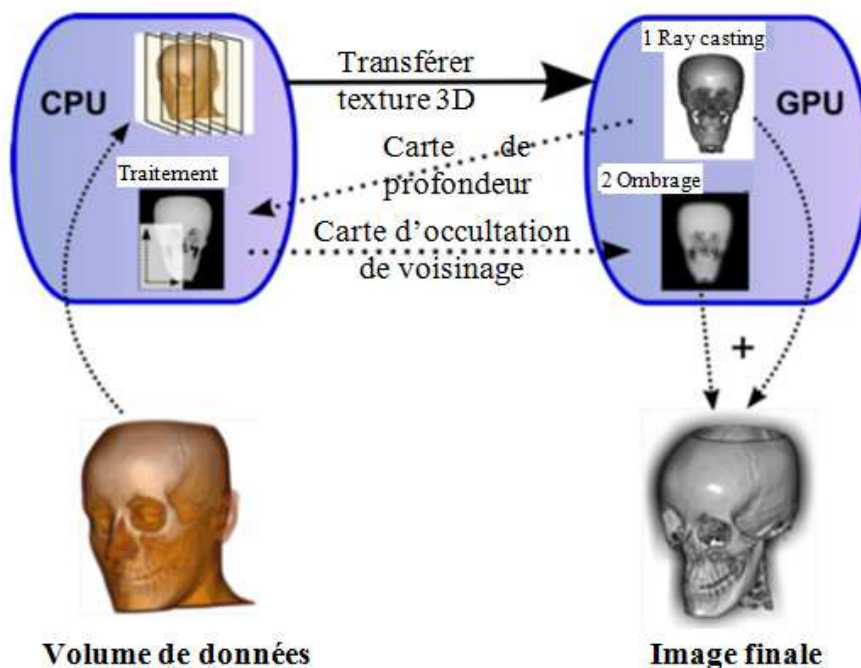
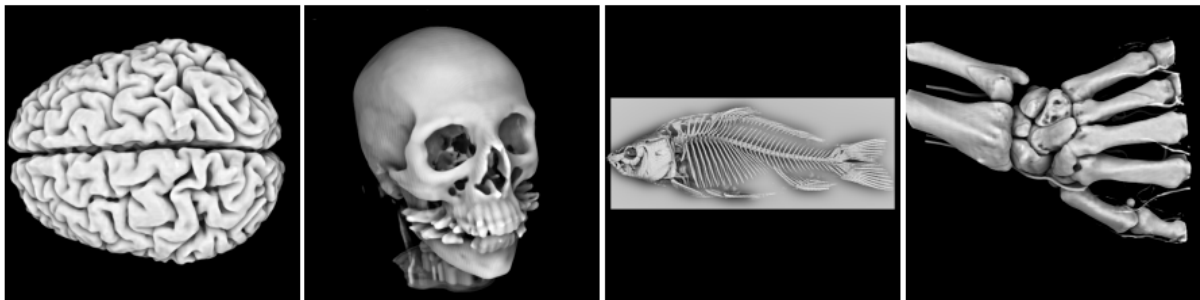


Figure 3—24: Schéma générale de l'algorithme des cartes d'occultation de voisinage (Diaz et al., 2008).

Ensuite la technique des summed-area tables introduite par (Crow, 1984) est utilisée sur la carte de profondeur. Cela leur permet d'évaluer pour un pixel donné à quelle profondeur ses voisins sont situés. Si ses voisins sont plus proches de l'observateur, le pixel correspond à un creux, sinon il correspond à une crête. Cette information est utile pour pondérer la couleur de ce pixel pendant la visualisation.

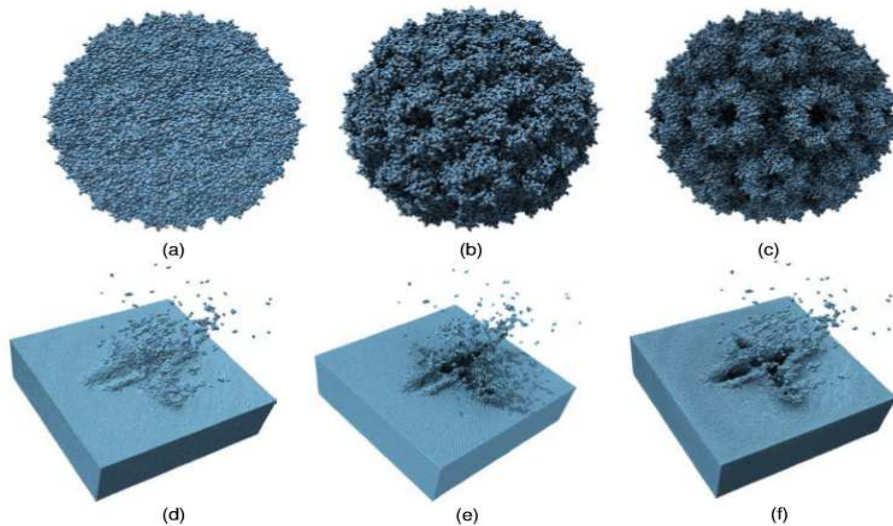
Schott et al. (2009) proposent une technique pour le RVD en se basant sur l'utilisation des textures 3D et des tranches alignées sur l'espace écran. Ils maintiennent un tampon d'occultation correspondant à l'opacité des  $n$  tranches précédemment traitées, et l'utilise pour la  $(n + 1)^e$  en cherchant pour chaque voxel contribuant dans l'occultation qui sera générée par l'accumulation des tranches précédentes. La méthode (Figure 3—25) permet une manipulation interactive de la camera, la fonction de transfert et les plans de division. L'un de ces inconvénients est qu'elle ne permet pas de représenter les occultations inter-structures qui sont dans un même plan aligné sur l'espace image.



**Figure 3—25: Rendu des données volumiques par la méthode de Schott et al. (2009).**

Ce travail est amélioré ensuite par Šoltészová et al. (2010) en permettant le placement interactif de la source lumineuse dans la position de l'observateur.

Grottel et al. (2012) ont présenté une méthode interactive d'OA pour les grandes données moléculaires dynamiques (Figure 3—26). Ils ont appliqué l'OA de l'espace objet basant sur l'information de voisinage local pour les grands ensembles de données basés constitués des particules dépendantes au temps sans avoir besoin des précalculs. Leur approche cumule les données des particules dans un volume de densité d'une large résolution pour approximer l'information sur les objets occulteurs.



**Figure 3—26:** Comparaison entre l'éclairage local (a, d), le ray tracing (b, e), et l'OA sur l'espace objet (c, f) (Grottel et al., 2012).

### **3.3.3 La génération de la fonction de transfert et la segmentation 3D à l'aide de l'OA**

Malgré les développements des GPU et les améliorations croissantes de leur puissance de calcul, la classification des données volumiques reste un défi. Dans (Correa and Ma, 2009), une technique de classification des données volumiques avec un histogramme 2D est proposée en se basant sur l'OA des voxels pour révéler la structure spatiale de leurs caractéristiques par le calcul de l'opacité uniquement. Cette information vient de l'observation que la plupart des volumes (MRI, CT ou simulation de ...) contiennent des motifs dits les spectres d'occultation représentant les données du même type. L'objectif de ce travail est de minimiser l'occultation afin de visualiser les structures cachées (occultées). Un spectre d'occultation des données volumiques encode une distribution 2D des valeurs d'intensités et d'occultation. Les couches ou les caractéristiques qui apparaissent isolées ou à l'extérieur des structures larges peuvent être facilement séparées à celles dans l'intérieur. Avec les spectres d'occultation, il est possible de générer des modèles de classification sans l'intervention de l'utilisateur.

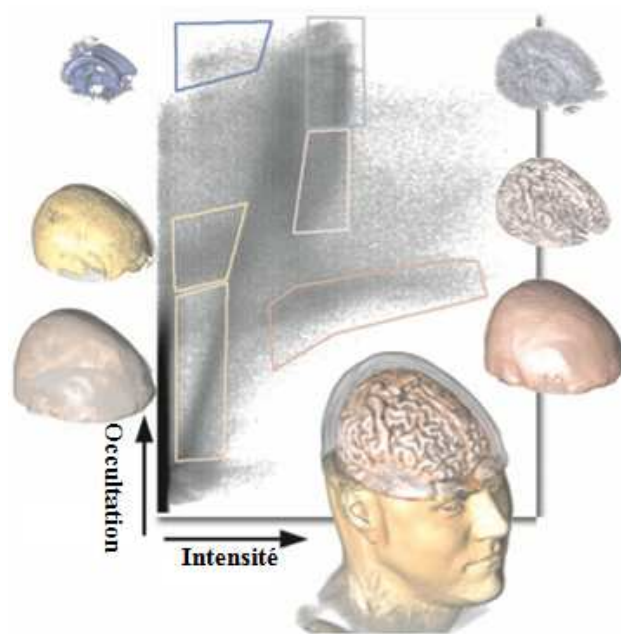


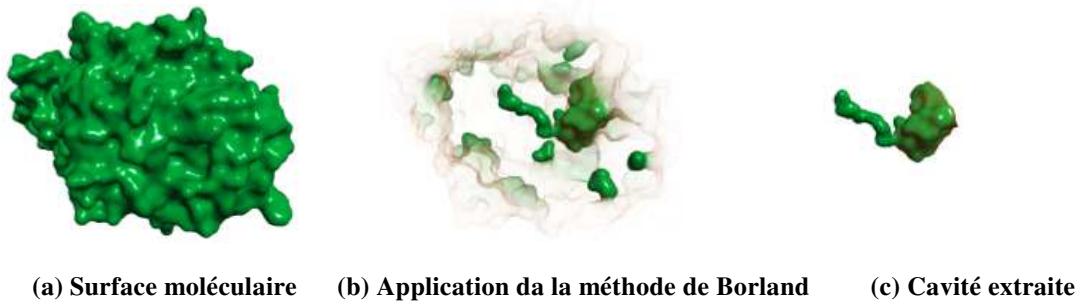
Figure 3—27: Le spectre d'occultation pour un ensemble de données IRM.

Plusieurs recherches (Krone et al., 2016) ont été également établies dans le cadre de la visualisation moléculaire dans le but de la détection, l'analyse et la visualisation des cavités dans les structures de protéines macromoléculaires. Ces surfaces sont caractérisées par une structure intérieure très compliquée qui n'est pas visible à partir des points de vue extérieurs à cause de l'occultation. Cet intérieur est souvent la région ou la caractéristique la plus importante de la surface.

Dans les interactions enzyme-ligand, le site actif d'un enzyme est considéré comme une cavité d'une surface moléculaire. La méthode de visualisation de Borland (2011) améliore la compréhension de l'intérieur des structures moléculaires et identifie les positions des cavités dans les molécules (Figure 3—28). Il a utilisé l'OA pour définir une opacité non constante pour chaque point dans la surface moléculaire.



Figure 3—28: La cavité de surface du site actif d'enzyme dit désaminase (dans le cercle). Une grande partie de la cavité est occultée par la surface extérieure (Borland, 2011).



**Figure 3—29: La cavité est extraite par un seuillage d’OA (Borland, 2011).**

Cette méthode permet également de calculer la couleur selon la valeur de l’OA pour améliorer la perception des cavités intérieure versus la surface extérieure (Figure 3—29).

Pour effectuer la segmentation 3D, certains travaux (Baum and Titschack, 2016) ont utilisé l’OA pour extraire des classes désirées mais différentes aux tissus ou aux matériaux constituant le volume de données. De nombreux objets naturels contiennent des pores et des cavités ayant des valeurs identiques à celles du matériau qui entoure l’objet. Par exemple, lorsque le CT visualise ces objets, les pores et les cavités ne peuvent pas être distingués du matériau englobant en utilisant le niveau de gris et les propriétés de texture de l’image.

### **3.4 Conclusion**

Après avoir introduit les critères essentiels de classification des méthodes d’OA pour le rendu volumique, nous avons présenté les différents travaux antérieurs concernant l’ombrage, l’automatisation de la fonction de transfert et la segmentation 3D, en détaillant plus ceux qui ont pour but d’améliorer l’ombrage. Nous avons regroupé ces derniers en deux catégories: les méthodes utilisant une phase de pré-calcul, et les méthodes la calculant à la volée.

De nombreuses solutions existent pour créer un système d’ombrage pour le rendu volumique en utilisant la définition géométrique de l’OA basée ray-casting (Ancel et al., 2010, 2012, Hernell et al., 2007, 2010; Ruiz et al., 2008; Stewart, 2003) qui offre des rendus de meilleure qualité mais impose un nombre important de directions échantillonnées. Celui-ci doit être choisi de manière efficace dans le voisinage de chaque voxel, ce qui rend complexe et difficile son intégration pour le calcul de l’OA des données scientifiques et augmente fortement le coût mémoire et calculatoire.

Alternativement, plusieurs méthodes sont proposées afin d'accélérer le calcul d'occultation sans l'utilisation des rayons, elles se basent sur des propriétés statistiques comme les histogrammes (Desgranges and Engel, 2007; Meß and Ropinski, 2010; Ropinski et al., 2008) ou des lois probabilistes (Penner and Mitchell, 2008; Ruiz et al., 2010). L'utilisation d'histogrammes a pour but de détecter les occulteurs d'un voxel mais les méthodes concernées souffrent généralement de l'un des inconvénients liés à l'augmentation du temps de calcul vu le nombre des histogrammes générés et leur régénération dépendamment au changement de la fonction de transfert. Les travaux exploitant des lois probabilistes représentent une bonne approximation du facteur d'occultation et offrent une qualité visuelle convaincante, mais ils sont caractérisés par le nombre énorme des variables intermédiaires utilisées et des calculs effectués.

Le chapitre suivant décrit notre méthode de calcul d'OA dont l'objectif est d'assurer la visualisation volumique avec une haute qualité en se basant sur les opérations du traitement d'images avec l'exploitation des filtres qui peuvent être effectués sur GPU.

## **Chapitre 4 — Occultation ambiante basée filtrage pour un ombrage volumique.**

### **4.1 Introduction**

L'augmentation constante de la taille des volumes médicaux observée depuis des années a principalement deux conséquences. Du point de vue du staff médical, la quantité d'information disponible rend plus difficile l'interprétation des données pour prendre les décisions correspondantes, ceci conduit à mettre en place une méthode d'ombrage sans configurer les paramètres et sans avoir une nécessité de recalculer les valeurs afin de faciliter sa tâche, d'autre part, il est nécessaire d'avoir une application qui n'augmente pas l'ensemble des données manipulées: initiales et générées pendant le traitement.

Notre objectif majeur dans cette thèse est de prendre en compte ces points en évitant l'utilisation d'une méthode d'illumination globale car elle influence l'interactivité des applications du rendu volumique. Dans ce contexte, la simulation de la lumière ambiante est convenable car elle semble venir de toutes les directions et impossible à déterminer, ainsi elle est uniquement caractérisée par son intensité. Cependant, l'éclairage ambiant n'est pas utilisé tout seul mais il est utilisé en conjonction avec d'autres modèles pour permettre d'illuminer certaines parties d'un volume qui ne le sont pas autrement. La solution sur laquelle nous nous concentrons est l'occultation ambiante (OA) qui est une méthode populaire pour donner un effet de certaines ombres douces peu coûteux en représentant la visibilité moyenne autour d'un voxel sans retranscrire la direction de la lumière. Elle permet de déterminer des influences des voxels les uns sur les autres et donnent des précisions sur leur distance, qui est parfois difficile à percevoir.

Nous réalisons une méthode efficace d'OA qui est considérée comme étant une approximation de l'éclairage indirect. Son principe est que chaque surface est assombrie en fonction de l'intensité de lumière qu'elle reçoit. Bien que la définition géométrique de l'OA trace efficacement les rayons, l'échantillonnage d'un nombre plus élevé de directions possède un impact important dans le temps de rendu. Alors, pour que la qualité et le temps de calcul de notre méthode ne soient pas influencés par le nombre des rayons utilisés pour calculer le facteur d'occultation de chaque voxel, nous utilisons une définition alternative non géométrique de l'occultation qui ne se base pas sur le lancer de rayons, une définition statistique qui exploite la nature discrète du volume vu qu'il est stocké dans une grille d'images 3D adéquate pour les opérations de traitement d'images qui ne sont pas possibles

dans le cas des mailles utilisées en rendu surfacique car ils sont stockées dans un format exploitable par les APIs graphiques comme un ensemble de triangles et des sommets.

Notre technique ne requiert pas un calcul de gradient ce qui la rend applicable aux régions homogènes, ainsi elle ne nécessite pas de manipuler beaucoup de variables afin de définir l'occultation de chaque voxel. Notre définition d'OA permet d'appliquer les techniques de filtrage de textures standard c.à.d. le filtrage linéaire. Par rapport aux techniques précédentes, elle consomme moins de mémoire (Penner and Mitchell, 2008; Ruiz et al., 2010) et produit moins d'artefacts sans besoin de transformer les données initiales (Penner and Mitchell, 2008; Ropinski et al., 2008).

## **4.2 Objectifs et motivation**

La visualisation scientifique est la transformation des données initiales en images compréhensibles en prenant en charge l'équilibre entre la simplification et la manipulation rapide de données, la clarté de la visualisation et une manipulation simple de l'application qui offre aux utilisateurs la possibilité de modifier les paramètres de façon interactive.

En particulier, la visualisation et l'imagerie biomédicale, en tant que branche de l'ingénierie biomédicale (Azar, 2011), fait référence à des techniques utilisées pour créer et afficher des images du corps humain et des organes à des fins cliniques ou de recherche. Une représentation facile de contenu est utilisée comme un outil de représentation des données du patient, elle joue un rôle décisif car elle constitue une aide importante pour le diagnostic et le traitement médical. Malheureusement, le grand intérêt pour atteindre un taux d'affichage interactif se fait au détriment de la qualité du rendu.

Pour donner aux scientifiques un aperçu de leurs données, la visualisation scientifique utilise des techniques d'infographie notamment le RVD (Hanqi et al., 2011). Cette technique nous permet d'obtenir une image finale unique de l'ensemble des données 3D, sans avoir besoin d'une géométrie intermédiaire, par un placage direct des voxels. Par conséquent, le RVD peut réduire le temps de traitement et permet d'utiliser l'application sans perdre le temps et l'effort à la recherche d'outils pour faire les transformations nécessaires. Par contre, les autres techniques de visualisation 3D nécessitent le calcul d'une représentation géométrique intermédiaire des données avant le rendu, ce qui provoque la perte d'une quantité importante d'information.

Pour avoir des données volumiques visibles, le RVD utilise la fonction de transfert pour convertir les valeurs initiales de données à un ensemble des propriétés optiques sous



forme de quantités observables lors de rendu; comme des opacités et des couleurs. Une fonction de transfert doit donc être convenable pour mettre en évidence les régions et les caractéristiques d'intérêt, ce qui rend cette tâche difficile même si la seule variable à utiliser est l'opacité.

Une bonne perception des relations spatiales est importante, ainsi l'ombrage volumique (Lindemann and Ropinski, 2011) a montré sa capacité à créer une bonne visualisation de volume permettant une compréhension facile et fiable du contenu intérieur. Les gradients peuvent être utiles lorsqu'on considère la relation entre la direction d'une surface contenue dans l'ensemble de données et la position de la source lumineuse, cependant, dans des ensembles de données bruitées (comme l'échographe), les gradients peuvent ne pas être clairement définis et conduire à des artefacts et des effets erronés d'ombrage, l'utilisation d'un modèle d'ombrage indépendant des gradients peut alors être un avantage. Pour cette raison, nous avons évité l'utilisation des gradients dans notre technique.

Notre méthode offre une meilleure compréhension de l'espace en prenant en compte les occulteurs voisins: opaques et semi-transparents. Puisque les données biomédicales ont tendance à être un peu bruitées, nous proposons que notre méthode se base sur OA, qui est indépendante du gradient. Afin de fournir des indications de profondeur supplémentaires, les valeurs d'OA doivent être intégrées dans le RVD basé ray casting.

Comme il est mentionné précédemment, la fonction de transfert (Läthén et al., 2014) joue un rôle important lors de l'observation des différentes variations des tissus médicaux, elle aide à révéler les structures importantes dans les données sans les masquer avec des régions sans importance. Notre contribution doit aussi permettre de manipuler interactivement la visualisation avec l'édition de la fonction de transfert, notre idée principale est donc d'aborder ce problème en proposant une méthode d'ombrage basée OA indépendante de toute fonction de transfert, tout en supportant les changements interactifs de la fonction de transfert, ce qui implique que les modifications des structures 3D des données doivent être prises en considérations lors de rendu.

### 4.3 Algorithme: Description générale

#### 4.3.1 Rappel

Dans cette section nous introduisons quelques notions nécessaires pour décrire brièvement notre méthode (Bergounioux, 2015; Chandel and Gupta, 2013; Giovannetti et al., 2007; Pathak and Singh, 2014; Singh and Aman, 2013; Tania and Rowaida, 2016).

##### 4.3.1.1 Filtrage

Les images peuvent être dégradées par différentes perturbations qui peuvent être éliminées par le filtrage en essayant de ne pas toucher aux informations essentielles de l'image (contours, dynamique, textures etc.) Le filtrage possède plusieurs avantages: il permet de réduire le bruit ou des artefacts dans les images, supprimer certains détails de l'image si nécessaire et plus généralement améliorer les images. Dans ce contexte, le traitement d'image s'appuie fondamentalement sur des traitements à l'aide de voisinage. Cela signifie que les traitements effectués à un endroit donné correspondant à un pixel dépendent non seulement de ce pixel mais aussi des pixels appartenant à son voisinage. Tous les types de filtres changent la valeur d'un pixel de manière à la remplacer par une autre en tenant en compte des valeurs des pixels dans un voisinage homogène.

Noter qu'il y a trois modifications possibles sur les valeurs d'une image: les transformations ponctuelles, les transformations locales et les transformations globales. Les transformations ponctuelles des pixels d'une image consistent à lire la valeur d'un pixel et la remplacer par une autre. Avec les transformations locales, on lit la valeur de quelques pixels voisins pour calculer une nouvelle valeur pour un pixel. Concernant les transformations globales, les valeurs de tous les pixels de l'image sont lues pour calculer une nouvelle valeur pour un seul pixel.

##### 4.3.1.2 Filtres de convolutions

L'image numérique étant une carte de pixels, on peut identifier chaque pixel par ses coordonnées  $X$  et  $Y$  et lui affecter une valeur liée à sa luminosité. On peut utiliser dans le cadre des images numériques un tableau de  $X$  colonnes et  $Y$  lignes qui réserve une place pour ranger la valeur de chaque pixel de l'image.

Un produit de convolution, est un opérateur mathématique qu'on utilise pour multiplier des matrices entre elles. Dans le cas qui nous intéresse, nous mettons en jeu deux matrices très différentes: la matrice image  $I$ , très grande et une matrice plus petite qu'on appelle le noyau  $h$  parce que c'est le "cœur" de tous les changements qui vont affecter l'image. Le noyau va donc

agir sur chacun des pixels, c'est à dire sur chacun des éléments de la matrice "image". Ce processus représente la base des filtres dits filtres de convolution.

Notons qu'il y a un autre type de filtres par équations aux dérivées partielles (Bergounioux, 2015).

#### *4.3.1.3 Filtres séparables*

Lorsque la matrice de convolution ou le noyau  $h$  peut s'écrire comme produit d'un vecteur colonne  $h_{Colonne}$  et d'un vecteur ligne  $h_{Ligne}$ .

### **4.3.2 Vision générale sur notre méthode**

Notre objectif est de proposer une nouvelle méthode d'ombrage basé-OA afin d'obtenir un rendu volumique interactif avec des ombres douces de haute qualité en minimisant le coût de mémoire. Notre principale contribution est la dérivation d'une nouvelle formule pour estimer la probabilité d'occultation d'un voxel qui est basée sur une méthode dite la théorie des cartes d'ombre exponentielles (ESM) proposée par Annen et al. (2008). Cette méthode a pour but le filtrage de SM, en approximant le test d'ombre à l'aide d'une fonction exponentielle qui est exploitée dans notre méthode afin d'approximer l'OA d'un voxel en utilisant le filtrage sur GPU. L'idée est d'interpréter le test d'occultation comme une fonction en escalier et utiliser l'exponentielle comme une approximation séparable de cette fonction en escalier. Un seul canal de texture de 32 bits est suffisant, ce qui rend cette approche consomme moins d'espace.

Dans cette section, nous introduisons brièvement notre pipeline d'ombrage basé-OA (Figure 4—1). Nos entrées sont les valeurs de densité de voxels (volume de densité) pour obtenir des informations d'ombrage sur chaque voxel afin d'identifier son facteur d'occultation indépendamment de la fonction de transfert utilisée.

Tous les voxels, distants ou proches, peuvent contribuer à la visibilité d'un point donné. Vu que l'OA a un caractère global, son utilisation peut affecter les performances dans les applications interactives. Pour éviter cette difficulté, notre solution consiste à appliquer une approximation du problème en remplaçant le calcul de visibilité globale par une expression locale (voir Figure 4—2).

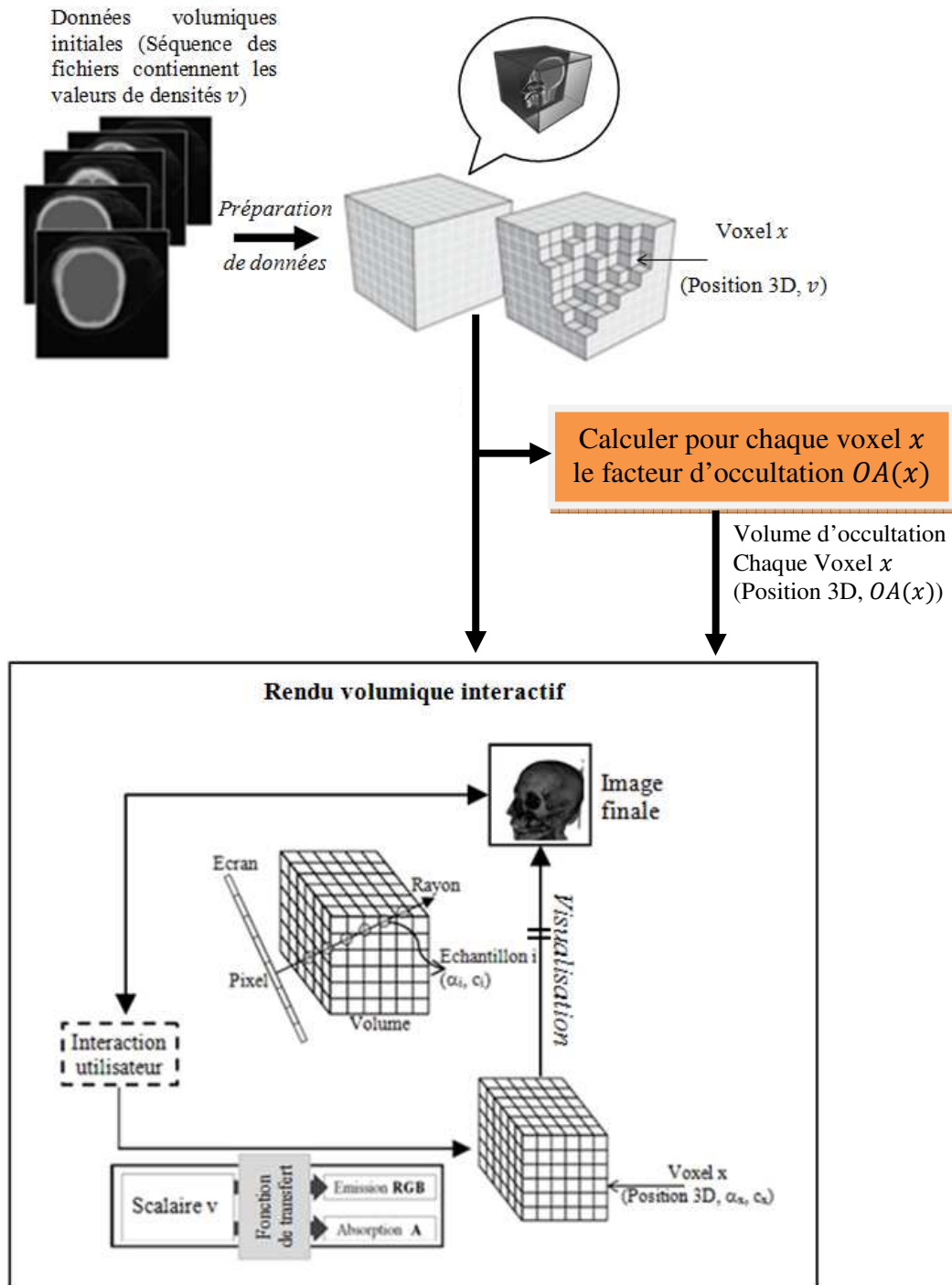
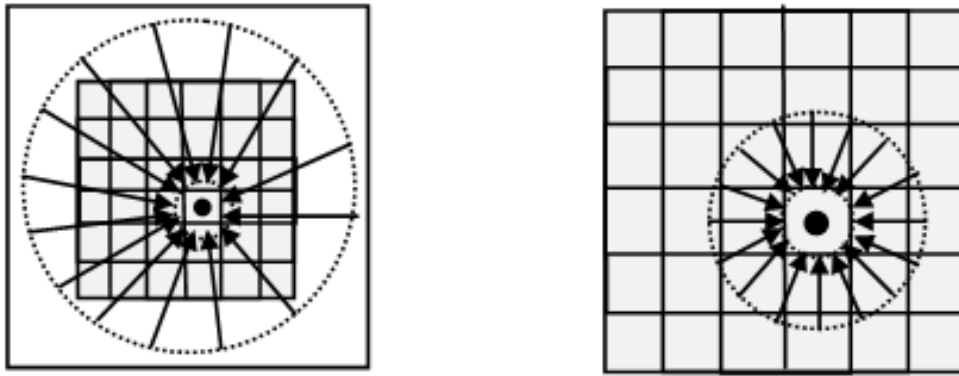


Figure 4—1: Schéma général de la technique proposée.



**Figure 4—2: OA. Approximation globale (gauche) vs approximation locale (droite).**

La connaissance du voisinage d'un voxel est essentielle, afin de calculer les effets appropriés d'ombrage basé-AO. Dans notre méthode, les interactions lumineuses sont capturées uniquement dans le voisinage de voxel qui est présenté par une sphère centrée au voxel au lieu de l'hémisphère utilisée dans le rendu surfacique classique (voir Figure 4—3).



**Figure 4—3 : Voisinage du voxel. Gauche: hémisphère détermine l'OA; la partie pointillée ne bloque pas la lumière. À droite: l'ombrage volumétrique est basé sur une sphère entière.**

Nous pouvons exploiter la nature discrète du volume pour calculer l'occultation en exprimant le champ scalaire volumique comme une variable aléatoire discrète afin d'obtenir les informations nécessaires d'ombrage. Pour calculer statistiquement l'OA, nous utilisons une hypothèse souvent exploitée dans les techniques d'approximation où la performance interactive est demandée. Le pourcentage de voxels voisins occulteurs donne une bonne approximation du pourcentage de rayons qui peuvent être occultés quand ils traversent le même espace. Sous cette hypothèse, nous utilisons une fonction caractéristique appropriée d'une manière que la valeur OA obtenue est minorée par 0, et majorée par 1.

Le prétraitement ne permet pas d'avoir un rendu volumique interactif à cause de la quantité importante des données voisines. Pour éviter ce problème, nous proposons une

solution à base de filtrage sur GPU qui offre l'acquisition et la compression des informations de voisinage pour chaque voxel. Donc, l'information lumineuse est compressée pour être manipulée interactivement pendant le rendu.

Le calcul d'OA en utilisant un filtrage approprié crée de nouvelles opportunités pour le RVD en particulier avec les changements de fonction de transfert. En plus ses avantages précédemment cités, le choix de notre approche pour adapter le processus de filtrage dans le cadre d'ombrage 3D est motivée par les résultats des recherches qui montrent que les filtres sur GPU deviennent de plus en plus développés. Notamment, la séparabilité de plusieurs types de filtres; le filtrage ou la convolution peut être réalisé en deux (ou plus ) passes séparées qui s'exécutent en parallèle: une convolution 1D est appliquée pour chaque vecteur.

Dans les prochaines sections, nous présenterons en détail notre méthode (Algorithme 4-1) qui est schématisée par Figure 4—4.

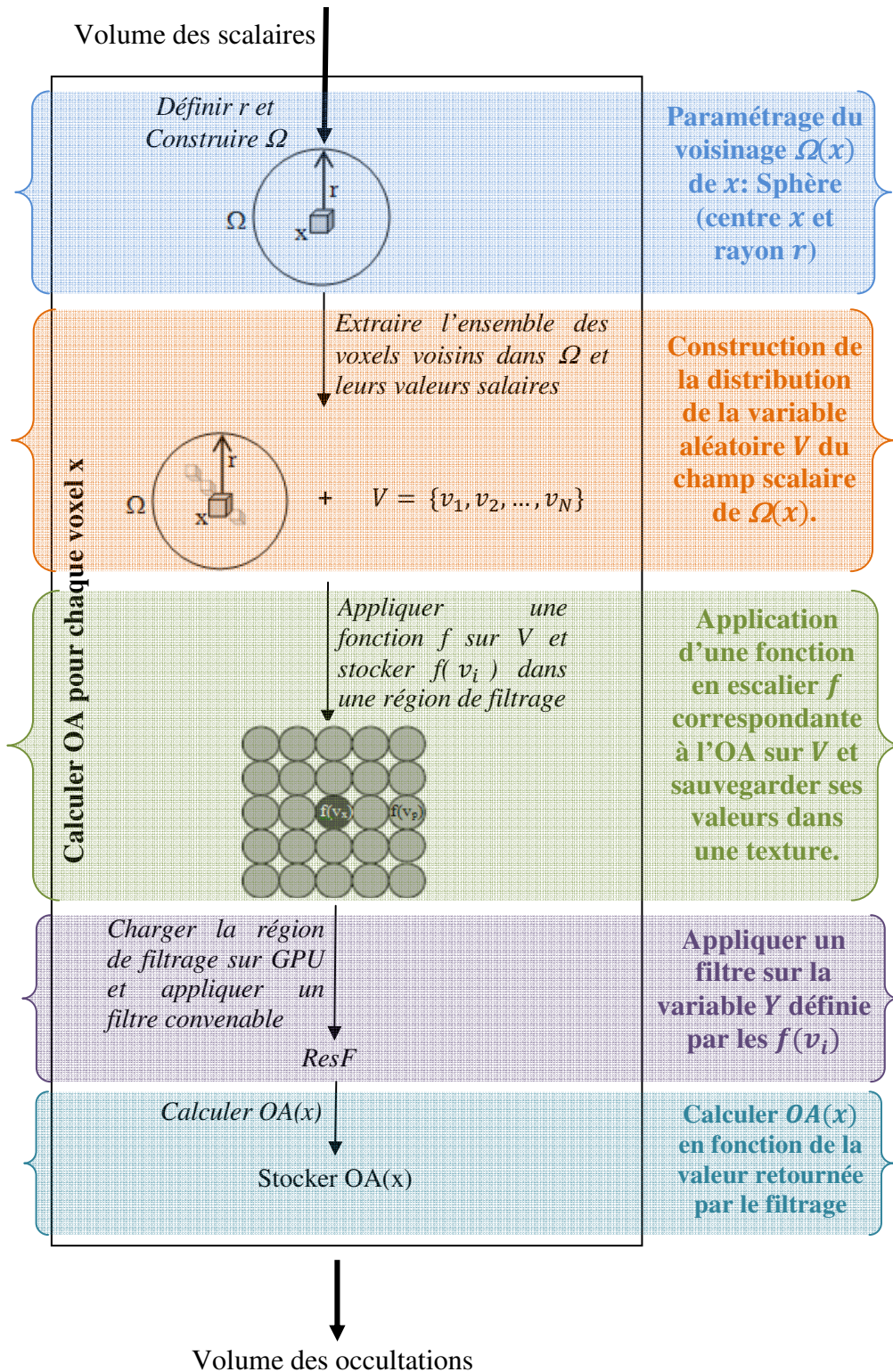


Figure 4—4: Une définition non géométrique de l'OA.

**Algorithme 4-1: OA statistique basée filtrage**

**Entrée:** Volume initial des valeurs scalaires  $v$

**Sortie:** Facteur d'occultation de voxel  $x$ :  $O(x) \in \mathbb{R}$

**Prétraitement**

**Entrée:** Information de voisinage de  $x$  avec un rayon sphérique  $r$

**Sortie:** Facteur d'occultation de voxel  $x$ :  $OA(x) \in [0,1]$

RV  $\leftarrow$  Résolution complète du volume original.

Répéter jusqu'à la fin de RV

**Etape 1:** Détecter l'information d'illumination de  $x$

$\Omega(x) \leftarrow$  Trouver la région avoisinante de  $x$

$V \leftarrow \{v_i = \text{valeur\_scalaire}(x_i) \mid x_i \in \Omega(x)\}$

$V_f = \{f(v_1), f(v_2), \dots, f(v_n)\}$  // Utiliser la fonction correspondante pour simuler le test d'occultation classique

**Etape 2:** Compresser l'information d'illumination de  $x$

$F_R \leftarrow$  Sauvegarder  $V_f$  sous forme une région de filtrage

Sauvegarder  $F_R$  dans une texture

$ResF \leftarrow$  Valeur retournée par l'application d'un filtre sur  $F_R$ .

**Etape 3:**  $OA(x) \leftarrow$  Utiliser ( $ResF$ ) pour calculer sa valeur d'occultation

Sortie  $OA(x)$  comme une valeur finale d'occultation

**Fin répéter**

Appliquer une fonction de transfert: Atténuer la couleur par  $OA(x)$

Rendu volumique: Appliquer ray casting sur le volume

Par pixel: Lancer un rayon

**Pour** tous les échantillons le long du rayon **faire**

Calculer couleur et opacité

Appliquer l'équation d'accumulation

**Fin Pour**

**Si** la fonction de transfert est changée **Alors**

Mettre à jour la couleur et l'opacité de chaque voxel

Utiliser ray casting en tenant en compte les nouvelles propriétés et les anciennes valeurs de visibilité sans aucun recalcul des OA



## 4.4 OA comme une information statistique

### 4.4.1 Rappel mathématique

Cette section a pour but de donner un rappel sur les termes statistiques et probabilistes (Sinai, 2013) que nous utilisons pour développer cette partie de thèse.

#### 4.4.1.1 Théorie de probabilité

La théorie des probabilités en mathématiques est l'étude des phénomènes caractérisés par le hasard et l'incertitude. Elle forme avec la statistique les deux sciences du hasard qui sont partie intégrante des mathématiques. Dans la théorie des probabilités, le but est de proposer un modèle prédictif pour une expérience aléatoire  $(E_R, A, \mathbb{P})$ :

1. Un ensemble, noté  $E_R$ , dit un univers des possibles qui donne la liste de tous les résultats que l'on pourrait obtenir si on réalisait l'expérience, ces éléments sont appelés cas possibles.
2. Un ensemble  $A$  dont les éléments sont tous les événements liés à l'expérience, chaque événement regroupant les éventualités pour lesquelles une certaine propriété est vérifiée. Ces événements, qui peuvent être réalisés ou pas au cours de l'expérience selon le résultat obtenu, représentent les seuls ensembles de possibilités pour lesquels on sait calculer la probabilité de réalisation.
3. L'espace probabilisable  $(E_R, A)$  est muni d'une mesure de probabilité afin de pouvoir calculer la probabilité de réalisation de n'importe quel événement lié à l'expérience aléatoire. Mathématiquement, cette mesure de probabilité est une application qui à chaque événement  $Eve \in A$  associe une valeur réelle comprise au sens large entre 0 et 1, souvent exprimée en pourcentage, dite probabilité de l'évènement  $Eve$ . Cette mesure de probabilité  $\mathbb{P}$  vérifie les trois axiomes des probabilités:

- i. (positivité) la probabilité d'un événement est une valeur entre 0 et 1:  $\forall Eve \in A, 0 \leq \mathbb{P}(Eve) \leq 1$ ,
- ii. (masse unitaire) la probabilité de l'univers est 1:  $\mathbb{P}(E_R) = 1$ ,
- iii. (additivité) pour toute suite dénombrable d'événements  $Eve_1, Eve_2, \dots \in A$  disjoints deux à deux, c'est-à-dire tels que  $Eve_i \cap Eve_j = \emptyset$  pour tous  $i \neq j$  alors  $\mathbb{P}(\bigcup_{i \geq 1} Eve_i) = \sum_{i \geq 1} \mathbb{P}(Eve_i)$ .

La théorie des probabilités est dite discrète lorsque l'ensemble  $E_R$  de l'espace probabilisé est fini ou dénombrable.

#### 4.4.1.2 Nature des Variables

Une variable est une application ou une relation qui associe à chaque individu de la population, une observation particulière.

Une variable est une caractéristique étudiée pour une population donnée. Il existe 2 types de variables: les variables qualitatives et les variables quantitatives.

- Les variables qualitatives sont représentées par des qualités, telles que le sexe, le programme d'études ou encore l'état civil. Les variables qualitatives s'expriment en modalités ou catégories qui sont comme des choix de réponses aux variables étudiées.
- Les variables quantitatives sont représentées par des quantités telles que l'âge, le poids et la taille. Elles s'expriment en valeurs représentent les choix de réponses aux variables quantitatives.

Les variables qualitatives s'opposent aux variables quantitatives: on ne peut pas leur calculer un total pour un ensemble d'individus. Il existe deux types différents des variables quantitatives, les variables quantitatives discrètes et continues.

- Les variables quantitatives discrètes sont des valeurs que l'on peut énumérer, il est inutile d'utiliser des classes pour les exprimer.
- Les variables quantitatives continues sont des valeurs très nombreuses dont l'énumération serait fastidieuse. Il est donc préférable de les exprimer en classe de largeur égale.

#### 4.4.1.3 Loi de probabilité d'une variable aléatoire

La loi de probabilité d'une variable aléatoire  $X$  est donnée par:

- l'ensemble des valeurs  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  prises par la variable aléatoire ;
- les probabilités  $\mathbb{P}(X=x_i)$  pour toutes les valeurs  $x_i$  prises par  $X$  (on rappelle que  $\sum_{i=1}^n \mathbb{P}(X = x_i) = 1$ ).

#### 4.4.1.4 Fonction de densité de probabilité

La fonction de densité de probabilité est une fonction positive qui décrit la vraisemblance de chaque valeur spécifique qu'une variable peut avoir.

#### 4.4.1.5 Fonction de distribution cumulative CDF

La densité de probabilité  $\mathbb{P}(x)$  ou la fonction de distribution cumulée  $F_X(x)$  définissent la loi de probabilité d'une variable aléatoire  $X$  (Walck, 2007). La fonction de distribution cumulée  $F_X(x)$ , encore appelée fonction de distribution ou fonction de répartition, d'une variable aléatoire  $X$  exprime la probabilité que  $X$  n'excède pas la valeur  $x$  (Équation 4.1).

Il est important de remarquer que  $F_X(x)$  est une fonction de  $x$  et non de la variable aléatoire  $X$ , pour chaque valeur de  $x$ ,  $F_X(x)$  représente une probabilité cumulée des fonctions de densité (Équation 4.3).

$$F_X(x) = \mathbb{P}(X \leq x) \quad \text{Équation 4.1}$$

La CDF ou la fonction de répartition de la variable aléatoire  $X$  est la fonction

$$\begin{aligned} F_X: \mathbb{R} &\rightarrow [0,1] \\ x &\mapsto F_X(x) = \mathbb{P}(X \leq x) \end{aligned} \quad \text{Équation 4.2}$$

$F_X$  est positive et croissante, continue à droite, telle que  $\lim_{x \rightarrow -\infty} F_X(x) = 0$  et  $\lim_{x \rightarrow +\infty} F_X(x) = 1$ .

$$F_X(x) = \mathbb{P}(X \leq x) = \sum_{x_i \leq x} \mathbb{P}(X = x_i) = \sum_{x_i \leq x} p(x) \quad \text{Équation 4.3}$$

#### 4.4.2 Définition statistique d'OA

Notre contribution, qui peut être appliquée dans le cas de RVD, approxime la technique OA par la CDF appliquée sur les valeurs de densité sans transformer les données initiales à l'iso-surface comme dans le cas de (Penner and Mitchell, 2008), évitant aussi le recalculé dans des applications caractérisées par l'édition interactive de la fonction de transfert.

Le stockage du champ scalaire dans une grille de voxels nous aide à accélérer l'OA volumique en exploitant l'avantage de la représentation basée-image. Donc, l'objectif est d'améliorer le prétraitement de volume de façon à extraire rapidement les informations sur le nombre de voxels occulteurs sans lancer un grand nombre de rayons.

Soit  $x \in \mathbb{R}^3$  un voxel pour lequel nous allons calculer sa valeur d'OA et  $p \in \mathbb{R}^3$  son voisin,  $v_x \in \mathbb{R}$  et  $v \in \mathbb{R}$  sont les valeurs scalaires de  $x$  et  $p$  respectivement. Si  $v$  est inférieure à  $v_x$ , donc  $p$  n'est pas un occulteur. Maintenant, nous supposons que  $V$  est une variable aléatoire dont la distribution est définie par les  $N$  valeurs  $v_1, \dots, v_N$  des voxels qui appartiennent à la région sphérique voisine  $\Omega$  centrée sur  $x$  (voir Figure 4—5).  $V$  est une variable quantitative discrète car elle prend un nombre fini ou dénombrable de valeurs réelles numériques exprimées par des observations (densités). Nous allons continuer à utiliser les notations décrites ici pour le reste de ce document.

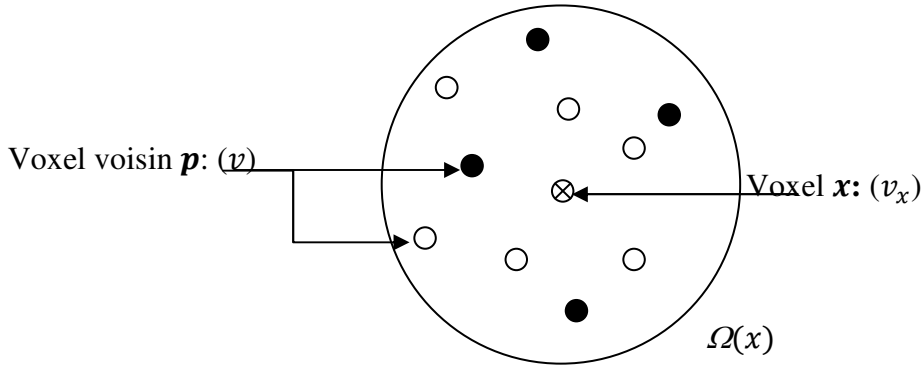


Figure 4—5 : Détermination des voxels occulteur  $p$  dans un voisinage représenté par une région sphérique  $\Omega(x)$  centrée à  $x$ : les voxels en noir sont des occulteurs ( $v \geq v_x$ ), tandis que les blancs ne sont pas ( $v \leq v_x$ ).

Si nous avons des informations sur la distribution de  $V$ , nous pouvons éviter de faire un test d'occultation pour chaque voxel  $p$  en effectuant un test unique sur la distribution entière. En fait, la CDF (Équation 4.4) est la fonction optimale pour effectuer ce test. Alors, si nous supposons qu'une région est une distribution des valeurs  $V$ , la CDF de la valeur scalaire du voxel  $x$  est définie par:

$$F_V(v_x) = \mathbb{P}(V \leq v_x) = \sum_{v_i \leq v_x} \mathbb{P}(V = v_i) = \sum_{v_i \leq v_x} p(v_i) \quad \text{Équation 4.4}$$

$v_i \in \mathbb{R}$  présente la valeur scalaire d'un voxel voisin à  $x$ . Dans cette équation,  $F_V(v_x)$  donne la probabilité d'avoir des voxels  $p \in \Omega(x)$  ayant des valeurs scalaires  $v_i$  plus petites ou égales à  $v_x$  c.à.d.  $F_V(v_x)$  détermine le pourcentage des voxels  $p$  qui n'occultent pas la lumière à  $x$ . Pour calculer le facteur d'occultation du voxel  $x$ ,  $OA(x)$ , nous appliquons la formule suivante:

$$OA(x) = 1 - F_V(v_x) \quad \text{Équation 4.5}$$

Cependant, le pré-calcul des  $F_V(v_x)$  pour chaque région sphérique nécessite beaucoup d'espace mémoire pour stocker toutes ces CDFs non compressées.

## 4.5 Test d'occultation comme une fonction en escalier exponentielle

### 4.5.1 Rappel mathématique

Nous introduisons d'abord les notions nécessaires à la définition du test d'occultation comme une fonction en escalier exponentielle (Kerns, 2011; Mendenhall et al., 2012; Rohatgi and Saleh, 2015; Spiegel et al., 2009)

#### 4.5.1.1 Effectif et fréquence

Le nombre d'individus présentant la valeur  $x_i$  de variable  $X$  s'appelle l'effectif ( $n_i$ ), d'une autre façon, il est le nombre des fois où  $x_i$  apparaît dans la population statistique étudiée. S'il y a  $p$  valeurs de la variable  $X$ , les effectifs sont donc notés  $n_1, n_2, \dots, n_p$ , nous considérons la situation statistique suivante:

Valeurs	$x_1$	$x_2$	...	$x_p$
Effectifs	$n_1$	$n_2$	...	$n_p$

**Tableau 2 : Notion d'effectif statistique.**

L'effectif total, ou la somme des effectifs, est donc égale au nombre total d'individus de la population. Ce nombre est noté  $n$ .

$$n = \sum_{i=1}^p n_i = n_1 + n_2 + \dots + n_p \quad \text{Équation 4.6}$$

La fréquence de la valeur  $x_i$  est le rapport de l'effectif de la valeur sur l'effectif total:

$$f_i = \frac{n_i}{n} \quad \text{Équation 4.7}$$

$f_i$  est toujours une valeur comprise entre 0 et 1 qui donne le pourcentage d'individus présentant la valeur  $x_i$  par rapport à l'ensemble de la population observée. Pour une série statistique présentant  $p$  valeurs, on a:

$$\sum_{i=1}^p f_i = f_1 + f_2 + \dots + f_p = 1 \quad \text{Équation 4.8}$$

#### 4.5.1.2 Fonction d'escalier

La notion de fonction en escaliers est assez intuitive. Nous allons la préciser. Soient  $a$  et  $b$  deux réels tels que  $a < b$ .

(1) Une subdivision  $\sigma$  de  $[a, b]$  est la donnée d'une liste finie strictement croissante d'éléments de  $[a, b]$

$\sigma = (x_0, x_2, \dots, x_n)$  avec  $x_0 < x_2 < \dots < x_n$  telle que  $x_0 = a$  et  $x_n = b$

(2) On dit qu'une fonction  $\varphi: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  est en escaliers s'il existe une subdivision  $\sigma = (x_0, x_2, \dots, x_n)$  de  $[a, b]$  telle que  $\varphi$  soit constante sur chacun des intervalles  $]x_i, x_{i+1}[$  pour  $i$  parcourant  $\{0, 1, \dots, n-1\}$ . On dit qu'une telle subdivision  $\sigma$  est adaptée à  $\varphi$ .

Alors, on appelle ainsi toute fonction qui est constante dans une suite d'intervalle, une fonction escalier c.à.d. elle est une fonction définie par une combinaison linéaire de fonctions élémentaires. Comme un cas particulier, une fonction élémentaire est une fonction valant 1 sur un intervalle  $I$  et 0 partout ailleurs, tel que.

$$\varphi_I(x) = \begin{cases} \alpha_1 = 1, & x \in I \\ \alpha_2 = 0, & x \notin I \end{cases} \quad \text{Équation 4.9}$$

L'une des propriétés de ce type de fonction est la somme suivante:

$$\varphi_I(x) = \sum_{i=1}^2 \alpha_i \quad \text{Équation 4.10}$$

Où  $\alpha_i$  est une valeur scalaire que prend  $\varphi_I(x)$  pour chaque intervalle.

#### 4.5.1.3 Fonction de Heaviside

La fonction en escalier (Équation 4.9) la plus utilisée est la fonction échelon-unité ou fonction de Heaviside  $H$ . Elle est une fonction discontinue prenant la valeur 0 pour tous les réels strictement négatifs et la valeur 1 partout ailleurs c.à.d.  $H$  a comme argument un nombre  $a$  et calcule les valeurs de la fonction au point  $a$ . On a par définition:

$$\forall x \in \mathbb{R}, H(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad \text{Équation 4.11}$$

#### 4.5.1.4 Filtrage séparable

Un filtre séparable selon  $x$  et  $y$  est un filtre pour lequel:  $f(x, y) = f_1(x) \times f_2(y)$ . Dans ce cas, la convolution 2D s'écrit comme une convolution 1D par  $f_1$ , suivi par une convolution 1D de  $f_2$ . Plus générale, on peut avoir:  $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_1(x_1) \times f_2(x_2) \times \dots \times f_n(x_n)$ . Cela réduit le coût de calcul de l'opérateur.

### 4.5.2 Test d'occultation

Pour calculer l'occultation d'un voxel  $x$ , il faut utiliser une variable qualitative  $C$  pour catégoriser les voxels voisins  $p$ . Dans notre cas, deux valeurs statistiques sont définies pour  $C$ : la valeur  $c_1 = \text{"occulteur"}$  attribuée aux voxels  $p$  qui satisfaisaient la condition  $v_p > v_x$  et une valeur  $c_2 = \text{"non occulteur"}$ , sinon.

Soient  $n$  l'effectif qui représente le nombre d'individus de  $c_1$  et  $f$  sa fréquence qui offre la proportion d'individus (voxels) de la population ( $\mathcal{Q}(x)$ ) possédant la valeur  $c_1$ . Alors,  $f$  réfère au facteur d'occultation du voxel  $x$  donnant une nouvelle définition de  $OA(x)$  (Équation 4.5), comme suit:

$$OA(x) = f = \frac{n}{N} \quad \text{Équation 4.12}$$

Cette formule est applicable aussi si la variable aléatoire  $V$  suit une distribution uniforme où la probabilité de chaque valeur  $v_i$  est égale à  $\frac{1}{N}$ . Dans ce cas,  $n$  est le nombre des cas favorables représentant les voxels occulteurs et  $N$  est le nombre de cas possibles.

Il est possible d'exprimer la fonction de distribution en terme de distribution déterministe centrée à  $x$  par lequel nous calculons  $n$ ; de sorte que la probabilité géométrique de l'occultation est:

$$OA(x) = 1 - \mathbb{P}_V(v \leq v_x) = \frac{\sum_{i=1}^N S(v_x - v_i)}{N} \quad \text{Équation 4.13}$$

où  $S$  représente une fonction en escalier, elle est utilisée pour calculer le test binaire de l'occultation entre  $x$  et chacun de ses voisins  $p$ ; notée  $TO(v_x, v)$ .

L'application de la dernière formule nécessite  $N$  accès à la grille des voxels, augmentant considérablement le temps de calcul, sauf lorsque  $N$  est petit. Dans ce cas, la sélection d'une petite sphère qui contient certains centres de voxels dégrade la qualité de l'OA et remplace l'ombre douce par des ombres dures plus petites.

Une approximation continue efficace de distribution de probabilité peut diminuer le temps de calcul des facteurs d'occultation. Avec une telle approximation, le support d'un noyau de filtre ne contient pas de valeurs des voxels (les valeurs  $v$ ). Donc, nous allons utiliser quelques variables représentatives qui peuvent être calculées avec un filtrage séparable, pour obtenir un rendu interactif.

Notre première contribution est une approximation, décrite ci-dessous, qui offre un espace mémoire réduit par rapport à (Penner and Mitchell, 2008), car elle utilise une approximation plus simple représentée par un seul terme.

Supposons que  $v_x - v \geq 0$  qui peut être pratiquement faux. Nous allons expliquer comment cette hypothèse est utilisée pour simplifier le test d'occultation et discuter le traitement à effectuer dans le cas contraire.

Le test d'occultation pour  $x$  est défini comme suit:

$$TO(v_x, v) = H(v_x, v) \quad \text{Équation 4.14}$$

où  $H(v_x, v)$  est une fonction en escalier de Heaviside, avec une valeur de 0 dans le cas de  $v_x \geq v$  et 1 sinon. En utilisant l'hypothèse  $v_x - v \geq 0$ , le test d'occultation  $H(v_x, v)$  est approximée avec une exponentielle comme suit:

$$H(v_x, v) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} e^{-\alpha(v_x - v)} \quad \text{Équation 4.15}$$

qui peut être estimé en utilisant une grande valeur positive  $c$  pour  $\alpha$ . En effet, pour  $c \gg 1$ ,  $e^{c \cdot y}$  ( $y$  est une variable réelle quelconque) a une pente très rapide proche de  $y = 0$  et tend rapidement vers 0 pour  $y < 0$ , comme la fonction en escalier  $H$ .

$$H(v_x, v) \approx e^{-c(v_x - v)} \quad \text{Équation 4.16}$$

Nous pouvons séparer cette fonction exponentielle en deux facteurs qui sont en fonction de  $v_x$  et  $v$ . Nous exploitons l'approximation de  $H$  par la fonction exponentielle suivante (Annen et al., 2008):

$$H(v_x, v) \approx e^{-c v_x} \cdot e^{c v} \quad \text{Équation 4.17}$$

Afin d'arriver à une bonne approximation, nous utilisons  $H(v_x, v)$  pour calculer  $S(v_x - v_i)$  (voir Équation 4.13).

## 4.6 Occultation et filtrage

### 4.6.1 Percentage closer filtering

PCF ou Percentage Closer Filtering (Reeves et al., 1987) est une technique de filtrage qui présente une solution pour le problème d'aliasing causé par les algorithmes de calcul d'ombre en utilisant les cartes de profondeur. Cet algorithme représente est une technique d'antialiasing et offre les ombres douces qui ressemble les pénombres.

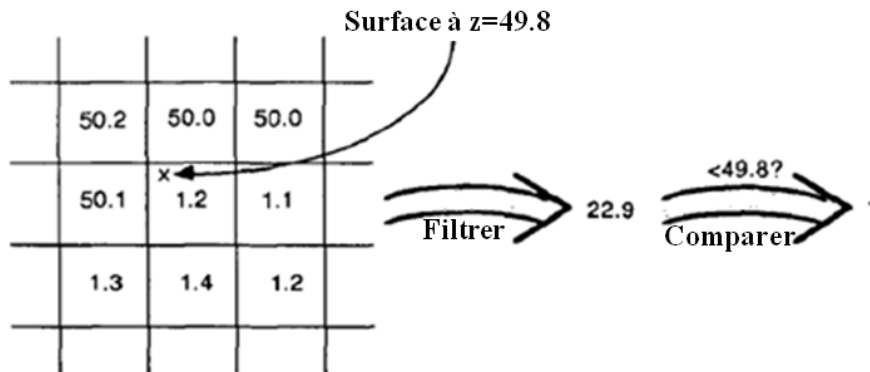


L'algorithme de z-buffer s'exécute en deux passes, dans la première passe, une vue de la scène est calculée au point de vu de la source lumineuse et calculer les valeurs z des objets les plus proches de la scène et les sauvegarder dans un z-buffer ou une carte de profondeur. Dans la seconde passe, la scène est rendue de point de vue de caméra. Pour chaque pixel, un point sur la surface est transformé sur l'espace de la source lumineuse, et comparer son z transformé avec le z de l'objet le plus proche de la lumière dans la carte de profondeur. Si le z transformé est supérieur du z sauvegardé, le point est dans l'ombre.

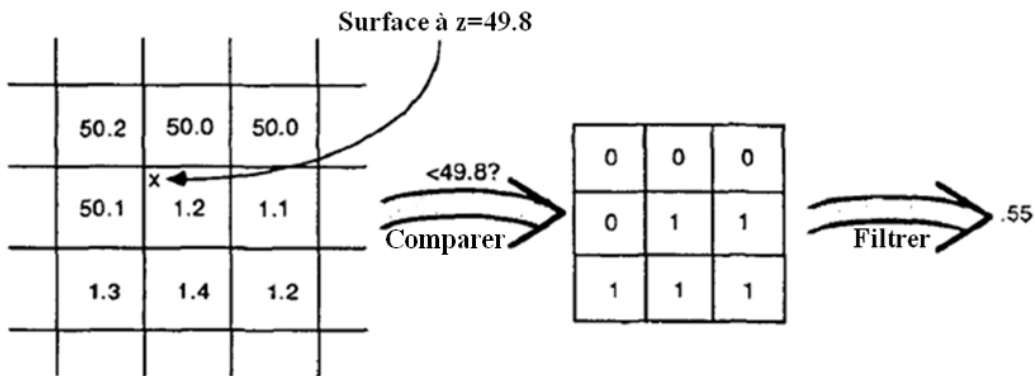
Cet algorithme possède deux problèmes d'aliasing : le premier concerne la création de la carte de profondeur, et le deuxième concerne l'échantillonnage. Le PCF a pour but de résoudre le deuxième problème. Les cartes des textures sont accessibles par le filtrage des valeurs des textures appartenant à une région particulière de la carte de la texture. Mais, les cartes de profondeur pour le calcul d'ombre ne sont pas accessibles de cette manière. Le problème principal est la valeur de profondeur filtrée qui doit être comparée à la profondeur de la surface à rendre pour déterminer si la surface est dans l'ombre ou non à ce point. Le résultat de cette comparaison doit être binaire, ce qui fait les ombres douces deviennent impossibles. Un autre problème est que les valeurs de profondeurs filtrées aux frontières des objets apparaissent comme n'avoir aucune relation avec le reste de la géométrie de la scène.

La solution proposée inverse l'ordre des étapes de filtrage et de comparaison. Les valeurs z de la carte de profondeur dans toute la région sont d'abord comparées à la profondeur de la surface à rendre. Cette transformation d'échantillonnage fait la conversion de la carte de profondeur de la région en une image binaire, qui est ensuite filtrée pour donner les proportions de la région en ombre. Les ombres ont des frontières douces sans aliasing.

Les GPUs offrent des méthodes pour réduire l'aliasing des textures de couleurs: mipmapping et filtrage anisotropique. Ces techniques ne peuvent pas être appliquées aux SMs standards, puisqu'elles interpolent les profondeurs des pixels voisins. Typiquement, les implémentations en temps réels utilisent l'échantillonnage du plus proche voisin de SMs ou prennent plusieurs échantillons et font la moyenne des résultats. Ces méthodes sont très coûteuses, causent aliasing et n'exploitent pas toutes les capacités des GPUs.



a) Filtrage ordinaire des textures ne fonctionne pas avec les cartes d'ombres.



b) Percentage closer filtering.

Figure 4—6: Filtrage ordinaire vs PCF.

La différence entre le filtrage ordinaire et PCF est donnée par Figure 4—6 où la distance entre la lumière et le point de la surface pour laquelle on va calculer l'ombre est 49.8. La région de la carte de profondeur dont le point de la surface est projeté est une matrice carrée qui contient trois pixels par trois pixels. Un filtre ordinaire des valeurs de la région de la carte de la profondeur donne la valeur 22.9 et la compare avec la valeur 49.8 pour donner une valeur 1, c.à.d. la surface est 100% dans l'ombre. PCF compare chaque valeur de la région avec la valeur projetée 49.8 et filtre la matrice des valeurs binaires pour obtenir la valeur 0.55 qui signifie que 55% de la surface est dans l'ombre.

Dans les applications utilisant les textures ordinaires, le coût de test de chaque pixel dans une région peut être évité en sauvegardant la texture dans un format préfiltrable comme la pyramide de résolutions (mipmapping).

#### 4.6.2 Cartes d'occultation exponentielles filtrables

##### 4.6.2.1 Rappel mathématique

###### 4.6.2.1.1 Esperance mathématique

L'espérance de la variable aléatoire  $X$  est le nombre, noté  $E(X)$ , qui représente la valeur moyenne prise par la variable  $X$  et défini par:

$$\begin{aligned} E(X) &= x_1 \mathbb{P}(X = x_1) + x_2 \mathbb{P}(X = x_2) + \dots + x_n \mathbb{P}(X = x_n) \\ &= x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n \end{aligned}$$

$$E(X) = \sum_{i=1}^n x_i p_i \quad \text{Équation 4.18}$$

L'indicateur de tendance centrale d'une distribution est la moyenne car elle représente le point le plus stratégique pour calculer la distance de chacun des échantillons (valeurs) de la distribution à un point unique dans la distribution de manière à ce qu'il y ait le moins de valeurs résiduelles possibles. Donc, la moyenne est le point le moins éloigné de tous les points de la distribution, c.à.d. elle représente le point où sa distance avec chaque individu est la plus petite.

###### 4.6.2.1.2 Inégalité de Markov

En théorie des probabilités, les inégalités sont utiles pour obtenir une limite les quantités qui pourraient autrement être difficiles à calculer. L'inégalité de Markov donne une borne supérieure de la probabilité qu'une variable aléatoire réelle à valeurs positives soit supérieure ou égale à une constante positive. Soit  $X$  une variable aléatoire discrète infinie à valeurs non négatives et admettant une espérance  $E(X)$ . Soit  $a > 0$ .

$$\mathbb{P}(X \geq a) \leq \frac{E(X)}{a}, \forall a > 0 \quad \text{Équation 4.19}$$

###### 4.6.2.2 Ombres douces: des SMs vers l'OA

Les ombres fournissent des repères visuels importants relatifs à la profondeur et la position des objets dans une scène. Les cartes d'ombre (Kolivand et al., 2015) exploitent une passe de rendu supplémentaire dans laquelle la scène est rendue en tenant en compte de la source de lumière comme un point de vue afin de déterminer les structures les plus proches de la source lumineuse.

Lors du rendu, chaque objet est vérifié, s'il se trouve dans ou hors de la carte d'ombre, ce qui détermine si l'objet est dans l'ombre ou non. Ce qui a pour conséquence générer des ombres avec des artefacts, l'utilisation des ombres douces sont très nécessaires, permet de résoudre ce problème. PCF produit la transition douce le long des bords d'ombre dure en les lissant par le filtrage des résultats des tests binaires dans un noyau donné. Comme nous avons mentionné précédemment, le principe de PCF consiste à effectuer un test de comparaison de profondeur sur une région dans la carte de profondeur, c.à.d. cette technique détermine le pourcentage d'occultation d'un point à ombrer.

Il existe de nombreuses similarités entre les SMs et l'OA, les deux consistent à déterminer le pourcentage des occulteurs respectivement pour un point/voxel afin de fournir des indices perceptifs appropriés. Par conséquent, nous pouvons exploiter PCF et ses diverses approximations (Annen et al., 2008; Peters and Klein, 2015; Shen et al., 2013), pour accélérer le calcul des valeurs d'OA sans qu'il soit nécessaire de calculer et stocker plusieurs valeurs de CDFs.

#### 4.6.2.3 Cartes d'occultation

En considérant l'hypothèse et les contraintes mentionnées ci-dessus, le problème OA sera résolu en estimant  $\mathbb{P}(v > v_x)$  par la définition d'un processus de filtrage dans la région voisine  $\Omega(x)$ , ce qui nous permet d'obtenir une réponse efficace. Pour cela, notre contribution est les cartes d'occultation exponentielles filtrables. La nouveauté de la méthode consiste à utiliser deux points critiques: les informations stockées dans le filtre et la manière d'exploiter le résultat de filtrage pour calculer la probabilité.

Par la suite, nous décrivons les étapes que nous suivons pour calculer le volume d'occultation:

##### 4.6.2.3.1 Etape 1: Définir une région de filtre pour chaque voxel.

L'objectif de cette étape est de sauvegarder une représentation compressée de la distribution des valeurs des voxels voisins dans une région de filtre. Cette représentation est équivalente à la fonction de test d'occultation filtrée. Pour réduire l'espace mémoire, nous sauvegardons un seul terme en fonction de la valeur de chaque voxel  $p \in \Omega(x)$ ,  $y = e^{c.v}$ , dans une texture où  $c \gg 1$ , l'ensemble de ces valeurs présentent une deuxième variable aléatoire que nous définissons. L'application d'un filtre sur cette texture fournit une valeur

d'espérance (Équation 4.20) de la distribution des valeurs exponentielles  $Y$  sur la région de filtre.

$$E(Y) = \sum_{i=1}^N y_i p_i \quad \text{Équation 4.20}$$

Alors, nous utilisons un filtre de transformation locale qui lit la valeur de quelques éléments du volume (voir section 4.3.1.1), qui représentent le voisinage d'un voxel  $x$ , afin de calculer une valeur  $ResF = E(Y)$ . L'objectif étant de ne pas modifier la valeur  $v_x$  mais d'exploiter  $ResF$  lors du calcul de  $OA(x)$ . Cette dernière est modélisée par un filtre de convolution dans lequel le noyau  $h$  est présenté par les valeurs de probabilités de densités  $p_i$  des différentes valeurs de la variable aléatoire  $Y$ , où les  $p_{i=1,N}$  respectent la propriété de  $h$  nécessitant que la somme de tous ses coefficients doit être égale à 1.

#### 4.6.2.3.2 Etape 2: Relation entre le filtrage de texture et la probabilité d'occultation d'un voxel.

L'information que nous fournit la dernière équation a pour but de réduire le problème d'anti-aliasing ainsi d'être utilisée pour approximer le facteur d'occultation d'un voxel donné. Alors, nous appliquons l'inégalité de Markov (Équation 4.19) pour calculer une approximation supérieure liée au résultat du PCF, nous pouvons l'appliquer car  $Y$  est une variable aléatoire ayant des valeurs non-négatives. Pour tout réel  $a = e^{c.v_x} > 0$ :

$$\mathbb{P}(Y \geq a) \leq a^{-1} E(Y) \quad \text{Équation 4.21}$$

Et par conséquent,

$$\mathbb{P}(Y \geq a) \leq a^{-1} E(Y) \quad \text{Équation 4.22}$$

Équation 4.20 devient donc:  $\mathbb{P}(Y \geq a) \leq a^{-1} \sum_{i=1}^N y_i p_i$

Alors,

$$\mathbb{P}(Y \geq a) \leq e^{-c.v_x} \sum_{i=1}^N e^{c.v_i} \mathbb{P}(Y = y_i) \quad \text{Équation 4.23}$$

Maintenant, nous considérons que le facteur de visibilité  $O_f(x)$  est calculé en appliquant un filtrage sur la fonction de test d'occultation  $OA(x)$ , qui est écrit comme

convolution (Annen et al., 2007), donc l'approximation exponentielle peut remplacer la fonction de test d'occultation:

$$O_f(x) = [\omega \times H(v_x, v)](p) \approx [\omega \times e^{-c(v_x - v)}](p)$$

On obtient donc,

$$O_f(x) \approx e^{-c \cdot v_x} [\omega \times e^{c \cdot v}](p) \quad \text{Équation 4.24}$$

où  $\omega$  est le noyau du filtre d'occultation du  $x$ .  $p$  appartient au voisinage de  $x$ . Notez que l'approximation exponentielle peut être décomposée en deux facteurs qui dépendent de  $v_x$  et  $v$ , par conséquent, l'exposant de  $v$  peut être pré-filtré pour accélérer l'opération de filtrage d'occultation.

A partir Équation 4.23 et Équation 4.24, nous déduisons que nous pouvons calculer  $OA(x)$  en utilisant le filtrage des exposants des valeurs scalaires et en appliquant ensuite l'inégalité de Markov. L'importance de cette dernière réside en ce qu'elle permet de borner la valeur de certaines probabilités où seule l'espérance de la distribution est connue.

#### 4.6.2.4 Cas d'erreur

Dans la section précédente, nous avons supposé que  $\Delta = v_x - v$  est toujours positive. Dans le cas contraire, le test d'occultation retourne un grand nombre car la nouvelle valeur de l'exponentielle ne converge pas vers 1 mais croît de façon exponentielle. Donc la valeur du filtrage est erronée, pour cela une utilisation de la PCF est suggérée. Donc, si un voxel  $x$  est classé invalide, nous utilisons un filtrage PCF avec un noyau de filtrage de  $2 \times 2$  similaire à la version bilinéaire de PCF implémentée sur GPU.

Nous pouvons simuler un test d'occultation filtré en calculant l'OA exponentielle (OAE) à quatre voisins proches puis nous appliquons une interpolation bilinéaire sur résultats ajustés.

Afin de détecter la validité de l'hypothèse, on calcule OAE et on teste si elle dépasse  $1 + \epsilon$  où  $\epsilon$  est un seuil prédéfini.

## 4.7 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de présenter une nouvelle méthode de visualisation à haute performance qui est adaptée aux exigences récentes en termes de qualité visuelle et interactivité. Nous avons montré la possibilité d'accélération du processus d'extraction

d'information d'accessibilité grâce à l'exploitation des opportunités de calcul des GPU plus particulièrement les filtres. En effet, l'utilisation de la compression dans le rendu volumique présente un grand gain d'espace et elle est très prometteuse pour la visualisation de grands ensembles de données.

---

## Chapitre 5 — Mise en œuvre, Résultats et Bilan

---

### 5.1 Introduction

Notre approche est un algorithme accéléré à l'aide d'un GPU, capable d'extraire efficacement des informations de visibilité des données volumiques. Comme nous avons montré dans le chapitre précédent, la méthode proposée bénéficie de l'utilisation de filtrage sur GPU avec moins d'espace mémoire.

Dans ce chapitre, nous présentons les détails de la mise en œuvre; environnement, contraintes, structures, ..., puis, nous exposons quelques résultats obtenus pour montrer la qualité visuelle de notre méthode ainsi son interactivité avec des changements dans la fonction de transfert. Une étude comparative est établie entre notre méthode et d'autres dans le but de valider nos contributions, en mettant en valeur la réduction d'espace mémoire et de calculs par la méthode courante.

### 5.2 Outils et matériels utilisés

La méthode proposée est implémentée en utilisant VTK (Visualization Toolkit, 2016) et l'ITK (Insight Segmentation And Registration Toolkit, 2016).

VTK est une bibliothèque portable de visualisation de données scientifiques écrite en C++ et orientée objet. Elle permet de faire des traitements sur ces données en créant très simplement une chaîne d'algorithmes pour produire au final une image 2D/3D. Son grand avantage est son large spectre d'applications (du traitement de l'image à la visualisation de données volumiques). De plus, un logiciel de visualisation nommé ParaView permet de faire de la visualisation de données au format interne VTK et ceci sur de simples machines ou des clusters graphiques et même du post-traitement en appliquant directement certains algorithmes de VTK.

ITK est une bibliothèque logicielle libre de classes C++ de traitement d'image. Elle contient des algorithmes de recalage d'image, de filtrage et de segmentation. Elle a été créée dans le but d'analyser toute sorte d'images médicales.

Les exemples et les tests ont été effectués sur un PC Intel i7-Core avec 2,0 GHz et 4 Go de RAM équipé d'une GPU NVIDIA GeForce 740M GT.



## 5.3 Données

### 5.3.1 Type de données initiales utilisées

Dans notre mise en œuvre, nous utilisons uniquement les données volumiques médicales obtenues au moyen des appareils et des scanners tels que l'IRM et CT.

#### 5.3.1.1 Dicom

Le but de cette section est de présenter la norme DICOM et la manipulation des fichiers correspondants (Gibaud, 2008; Mustra et al., 2008; Pianykh, 2012).

##### 5.3.1.1.1 Généralité

DICOM. (Digital Imaging and Communication in Medicine) désigne la norme pour les fichiers numériques créés lors d'examens d'imagerie médicale en définissant une méthode de communication pour les différents équipements d'imagerie médicale numérique. Elle est maintenant utilisée par la plupart des fabricants de matériel d'imagerie médicale. Elle représente un progrès réel car elle permet de prédire la possibilité d'interconnexion des appareils à partir d'un Document de Conformité ou " Conformance Statement " émis pour chacune des machines respectant cette norme. Cette norme recouvre aussi les spécifications concernant leur archivage et leur transmission en réseau (aspects particulièrement importants dans le milieu médical). Indépendant des technologies (scanner, IRM, etc.), et des constructeurs, elle permet de standardiser l'accès aux résultats d'imagerie médicale.

Ainsi la norme permet aux équipements de communiquer localement, à distance ou au travers d'un média en assurant la compatibilité des équipements et en éliminant les formats propriétaires. Outre les images numériques issues des examens médicaux, les fichiers DICOM véhiculent aussi nombre d'informations textuelles concernant le patient (état civil, âge, poids, etc.), l'examen réalisé (région explorée, technique d'imagerie utilisée, etc.), la date d'acquisition, le praticien etc. Ces fichiers peuvent contenir plusieurs « tranches » ou images représentant les différents calques d'une numérisation et ils ne peuvent être lus et modifiés que par des logiciels spécialisés (Preim and Botha, 2014).

DICOM est la norme la plus courante pour le transfert des images numériques médicales ayant pour but d'obtenir les images du patient ainsi que toutes les informations associées dans un format identique permettant l'interconnexion et l'inter-action ("interoperability" ) des équipements et le transfert des données. La principale originalité des fichiers issus d'examens d'imagerie médicale réside dans leur capacité à stocker des données brutes bien au delà de ce que peut distinguer l'œil humain sur un écran, et sur

lesquelles les médecins peuvent travailler ultérieurement sans perte d'information. Il est possible de visualiser la totalité d'un examen dans l'ordre chronologique et par séries (par exemple coupes avant injection, coupes après injection, reconstructions selon un autre plan de coupe etc.).

#### 5.3.1.1.2 Pourquoi un format spécifique pour les images médicales?

##### **a.** Identification unique des images produites

Un Service de Radiologie produit plusieurs milliers d'images chaque jour, ainsi, un scanner, travaillant au rythme de 3 patients par heure produit environ 150 images par heures, et il n'est pas possible de classer ces images dans un format courant de type JPEG ou GIF car il aurait un risque de pertes des données démographiques de l'images, (nom du patient, type d'examen, hôpital, date d'examen, type d'acquisition etc...). Le format DICOM permet de rendre unique chaque image produite et de leur associer des informations spécifiques. Ainsi chaque image est autonome, si elle est perdue, reproduite ou renommée, il est toujours possible d'identifier formellement son origine, le patient, la date, la série d'où elle provient, les paramètres d'acquisition etc.. .

Le format n'est pas rigide, il contient des informations obligatoires et d'autres optionnelles. Plusieurs numéros d'identification uniques UID ("Unique Identifier") sont générés automatiquement par les machines DICOM et obligatoirement présents dans chaque image DICOM. Il ne peut pas exister deux UID identiques pour désigner des informations différentes, ceci quelque soit la machine et sa localisation, ainsi l'UID d'une série d'images est spécifique à une date, un patient, une étude, un hôpital et une machine donnée. Cette identification est nécessaire non seulement pour des raisons médicales et médico-légales, mais aussi pour permettre aux machines la formation et la gestion de bases de données.

##### **b.** Le format est indépendant des machines et des protocoles de communication

La norme DICOM est utilisée au niveau "applicatif" c'est à dire elle permet la communication d'un programme à un autre, ceci sous-entends que les connections de bas niveau, câblages et protocoles réseaux soient établies.

##### **c.** Le format utilise un vocabulaire contrôlé

Il est important que d'une machine à l'autre le vocabulaire soit identique ainsi, on identifie les données de façon universelle quelque soit la machine. DICOM utilise la

norme SNOMED mise au point par les anatomo-pathologistes (Systemized Nomenclature for Medicine ).

**d.** La norme peut être facilement révisée et modifiée grâce à la multiplicité des Documents de Référence. Actuellement la norme DICOM se compose de 12 parties auxquelles s'ajoutent des suppléments. La rédaction de cette norme suit des directives strictes établies par le comité ISO.

**e.** Le Format DICOM est adaptable aux autres spécialités médicales. Ainsi ce format est déjà adopté par les cardiologues, les dentistes, les anatomopathologistes et les gastro-entérologues.

### *5.3.1.2 Les sources d'images ou modalités*

La radiologie dans le domaine médical, désigne l'ensemble des modalités diagnostiques et thérapeutiques utilisant les rayons X, ou plus généralement utilisant des rayonnements.

#### **5.3.1.2.1 Modalité CT ( scanner )**

La tomодensitométrie se définit comme une chaîne radiologique tomographique effectuant la mesure de l'atténuation d'un faisceau de rayons X à la traversée d'un volume anatomique avec reconstruction matricielle d'une image numérisée. Les images acquises ont une résolution de 512 x 512 et sont obtenues en séries ou coupes à partir de lesquels une reconstruction volumique (3D) est possible où la taille de chaque image est de 0.5 Mo par image (noir et blanc) avec une possibilité de reconstruction 3D en couleur. Un examen normal peut construire quatre séries chacune d'elles est composée de 50 images (25 Mo).

#### **5.3.1.2.2 Modalité MR ( IRM )**

L'utilisation des champs magnétiques statiques et dynamiques (radiofréquences) permet aussi dans des conditions particulières d'exciter les atomes d'hydrogène et en retour de coder une image de leur répartition dans les tissus, permettant une étude des organes internes sans irradiation de l'organisme. Le résultat de chaque examen est un ensemble de séries d'images telles que de 50 images (25 Mo) ou de 100 images (50 Mo) avec la possibilité de la reconstruction volumique ( 3D ) à partir des coupes. La résolution de l'image est 512 x 512 ou 256x256 avec 0,5 Mo par image ( noir et blanc ).

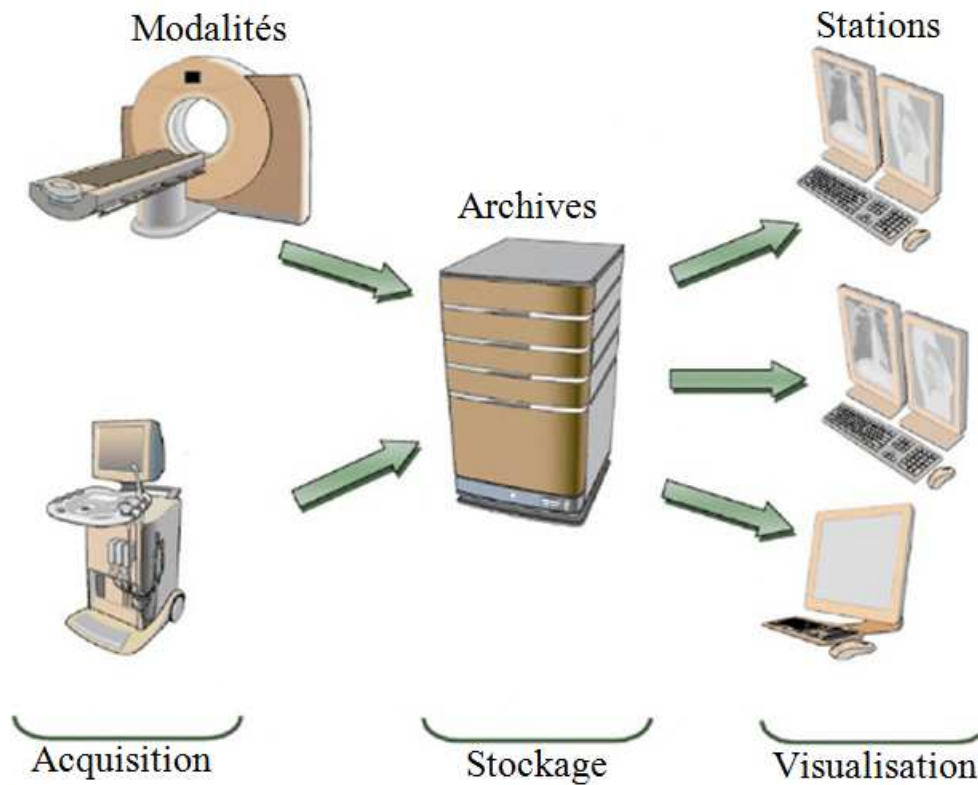
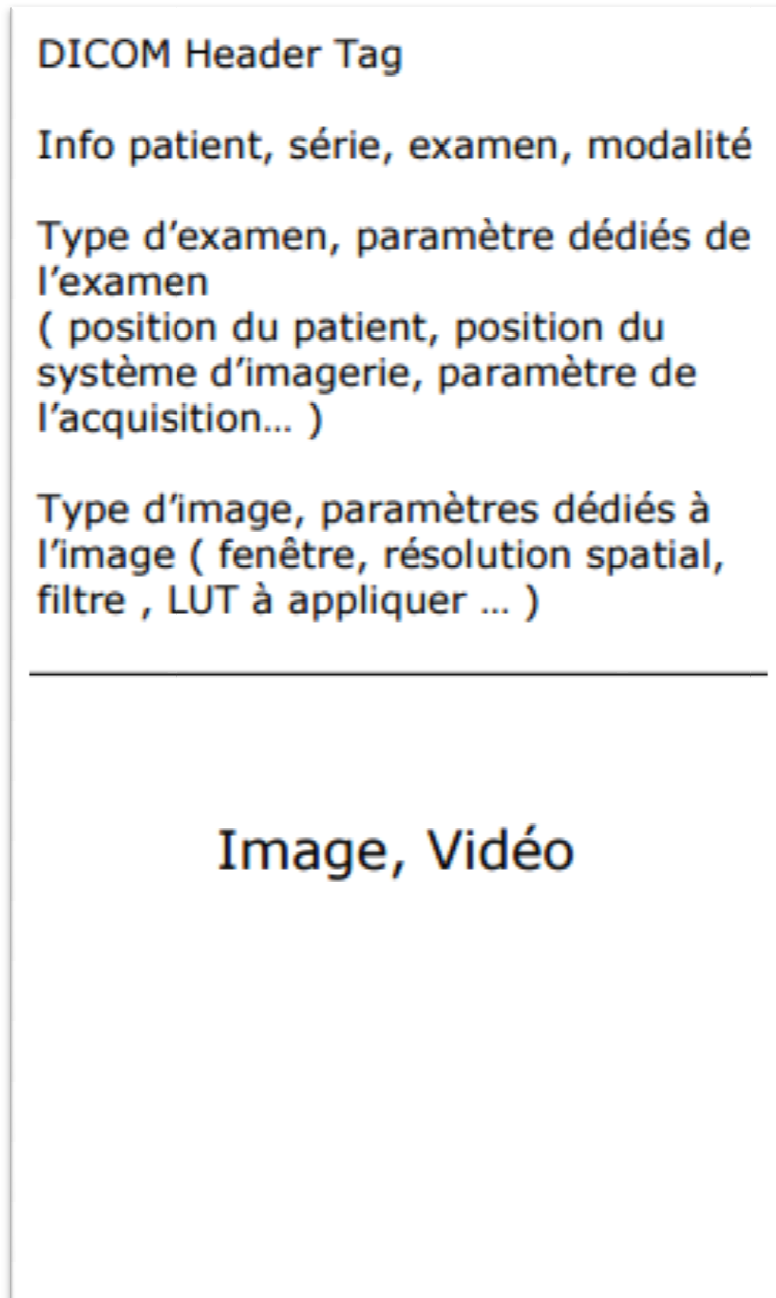


Figure 5—1: Les modalités stockent les images dans des archives digitales qui sont accessibles par les radiologues afin de visualiser les images sur des stations.

Les fichiers DICOM véhiculent aussi un nombre d'informations textuelles ou spécifiques qui sont appelées aussi DICOM Tag Header. Ces informations concernent le patient (état civil, âge, poids, etc.), l'examen réalisé (région explorée, technique d'imagerie utilisée, etc.), la date d'acquisition, le praticien etc. Ces informations sont perdues si le fichier n'est pas enregistré au en DICOM.



**Figure 5—2 : Format DICOM.**

### *5.3.1.3 Description des ensembles de données DICOM utilisés*

Durant la validation de notre méthode, nous avons utilisé trois séries DICOM: DS1, DS2 et DS3 tel que chacune d'elles est une série de coupes CT où les images sont ordonnées chronologiquement. DS1, DS2 et DS3 contiennent respectivement 250, 350 et 361 images obtenues avec une résolution de  $512 \times 512$  représentant un pied/cheville d'un adulte, une jambe et une tête/face et sinus.

Pour qu'un radiologue puisse écrire un compte rendu d'un examen ou qu'un médecin puisse prendre une décision d'un traitement, il doit examiner et lire les images une après

l'autre d'une façon individuelle ce qui perd beaucoup de temps sans avoir une idée globale sur la série (voir: Figure 5—3, Figure 5—4 et Figure 5—5).



**Figure 5—3:** Quelques images de la série DS1. Les images données ici ont respectivement le numéro 3/250, 194/250 et 227/250.

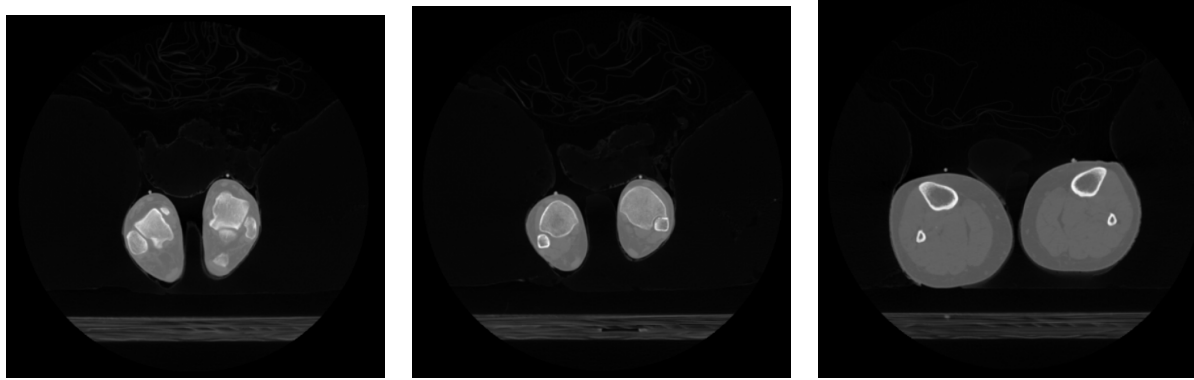


Figure 5—4: Quelques images de la série DS2. Les images données ici ont respectivement le numéro 1/350, 30/350 et 265/350.

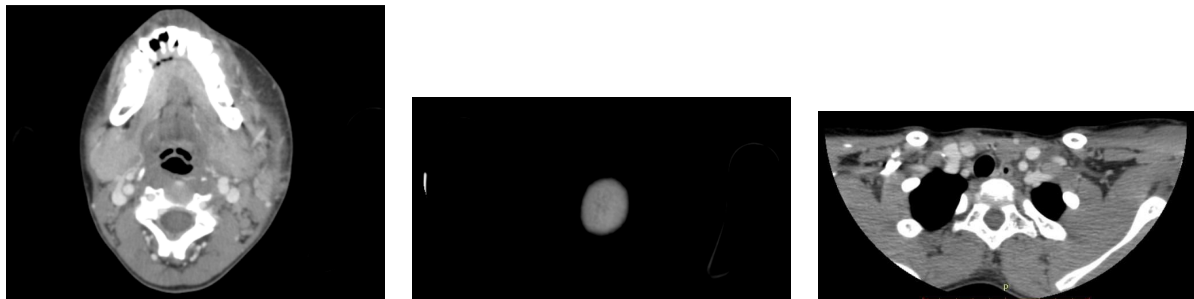


Figure 5—5: Quelques images de la série DS3. Les images données ici ont respectivement le numéro 1/361, 253/361 et 360/361.

### 5.3.2 Structuration volumique

Une étape de reconstruction est réalisée afin d’obtenir une structure 3D des ensembles de données indiqués précédemment. L’utilisation de textures dans notre application implique une contrainte forte sur la structure des données volumiques: les données doivent être sous la forme d’une grille cartésienne de voxels. Toute autre structuration impose un ré-échantillonnage des données vers une grille cartésienne pour la visualisation. Cette contrainte est due au fait que les textures sont des tableaux, ils correspondent donc parfaitement au maillage cartésien.

Alors, les données que nous manipulons sont stockées dans des grilles régulières avec un espacement isotrope (Figure 5—6). Pour évaluer notre méthode, nous avons utilisé trois ensembles de données différents, le premier (DS1) de  $512 \times 512 \times 250$  voxels, le second (DS2) de  $512 \times 512 \times 350$  voxels et le troisième (DS3) de  $512 \times 512 \times 361$  voxels.

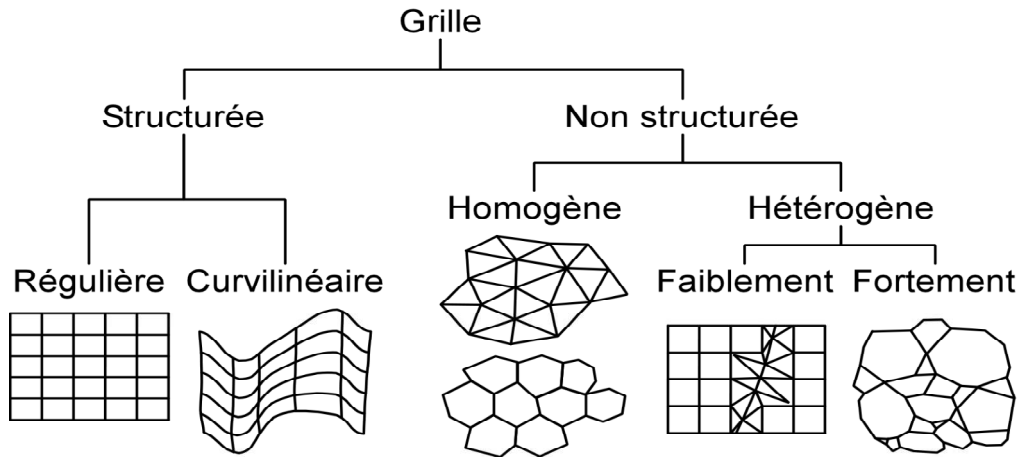


Figure 5—6 : Taxinomie des représentations cellulaires en fonction de leur topologie.

## 5.4 Détails de la mise en œuvre

Notre technique se compose de deux passes: le calcul d’ombrage et le rendu interactif, la première passe est effectuée comme une étape de prétraitement avant le rendu.

### 5.4.1 Le calcul d’ombrage

Le calcul d’ombrage basé OA est effectué dans une étape de prétraitement pour ne pas influencer l’interactivité du rendu volumique. Avant de mettre en évidence cette étape, nous présentons d’abord un bref rappel sur des concepts essentiels pour cette section.

#### 5.4.1.1 Rappel

##### 5.4.1.1.1 Filtre de Gauss

Le filtre de Gauss est un opérateur de convolution qui est utilisé pour rendre les images floues et éliminer les détails et les bruits. L’image est stockée comme une collection des pixels discrets, on a besoin de produire une approximation discrète de la fonction gaussienne dite noyau (Équation 5.1) avant de réaliser la convolution (discrète).

$$\mathbb{P}(x) = f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Équation 5.1}$$

où  $\sigma$  est la déviation standard de la distribution et représente la largeur du filtre gaussien.  $\mathbb{P}(x)$  est la fonction de densité de probabilité de la valeur  $x$  de la variable  $X$ .

##### 5.4.1.1.2 MIP-mapping

Le MIP mapping est une technique d’application de textures, les MIP maps, qui permet d’améliorer la qualité de l’affichage et d’accélérer le temps de rendu. Les MIP maps sont des collections d’images pré-calculées, optimisées qui construisent une texture principale.



Le but du MIP mapping est d'éviter la pixellisation lorsqu'on s'éloigne d'une texture ce qui permet de réduire les artefacts d'aliasing. Cette technique consiste à envoyer au GPU des échantillons de texture de résolutions décroissantes qui seront utilisés à la place de la texture originale, en fonction de la distance du point de vue à l'objet texturé et du niveau de détails nécessaire. Le niveau de détail des textures est donc adapté à la distance de l'objet, un objet proche affichera des textures en haute résolution tandis qu'un objet lointain se verra attribuer une texture de faible taille.

Le problème posé est quel niveau de détails (résolution) on doit utiliser pour l'image texture. Une très haute résolution cause les effets d'aliasing, une petite résolution donne peu de détails visibles. La solution est d'utiliser plusieurs niveaux de détails selon la distance entre l'objet et l'observateur ou les mipmaps. Alors les mipmaps sont utilisés pour le filtrage par la génération d'une pyramide des textures où la texture de la plus haute résolution est situé au niveau 0, une résolution de moitié à chaque niveau ultérieur. Le rendu passe au niveau mipmap adéquate quand la texture est vue à partir d'une distance ou en une taille plus petite. La vitesse de rendu s'incrémente car le nombre des texels à traiter peut être moins que dans le cas d'une texture simple.

#### *5.4.1.2 OA basée filtrage*

Nous suivons les étapes suivantes lors de l'application de notre méthode d'OA qui se base sur le filtrage pour non seulement réduire les artefacts mais aussi utiliser la valeur retournée par le filtrage afin d'approximer la probabilité d'occultation via l'inégalité de Markov.

1. La création d'un nouveau volume contenant les valeurs exponentielles de la distribution  $e^{c \cdot v}$  au lieu des valeurs régulières  $v$ . Si la valeur de  $c$  n'est pas suffisamment grande, des artefacts sont obtenus (Annen et al., 2008) alors qu'une valeur maximale est définie pour  $c$  dépendamment à la méthode d'écriture de nombres réels par la représentation en virgule flottante. Empiriquement  $c = 80$  (Peters and Klein, 2015) est la valeur optimale pour les nombres de 32 bits.

2. L'application d'une convolution avec le noyau gaussi(Peters and Klein, 2015)en pour générer des distributions locales centrées sur chaque voxel  $x$  dans le but de prendre plusieurs tailles du voisinage de  $x$  afin de bien cerner sa valeur d'occultation. La construction du noyau est l'étape la plus importante car il servira pour la convolution, il nous réfère les valeurs des densités de probabilité  $p_i$  (Équation 4.20). Le filtre gaussien est séparable, donc il suffirait de

calculer un noyau 1D, puis l'appliquer dans les trois directions. Nous obtiendrons de bien meilleurs résultats en termes de performance.

3. Le choix de génération de plusieurs distributions centrées aux différents voxels nécessite un espace mémoire pour stocker un grand nombre de ces volumes. Donc, nous doublons, à chaque itération, la taille du noyau gaussien et le nombre d'échantillons. Cela nous permet de stocker toutes les cartes d'occultation créées dans une texture de mipmapping avec un seul canal flottant.

4. Au lieu d'effectuer un test d'occultation binaire entre  $v$  et  $v_x$ , nous évaluons uniquement l'Équation 4.23.

Comme il est indiqué précédemment, l'approche à seuil (Figure 5—7) est utilisée pour détecter les cas d'échec tel que pour chaque voxel nous calculons  $E(Y)$  (Équation 4.20) puis nous vérifions s'il dépasse  $1 + \varepsilon$  où  $\varepsilon$  est un seuil donné. Si notre condition n'est pas vérifiée, le test d'occultation renvoie un nombre ne converge pas vers 1,0 mais se développe de façon exponentielle. Pour des raisons de performance, nous choisissons d'utiliser uniquement un noyau de filtre  $2 \times 2$  similaire à la version bilinéaire de PCF implémentée sur GPU. Ce choix nous permet d'éviter à créer deux cartes d'occultation: une contient les densités et une autre contient leurs exponentielles 32 bits ce qui augmente l'espace mémoire par 24 ou 32 fois la résolution de la carte d'occultation basée densités. Nous effectuons d'abord un test d'occultation en évaluant l'OAE sur les quatre voisins les plus proches suivis d'une interpolation bilinéaire sur les résultats qui ne respectent pas la condition.

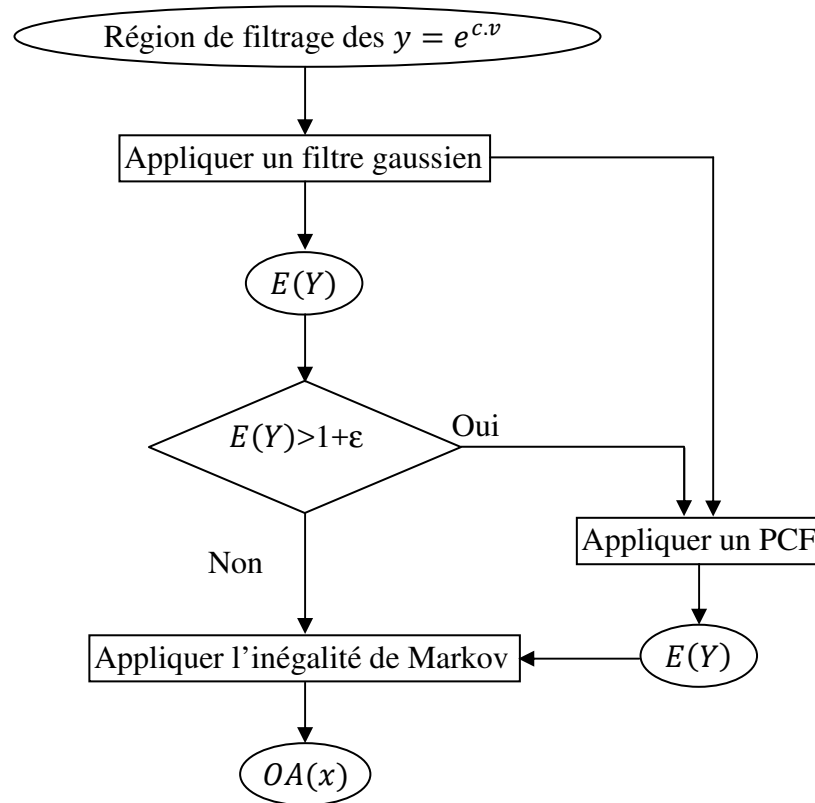


Figure 5—7: Méthode de détection du non respect de l’hypothèse.

### 5.4.2 Rendu

Comme nous avons mentionné précédemment, nous nous sommes intéressés à développer une méthode d’ombrage basé-OA pour le RVD. Dans cette section, nous discutons les éléments essentiels pour visualiser le volume.

#### 5.4.2.1 Méthode de rendu

Pour calculer l’image finale, nous utilisons le ray-casting qui est une méthode ordre-image (voir section 2.4.2.2) consistant à calculer chacun des pixels de l’image un par un. Il faut alors pour chaque rayon traverser le volume afin de trouver les voxels qui contribuent à la couleur finale tel que nous évaluons les rayons par la méthode de composition d’avant en arrière vue dans la section 2.7.2.1.

#### 5.4.2.2 Optimisation

Grace à l’utilisation de la méthode ordre-image, nous pouvons diminuer l’espace mémoire nécessaire pour réaliser le rendu d’un volume donné par le saut des voxels vides ce qui augmente la performance. Le saut des voxels vides possède une grande importance vu les

tailles énormes des volumes des données scientifiques qui peuvent facilement dépasser la quantité disponible de la mémoire.

La composition d'avant en arrière nous permet de bénéficier d'une autre optimisation simple à mettre en œuvre et très efficace dite la terminaison précoce de rayon. Un rayon peut être terminé dès que l'opacité atteint un seuil prédéfini sans arriver à la fin du volume. Dans ce cas, une grande partie des données seront ignorées ce qui accélère le rendu, car continuer la composition après un point où le pixel devient opaque ne changera plus la couleur ou l'opacité. Avec un volume très transparent, en revanche, il n'y aura pas un gain de vitesse. Alors, les paramètres de la fonction de transfert affectent avec un grand degré l'utilité de cette technique.

Les deux méthodes d'optimisation se complètent car la terminaison précoce des rayons ne fonctionne pas bien lors de l'utilisation des volumes contenant de grandes zones transparentes. Le saut d'espace vide est utilisé pour optimiser le lancement des rayons dans telles conditions.

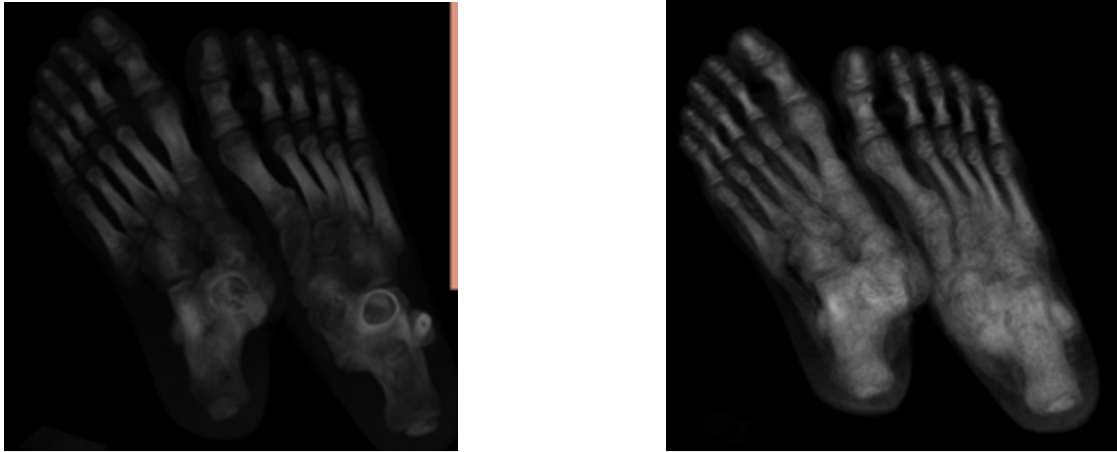
#### *5.4.2.3 Fonctions de transfert et classification*

Nous devons mentionner aussi que les tables de fonctions de transfert sont calculées et stockées dans des textures 1D pour une utilisation ultérieure lors des changements interactifs de l'étape de classification qui se produisent pendant le rééchantillonnage.

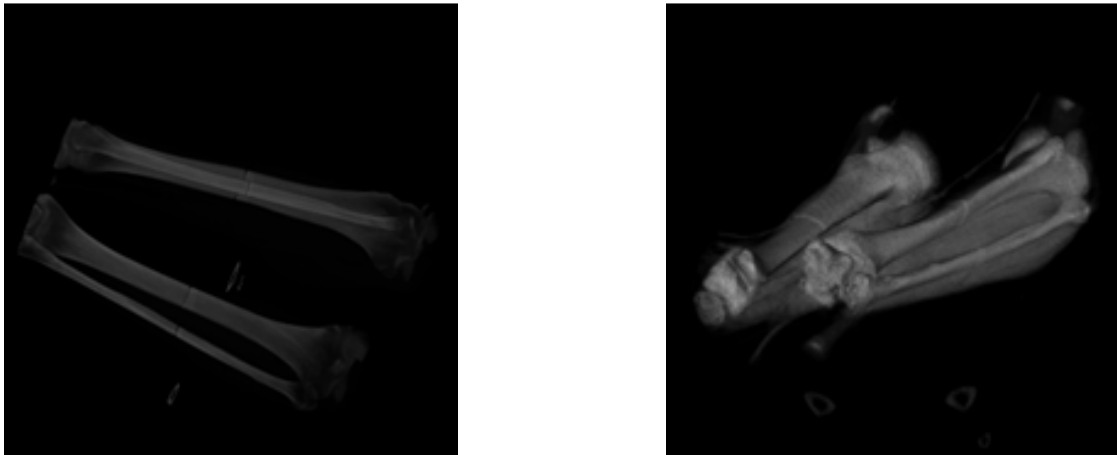
La plupart des algorithmes de rendu volumique utilisent la pré-classification c.à.d appliquent d'abord la fonction de transfert sur les données scalaires, puis effectuent l'opération d'interpolation. Nous adoptons la post-classification (section 2.6.2) qui applique la fonction de transfert après l'interpolation.

## **5.5 Résultats visuels**

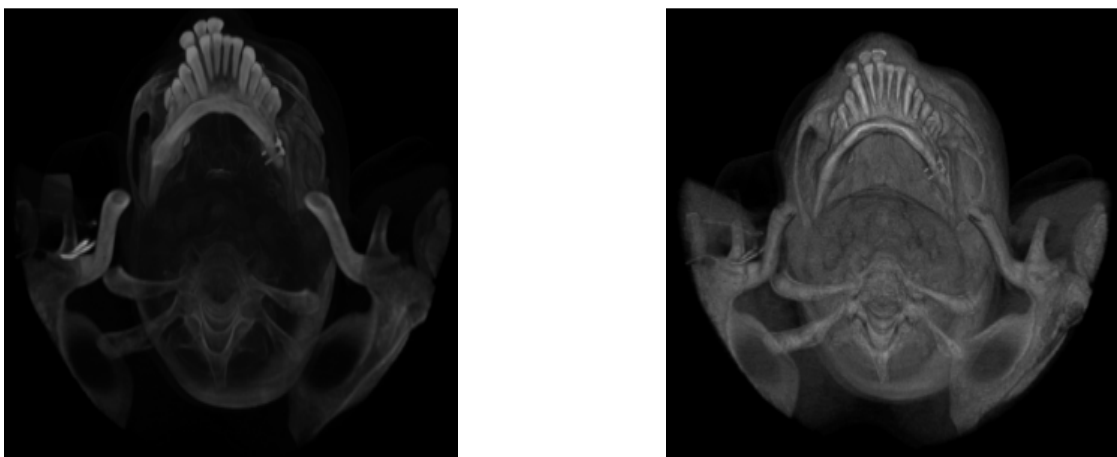
Maintenant, nous présentons la démonstration des résultats de notre algorithme sur des ensembles de données précédemment indiquées (DS1, DS2 et DS3) et nous explorons également les différentes mesures que l'algorithme produit. Pour chaque ensemble de données, nous montrons les images finales avec et sans notre méthode d'ombrage (Figure 5—8 et Figure 5—9). Le résultat semble mieux avec notre définition d'OA qui donne des images plus importantes. Cette qualité visuelle convaincante est obtenue avec une performance de temps interactif (voir tableau 1) parce que toutes les étapes de filtrage sont effectuées sur le GPU.



**Figure 5—8: Visualisation de DS1. L'image gauche est obtenue sans l'utilisation de notre OA où celle droite est calculée avec la notre.**



**Figure 5—9 : Illustration de DS2 visualisation sans (à gauche) et avec notre OA (à droite).**



**Figure 5—10: Illustration de DS3 visualisation sans (à gauche) et avec notre OA (à droite).**

L'opération la plus importante parmi toutes les techniques de rendu volumique est l'étape de classification. Cette étape est la clé pour mettre en évidence la meilleure partie des données, et rejeter d'autre. La classification est un processus dans lequel les valeurs de

données sont transformées en une couleur  $c(x)$  et une valeur d'opacité  $\alpha(x)$ , ce qui est généralement effectuée par une fonction de transfert. Le but de la classification est de faire ressortir les caractéristiques intéressantes des données de la meilleure façon possible sans avoir d'aliasing.

Mais, il n'existe pas de méthode générale qui puisse faire automatiquement la classification. Nous avons utilisé une méthode qui se base sur les valeurs données par les experts.

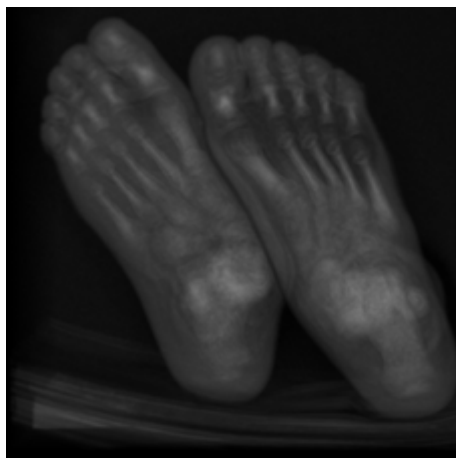
La préclassification produit des couleurs incorrectes et construit des images floues car il est impossible de produire les hautes fréquences dans la fonction de transfert. Lorsqu'une méthode d'interpolation non linéaire est utilisée (par exemple trilineaire) avec une fonction de transfert constant, les deux types de la classification donnent les mêmes résultats. Mais, si la préclassification n'a pas une qualité d'image finale importante, elle peut être utilisée pour accélérer les calculs dans le ray casting puisque le volume entier peut être pré-ombragé. Dans le rendu basé GPUs, ces dernières doivent avoir un support pour les lectures de texture dépendante afin de pouvoir utiliser la post-classification, ce qui rend la préclassification la seule méthode utilisable par les cartes ne possédant pas cette caractéristique. Contrairement à la pré-classification, la post-classification produit les résultats corrects qui se traduisent par une meilleure qualité d'image, mais il nécessite généralement aussi plus de calculs et des GPUs plus avancés. La post-classification produit toujours le résultat correct mais avec un coût de calcul plus élevé et des exigences matérielles plus élevé dans le cas du rendu basé sur le matériel. L'utilisation de la préclassification est un bon moyen d'accélérer toute méthode puisque la classification et l'ombrage sont effectués dans une étape de prétraitement.

La procédure de classification est indépendante du type de la méthode de texture utilisée. La préclassification peut être exécutée sur tous les matériels, car la fonction de transfert sur le volume avant sa conversion en textures. Cette manière est non flexible car une fois les textures sont chargées il n'y a aucune possibilité de changer la fonction de transfert sans recharger toutes les textures. Cela influence l'interactivité car l'utilisateur demande d'être capable de changer la fonction de transfert à la volée.

Les textures palettées présentent une fonctionnalité prise en charge par la plupart des matériels. Ces textures utilisent une table de couleurs qui contrôle les couleurs des textures. Cette technique est souvent utilisée pour mettre en œuvre de la pré-classification où la table

des couleurs devient l'équivalent d'une table de fonction de transfert unidimensionnelle utilisée par de nombreux algorithmes de rendu. La post-classification peut être effectuée sur tout le matériel qui supporte la recherche de texture dépendante. Avec des recherches de texture dépendante, on a la possibilité d'avoir une post-classification flexible avec des fonctions de transfert multidimensionnelles. La texture dépendante permet à la carte d'évaluer une texture à une coordonnée de texture quelconque et d'utiliser les valeurs soit au canal alpha et rouge, soit aux canaux bleu et vert comme une coordonnée de texture dans une autre texture.

Différentes fonctions de transfert ont également été appliquées de manière interactive sans recalculer les facteurs d'occultation des volumes. Cela démontre l'indépendance de notre approche des fonctions de transfert. La Figure 5—11 montre plusieurs résultats obtenus en matière d'images et des taux de trame.



4.34 fps



4.26 fps

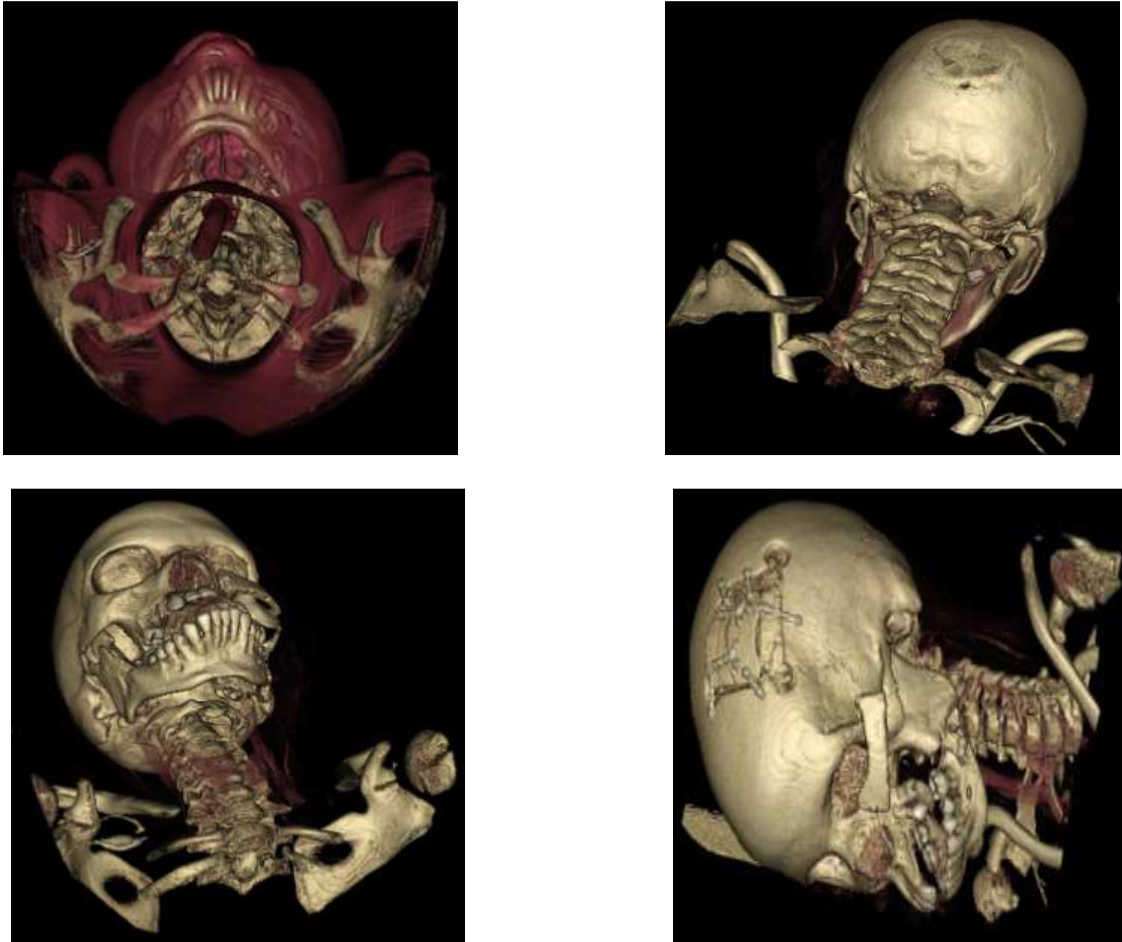


4.85 fps



4.05 fps

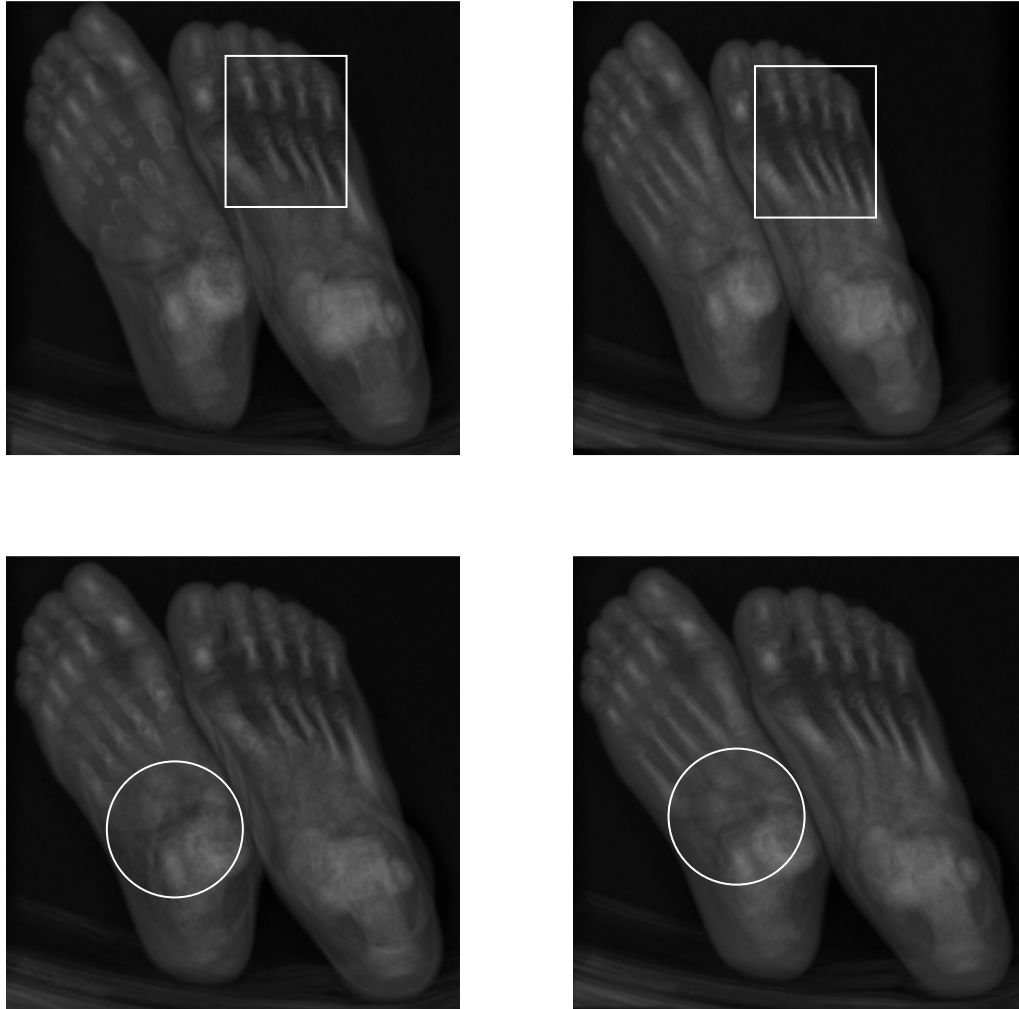
**Figure 5—11: Application de diverses fonctions de transfert.**



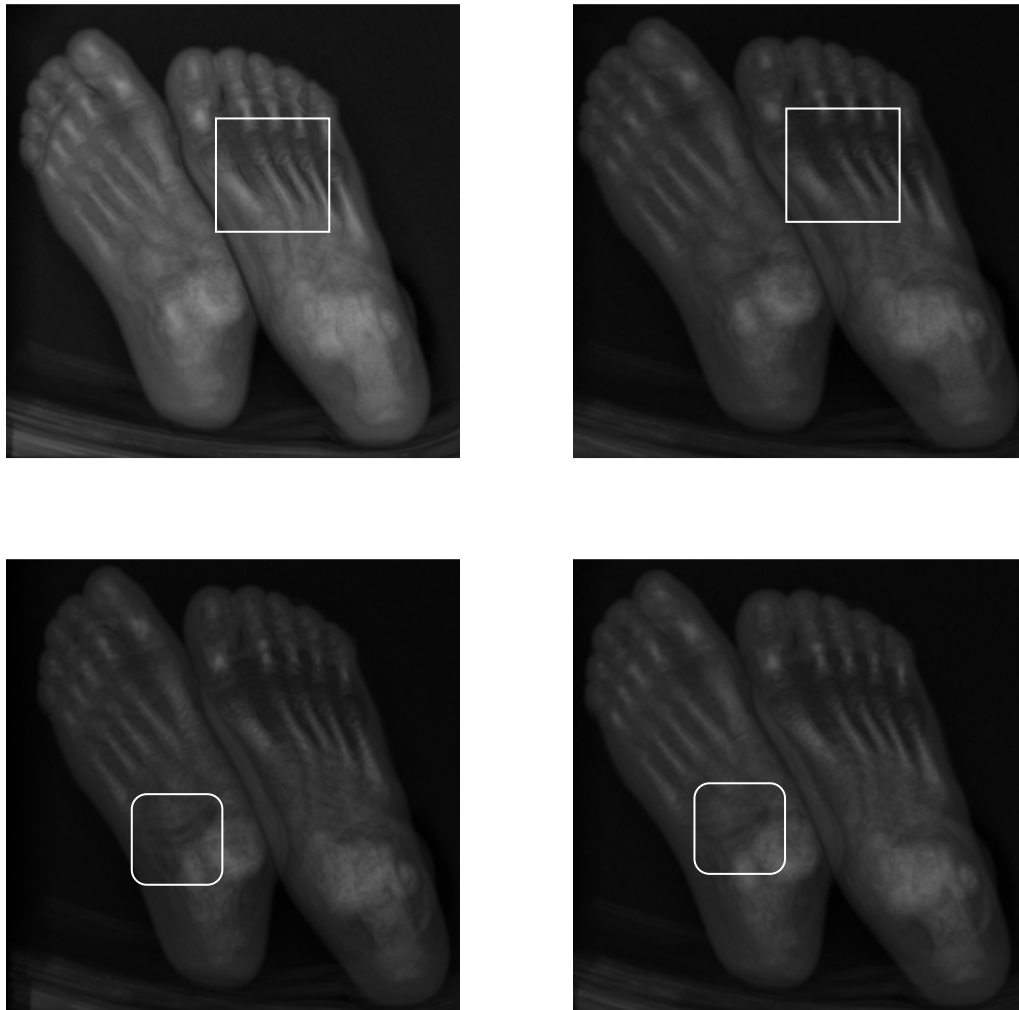
**Figure 5—12 : Application de diverses fonctions de transfert (Exemple2).**

Dans Figure 5—13 et Figure 5—14, nous examinons l'influence du nombre des voxels voisins sur la qualité visuelle de notre estimation d'OA. Nous ne pouvons pas détecter l'influence pour chaque voxel parce que l'image finale 3D est construite par la contribution de plusieurs voxels. La qualité visuelle est proportionnelle à la taille choisie de la région avoisinante. Une petite sphère peut contenir la plupart de ses voxels des occulteurs ou des non-occulteurs ce qui nous conduit à obtenir respectivement un voxel très/totalement sombre ou très/totalement éclairé. Cependant, un voisinage d'une large taille donne une plus grande variété de test d'occultation. En outre, la taille du voisinage implique l'utilisation de l'inégalité de Markov ou de la technique PCF.



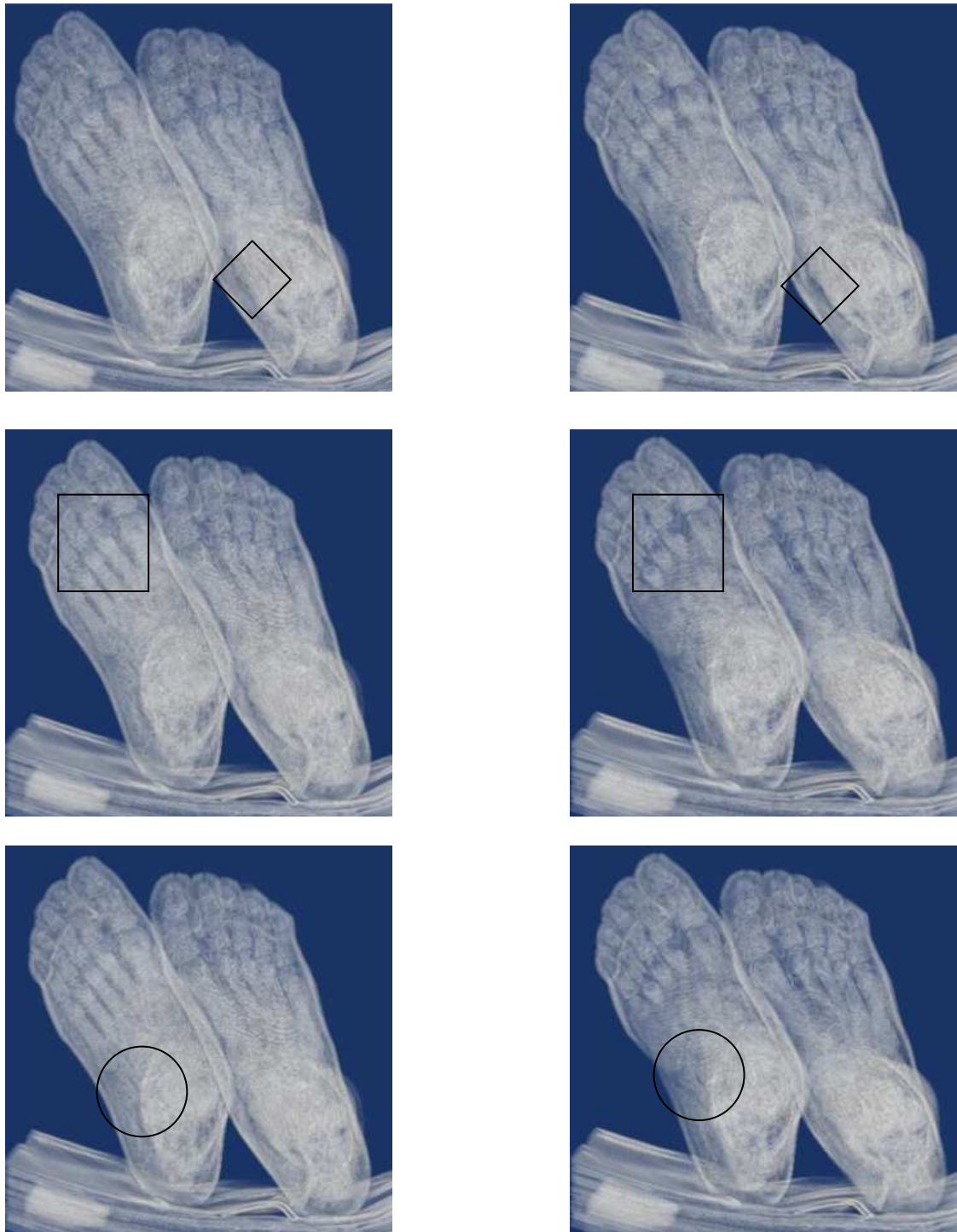


**Figure 5—13: Impact de la taille du voisinage sur le rendu final de volume.**



**Figure 5—14: D'autres exemples sur l'impact de la taille du voisinage sur le rendu final de volume.**

Nous considérons maintenant l'impact de la valeur de seuil  $\epsilon$  dans l'estimation de l'OA. Pour le même voisinage d'un voxel, les résultats peuvent être différents et dépendent à la valeur choisie de  $\epsilon$ . La variation de sa valeur influence l'ensemble de voxels qui ne respectent pas notre hypothèse. Figure 5—15 et Figure 5—16 présentent, en appliquant deux fonctions de transfert différentes, d'autres images de DS1 en utilisant plusieurs valeurs de  $\epsilon$ .



**Figure 5—15 : L'influence du seuil sur la qualité visuelle obtenue (exemple 1).**

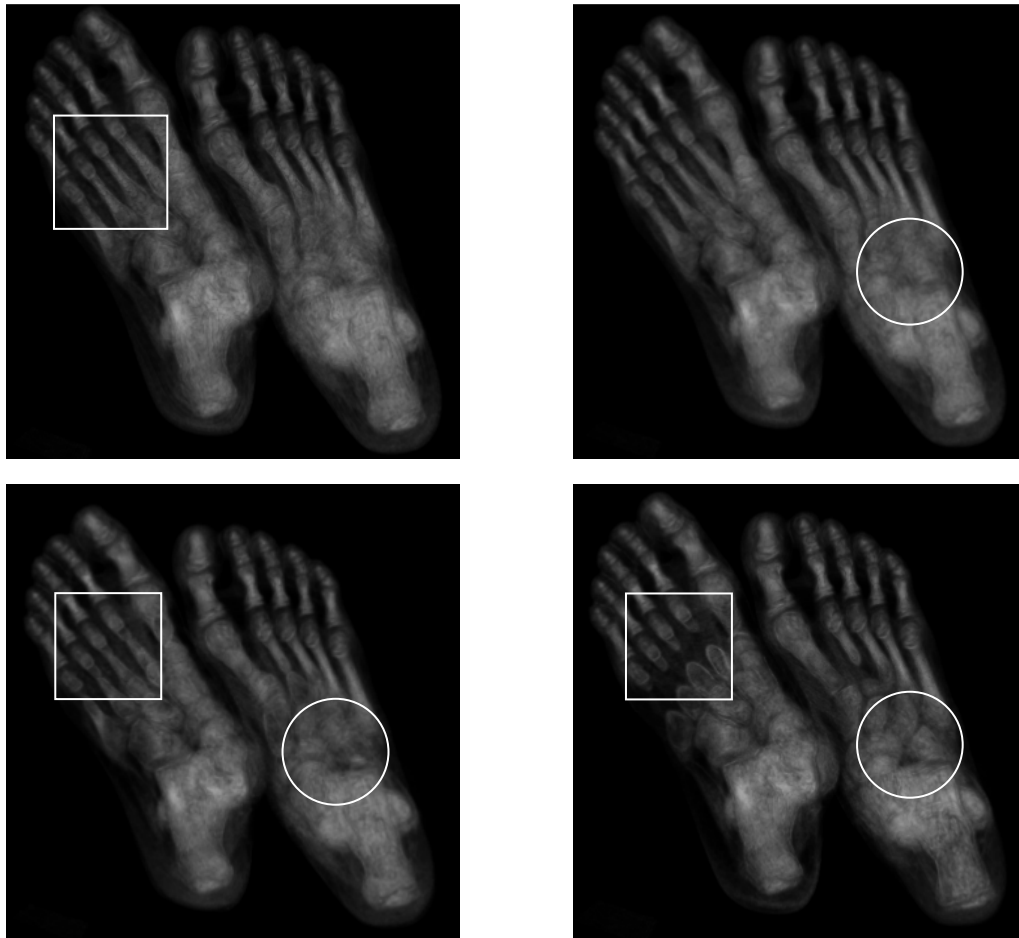


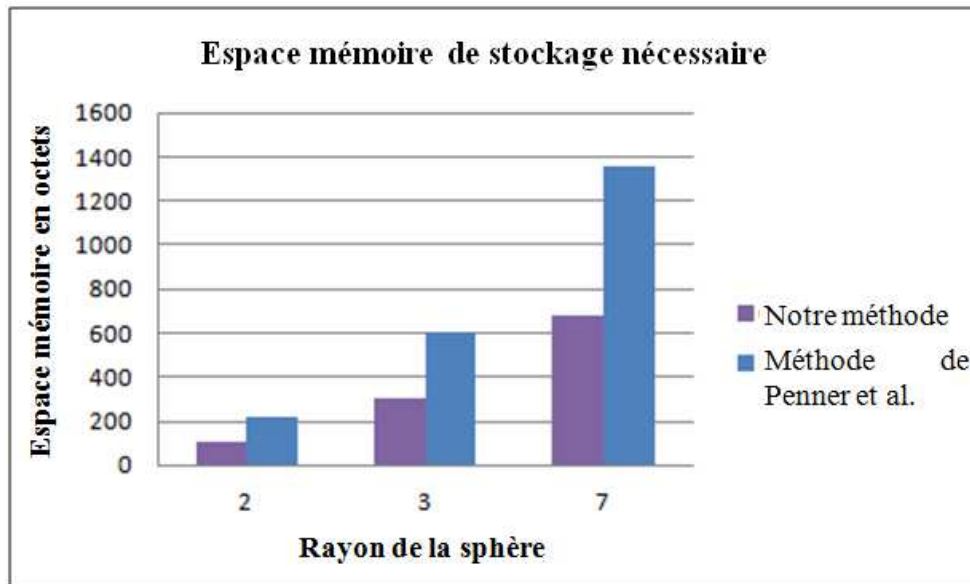
Figure 5—16 : L'influence du seuil sur la qualité visuelle obtenue (exemple 2).

## 5.6 Espace mémoire : Discussion et comparaison

L'espace mémoire nécessaire à la méthode décrite est évalué en tenant en compte plusieurs critères, notamment le stockage des termes nécessaires pour calculer l'OA. Car le nombre de ces termes est un facteur important influençant la performance des applications, une analyse comparative, entre notre travail et celui de Penner et Mitchell (2008), est donnée dans la figure 12. Nous avons révélé que notre méthode utilise moins d'espace de stockage, ce qui est avantageux pour les applications de rendu volumique comme l'imagerie médicale. Ce type d'application doit particulièrement bénéficier d'améliorations sur la façon d'extraction des données représentatives à partir des larges données volumiques stockées.

Nous trouvons que le terme exponentiel est efficace pour compresser l'information d'accessibilité dans le voisinage d'un voxel. Pour chaque voxel, Penner et al. estiment que le facteur d'occultation dépendent des deux termes stockés dans une région de filtre via une texture de deux canaux: la valeur iso-surface et sa valeur au carré.

Nous illustrons notre explication avec des exemples présentés dans la Figure 5—17. Nous présentons les différentes valeurs du rayon de voisinage sphérique pour évaluer l'espace mémoire nécessaire au stockage des termes. Noter que nous avons utilisé pour représenter chaque terme en virgule flottante à 32 bits.



**Figure 5—17 : Consommation d’espace mémoire en octets.**

En plus de présenter et stocker des données de manière efficace, la performance peut être affectée par l'espace mémoire nécessaire pour les différentes exécutions. Une analyse des différents calculs est effectuée pour trois méthodes: la notre, celle de Penner et Mitchell (2008) et celle de Ruiz et al. (2010). Afin d'obtenir la valeur OA et par l'application d'un filtre convenable sur les termes stockés dans la région considérée, il suffit de calculer un paramètre unique (la moyenne). Penner et Mitchell calculent deux paramètres: la moyenne et la variance. Ruiz et al. utilisent trois paramètres qui sont la valeur minimale de la densité, la valeur maximale de la densité et de la moyenne des valeurs de densité. A noter que chaque paramètre nécessite un appel de filtre. Donc, plus les filtres sont utilisés, plus l'espace de stockage est demandé pour réaliser les calculs nécessaires. Comme nous remarquons dans Figure 5—18, notre méthode permet une excellente approximation pour le PCF avec moins de ressources de calcul.

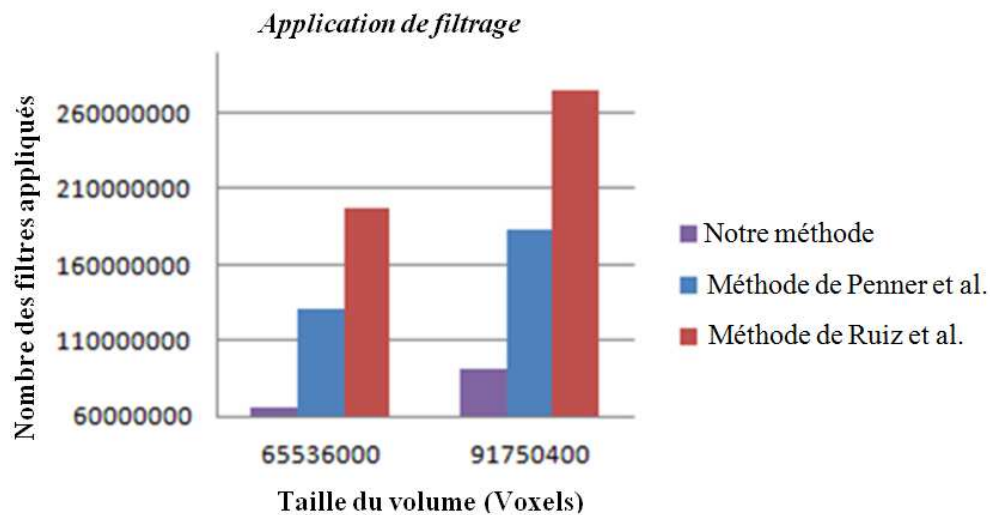


Figure 5—18 : Exigences de filtrage.

	Sans OA	Avec OA
DS1	0.15	0.23
DS2	0.231	0.246
DS3	0.242	0.248

Tableau 3 : Temps de rendu (en seconde) de trois ensembles de données avec et sans notre méthode d'ombrage.

## 5.7 Limites

Le dernier aspect à discuter maintenant concerne les principales limites de notre approche. Tout d'abord, notre implémentation est utilisée uniquement dans le champ de données scalaire, ce qui représente une quantité associée à un seul nombre tel que la densité en médecine, la tension, la température et l'ampleur de la vitesse tout au long de la science et de l'ingénierie. Les données scientifiques qui sont présentées par un vecteur ou un champ de tenseurs ne sont pas concernées par l'approche courante. En conséquence, nous n'utilisons pas les données multi-champs, qui contiennent des valeurs avec des champs différents comme des champs scalaires, vectoriels ou/et tenseur.

Du fait que les données initiales sont représentées par une série de coupes 2Ds obtenues à partir d'imagerie par résonance magnétique (IRM) ou la tomographie par ordinateur (CT), une étape de reconstruction 3D est nécessaire pour créer une structure de volume appropriée. Comme indiqué précédemment, notre méthode manipule la grille régulière avec des données isotropes contenant un ensemble d'échantillons prélevés à intervalles réguliers le long des trois axes orthogonaux. La reconstruction 3D peut offrir une grille régulière avec des données anisotropies ou un volume irrégulier. Dans le premier cas,

l'espacement entre les échantillons le long de chaque axe est constant, mais avec trois espacements différents pour les trois axes. Le dernier est constitué d'une collection de cellules dont la connectivité est définie explicitement dans une forme arbitraire telle que tétraèdres, hexaèdres, ou prismes. Nous pouvons appliquer notre méthode en utilisant ces deux dernières structures de données volumiques, mais nous devons passer par une étape intermédiaire de transformation pour obtenir une grille régulière isotrope. Par conséquent, plus l'augmentation du temps de rendu, la qualité visuelle peut être affectée par l'introduction d'artefacts à cause de la perte de l'information.

Finalement, les données volumiques animées, ou ce que l'on appelle des données volumiques variées dans le temps, ne peuvent pas être considérées comme des entrées de notre méthode.

## **5.8 Conclusion**

Le présent chapitre visait à replacer notre travail dans son contexte applicatif, à savoir l'ombrage pour la visualisation scientifique des données volumiques médicales. Au cours de nos diverses expérimentations, il est apparu que le présent travail reste parfaitement viable pour les calculs même sur de très grandes quantités de données. En revanche, nous sommes conscients des limitations qu'impose la contrainte de la fonction exponentielle dans la mise au point de notre approche pour qu'elle puisse exprimer pleinement son potentiel sur les cas de la validation de l'hypothèse.

---

## Chapitre 6 — Conclusion générale

---

La visualisation scientifique occupe une grande place dans le domaine de l'infographie, en raison de la diversité des modèles de représentation à l'œuvre. Il ne s'agit pas seulement de représenter des surfaces continues, telles que les limites du domaine étudié ou quelques isosurfaces, mais également des objets de dimension inférieure, comme des lignes de courant ou des points de Gauss.

Dès lors que l'explosion de la puissance de calcul permet de réaliser des simulations numériques de plus en plus fines et complexes, la visualisation scientifique doit sans cesse s'adapter et proposer de nouvelles méthodes pour l'analyse et la compréhension des volumes de données générées.

L'exploration de données volumiques denses pose un problème fondamental, dans la mesure où une méthode de rendu idéale devrait permettre d'une part d'afficher le plus de données possibles, en dépit des occultations survenant nécessairement au moment de la projection, tout en offrant une compréhension claire des phénomènes observés et de leurs relations spatiales. De nombreuses méthodes ont été proposées, parmi lesquelles les modèles optiques de RVD qui occupent une place importante. De tels rendus inspirés par des modèles physiques supposent que le système visuel humain est capable d'appréhender et de comprendre la structure des volumes partiellement transparents, alors que de tels objets ne se rencontrent que rarement dans notre environnement.

En dépit des techniques développées jusqu'à présent, l'analyse et la compréhension de données denses demeurent un problème important en visualisation scientifique. On cherche à afficher le plus d'informations possibles afin d'appréhender le phénomène visualisé, qui est par nature volumique.

Par ailleurs, l'interactivité constitue un des points clés de la visualisation, au moins dans la phase d'exploration des données. Comme l'ombrage ne représente qu'une sous-partie du rendu total d'une scène 3D, il paraît nécessaire ici de disposer d'une méthode consommant le moins de temps de calcul possible.

En modulant les intensités lumineuses du monde qui nous entoure, l'éclairage constitue une importante source d'information sur la forme et l'orientation des objets environnants,



ainsi que sur leurs relations spatiales. S'il résulte simplement de la propagation de la lumière et de son interaction avec les objets rencontrés, les effets produits sont divers par nature: intensité fonction de l'orientation relative des surfaces par rapport aux sources de lumières, ombres portées, interréllections, importance de l'étendu des sources de lumière. A partir de là, des causes différentes peuvent produire des effets très divers, ce qui rend difficile l'extraction de forme à partir de l'ombrage.

Le traitement de gros ensembles de données volumiques est un domaine récent qui s'est particulièrement développé les cinq dernières années, en parallèle avec les moyens d'acquisition de données de masse. La mesure d'une visibilité locale à un point, où l'OA, joue un rôle crucial dans l'ombrage du volume. L'objectif principal du travail présenté dans cette thèse était de développer une méthode d'ombrage de données volumiques issues des appareils médicaux mais aussi de façon plus générale, elle permet la visualisation de données volumiques portant des valeurs scalaires. Dans ce contexte, les principales problématiques concernaient d'une part l'espace mémoire nécessaire pour réaliser les différents calculs, d'autre part l'accélération de ces calculs vu la taille des volumes manipulés.

Vu la nature discrète de ces données, nous avons exploité des propriétés du processus de filtrage pour développer une approximation d'OA volumique avec une vitesse importante sans avoir des artefacts remarquables dans le rendu final du volume. La première contribution de ce travail est d'adapter la fonction exponentielle pour estimer le test d'occultation binaire. Par conséquent, nous avons pu réduire la mémoire par rapport aux méthodes de Penner et Mitchell (2008) et Ruiz et al. (2010), grâce à l'utilisation d'un terme unique d'exposant. Pour estimer la fonction de visibilité sur une région de filtre, qui représente notre deuxième contribution, nous avons utilisé l'inégalité de Markov qui donne une borne supérieure de la quantité de lumière atteignant le voxel considéré.

Nous avons implémenté cet algorithme et nous avons présenté au chapitre 5 une série d'expérimentations sur des données volumiques réelles de la médecine. L'algorithme est interactif et répond à nos attentes en termes de qualité visuelle.

Dans un avenir proche, il nous semble en premier lieu d'insister sur la nécessité de proposer une solution pour éliminer la définition manuelle de seuil utilisé lors de la détection du non-respect de l'hypothèse, en mettant en œuvre une définition automatique et adaptative. Sans l'utilisation de la définition (manuelle ou automatique) de seuil, le filtrage donne une réponse erronée à cause de la grande valeur retournée par la fonction exponentielle. Le traitement de cette divergence exponentielle sur le côté gauche est également considéré

comme l'une des directions pour la future recherche, en proposant d'utiliser un filtrage amélioré pour augmenter la qualité de notre travail. De plus, nous voulons visualiser des données représentées par la grille régulière anisotrope et le volume irrégulier, afin d'exploiter plus de structures volumiques. En addition, nous prévoyons d'étendre notre travail pour être utile avec des ensembles de données dynamiques. Ainsi, il serait intéressant d'étendre l'étude à la visualisation des données volumiques de différents domaines scientifiques et de l'ingénierie qui sont représentées par des champs vectoriels (pression, vitesse, champ électrique, champ magnétique) ou tensoriels (diffusion, électrique et conductivité thermique, le stress, la tension.....).

## Activités scientifiques: communications et publications

1. Bahi Naima, Babahenini Mohamed Chaouki, « Le calcul de visibilité par la division d'espace binaire (BSP) », 7<sup>ème</sup> édition de l'atelier de Traitement et l'Analyse de l'Information Méthodes et Applications : TAIMA'2011, Association de la Recherche Tunisienne des Sciences pour l'Image, Hammamet, 2011, 03-08 octobre 2011.

2. Bahi Naima, Babahenini Mohammed Chaouki, "Bounding Volume Hierarchy Heuristics for Ray Tracing Acceleration", La 2<sup>ème</sup> conférence International sur les Systèmes Complexes (CISC'11), université de Jijel, Algérie, 06-08 Décembre 2011.

3. Bahi Naima, Babahenini Mohammed Chaouki, Khemliche Sarra and Zerari Abd El Moumène. Full Volume Rendering based Ambient Occlusion, 3<sup>èmes</sup> Journées Doctorales en Informatique de Guelma, Guelma, Algérie, 4 - 5 Décembre 2013.

<http://www.labstic.com/jdi13/jdi13/index.html>

4. Bahi Naima, Babahenini Mohamed Chaouki, "Volumetric Ambient Occlusion for Volume Rendering", 1<sup>ier</sup> Workshop Images, Graphiques et Vie Artificielle IGVA'13, Université de biskra, 16-18 Juin 2013.

5. Zerari abd El Moumène, Babahenini Mohamed Chaouki, BAHI Naima, KHEMLICHE Sarra, « Ombres douces avec source de lumière surfacique », Les 4<sup>èmes</sup> Journées Doctorales en Informatique de Guelma (JDI'2014), Université de Guelma, Algérie, 03-04 Décembre 2014.

<http://www.labstic.com/jdi14/jdi14/index.php>

6. Khemliche Sarra, Babahenini Mohamed Chaouki, Bahi Naima and Zerari Abd El Moumène, « Efficient compute for complex illumination effects with virtual point light », Les 4<sup>èmes</sup> Journées Doctorales en Informatique de Guelma (JDI'2014), Université de Guelma, Algérie, 03-04 Décembre 2014.

<http://www.labstic.com/jdi14/jdi14/index.php>

7. BAHI Naima, Babahenini Mohamed Chaouki, Khemliche Sarra, Zerari abd El Moumène, « Ray-casting pour le rendu volumique des images médicales », International Electrical and Computer Engineering Conference (IECEC'2015), Université de Sétif, Algérie, 23-25 Mai 2015.

<http://www.univ-setif.dz/IECEC2015/>

8. BAHI Naima, Babahenini Mohamed Chaouki, KHEMLICHE Sarra, Zerari abd El Moumène, “Rendu volumique direct des données scientifiques. Ray casting”, The 2nd International Conference on Multimedia Information processing (CITIM'2015), Université de Mustapha Stambouli, Mascara, 12-13 Mai 2015.

<http://www.univ-mascara.dz/citim2015/main.html>

9. Abd El Mouméne Zerari, Mohamed Chaouki Babahenini, Naima Bahi and Sarra Khemliche, “Fast Soft Shadow with Screen Space Ambient Occlusion for Real Time Rendering”, Accepted for: The 1st Mediterranean Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Tebessa, Algeria on November 22-23, 2016.

<https://medprai2016.sciencesconf.org/>

10. BAHI Naima, Babahenini Mohamed Chaouki, “An enhanced filtering based approach to approximate volumetric ambient occlusion”, International Journal of Biomedical Engineering and Technology, ‘in press’.

# Références

- Ancel, A., Dischler, J.-M. and Mongenet, C. (2010), 'Feature-driven ambient occlusion for direct volume rendering' in *Proceedings of the 8th IEEE/EG International Conference on Volume Graphics*, Eurographics Association, pp. 85–92.
- Ancel, A., Dischler, J.M. and Mongenet, C. (2012), 'Load-Balanced Multi-GPU Ambient Occlusion for Direct Volume Rendering' in *Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization*, Eurographics Association, pp. 99–108.
- Annen, T., Mertens, T., Bekaert, P., Seidel, H.P. and Kautz, J. (2007), 'Convolution shadow maps' in *Proceedings of the 18th Eurographics Symposium on Rendering Techniques*, Eurographics Association, pp. 51–60.
- Annen, T., Mertens, T., Seidel, H.P., Flerackers, E. and Kautz, J. (2008), 'Exponential Shadow Maps' in *Proceedings of the 16th Graphics Interface*, Canadian Information Processing Society, pp. 155–161.
- Azar, A.T. (2011) 'Biomedical Engineering: specialisations and future challenges', *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, Vol. 6 No. 2, pp. 163–177.
- Bartz, D., Hagen, H., Interrante, V. and Preim, B. (2005), 'Illustrative rendering techniques for visualization: future of visualization or just another technique?' in *VIS 05: Visualization 2005.*, IEEE, pp. 715–718.
- Baum, D. and Titschack, J. (2016), 'Cavity and pore segmentation in 3D images with ambient occlusion' in *EuroVis: Eurographics Conference on Visualization*, The Eurographics Association, pp. 113–117.
- Beason, K.M., Grant, J., Banks, D.C., Futch, B. and Hussaini, M.Y. (2006), 'Pre-computed illumination for isosurfaces' in *Electronic Imaging*, International Society for Optics and Photonics, pp. 60600b–60600b–11.
- Bergounioux, M. (2015) *Introduction au traitement mathématique des images-méthodes déterministes*, Livre, Springer.
- Borland, D. (2011) 'Ambient occlusion opacity mapping for visualization of internal molecular structure', *WSCG*, Vol. 19 No. 1, pp. 17–24.
- Bredow, R. (2002), 'Renderman on film' in *SIGGRAPH 2002 Course 16 Notes, RenderMan in Production*.
- Bresenham, J.E. (1965) 'Algorithm for computer control of a digital plotter', *IBM Systems Journal*, Vol. 4 No. 1, pp. 25–30.
- Bresenham, J.E. (1977) 'A linear algorithm for incremental digital display of circular arcs', *Communications of the ACM*, Vol. 20 No. 2, pp. 100–106.
- Chandel, R. and Gupta, G. (2013) 'Image Filtering Algorithms and Techniques : A Review', *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, Vol. 3 No. 10, pp. 198–202.

- Correa, C.D. and Ma, K. (2009) 'The occlusion spectrum for volume classification and visualization', *IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS*, Vol. 15 No. 6, pp. 1465–1472.
- Crow, F.C. (1977), 'Shadow algorithms for computer graphics' in *SIGGRAPH '77: Proceedings of the 4th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM Press, pp. 242–248.
- Crow, F.C. (1984) 'Summed-area tables for texture mapping', *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 18 No. 3, pp. 207–212.
- Dachsbacher, C. and Stamminger, M. (2006), 'Splating indirect illumination' in *The 2006 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, ACM, pp. 93–101.
- Desgranges, P. and Engel, K. (2007), 'Fast ambient occlusion for direct volume rendering' in *The 8th United States Patent Application*, Patent and Trademark Office, United States, pp. 119–184.
- Diaz, J., Yela, H. and Vazquez, P. (2008) 'Vicinity Occlusion Maps: Enhanced depth perception of volumetric models', *Computer Graphics International*, Vol. 2008 No. 2008, pp. 56–63.
- Donnelly, W. and Lauritzen, A. (2006), 'Variance shadow maps' in *The 2006 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, ACM, pp. 161–165.
- Ebert, D. and Rheingans, P. (2000), 'Volume illustration: non-photorealistic rendering of volume models' in *VIS '00: Visualization '00*, IEEE Computer Society Press Los Alamitos, CA, USA, pp. 195–202.
- Elvins, T.T. (1992) 'A survey of algorithms for volume visualization', *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 26 No. 3, pp. 194–201.
- Fecteau, J.H. and Munoz, D.P. (2006) 'Saliency, relevance, and firing: a priority map for target selection', *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 10 No. 8, pp. 382–390.
- Gibaud, B. (2008), 'The DICOM standard: a brief overview' in *Molecular Imaging: Computer Reconstruction and Practice*, Springer Netherlands, pp. 229–238.
- Giovannetti, G., Viti, V., Positano, V., Santarelli, M.F., Landini, L. and Benassi, A. (2007) 'Coil sensitivity map-based filter for phased-array image reconstruction in Magnetic Resonance Imaging', *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, Vol. 1 No. 1, pp. 4–17.
- Grabli, S. (2005), *Le Style Dans Le Rendu Non-Photoréaliste de Dessins Au Trait À Partir de Scènes 3D: Une Approche Programmable*, Thèse, Université Joseph Fourier de Grenoble (UJF).
- Grottel, S., Krone, M., Scharnowski, K. and Ertl, Th. (2012), 'Object space ambient occlusion for molecular dynamics' in *Visualization Symposium (PacificVis), 2012 IEEE Pacific*, IEEE, pp. 209–216.
- Hadwiger, M., Ljung, P., Salama, C.R. and Ropinski, T. (2009), 'Advanced illumination techniques for GPU volume raycasting' in *ACM Siggraph Asia Courses*, ACM, Singapore, pp. 1–166.

- Hanqi, G., Ningyu, M. and Xiaoru, Y. (2011) ‘WYSIWYG (What You See is What You Get) volume visualization’, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 17 No. 12, pp. 2106–2114.
- Hasenfratz, J., Lapierre, M., Holzschuch, N. and Sillion, X. (2003) ‘A survey of real-time soft shadows algorithms’, *Computer Graphics Forum*, Vol. 22 No. 4, pp. 753–774.
- Hassani, S. (2009) ‘Dirac delta function’, *Mathematical Methods*, pp. 139–170.
- Hernell, F., Jung, P. and Ynnerman, A. (2007), ‘Efficient ambient and emissive tissue illumination using local occlusion in multiresolution volume rendering’ in *VG 2007: 6th Eurographics/IEEE-VGTC International Symposium on Volume Graphics*, Eurographics Association, Prague, Czech Republic, pp. 1–8.
- Hernell, F., Ljung, P. and Ynnerman, A. (2008), ‘Interactive global light propagation in direct volume rendering using local piecewise integration’ in *Volume and Point-Based Graphics*, pp. 105–112.
- Hernell, F., Ljung, P. and Ynnerman, A. (2010) ‘Local ambient occlusion in direct volume rendering’, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16 No. 4, pp. 548–559.
- Humphreys, G. and Pharr, M. (2004) *Physically based rendering*, 1st., Morgan Kaufmann.
- Ikits, M., Kniss, J., Lefohn, A. and Hansen, C. (2007) ‘Volume rendering techniques’, *GPU Gems 2*.
- Insight Segmentation And Registration Toolkit. [online] <http://www.itk.org/> (Accessed 10 June 2016).
- Iones, A., Krupkin, A., Sbert, M. and Zhukov, S. (2003) ‘Fast realistic lighting for video games’, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 23 No. 3, pp. 54–64.
- Jia, Y.L., Zhang, H.C. and Jing, Y.Z. (2008) ‘A modified Bresenham algorithm of line drawing’, *Journal of Image and Graphics*, Vol. 13 No. 1, pp. 158–61.
- Johnson, C.R. and Tricoche, X. (2009) ‘Biomedical visualization’, *Advances in Biomedical Engineering*, pp. 209–272.
- Jönsson, D., Sundén, E., Ynnerman, A. and Ropinski, T. (2014) ‘A survey of volumetric illumination techniques for interactive volume rendering’, *Computer Graphics Forum*, Vol. 33 No. 1, pp. 27–51.
- Kajiya, J.T. (1986), ‘The rendering equation’ in *SIGGRAPH '86 Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM New York, NY, USA, pp. 143–150.
- Kerns, G.. J. (2011) *Introduction to probability and statistics using R*, 1st., Lulu.com.
- Khuri, A.I. (2004) ‘Applications of Dirac’s delta function in statistics’, *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, Vol. 35 No. 2, pp. 185–195.
- Klein, J., Bartz, D., Friman, O., Hadwiger, M., Preim, B., Ritter, F., Vilanova, A. and Zachmann, G. (2008) ‘Advanced algorithms in medical computer graphics’, *Annex to the*

*Conference Proceedings of EUROGRAPHICS*, pp. 25–44.

- Klein, J., Friman, O., Hadwiger, M., Preim, B., Ritter, F., Vilanova, A., Zachmann, G. and Bartz, D. (2009) ‘Visual computing for medical diagnosis and treatment’, *Computers and Graphics*, Vol. 33 No. 4, pp. 554–565.
- Kolivand, H., Sunar, M.S., Altameem, A., Rehman, A. and Uddin, M. (2015) ‘Shadow mapping algorithms : applications and limitations’, *Applied Mathematics & Information Sciences*, Vol. 9 No. 3, pp. 1307–1315.
- Kratz, A., Jan, R., Hadwiger, M. and Hotz, I. (2011) ‘Adaptive screen-space sampling for volume ray-casting’, *Konrad-Zuse-Zentrum Für Informationstechnik Berlin*.
- Krone, M., Kozlikova, B., Lindow, N., Baaden, M., Baum, D., Parulek, J., Hege, C.H. and Viola, I. (2016) ‘Visual analysis of biomolecular cavities: state of the art’, *Computer Graphics Forum*, Vol. 35 No. 3, pp. 527–551.
- Krüger, J. (2010), ‘A new sampling scheme for slice based volume rendering’ in *VG10: IEEE/EG International Symposium on Volume Graphics (2010)*, The Eurographics Association 2010, pp. 1–4.
- Landis, H. (2002) ‘Production-ready global illumination’, *Course 16: RenderMan in Production. ACM SIGGRAPH Course Notes*.
- Langer, M.S. and Bülthoff, H.H. (2000) ‘Depth discrimination from shading under diffuse lighting’, *Perception*, Vol. 29 No. 6, pp. 649– 660.
- Läthén, G., Lindholm, S., Lenz, R., Borga, M., Läthén, G., Lindholm, S., Lenz, R. and Borga, M. (2014), ‘Evaluation of transfer function methods in direct volume rendering of the blood vessel lumen Evaluation of Transfer Function Methods in Direct Volume Rendering of the Blood Vessel Lumen’ in *Eurographics Workshop on Visual Computing for Biology and Medicine*, The Eurographics Association, pp. 117–126.
- Levoy, M. (1988) ‘Display of surfaces from volume data’, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 8 No. 3, pp. 29–37.
- Lichtenberg, N., Smit, N., Hansen, C. and Lawonn, K. (2016), ‘Sline: Seamless Line Illustration for Interactive Biomedical Visualization’ in *Eurographics Workshop on Visual Computing for Biology and Medicine*, The Eurographics Association, pp. .
- Lin, L., Chen, S., Shao, Y. and Gu, Z. (2013) ‘Plane-based sampling for ray casting algorithm in sequential medical images’, *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, Vol. 2013 No. , pp. .
- Lindemann, F. and Ropinski, T. (2011) ‘About the influence of illumination models on image comprehension in direct volume rendering’, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 17 No. 12, pp. 1922–1931.
- Ljung, P. (2006), ‘Adaptive sampling in single pass, GPU-based raycasting of multiresolution volumes’ in *VG: Eurographics/IEEE VGTC Symposium on Volume Graphics*, The Eurographics Association, pp. 39–46.
- Ljung, P., Lundström, C. and Ynnerman, A. (2006a), ‘Multiresolution interblock interpolation in direct volume rendering’ in *EuroVis06: Joint Eurographics - IEEE VGTC Symposium*



- on Visualization, The Eurographics Association, pp. 259–266.
- Ljung, P., Winskog, C., Persson, A., Lundstrom, C. and Ynnerman, A. (2006b) ‘Full body virtual autopsies using a state-of-the-art volume rendering pipeline’, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 12 No. 5, pp. 869–876.
- Max, N. (1995) ‘Optical models for direct volume rendering’, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 1 No. 2, pp. 99–108.
- Max, N., Hanrahan, P. and Roger, C. (1990) ‘Area and volume coherence for efficient visualization of 3D scalar functions’, *Computer Graphics*, Vol. 24 No. 5, pp. 27–33.
- Mendenhall, W., Beaver, R.J. and Beaver, B.M. (2012) Introduction to probability and statistics, Cengage Learning.
- Méndez-Feliu, À. and Sbert, M. (2009) ‘From obscurances to ambient occlusion: A survey’, *The International Journal of Visual Computer*, Vol. 25 No. 2, pp. 181–196.
- Meß, C. and Ropinski, T. (2010), ‘Efficient acquisition and clustering of local histograms for representing voxel neighborhoods’ in *Proceedings of the 8th IEEE/EG International Conference on Volume Graphics*, pp. 117–124.
- Mueller, K. and Crawfis, R. (1998), ‘Eliminating popping artifacts in sheet buffer-Based splatting’ in *Visualization ’98*, IEEE, pp. 239–245.
- Mustra, M., Delac, K. and Grgic, M. (2008), ‘Overview of the DICOM standard’ in *ELMAR: 50th International Symposium*, IEEE, pp. 39–44.
- Nguyen, B.P., Tay, C., Chui, W. and Ong, S. (2012) ‘A clustering-based system to automate transfer function design for medical image visualization’, *The Visual Computer*, Vol. 28 No. 2, pp. 181–191.
- Nulkar, M. and Mueller, K. (2001) ‘Splatting With Shadows’, *Volume Graphics*, pp. 35–49.
- Pathak, A. and Singh, E. (2014) ‘Comparative study on filtering techniques of digital image processing’, *Advance in Electronic and Electric Engineering*, Vol. 4 No. 6, pp. 669–674.
- Penner, E. and Mitchell, R. (2008), ‘Isosurface ambient occlusion and soft shadows with filterable occlusion maps’ in *SPBG 2008: Proceedings of the 5th Eurographics IEEE/EG Symposium on Volume and Point-Based Graphics*, Eurographics Association, Switzerland, pp. 57–64.
- Peters, C. and Klein, R. (2015), ‘Moment shadow mapping’ in *Proceedings of the 19th Meeting of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, ACM, California, pp. 7–14.
- Peters, T. (2014) ‘The physics of volume rendering’, *European Journal of Physics*, Vol. 35 No. 6, pp. 65028.
- Petit, J., Brémond, R. and Tarel, J.-P. (2009) ‘Une carte de saillance adaptée aux images HDR’, *Revue Électronique Francophone d’Informatique Graphique*, Vol. 3 No. 2, pp. 1–10.
- Pianykh, O.S. (2012) Digital imaging and communications in medicine (DICOM): a practical

introduction and survival guide, 2nd., Springer Science & Business Media.

- Pitteway, M.L. V. and Watkinson, D.J. (1980) 'Bresenham's algorithm with grey scale', *Communications of the ACM*, Vol. 23 No. 11, pp. 625–626.
- Preim, B., Baer, A., Cunningham, D., Isenberg, T. and Timo, R. (2016) 'A survey of perceptually motivated 3D visualization of medical image', *Computer Graphics Forum*, Vol. 35 No. 3, pp. 501–525.
- Preim, B. and Bartz, D. (2007) *Visualization in medicine: theory, algorithms and applications*, 1st., Morgan Kaufmann, USA.
- Preim, B. and Botha, C. (2014) *Visual computing for medicine: theory, algorithms and application*, 2nd., Morgan Kaufman.
- Reeves, W.T., Salesin, D.H. and Cook, R.L. (1987) 'Rendering antialiased shadows with depth maps', *Computer Graphics*, Vol. 21 No. 4, pp. 283–291.
- Ritschel, T. (2007), 'Fast GPU-based Visibility Computation for Natural Illumination of Volume Data Sets' in *Eurographics*, The Eurographics Association, pp. 17–20.
- Rohatgi, V.K. and Saleh, A.M.E. (2015) *An introduction to probability and statistics*, John Wiley & Sons.
- Ropinski, T., Meyer-Spradow, J., Diepenbrock, S., Mensmann, J. and Hinrichs, K. (2008) 'Interactive volume rendering with dynamic ambient occlusion and color bleeding', *Computer Graphics Forum*, Vol. 27 No. 2, pp. 567–576.
- Rostamzadeh, N., Jönsson, D. and Ropinski, T. (2013), 'Comparison of volumetric illumination methods by considering the underlying optical models' in *SIGRAD 2013 : Proceedings of Visual Computing*, Swedish Computer Graphics Association, Sweden, pp. 35–40.
- Ruiz, M., Boada, I., Viola, I., Bruckner, S., Feixas, M. and Sbert, M. (2008), 'Obscurance-based volume rendering framework' in *Proceedings of the 7th Eurographics / IEEE VGTC International Symposium on Volume Graphics and the 5th Eurographics / IEEE VGTC Symposium on Point-Based Graphics*, The Eurographics Association, Los Angeles, California, USA, pp. 113–120.
- Ruiz, M., Szirmay-Kalos, L., Umenhoffer, T., Boada, I., Feixas, M. and Sbert, M. (2010) 'Volumetric ambient occlusion for volumetric models', *Visual Computer*, Vol. 26 No. 6–8, pp. 687–695.
- Schott, M., Pegoraro, V., Hansen, C., Boulanger, K. and Bouatouch, K. (2009) 'A directional occlusion shading model for interactive direct volume rendering', *Computer Graphics Forum*, Vol. 28 No. 3, pp. 855–862.
- Shen, L., Feng, J. and Yang, B. (2013) 'Exponential soft shadow mapping', *Computer Graphics Forum*, Vol. 32 No. 4, pp. 107–116.
- Sinai, Y.G. (2013) *Probability theory: an introductory course*, Springer Science & Business Media.
- Singh, P. and Aman, A. (2013) 'Analytical analysis of image filtering techniques',

*International Journal of Engineering and Innovative Technology*, Vol. 3 No. 4, pp. 29–32.

- Sloan, P., Kautz, J. and Snyder, J. (2002) ‘Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic , low-frequency lighting environments’, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 21 No. 3, pp. 527–536.
- Šoltészová, V., Patel, D., Bruckner, S. and Viola, I. (2010) ‘A multidirectional occlusion shading model for direct volume rendering’, *Computer Graphics Forum*, Vol. 29 No. 3, pp. 883–891.
- Šoltészová, V., Patel, D. and Viola, I. (2011), ‘Chromatic shadows for improved perception’ in *The ACM SIGGRAPH/eurographics Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering*, ACM, pp. 105–116.
- Spiegel, M.R., Schiller, J.J. and Srinivasan, Alu, R. (2009) *Probability and statistics*, 3rd., Schaum’s Outline Series, Mc Graw Hill.
- St-Amour, J.-F. (2004), *Génération D’ombres Floues Provenant de Sources de Lumière Surfaceutiques À L’aide de Tampons D’ombre Étendus*, Thèse, Université de Montréal.
- Stewart, A.J. (2003), ‘Vicinity shading for enhanced perception of volumetric data’ in *(VIS’03): 14th IEEE Visualization*, IEEE Computer Society, pp. 355–362.
- Tania, S. and Rowaida, R. (2016) ‘A comparative study of various image filtering techniques for removing various noisy pixels in aerial image’, *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, Vol. 9 No. 3, pp. 113–124.
- Tarini, M., Cignoni, P. and Montani, C. (2006) ‘Ambient occlusion and edge cueing for enhancing real time molecular visualization’, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 12 No. 5, pp. 1237–1244.
- Thollot, J. (2009), *Le Rendu Expressif: Un Ensemble D’outils et Techniques Pour La Communication Visuelle*, Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.
- Towers, J.D. (2007) ‘Two methods for discretizing a delta function supported on a level set’, *Journal of Computational Physics*, Vol. 220 No. 2, pp. 915–931.
- Treavett, S.M. and Chen, M. (2000), ‘Pen-and-ink rendering in volume visualisation’ in *Visualization’00*, IEEE Computer Society Press, pp. 203–210.
- Tzeng, F.Y., Lum, E.B. and Ma, K.L. (2005) ‘An intelligent system approach to higher-dimensional classification of volume data’, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 11 No. 3, pp. 273–284.
- Visualization Toolkit. [online] <http://www.vtk.org/> (Accessed 10 June 2016).
- Vivanloc, V. (2008), *Rendu Distribué Sur Grappe de CPU/GPU et Effets D’éclairage Global*, Thèse, Université Toulouse 3 - Paul Sabatier.
- Walck, C. (2007) *Hand-book on statistical distributions for experimentalists*.
- Williams, L. (1978), ‘Casting curved shadows on curved surfaces’ in *SIGGRAPH ’78: Proceedings of the 5th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive*

*Techniques*, ACM Press, pp. 270–274.

Wyman, C., Parker, S., Shirley, P. and Hansen, C. (2006) ‘Interactive display of isosurfaces with global illumination.’, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 12 No. 2, pp. 186–196.

Zhang, C. and Crawfis, R. (2002), ‘Volumetric Shadows Using Splatting’ in *The IEEE Visualization 2002 Conference*, IEEE Computer Society, pp. 85–92.

Zhang, Y., Davis, U.C., Ma, K. and Davis, U.C. (2013), ‘Fast global illumination for interactive volume visualization’ in *The ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, ACM, pp. 55–62.

Zhukov, S., Iones, A. and Kronin, G. (1998), ‘An ambient light illumination model’ in *Rendering Techniques 1998: Proceedings of Eurographics Rendering Workshop*, Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 45–56.