HAL
open science

Placement de caméras et ajustement automatique des paramètres de stéréoscopie

Billal Merabti

To cite this version:

Billal Merabti. Placement de caméras et ajustement automatique des paramètres de stéréoscopie. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. 2011. dumas-00636737

HAL Id: dumas-00636737

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00636737v1

Submitted on 28 Oct 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

2010/2011

MASTER II SPECIALITE
RECHERCHE EN INFORMATIQUE

Billal MERABTI

[PLACEMENT DE CAMERAS ET AJUSTEMENT AUTOMATIQUE DES PARAMETRES DE STEREOSCOPIE]

RAPPORT DE STAGE

Equipe BUNRAKU

Encadrants :
Kadi BOUATOUCH
Christian BOUVILLE

EMP UNIVERSITÉ DE RENNES 1 istic IRISA

Résumé

La visualisation 3D stéréoscopique connait un regain d'intérêt avec l'apparition sur le marché grand public de dispositifs de visualisation à des coûts très abordables. Cependant, ces écrans engendrent une fatigue visuelle inhérente aux systèmes d'affichage stéréoscopique essentiellement en raison de la divergence entre les stimuli d'accommodation et de convergence. Ce problème a fait l'objet de nombreuses recherches mais ces résultats sont encore peu exploités dans le monde de l'infographie 3D alors que les paramètres de prise de vue sont beaucoup plus facilement contrôlables que dans le cas d'une acquisition vidéo. Le travail réalisé s'appuie sur le contrôle différencié de la disparité, pour proposer une méthode de compression progressive de l'espace virtuel, de manière à obtenir le meilleur compromis possible entre confort et qualité de visualisation.

Mots clés

Stéréoscopie, fatigue visuelle, inconfort visuel, application interactive, prise de vue stéréoscopique, compression progressive.

Sommaire

RESUME **1**

SOMMAIRE **2**

LISTE DES FIGURES 4
LISTE DES TABLEAUX 4

INTRODUCTION **5**

ORGANISATION DU RAPPORT 5

1. PROBLEMATIQUE **7**

INTRODUCTION 7
1.1. PERCEPTION DE LA 3D 7
1.1.2. Indicateurs de profondeur monoscopiques *7*
1.1.2. Indicateurs de profondeur stéréoscopique *8*
1.1.3. Ecrans 3D *9*
1.2. PRODUCTION DE LA 3D 9
1.2.1. Configuration des caméras 3D *10*
1.2.2. Résultats espérés d'un bon paramétrage des caméras *11*
1.3. CAUSES DE L'INCONFORT VISUEL EN STEREOSCOPIE 12
1.3.1. Disparité binoculaire excessive *12*
1.3.2. Conflit vergence-accommodation *12*
1.3.3. Crosstalk *12*
1.3.4. Fenêtre stéréoscopique *13*
1.3.5. Parallaxe vertical excessive *13*
1.3.6. Aliasing *13*
1.3.7. Autre *13*
1.4. TRAVAIL A EFFECTUER 13

2. ETAT DE L'ART SUR L'INCONFORT VISUEL **14**

INTRODUCTION 14
2.1. CLASSIFICATION DES METHODES EXISTANTES 14
2.1.1. Adaptation du scénario *14*
2.1.2. Déformation de l'espace objet *15*
2.1.3. Adaptation de la prise de l'image *16*
2.2. MESURE DE L'INCONFORT 17
2.2.1. Mesures subjectives *17*
2.2.2. Mesures objectives *17*
CONCLUSION 18

3. CONTRIBUTIONS **19**

INTRODUCTION 19
3.1. PREMIERE AMELIORATION : COMPRESSION PROGRESSIVE DE LA PROFONDEUR 19
3.1.1. Principe de notre solution *20*
3.1.2. Mise œuvre *22*
3.2. DEUXIEME AMELIORATION : METHODE LIEE AUX MAILLAGES A GRANDES DISPARITES DE RESOLUTION 24
3.2.1. Définition *24*
3.2.2. Solution proposée *24*
3.3. TROISIEME AMELIORATION : NOUVEAU CALCUL DE L'ECLAIRAGE 25
3.4. AJOUT D'UN FILTRE ANTI ALIASING 25
3.5. CONCLUSION 25

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS 26

INTRODUCTION 26
4.1. EXPERIMENTATION 26
4.1.1. Compression progressive de la profondeur 26
4.1.3. Amélioration de la perception de la profondeur en adaptant l'éclairage 28
4.1.4. Ajout d'un filtre anti aliasing 28
4.2. RESULTATS 29
Test 1. inconfort visuel 29
Test 2. perception de la profondeur 31
Test 3 : test de déformation de formes géométriques classiques 32
Test 4 : test sur la perception de la profondeur avec adaptation d'éclairage 32
Test 5 et test 6 32
4.3. COMPLEXITE DE CALCUL 32
CONCLUSION 33

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES 34

BIBLIOGRAPHIE 35

Liste des figures

Figure 2-1. Zones de confort visuel 14
Figure 2-2. Ajustement des positions des objets en fonction des zones de confort. 14
Figure 2-3. Evolution des profondeurs critiques des objets. 15
Figure 2-4. compression de la profondeur 15
Figure 2-5. Technique des trois régions 15
Figure 2-6. mise au point sur l'objet en fond d'écran. - William Klein, dans la foule – 1955- 16
Figure 2-7. mise au point sur l'objet en avant plan 16
Figure 2-8. Ajout d'un flou artificiel pour forcer l'observateur à se concentrer sur une région particulière de l'image 17
Figure 2-9. Flou généré automatiquement par réglage des lentilles d'une caméra conventionnelle 17
Figure 3-1. Objet situé dans la frontière entre deux régions est compressé : problème de changement d'ordre dans la région entourée en rouge. 20
Figure 3-2. Objet situé dans la frontière entre deux régions n'est pas compressé : problème de changement d'ordre dans la région entourée en rouge. 20
Figure 3-3. Traitement chaque point de l'objet séparément : pas de problème de changement d'ordre. 20
Figure 3-4. facteurs de compression en fonction de la profondeur 21
Figure 3-5. une théière déformée par l'algorithme des trois régions (vue de dessus) 21
Figure 3-6. une théière déformée par notre algorithme (vue de dessus) 21
Figure 3-7. Théière déformée par l'algorithme des trois régions + maillage original (vue de dessus). 21
Figure 3-8. Théière déformée par notre algorithme+ maillage original (vue de dessus).. 21
Figure 3-9. Architecture du pipeline graphique 22
Figure 3-10. rastérisation d'une ligne 24
Figure 3-11. effet de la compression progressive de la profondeur sur différentes résolutions de maillages. 24
Figure 4-1. Exemple d'un objet déformé par l'algorithme de Holliman 27
Figure 4-2. Exemple d'une scène composé de lignes aléatoires déformées 27
Figure 4-4. maillage de terrains. 29
Figure 4-5. exemple de texture à utiliser pour le maillage de terrain. 29
Figure 4-6. Fatigue visuelle engendrée par les différents facteurs de fatigue. 30

Liste des tableaux

Tableau 2-1. Influence des différents facteurs de la scène sur la fatigue visuelle 18
Tableau 4-1. Réponses des sujets pour le test 2. 31
Tableau 4-2. Synthèse des résultat du test 2. Proportions de bonnes perceptions par classe d'objet 31
Tableau 4-3. Résultats de la première expérience du test 3. Perception des déformation sur les objets. 32

Introduction

L'image en trois dimensions (écrans 3D, avec et sans lunettes, caméras stéréoscopiques et Blue-ray 3D-players) fût la plus grande attraction de l'édition 2011 du salon CES (le plus grand salon au monde de technologie grand public) à Las-Vegas. Selon les spécialistes, 2011 s'apprête à subir une véritable vague déferlante de produits diffusant en trois dimensions. D'autre part, l'intérêt pour l'édition de films en 3D augmente et les chaines télévisées diffusent de plus en plus de contenus 3D. Néanmoins, face à cette vague avancée technologique, la production pratique des contenus stéréoscopiques n'arrive pas encore à offrir un résultat naturel, confortable et agréable, sans risque pour les observateurs [1,2,3,4].

La fatigue visuelle due aux systèmes d'affichage stéréoscopique est essentiellement causée par la divergence entre les stimuli d'accommodation et de convergence [5]. D'autres facteurs liés aux contenus 3D, tels que l'existence de paradoxes comme l'occultation d'un objet proche par un autre plus loin, interviennent également pour augmenter l'inconfort visuel [6].

La réduction de la fatigue des téléspectateurs a fait l'objet de nombreuses recherches dont les résultats sont encore peu exploités dans le monde de l'informatique graphique 3D. C'est également l'objet de notre stage. Nous abordons le problème en nous intéressant essentiellement à l'ajustement des paramètres de prise de vue des caméras stéréoscopiques pour des scènes de synthèses.

Organisation du rapport

Ce rapport est constitué de 4 sections. Dans la première, nous commencerons par une présentation du contexte de la stéréoscopie. Nous présenterons les différents indicateurs qu'utilise le système visuel humain pour percevoir la distance qu'il le sépare des objets que nous appellerons dans ce rapport, par abus de langage, profondeur. Ensuite, nous survolons quelques notions importantes dans la production des images 3D stéréoscopiques. Nous présenterons également dans cette section les causes de l'inconfort visuel liées à la stéréoscopie. Nous terminerons par une présentation de la problématique que nous avons traitée durant notre stage.

La deuxième section contiendra un état de l'art sur l'inconfort visuel causé par la stéréoscopie. Elle débutera par une étude des méthodes existantes dans la littérature visant la réduction de la fatigue visuelle. Les solutions existantes seront classifiées selon l'approche utilisée, et seront discutées. Ensuite, une sous-section traitera les techniques de mesure de l'inconfort utilisées pour évaluer les solutions de notre problématique.

C'est à partir de la troisième section que nous aborderons notre travail de stage. Notre travail sera basé sur un algorithme dit de trois régions [2] introduit dans la section précédente. Nous commencerons par une explication détaillée de cet algorithme. Puis, nous citerons nos contributions pour résoudre un ensemble d'artefacts que nous définirons dans cette section. Avant de conclure la section, nous nous pencherons sur un autre travail qui consiste en l'application d'un filtre anti-aliasing pour améliorer le confort visu0el.

La section suivante contiendra la partie expérimentation de notre travail de stage. L'apport de chacune de nos contributions sera testée séparément. Nous commencerons la section par énumérer tous les tests que nous avons prévus d'effectuer. Nous préciserons l'objectif et le mode opératoire de chacun des tests. Ensuite, nous donnerons les résultats et les discuterons dans une autre sous-section. Deux tests sont en cours dont les résultats seront présentés lors de la soutenance du stage.

1. Problématique

Introduction

Dans cette section, nous commençons par une présentation du contexte de la stéréoscopie. La perception de la 3D fera l'objet de la première sous-section où nous présenterons les différents indicateurs qu'utilise le système visuel humain pour percevoir la profondeur. Ensuite, nous survolons quelque notions importantes dans la production des images 3D stéréoscopiques. Nous terminons le chapitre par une présentation des causes d'inconfort visuel en stéréoscopie.

1.1. Perception de la 3D

Notre perception de la profondeur se réalise, selon les neurologistes, en construisant des indicateurs basés sur différentes informations perçues par un œil ou deux yeux ou en utilisant des a priori sur les dimensions des objets. Certains de ces indicateurs sont physiologiques, d'autres psychologiques [7]. Ces indicateurs se déclinent en deux catégories : Indicateurs de profondeur monoscopiques et stéréoscopiques.

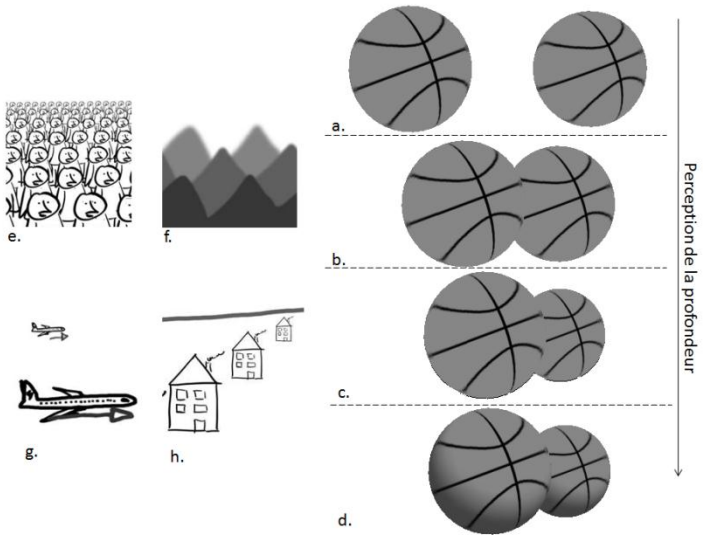


Figure 1.1. indicateurs de profondeurs monoscopiques [6]: a-profondeur non perçu ; b-occultation ; c-taille relative ; d-ombrage ; e-différence d'échelle de la texture ; f-densité ; g-vitesse relative ; h-convergence vers l'horizon.

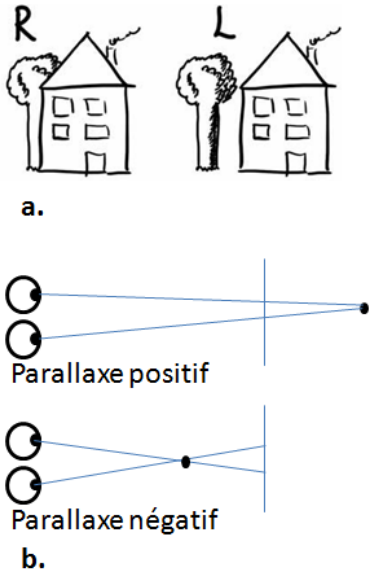


Figure 1.2. indicateurs de profondeurs stéréoscopiques [8] : a-occultation stéréoscopique ; b-parallaxe vue de haut.

1.1.2. Indicateurs de profondeur monoscopiques

Ce sont les indicateurs qui permettent de percevoir les profondeurs des objets en utilisant un seul œil. La Figure 1.1 résume les indicateurs les plus importants :

- occultation : l'objet le plus proche couvre une partie de l'objet derrière lui ;
- taille relative : plus l'objet s'éloigne, plus sa taille diminue ;
- densité : lorsqu'un objet s'éloigne, il apparait plus clair ;
- convergence vers l'horizon ;
- objets dont les dimensions sont connus : estimation de la profondeur à partir de la

dimension perçue et la dimension connue ;
- ombrage : permet de percevoir la géométrie 3d d'un objet ;
- mouvements et vitesses relatives : les objets lointains se déplacent moins vite que ceux qui sont proches ;
- différence d'échelle de la texture de l'image.

1.1.2. Indicateurs de profondeur stéréoscopique

Le système visuel humain se compose de deux yeux. Chacun perçoit une image. Le cerveau humain se sert des différences entre les deux images perçues à partir deux points de vue différents pour déterminer l'information de profondeur. La différence entre les deux images, représentées sur la Figure 1.2, se traduit de deux façons :

- occultation, apparition : l'occultation se produit lorsque les objets se couvrent mutuellement. C'est le repère de profondeur le plus puissant pour l'être humain. En stéréoscopie, l'occultation ne se produit pas de la même manière pour les deux yeux (figure 1.2.a). Certaines parties des objets peuvent être occultées pour un œil et pas pour l'autre.
- parallaxe horizontal : écart horizontal entre deux pixels représentant le même objet sur deux images. Si chacune de ces deux images est projetée simultanément sur les yeux, le cerveau construit une information qualitative de la profondeur en fonction de la valeur de la parallaxe. Si ce dernier est nulle l'objet apparait sur l'écran, sinon selon son signe l'objet peut apparaitre devant ou derrière l'écran (figure 1.2.b).

Notons que la capacité de perception de la profondeur, grâce aux repères binoculaires, n'est pas réservée uniquement aux personnes ayant les deux yeux intactes. En fait, le cerveau humain peut se baser sur les images perçues avec un seul œil pour construire la profondeur.

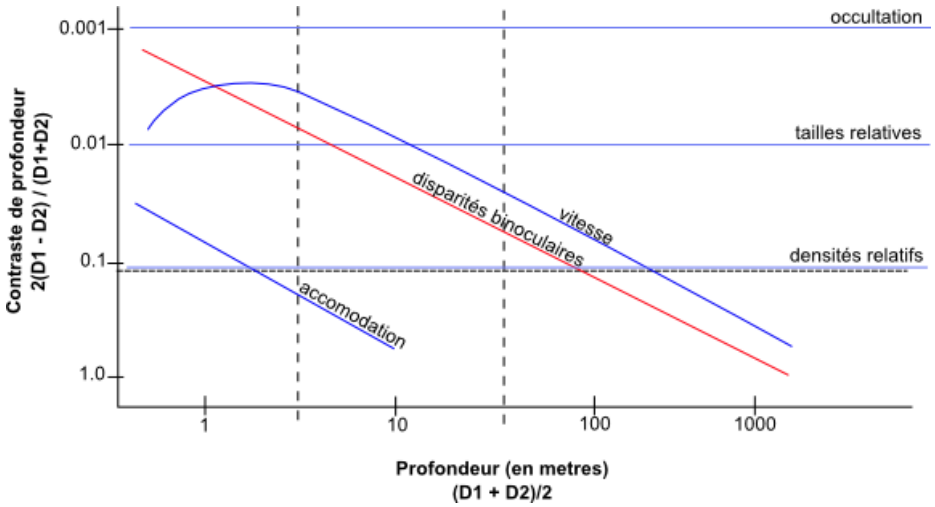


Figure 1.3. Seuils de discrimination des indicateurs de profondeurs en fonction du log de la profondeur [9]

La contribution des différents indicateurs pour la perception de la profondeur diffère selon l'ordre de profondeur (Figure 1.3). Dans [9] on trouve une étude de la discrimination minimale des différents repères en fonction de la profondeur.

1.1.3. Ecrans 3D

Les écrans stéréoscopiques peuvent être réalisés par plusieurs techniques. Généralement, on distingue les écrans stéréoscopiques des écrans auto-stéréoscopiques [10]. Les deux utilisent différentes techniques pour présenter les images gauche et droite aux yeux correspondants avec ou sans lunettes. Un système stéréoscopique est dit temps-parallèle (*time-parallel*) lorsque les deux images sont perçues par les yeux en même temps, et temps-multiplexé (*time-multiplexed*) lorsque les images gauches et droites sont rapidement alternées [9] (fréquence supérieure à 100 Hz).

1.2. Production de la 3D

Pour générer une image 3D, on doit créer deux images 2D de la même scène. Ces deux images 2D correspondent aux images que doit voir chacun de nos yeux. Si les deux images sont correctement générées, l'observateur de la scène 3D perçoit des objets de manière réaliste.

Figure 1.4. Plate-forme de caméras 3D avec miroir semi transparent

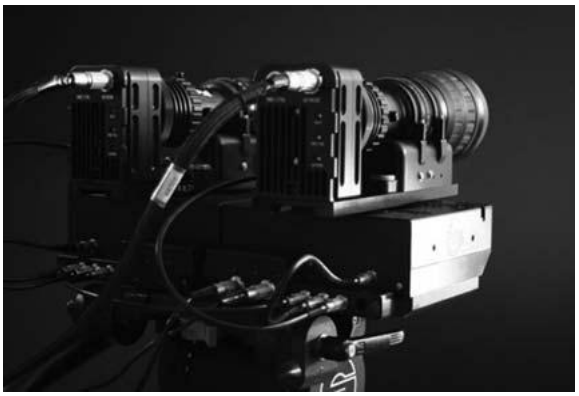


Figure 1.5. Plate-forme de caméras 3D parallèle

La méthode la plus commode et la plus simple pour produire des images 3D est l'utilisation de deux caméras. Chacune capture une image d'un œil. Les caméras sont placées sur des plates-formes spécifiques (Figure 1.4 et Figure 1.5) qui permettent certaines configurations de positionnement (distance interoculaire et convergence). Néanmoins, la configuration de deux caméras pour un fonctionnement simultané est très contraignante. Nous citons ci- dessous quelques difficultés liées à la préparation et à la configuration des caméras pour la 3D :

- correspondance des objectifs des deux caméras : tâche revenant aux constructeurs.
- zoom : utilisation devant être limitée car il y a un risque d'augmenter les disparités sur les images.
- correspondance de la mise au point (focus) **:** généralement contrôlée par la même commande pour les deux caméras.
- utilisation de miroirs semi-transparents (Figure 1.4) : très fragiles et collecteurs de poussière.

1.2.1. Configuration des caméras 3D

Un paramétrage 3D pour la génération d'images, consiste à déterminer la configuration des caméras permettant de visualiser la scène sous forme d'image 3D. Cette dernière est visualisée dans un espace limité physiquement par les bordures de l'écran. De plus, pour des raisons de confort, une autre limitation sur les profondeurs de cet espace de projection s'impose.

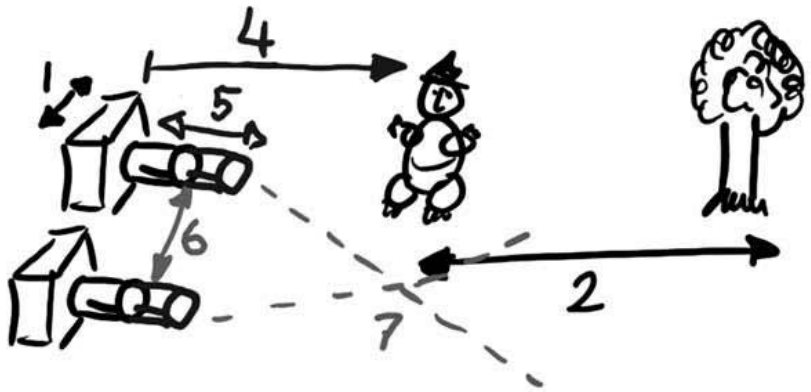


Figure 1.6. Paramètres de configuration de caméras 3D [6]

Cet espace définissant notre monde virtuel, se détermine par l'interaction d'un écran 2D et des yeux de l'observateur. Toutefois, il peut être transformé en utilisant des effets visuels très spécifiques. Cependant, pour produire de "bonnes" images 3D, plusieurs paramètres doivent être préalablement fixés avant la phase de la capture (Figure 1.6). Ces paramètres peuvent être classés en deux catégories. La première catégorie englobe les paramètres communs à la production des images en 2D tels que :

1. la résolution des caméras ;
2. la distance entre le premier plan et le fond d'écran ;
3. la taille de l'écran de rendu ;
4. la distance entre la caméra et le premier plan de la scène ;
5. la distance focale des caméras.

Quant à la deuxième catégorie, elle comporte les paramètres stéréoscopiques qui se résument en deux paramètres essentiels :

6. la distance interoculaire **:** distance horizontale entre les deux caméras. Ce paramètre est le plus influant sur la fatigue visuelle. Et sur la perception de la profondeur (Figure 1.7).
7. la convergence des caméras **:** angle formé entre les deux caméras (Figure 1.8).

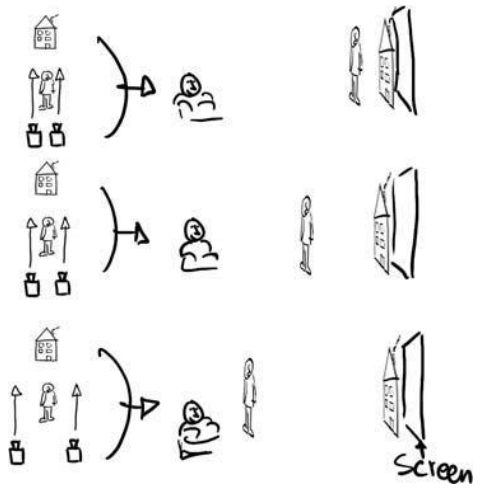


Figure 1.7. Effet de la distance interoculaire sur les profondeurs perçues dans une image 3D [6].

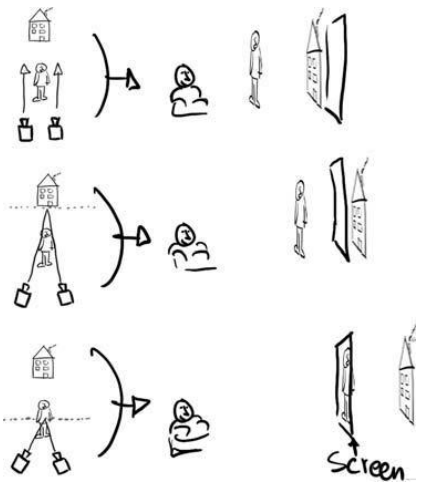


Figure 1.8. Effet de la distance interoculaire sur les profondeurs perçues dans une image 3D [6].

Ce sont ces deux derniers paramètres stéréoscopiques qui déterminent la qualité des images 3D que nous produirons.

1.2.2. Résultats espérés d'un bon paramétrage des caméras

Une configuration adéquate des différents paramètres cités ci-dessus doit permettre de produire des images 3D de qualité. La qualité d'une image est mesurable selon sa capacité d'exprimer la profondeur avec des exigences de confort [11]. Les paramètres visibles de l'image à prendre en compte (Figure 1.9) sont :

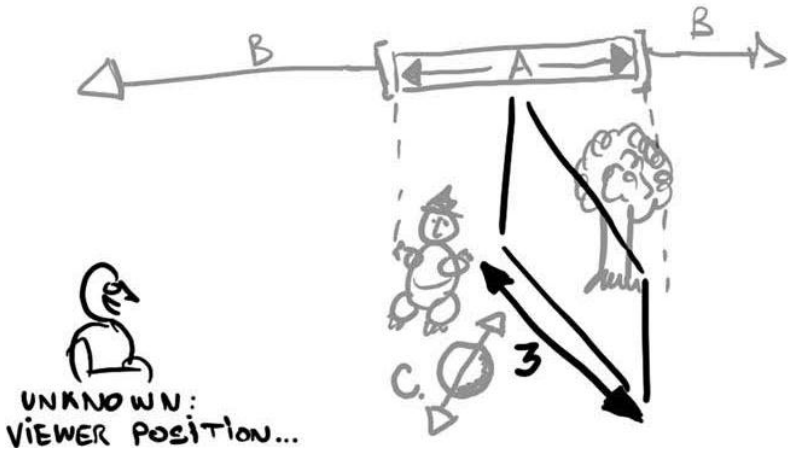


Figure 1.9. Paramètres à contrôler lors de la création d'images 3D [6] : A-intervalle de profondeurs ; B-positionnement ; C-rondeur;

- l'intervalle de profondeur : il doit être compris dans une région de confort ;
- le positionnement sur l'axe des profondeurs **:** éloignement minimal entre le spectateur et le premier plan de la scène ;
- la rondeur **:** ratio entre les profondeurs réelles et virtuelles. Une bonne stéréoscopie est celle qui assure une rondeur entre 0.7 et 1 dans des régions d'intérêt [8].

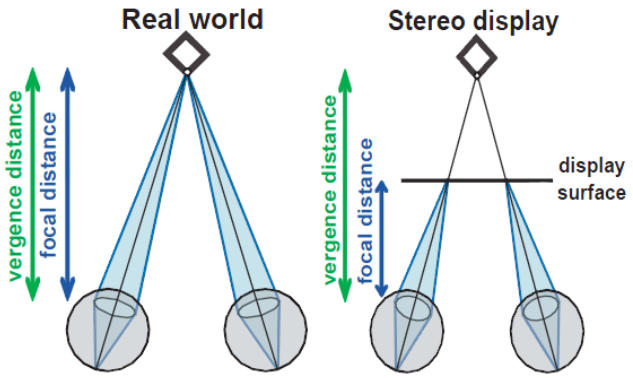


Figure 1.10. Conflit Vergence-accommodation [9]

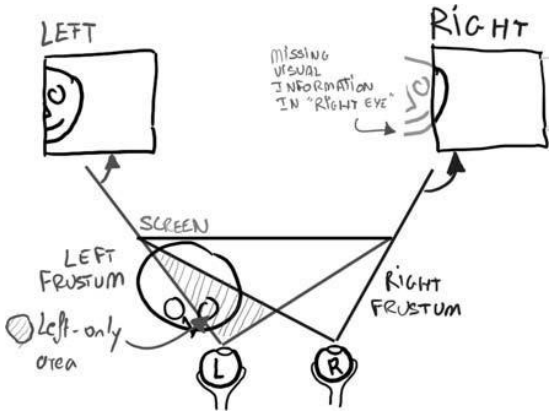


Figure 1.11. Fenêtre stéréoscopique [6]

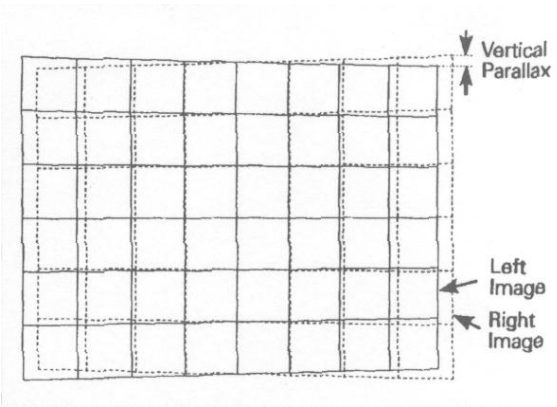


Figure 1.12. Parallaxe vertical engendrée par l'utilisation de caméras convergentes [12]

1.3. Causes de l'inconfort visuel en stéréoscopie

1.3.1. Disparité binoculaire excessive

Les disparités binoculaires excessives sont considérées, selon la plupart des chercheurs, comme étant la cause de fatigue binoculaire la plus importante [5,13,14]. C'est pourquoi, plusieurs recherches ont été effectuées pour la réduire. Nous résumons ci-dessous les principaux travaux et résultats sur ce type de cause d'inconfort.

1.3.2. Conflit vergence-accommodation

L'accommodation est le processus de concentration sur un objet particulier (Figure 1.10). Selon la profondeur à laquelle se trouve cet objet, les cristallins de dos deux yeux s'adaptent en s'épaississant ou en s'amincissant à des fins de mise au point. La profondeur est déterminée par le cerveau selon la convergence des yeux. Toutefois, la profondeur perçue des objets affichés sur un écran est différente de celle où il est affiché (sur écran). Les images apparaissent donc floues. Par conséquent, les cristallins effectuent des changements supplémentaires d'épaisseur afin d'y remédier. Plusieurs recherches ont été effectuées pour déterminer des limites de profondeur autour de l'écran minimisant ce conflit.

1.3.3. *Crosstalk*

C'est un problème beaucoup plus technologique, lié à la qualité des écrans stéréoscopiques. La diaphonie est la visibilité d'une partie de l'image gauche par l'œil droite ou vice-versa. Ce problème peut se produire différemment selon la technologie utilisée : en stéréoscopie temps-parallèle à cause de

l'inclinaison des verres polarisant, en stéréoscopie temps-multiplexé à cause de problèmes de synchronisation entre les écrans et les lunettes, et enfin en auto-stéréoscopie suite à un écart du point de vue principale.

1.3.4. Fenêtre stéréoscopique

Ce problème apparait lorsque les objets sont proches des bordures gauche et droite de l'écran et que celui-ci est uniquement visible par un seul œil à cause du phénomène d'occultation (Figure 1.11). Le spectateur aura donc l'impression de voir le monde à travers une fenêtre qui est l'écran. Le conflit se produit lorsque les objets sont perçus devant l'écran. En fait, la vergence détermine que l'objet est plus proche que l'écran, mais son occultation par l'écran dit le contraire.

1.3.5. Parallaxe vertical excessive

Principalement engendrée par l'utilisation de caméras convergentes, les disparités verticales (Figure 1.12) dépassant un certain seuil tolérable génèrent de sérieux problèmes de fusion. Cela engendre des maux de tête et des nausées pour l'observateur.

1.3.6. Aliasing

Dans [15], les auteurs ont supposé que l'aliasing est une cause inhérente de l'inconfort visuel. En utilisant un modèle géométrique de la perception de la profondeur, ils ont présenté une analyse fréquentielle de la perception des images 3D qui confirme leur hypothèse.

L'Aliasing est un artefact qui se crée par les disparités négatives dans une image stéréoscopique. Il est connu que la taille d'un objet perçu devant (disparité négative) ou derrière l'écran (disparité positive) est différente que celle qu'il occupe sur l'écran. Du coup, l'observateur ressent une différence de résolution entre différentes zones de l'image. L'augmentation de la résolution des objets sortant de l'écran crée le problème d'aliasing.

1.3.7. Autre

Il existe plusieurs autres causes d'inconfort liés à des problèmes technologiques, notamment l'alignement des caméras et le calibrage en luminosité et en couleur. Pour la création d'images stéréoscopiques du monde réel, effectuer ces deux tâches s'avère complexe. En revanche, pour des scènes de synthèse, ces problème ne se posent pas lors de la manipulation de caméras virtuelles.

1.4. Travail à effectuer

La recherche de compromis entre la qualité de la perception de la profondeur et le confort visuel reste encore un domaine de recherche à explorer. Dans notre travail, nous nous intéressons à l'aspect fatigue visuelle. Nous avons étudié plusieurs solutions de réduction de l'inconfort visuel issues de travaux récents que nous résumons dans le chapitre prochain. Nous avons tenté de les adapter et de proposer des améliorations pour des applications interactives contenant des scènes de synthèse. Plusieurs contributions ont été mises en œuvre, implémentées et testées sur un écran auto-stéréoscopique. Nous avons utilisé le langage GLSL qui permet d'implémenter des processus de rendu sur cartes graphiques.

Nous avons également effectué des tests pour valider certaines propositions existantes dans la littérature, notamment l'application de filtres anti aliasing sur des images 3D pour l'amélioration du rapport perception/inconfort . L'évaluation de ce dernier est effectuée à l'aide de tests subjectifs pour la perception de la profondeur, et des tests objectifs introduits précédemment pour évaluer l'inconfort visuel.

2. Etat de l'art sur l'inconfort visuel

Introduction

La création de contenus 3D stéréoscopiques reste encore un défi pour les chercheurs. Accentuer l'effet stéréoscopique pour donner de fortes sensations de la 3D était un atout pour immerger le spectateur dans des scènes 3D virtuelles. Néanmoins, bien que cette solution soit très efficace pour de courtes séquences, comme dans le cas de la pub OASIS [16], elle ne l'est pas pour des applications interactives de plus longues durées tels que les simulateurs, les jeux vidéo, etc. Ceci est dû à l'inconfort visuel.

Dans une première sous-section, nous classifierons les travaux qui tiennent compte de l'aspect confort visuel de l'utilisateur lors du rendu stéréoscopique. Ensuite, nous présenterons dans un deuxième sous-section des métriques servant à mesurer l'inconfort visuel en se basant sur les travaux les plus importants dans la littératures. Cela nous servira d'une quantification de l'inconfort visuel afin d'évaluer nos solutions.

2.1. Classification des méthodes existantes

Dans la plupart des travaux précédents, les auteurs essaient de trouver un compromis entre la perception de l'effet stéréoscopique et le confort visuel. Nous avons pu distinguer trois classes de solutions proposées.

2.1.1. Adaptation du scénario

La première classe de solution fonctionne selon un principe simple : déterminer les causes de l'inconfort et les éviter.

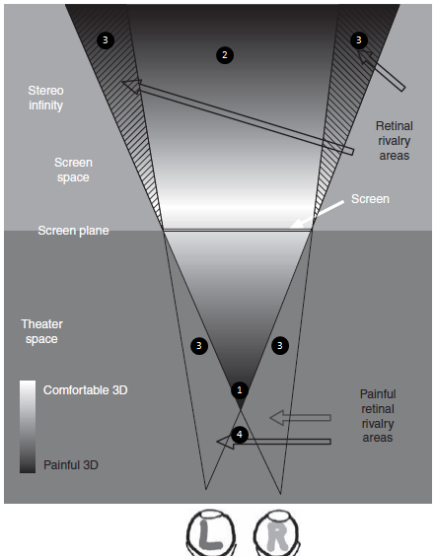


Figure 2-1. Zones de confort visuel [6] :1. Grandes disparité, 2. Conflit vergence-accommodation, 3. Fenêtres stéréoscopique, 4. Problème de fusion

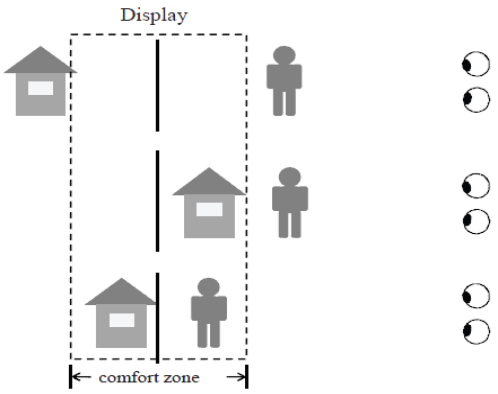


Figure 2-2. Ajustement des positions des objets en fonction des zones de confort.

Dans [8], l'auteur propose une carte qui représente la valeur de l'inconfort selon la position des objets dans l'espace 3D de l'observateur (Figure 2-1). Par conséquent, les différents objets de la scène devront être placés dans des zones de confort qui correspondent aux zones claires de la carte (Figure 2-2).

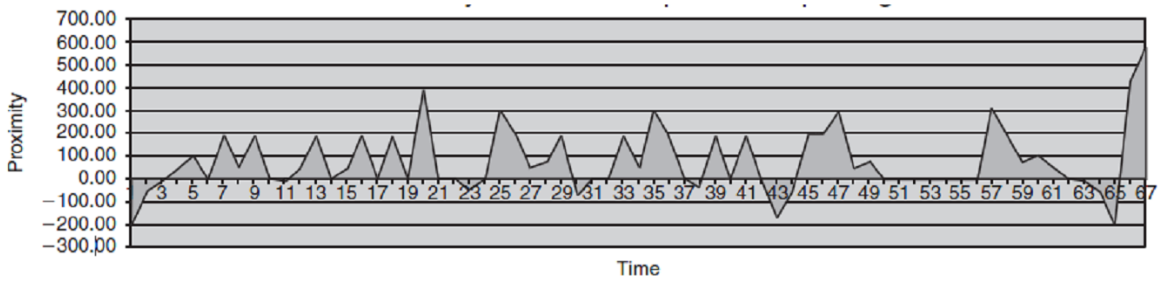


Figure 2-3. Evolution des profondeurs critiques des objets [11].

Contrairement à la solution de WOODS (8), qui agit sur la configuration spatiale des objets pour rester dans des zones de confort (Figure 2-2), SUGIHARA [11] autorise que certains objets débordent de ces zones de confort pour de courtes durées dans l'objectif de donner une forte sensation de la 3D. Par ailleurs, cette durée est suivie par des périodes de repos où l'effet stéréoscopique est négligeable ou inexistant (Figure 2-3).

Cette catégorie de solutions est très efficace dans le cinéma 3D. D'ailleurs, ces deux solutions sont largement exploitées jusqu'aujourd'hu1. Si l'on considère le film « Thor » par exemple, sur une durée de 1h54, il ne contient qu'environ 20 minutes de scènes stéréoscopiques apparentes. En plus, il est rare de voir des objets émergeant de l'écran et pénétrant dans la salle de cinéma (l'expérience a été réalisée à l'aide de 3 sujets âgés entre 23 et 26 ans ayant une parfaite vision).

Pour des applications interactives, la position des objets est souvent contrôlée par l'utilisateur. Il est donc difficile, voire impossible, de contrôler les scénario pour améliorer le confort visuel.

2.1.2. Déformation de l'espace objet

Graham et al. [12] supposent que la perception des profondeurs disparait à partir d'un certain seuil. Ils proposent de compresser les profondeurs de la scène réelle pour obtenir des profondeurs inclues dans un intervalle de confort prédéterminé (Figure 2-4). En supposant que ce dernier est connu, ils ont également établi une formule pour déterminer la meilleure distance interoculaire permettant de rester dans la zone de confort.

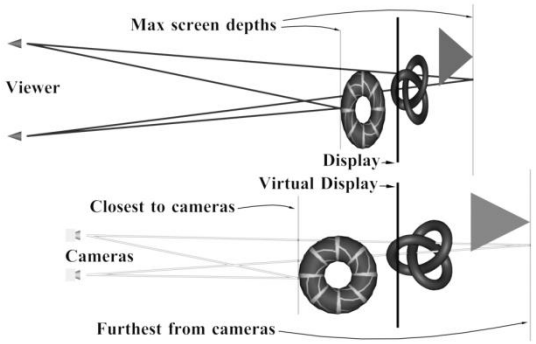


Figure 2-4. compression de la profondeur [12]

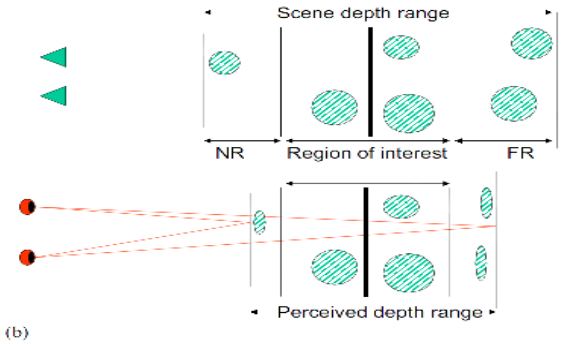


Figure 2-5. Technique des trois régions [2]

Holliman est encore allé plus loin dans la même direction que Graham. En plus de compresser les profondeurs dans un intervalle de profondeurs, dans son algorithme dit "de trois régions" [2], il propose de partitionner l'intervalle de profondeurs en trois régions d'intérêt ayant différents coefficients de compression (Figure 2-5). L'objectif est d'assurer une bonne perception de la

profondeur sur les objets centraux. L'auteur prétend que sa méthode est applicable à des scènes d'animation comme les jeux ou les applications réelles nécessitant une perception exacte de la profondeur dans le cas de certaines applications.

L'un des travaux les plus récents ayant le même objectif est celui de Lang et al. [14]. Ces auteurs proposent une solution logicielle, utilisant la technique "*image warping*". L'objectif est de permettre une adaptation automatique (linéaire ou non) des disparités, donc des profondeurs perçues. Cette solution peut être exploitée manuellement par un opérateur en postproduction ou intégrée directement dans les caméras pour fournir une assistance à la production. Deux inconvénients majeurs sont à constater : d'une part, l'automatisation de cette solution reste un défi parce qu'elle nécessite de correspondre point à point des deux images ; d'autre part, l'application de la technique "*image warping*" engendre des déformations très visibles pour l'observateur.

2.1.3. Adaptation de la prise de l'image

Seuntiëns et al. [17] ont étudié l'effet de la distance inter-caméras sur la perception de la profondeur, la netteté des images et la fatigue visuelle. Ils ont conclu que la fatigue visuelle est proportionnelle à la distance inter-caméras.

IJsselsteijn et al. [3] ont confirmé que l'utilisation de distances inter-caméras égales à la distance interoculaire humaine ne provoque aucune fatigue supplémentaire pour un observateur (mise à part celle provoquée par un conflit vergence-accommodation).

Stelmach et Tam [18] ont comparé l'effet de trois configurations de caméras (parallèle, convergente et images décalées) sur l'inconfort visuel. La configuration "images décalées" consiste en une capture parallèle suivie d'un décalage vertical par rapport à l'axe de vision de l'une des images. Ils ont conclu que les deux configurations "convergente" et "images parallèles" améliorent considérablement le confort visuel sans pour autant perdre significativement la perception de la profondeur. Ils ont justifié leur conclusion par le fait que les distances interoculaires générées par ces deux configurations sont réduites.

Figure 2-6. mise au point sur l'objet en fond d'écran. - William Klein, dans la foule – 1955-

Figure 2-7. mise au point sur l'objet en avant plan

Plus récemment, plusieurs chercheurs sont partis sur une nouvelle piste. Le flou dans des images stéréoscopique est envisagé comme solution. En s'appuyant sur l'hypothèse « l'œil fuit le flou » [19] (lorsque l'on regarde la Figure 2-6 on a tendance à se concentrer sur la foule en arrière, par contre, dans la Figure 2-7 on ne regarde que l'enfant en avant), Held et al. [20] proposent d'ajouter du flou sur les objets qui se situent dans des régions critiques par rapport à l'inconfort visuel (Figure 2-8 et Figure 2-9). Kim et al. dans [15] continuent dans le même sens et affine l'idée. Ils proposent un filtre anti-aliasing permettant de créer ce flou. Ce dernier espère remédier à deux causes d'inconfort : l'aliasing créé par les objets sortant de l'écran (voir **1.3.6. Aliasing**) et le conflit convergence/accommodation.

Figure 2-8. Ajout d'un flou artificiel pour forcer l'observateur à se concentrer sur une région particulière de l'image [15]

Figure 2-9. Flou généré automatiquement par réglage des lentilles d'une caméra conventionnelle

Par contre, certains chercheurs travaillant sur des images planaires, pensent que le flou engendre une fatigue supplémentaire. Le cerveau force les cristallins des yeux à faire le point sur les objets flous. Naturellement, l'œil n'arrivera pas à réaliser cette tâche. Les muscles de l'œil continuent à forcer les cristallins à s'agrandir et à se rétrécir, ce qui causera des nausées à l'observateur.

2.2. Mesure de l'inconfort

2.2.1. Mesures subjectives

La réalisation de tests de performance des solutions proposées pour diminuer l'inconfort visuel est très complexe. Généralement, les tests sont effectués d'une façon subjective en faisant appel à plusieurs sujets de test. Ces derniers sont exposés à différentes séquences d'images 3D stéréoscopiques puis sont appelés à remplir des formulaires contenant des questions du genre : "sur quelle image l'objet est plus profond ?", "avez-vous mal à la tête ?", etc. Toutefois, la perception de la 3D diffère d'une personne à l'autre, et l'état physique des personnes sollicitées influe sur leurs réponses. Afin de pouvoir valider une hypothèse, il faudrait prévoir un échantillon de nombreux individus. Ce qui risque de coûter assez cher.

Les difficultés statistiques et économiques ne sont pas les seuls obstacles pour l'expérimentation. En fait, dans certains pays, notamment, la France, ce genre d'expérience faisant appel au facteur humain est très réglementé par la lo1. Il nécessite de lourds dossiers administratifs ainsi que la présence d'une équipe médicale.

La mesure subjectif de l'inconfort reste le meilleur moyen pour évaluer les techniques de réduction de la fatigue. Le choix des individus ainsi que des procédures d'expérimentation n'est pas aussi simple à réaliser. Plusieurs travaux proposent des protocoles d'expérimentation et d'analyse [11] et [1].

2.2.2. Mesures objectives

Certains chercheurs ont tenté de construire des métriques permettant de réaliser des tests d'une façon objective, rapide et pas coûteuse. Jaeseob et al. [5] ont défini une formulation d'une métrique

objective pour l'évaluation de la fatigue visuelle. Sur plusieurs expériences, ils ont pu assurer une forte corrélation avec les résultats des tests subjectifs.

Selon [5], la fatigue visuelle $\boldsymbol{F}$ peut être exprimée en fonction de quatre facteurs qui sont : la complexité spatiale, la profondeur des objets, la complexité temporelle et les mouvements de la scène. Le tableau 2-1 explique la signification de chacun de ces paramètres. La colonne centrale contient la liste des facteurs intervenant pour causer l'inconfort. Dans la colonne de gauche, nous trouvons des états qui augmentent les valeurs de ces facteurs donc cause la fatigue. Par contre, le contraire est vrai pour la colonne de droite.

La fatigue F est calculée selon la formule :

$$F = \alpha\, C_{spac} + \beta\, A_{spac} + \gamma\, C_{tmp} + \delta\, A_{tmp} \qquad (1)$$

fatigue	**<----------> **	**Confort**
plusieurs objets	**complexité spatiale (C_{spac})**	peu d'objets
hors la zone de confort	**profondeur des objets (A_{spac})**	zone de confort
scène dynamique	**complexité temporelle (C_{tmp})**	scène statique
grandes vitesses	**mouvements de la scène (A_{tmp})**	vitesses réduites

Tableau 2-1. Influence des différents facteurs de la scène sur la fatigue visuelle

Dans leur papier, les auteurs ont détaillé les calculs des différents facteurs à partir des séquences stéréoscopiques. Cette métrique est l'une parmi plusieurs autres. Une autre métrique a été proposée dans [21]. Nous avons choisi d'utiliser la métrique de [5] pour notre travail parce que nous avons jugé que les tests de validation proposés par les auteurs sont plus élaborés.

Conclusion

Dans cette section, nous avons commencé par classifié, présenté et discuté les différents travaux portant sur l'amélioration du confort visuel durant une expériences stéréoscopique. Nous avons déterminé trois classes de solution : des méthodes qui visent à adapter le scénario pour ne pas causer un inconfort ; d'autres tentent de déformer l'espace en diminuant les disparités perçues donc la profondeur et enfin, des méthodes modifiants l'image planaire pour aiguiller l'accommodation de l'observateur.

Ensuite, nous avons soulevé le problème de l'expérimentation pour ce genre de travaux. La fatigue, étant un facteur subjectif, est difficile à mesurer. Nous avons brièvement évoqué les mesures subjectives, puis, nous avons présenté certains travaux qui proposent des métriques objectives pour la mesure (ou l'estimation) de cette entité subjective : la fatigue.

Le section suivante contiendra nos contributions et améliorations de l'un des algorithmes que nous avons cités lors de la classification des algorithmes existants. L'algorithme des trois régions de Holliman [2] sera détaillé et modifié.

3. Contributions

Introduction

Nous avons cité dans la section précédente plusieurs travaux visant à améliorer le confort visuel. La plupart de ces derniers sont réalisés pour des images stéréoscopiques du monde réel, et ne sont pas souvent adaptés pour des applications interactives avec des scènes de synthèse.

Dans cette section, nous présentons les améliorations que nous avons apportées à l'algorithme des trois régions. La première amélioration consiste à une compression progressive de la profondeur. Tandis que la deuxième est une méthode pour l'appliquer sur des maillages de basse résolution. La dernière est une proposition pour le calcul de l'éclairage. Nous terminons le chapitre sur une discussion de la méthode d'ajout de filtres anti-aliasing.

3.1. Première amélioration : compression progressive de la profondeur

L'une des idée les plus attirantes pour la diminution de l'inconfort est la méthode des trois régions de Holliman [2]. Holliman sépare l'espace de la scène en trois régions. La première région est celle se situant dans une zone de confort pour l'observateur. Les deux autres sont celles devant et derrière la première. Les objets de ces deux régions subissent une compression selon un axe de profondeur afin de réduire leurs impacts sur l'inconfort de l'observateur (Figure 2-5). Toutefois, avant de rendre un objet de la scène, on détermine d'abord à quelle région il appartient. Pour des images du monde réel l'information de la profondeur (ou de région) d'un point est donnée par sa disparité. Le calcul de la disparité nécessite de mettre en correspondance les points des images gauche et droite, ce qui s'avère complexe. La compression de la profondeur consiste en l'application d'une déformation horizontale de l'image [14] (*image warping*).

Par contre, l'application de l'algorithme des trois régions s'avère plus simple pour des scènes de synthèse. La profondeur est une information très facile à obtenir si l'on connait les coordonnées spatiales de ce point ainsi que la configuration de caméras. Chaque objet de la scène est transformé grâce à une matrice de transformation/visualisation afin de calculer ses projections sur les différentes images planes constituant l'image 3D. A chaque caméra virtuelle, nous associons trois matrices de transformation/visualisation, chacune correspondant à l'une des régions définies par Holiman.

Le calcul de $M_1, M_2\ et\ M_3$, les trois matrices de transformation/visualisation correspondantes aux régions $R_1, R_2\ et\ R_3$, n'est pas compliqué. M_1 s'obtient directement de la matrice de transformation/visualisation par défaut du système du rendu (dans le cas d'OpenGL : c'est glModelViewMatrix). Tandis que $M_2\ et\ M_3$ s'obtiennent en appliquant 3 opérations basiques sur M_1.

$$M_i = T_i^{-1}\, C_i\, T_i\, M_1$$

T_i : translation pour ramener la frontière de la région i à l'origine du repère.
C_i : mise à l'échelle selon l'axe z.

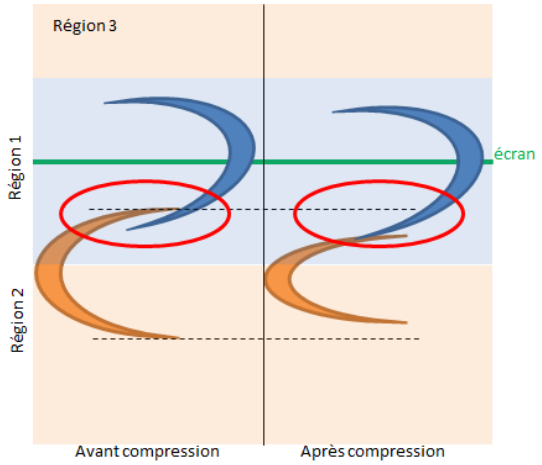


Figure 3-1. Objet situé dans la frontière entre deux régions est compressé : problème de changement d'ordre dans la région entourée en rouge.

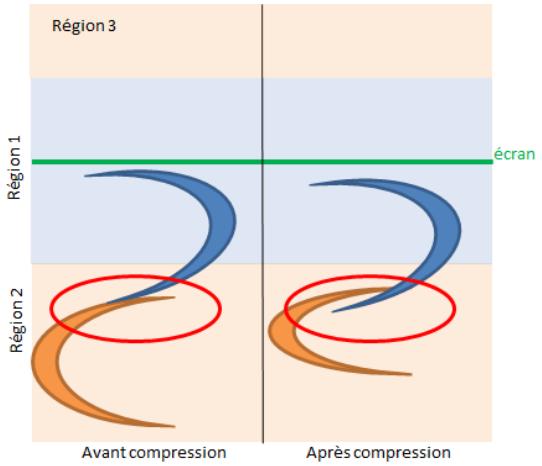


Figure 3-2. Objet situé dans la frontière entre deux régions n'est pas compressé : problème de changement d'ordre dans la région entourée en rouge.

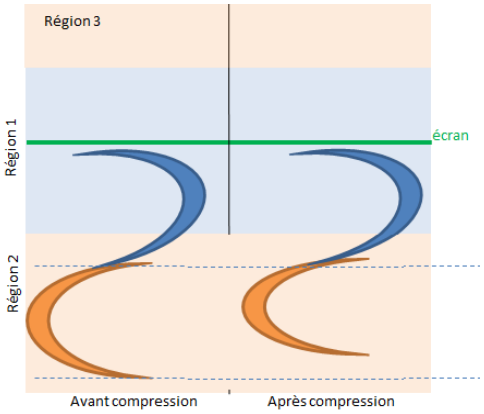


Figure 3-3. Traitement chaque point de l'objet séparément : pas de problème de changement d'ordre.

Les objets qui se situent sur la frontière entre deux régions peuvent causer de sérieux problèmes de perception. Les figures 3.1 et 3.2 nous montrent deux cas de figure pour l'affectation des objets. Néanmoins, dans un processus de rendu, on manipule principalement des sommets. Si l'on traite chacun des sommets définissant un objet séparément (figure 3.3), l'effet présenté sur les figures précédentes sera éliminé. Mais, un nouveau problème de perception s'impose vu que certaines parties d'un même objet ne seront pas traitées de la même manière.

Lorsque les objets ont des formes géométriques simples et connues, nous apercevons un changement d'allure au moment du passage d'une région à l'autre. Cela réduit considérablement la qualité des images perçues. Pour y remédier, nous nous sommes inspirés de l'algorithme des trois régions de Holiman pour proposer ci-après notre solution.

3.1.1. Principe de notre solution

Notre idée consiste à cacher cette effet de compression pour l'observateur. Ce dernier ne doit pas remarquer une discontinuité dans la forme des objets. Pour cela, nous appliquons des compressions continues et progressives de l'objet. Le facteur de compression, défini dans la méthode des trois régions par trois scalaires correspondants chacun à l'une des régions, sera désormais définis par une fonction continue prenant des valeurs comprises entre 1 (pas de compression) et *Cmax,* une valeur positive comprise entre 0 et 1. *Cmax* correspondra à un facteur de compression maximale comme l'indique la figure 3.4.

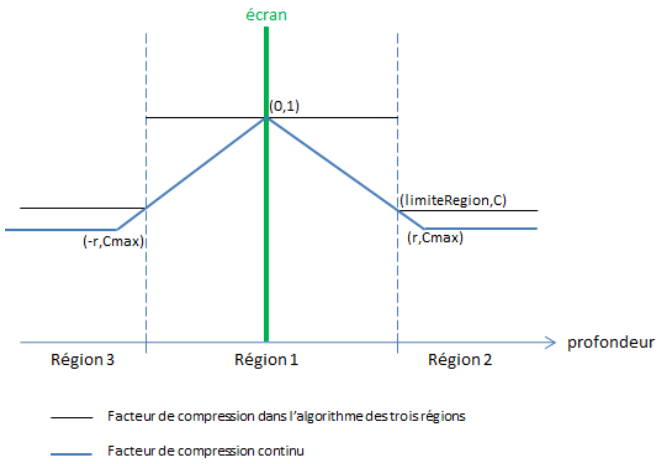


Figure 3-4. facteurs de compression en fonction de la profondeur

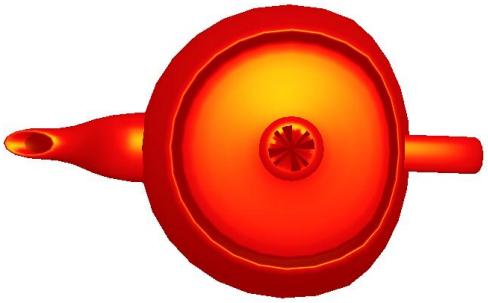


Figure 3-5. une théière déformée par l'algorithme des trois régions (vue de dessus)

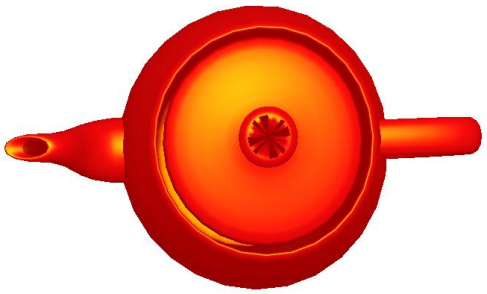


Figure 3-6. une théière déformée par notre algorithme (vue de dessus)

Les figures 3.5 et 3.6 montrent la différence de la perception des géométries simples en appliquant les deux méthodes. Il est claire qu'il est difficile de détecter une compression sur les objets compressés selon un facteur progressif sans se référer aux formes originales. Les parties gauches des deux théières ne sont pratiquement pas déformées. En revanche, les parties droites sont compressées par les deux algorithmes pour avoir les mêmes profondeurs finales. A l'œil nu, la figure 3.6 apparait non déformée. Contrairement à l'autre, ou nous pouvons facilement détecter la frontières entre les régions. C'est uniquement après avoir regardé les figures 6 et 7 que l'on se rend compte de cet effet.

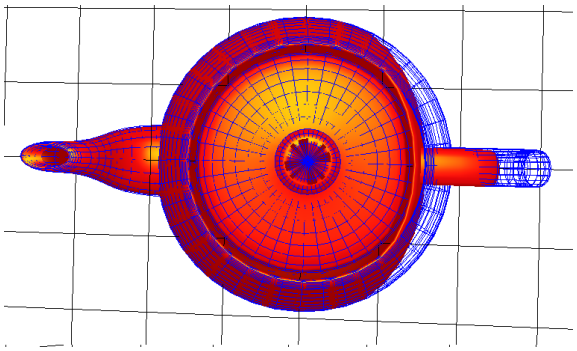


Figure 3-7. Théière déformée par l'algorithme des trois régions + maillage original (vue de dessus). En rouge, l'objet compressé par l'algorithme des trois régions. En bleu, maillage original de l'objet.

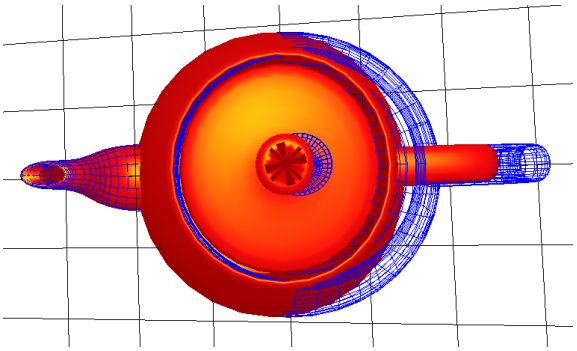


Figure 3-8. Théière déformée par notre algorithme+ maillage original (vue de dessus). En rouge, l'objet compressé progressivement par notre solution. En bleu, maillage original de l'objet.

3.1.2. Mise œuvre

Contrairement à la méthode des trois régions, l'implémentation de notre proposition nécessite l'accès au pipeline graphique. Enumérer toutes les matrices de transformation/visualisation n'est pas envisageable dans un cas continu. Avant d'entamer le détail de la mise en œuvre, commençons d'abord par donner un bref aperçu du pipeline graphique et les possibilités offertes par son architecture (figure 3.9).

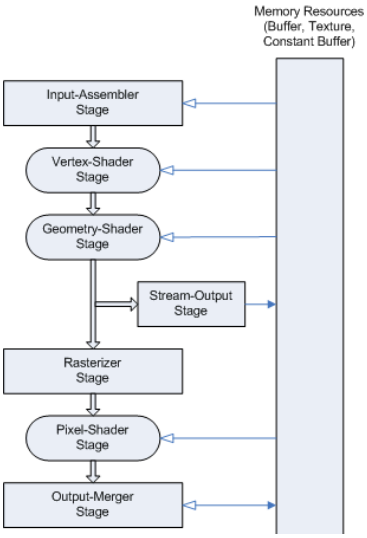


Figure 3-9. Architecture du pipeline graphique

Les cartes graphiques de nos jours permettent aux développeurs de programmer certaines parties du pipeline graphique. A savoir, le *vertex shader*, le *fragment shader* et parfois le *geometry shader*. Pour notre première contribution, nous n'aurons besoin d'intervenir qu'au niveau du *vertex shader* pour réaliser la compression de la profondeur. Pour créer l'effet de la compression progressive de la profondeur, nous mettons à jour les valeurs de la coordonnée de profondeur des points dans le repère des caméras.

Soit :

$M(4 \times 4)$: la matrice de transformation/visualisation manipulée par défaut.

$P(4 \times 4)$: une matrice de projection homogène

$v\ (x, y, z, w)$: un sommet de la scène. x, y, z, w : sont les coordonnées homogènes de ce sommet dans le repère de la scène.

Pour calculer les coordonnées de la projection d'un sommet *v* sur l'écran, nous devant d'abord le ramener au repère de la caméra. Les coordonnées $v'(x', y', z', w')$ du sommet *v* exprimées dans le repère de la caméra sont obtenues par la relation :

$$v' = v \times M$$

Une fois les coordonnées exprimé dans le repère de la caméra, l'application de la projection se réduit à une simple multiplication par la matrice de projection.

$$v'' = v' \times P$$

Rappelons que les matrice M (resp. P) résument l'ensemble de transformations géométriques appliquées aux objets et à la caméra (resp. paramètres de projection). Pour plus de détails, se référer à [22].

Lorsque les coordonnées d'un sommets sont exprimées dans le repère de la caméra, la coordonnée *z'* correspond à la profondeur de l'objet par rapport à la caméra. En sachant en plus que les caméras utilisées pour une prise de vue stéréoscopique sont uniquement décalées par rapport à l'axe des abscisses et placées selon une configuration parallèle ; la valeur de la profondeur z_i' exprimée dans le repère de la caméra *i* d'un sommet reste invariante d'un repère lié à une caméra à l'autre.

Mise à jour de la valeur de la profondeur

Dans ce paragraphe nous déterminons la fonction *T* qui donne la nouvelle profondeur comprimée $\hat{z}$ en fonction de la profondeur initiale. Toutefois, pour simplifier les formules, nous effectuerons d'abord une translation du repère de la caméra selon l'axe des profondeurs pour ramener l'origine des profondeurs au niveau de l'écran. Après la transformation, nous effectuerons la transformation inverse pour permettre de continuer le processus d'affichage sur le pipeline.

La translation se résume à une addition d'un vecteur t(0, 0, -*DE*), tel que *DE* est la distance entre l'observateur et l'écran stéréoscopique sur lequel la scène est sensée s'afficher. Désormais, nous appelons $\tilde{z}$ la profondeur du sommet exprimée dans le repère ayant l'écran comme origine des profondeurs.

$$\tilde{z} = z' - DE$$

Chaque partie élémentaire de l'espace ayant une épaisseur $d\tilde{z}$ sera comprimée d'une valeur $f(\tilde{z})$. Ce qui fait que l'épaisseur finale de cet élément d'espace sera donnée par $f(\tilde{z})\, d\tilde{z}$. La fonction *T* qui nous donnera la nouvelle profondeur d'un point ayant une profondeur initiale égale à z est la suivante :

$$T(\tilde{z}) = \int_0^{\tilde{z}} f(z)\, dz$$

Finalement, pour revenir au repère de la caméra nous effectuerons la translation inverse de celle effectuée ci-dessus. Cela nous donne :

$$\hat{z} = T(\tilde{z}) + DE = \int_0^{\tilde{z}} f(z)\, dz + DE$$

Pour notre implémentation, nous avons considéré la fonction $f(z)$ comme une fonction linéaire sur des intervalle. Nous n'avons pas jugé nécessaire de considérer des fonctions plus complexes (ex. en cloches) puisque le résultat que nous avons obtenu était satisfaisant.

$$f\,(z) = \begin{cases} 1 - az, si\ z\ \in [0, Lmax] \\ 1 + bz, si\ z\ \in [-Lmin, 0[\\ C_0\ , sinon \end{cases}$$

Avec : *a, b, Lmax, Lmin* : sont des constantes positives, et $C_0 \in]0,1[$.

3.2. Deuxième amélioration : méthode liée aux maillages à grandes disparités de résolution

3.2.1. Définition

Jusqu'à maintenant, nous n'avons manipulé que les sommets définissant la scène. Pour un point de vue éloigné, l'algorithme a l'air de bien fonctionner. Toutefois, pour des points de vue proches, des artefacts peuvent apparaitre dans certains cas. Tel qu'expliqué ci-après. Les surfaces constituant les objets sont définies par contours composés de sommets. Prenons l'exemple de la primitive géométrique la plus basique : le segment. Il est défini par deux sommets aux extrémités. Le rendu de ce segment s'effectue à l'aide d'un processus de rastérisation (OpenGL) qui interpole les points entre les deux extrémités projetées de ce segment (figure 3.10). Le résultat est un segment de droite affiché sur l'écran. Par conséquent, les pixels appartenant à ce segment projeté ont subi le même facteur de compression. Ce qui est en contradiction avec le principe de compression progressive. Ce problème apparait dans le cas de maillages contenant des triangles de grande taille. Par contre, il est difficilement perceptible dans le cas de maillage dense où les triangles le composant sont de petite taille (figure 3.11).

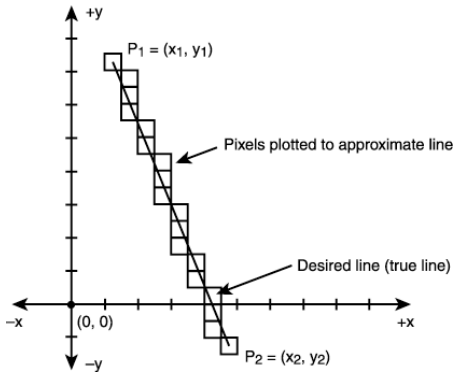


Figure 3-10. rastérisation d'une ligne [23]

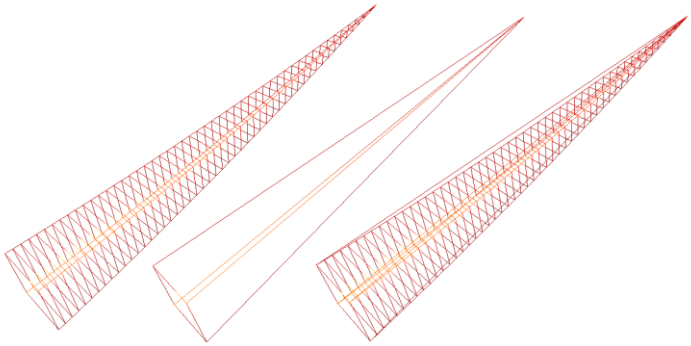


Figure 3-11. effet de la compression progressive de la profondeur sur différentes résolutions de maillages (vue de gauche). A gauche, rendu d'un maillage à grande résolution. au milieu, rendu du même objet avec un maillage de basse résolution. A droite, les deux maillages affichés ensembles. Nous remarquons que le maillage de basse résolution ne suit pas correctement la déformation progressive de l'espace. Chaque point du maillage est compressé de la même manière.

3.2.2. Solution proposée

Comme mentionné ci-dessus, c'est bien le processus de rastérisation qui cause ce phénomène lié aux facette de grande taille. Malheureusement, l'intervention au niveau de ce processus sur le pipeline graphique reste encore très limitée, voir infaisable. Pour cela, nous agissons au niveau du « géometry shader ». ce dernier permet de définir de nouvelles primitives de rendu, ou de modifier les existantes (ex. lignes, triangles, quadrilatérales, etc.).

L'idée est la suivante : Soit deux sommets a et b définissant un segment de droite ab. Si $||ab||$ est inférieure à un certain seuil s, le rendu du segment de droite est effectué. Sinon, nous ajoutons suffisamment de sommets intermédiaires c_i entre a et b afin que les segments constitués de deux sommets successifs ait une langueur inférieure au seuil s.

3.3. Troisième amélioration : nouveau calcul de l'éclairage

Rappelons que l'objectif principale de nos améliorations est la diminution de l'inconfort visuel tout en gardant une bonne perception des formes des objets ainsi que de leurs profondeurs. L'ombrage est l'un des indicateurs principaux de profondeur. Il permet de décerner assez clairement les formes spatiales des objets. Toutefois, après compression de la profondeur, ces formes spatiales risquent de paraitre déformées pour un observateur bien concentré.

Pour tromper l'œil de l'utilisateur, nous proposons la méthode suivante : les rayons lumineux sont sensés se déplacer suivant des trajectoires rectilignes. Ces dernières doivent, comme les segments de droites définissant les contours des objets, subir une déformation due à la compression de la profondeur. Les positions des sources lumineuses sont également sujet un changement de position. En pratique, il n'est pas toujours simple de mettre en œuvre un modèle d'illumination prenons en compte cette déformation. Nous nous sommes donc intéressés à simuler ce phénomène sans pour autant avoir recours à des modèles complexes d'illumination. En effet, dans un processus de rendu conventionnel, le calcul de la luminance en un point de l'objet est fonction de sa position dans l'espace. Pour simuler l'effet expliqué dans le paragraphe précédent, nous utilisons le modèle classique d'illumination. Mais à la place d'utiliser les positions finales des sommets (après compression) pour le calcul d'éclairage, nous utilisons les positions avant compression. En résumé, le calcul d'éclairage s'effectue avant compression. Ensuite la compression est effectuée sur des sommets dont l'éclairage a été déjà calculé.

3.4. Ajout d'un filtre anti aliasing

Comme nous l'avons cité dans la section 1, l'aliasing est un artefact causé par les objets sortant de l'écran. Il engendre un inconfort visuel supplémentaire [15]. L'expérimentation des filtres anti-aliasing est en cours. Nous souhaitons établir des expériences pour tester l'efficacité de ces filtres sur des scènes de synthèses. Nous comparerons également l'efficacité de différents filtres anti-aliasing pour la réduction de la fatigue.

3.5. Conclusion

Nous avons présenté dans cette section les différentes contributions que nous avons proposées pour diminuer l'inconfort visuel causé par des images stéréoscopiques. La première contribution est une amélioration de l'algorithme des 3 régions par une compression progressive de la profondeur. Nous avons également décrit la phase d'implémentation qui a été réalisée sur cartes graphiques. Puis, nous avons proposé une solution à un artefact produit par les maillages de basse résolution. La troisième contribution concerne l'éclairage qui est un indicateur important de la profondeur [6]. l'éclairage calculé ne dépend pas de la compression de profondeurs appliquée aux objets. Chaque point d' un objet est éclairé comme s'il n'a pas subi de compression. Finalement, nous avons intégré des filtres anti-aliasing dans le processus de rendu.

Dans la section suivante, nous présentons la partie expérimentale que nous avons effectuée afin de valider les amélioration que nous avons apporté et qui ont été décrites dans cette section.

4. Résultats et discussions

Introduction

Dans cette section nous testons les différentes contributions que nous avons proposées en section 3. Nous commençons dans une première sous-section par présenter les différents tests que nous avons élaborés. Six tests sont réalisés répartis en quatre classes. Chacune correspond à l'une des améliorations que nous avons présentées dans la sections précédente. Ensuite, une sous-section résultat contiendra les résultats des tests qui ont été déjà effectués. Certains résultats ne sont pas encore disponibles. Notamment la partie concernant les filtres anti-aliasing. Les résultats seront disponibles en annexes une fois générés.

4.1. Expérimentation

Nous avons prévu deux types de test : objectifs et subjectifs. Pour la mesure de la fatigue visuelle, nous n'effectuerons que des tests objectifs pour les raisons citées en sous-section 2.2.2. Nous utiliserons la formule (1) que nous avons annoncée dans à la fin de la section 2. Afin d'évaluer l'inconfort visuel. Des tests subjectifs seront effectués pour évaluer la qualité et la perception des images stéréoscopiques réalisées.

4.1.1. Compression progressive de la profondeur

Test 1 : inconfort visuel

Objectif

Ce test est un test objectif qui a pour objectif de tester si la compression de la profondeur améliore ou pas le confort visuel.

Expérimentation

Le premier test consiste à se balader dans un environnement virtuel et de calculer à chaque instant les quatre paramètres de l'équation (1) causant l'inconfort visuel. Il suffit ensuite de comparer les résultats du même scénario avant et après l'application de la compression progressive de la profondeur. L'environnement virtuel supposé est constitué de 3 objets simples : une théière, une sphère et un cône. La conclusion de ce test est évidente puisque l'on sait que dans les conditions de l'expérience, la seule différence entre les deux environnements est la profondeur perçue. Toutefois, les résultats numériques de comparaisons sont plus parlants.

Test 2 : perception de la profondeurs

Objectif

Ce test est un test subjectif. L'objectif espéré est de savoir l'effet de la compression progressive de la profondeur sur la perception de la profondeur.

Expérimentation

Pour tester si la compression que nous avons réalisée n'altère pas considérablement la perception de la profondeur ainsi que les formes 3D des objets, nous avons fait appel à des sujets pour

nous donner leurs avis. Le test consiste à présenter aux observateurs des stimuli, avec ou sans compression, sur un fond blanc très éloigné. Les observateurs ne savent pas a priori si les stimuli sont compressés ou pas. Selon leurs impressions, ils choisissent l'une des mentions : très sortant, sortant, sur l'écran ou derrière l'écran. Les stimuli utilisés pour les tests sont des objets simples : une théière, une sphère et une pyramide. Chaque objet est rendu individuellement selon des conditions adéquates d'éclairage. Les objets peuvent être texturés ou rendus avec une couleur unie.

Nous avons fait appel à 5 sujets, dont 3 sont de sexe masculin, âgés entre 22 et 26 ans. Les sujets prétendent avoir une excellente vision et n'utilisent aucune correction de vision. Le test dure 5 seconde par stimuli et chaque sujet est sensé voir tous les stimuli au nombre de 12 à différentes positions. Une durés importante sépare deux tests successifs pour ne pas permettre aux sujets d'être influencés par les stimuli déjà observés. L'ordre de passage des objets est aléatoire.

Test 3 : test de déformation de formes géométriques classiques

Objectif

Comme le précédent, ce test est un test subjectif. A travers ce test nous souhaitons savoir si les objets géométriques simples sont perçus correctement ou non.

Expérimentation

Ce test consiste à montrer à des sujets un ensemble d'images contenant des formes géométriques simples déformées. Ces derniers donnent leurs évaluations sur la finesse des objets. Nous effectuerons les tests sur les deux types d'image : conventionnelles et stéréoscopiques. Le test est effectué sur deux expériences.

Dans la première expérience, chacune des images comporte un seul objet simple. Cet objet peut être rendu sans déformation, avec déformation par l'algorithme des trois régions d'Holliman ou avec déformation par notre solution (Figure 4-1). Tous les objets déformés sont situés à la même profondeur qui correspond dans l'algorithme des trois régions à la frontière entre deux régions. Les sujets doivent signaler les anomalies qu'ils constatent sur les images.

Par contre, les images présentées aux observateurs dans la deuxième expérience contiennent un ensemble de lignes droites orientées aléatoirement dans l'espace (Figure 4-2). Toutes les lignes sont déformées par notre solution sauf une, ou bien le contraire. Les sujets doivent détecter les lignes qui n'apparaissent pas droites.

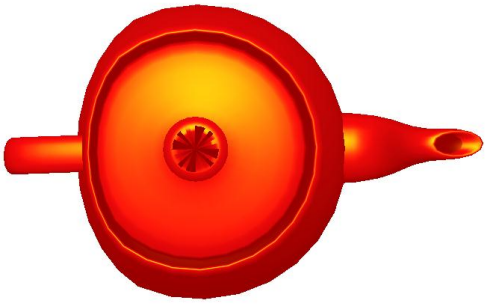


Figure 4-1. Exemple d'un objet déformé par l'algorithme de Holliman

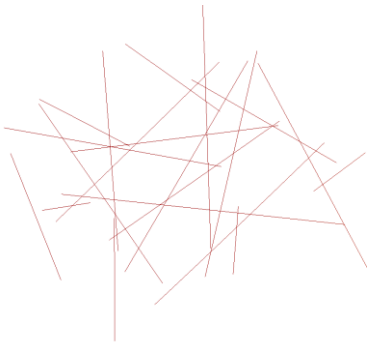


Figure 4-2. Exemple d'une scène composé de lignes aléatoires déformées

4.1.3. Amélioration de la perception de la profondeur en adaptant l'éclairage

Test 4 : test sur la perception de la profondeur avec adaptation d'éclairage

Objectif

A travers ce test, nous souhaitons déterminer l'effet de notre modèle d'éclairage sur la perception de la profondeur pour des images stéréoscopiques. Ce test est un test subjectif.

Expérimentation

Cette expérience consiste à présenter à des sujets des images stéréoscopiques contenant deux objets identiques, situés à la même profondeur, mais éclairés différemment. Les sujets ne sont pas informés de la nature de la différence entre les deux objets. Nous leurs demandons de répondre à la question : « lequel des deux objets est le plus proche ? ».

Les objets visualisés dans cette expérience ont tous subit une compression progressive de la profondeur tel que nous l'avions implémentée. Ils se trouvent sur le plan avant délimitant la zone de confort définie par Mendiburu [6].

4.1.4. Ajout d'un filtre anti aliasing

Les tests que nous présentons dans cette sous- section ne sont pas encore effectués. Nous avons prévu de les réaliser durant le mois restant de la durée de stage. Nous les citons juste à titre d'information. Les résultats seront discutés dans une Annexe qui sera fournie plus tard.

Test 5 : effet du flou (l'œil fuit-il le flou ?)

Objectif

L'objectif de ce test est de vérifier si, effectivement, le flou dans des images stéréoscopiques améliore le confort visuel ou pas. Pour être plus précis, nous testons l'hypothèse faite dans [19] , à savoir « l'œil fuit le flou ».

Expérimentation

Ce test consiste à présenter à des sujets des images contenant un ensemble de mots avec différents niveaux de flou pendant une très courte durée. Ces derniers doivent ensuite nous donner la listes de mots qu'ils ont su lire. Si les mots lus par les sujets se trouvent souvent dans des zones non floutées, nous pourrons confirmer l'hypothèse.

Pour construire les images de test, nous utiliserons des maillages de terrains accidentés (Figure 4-3) vus de dessus. Ces terrains seront texturés par des images contenant des mots aléatoirement répartis et de taille uniforme (Figure 4-4). Les mots sur la texture sont repérés par leurs coordonnées. Nous pourrons donc savoir la profondeur dans laquelle se trouve chacun. Ensuite, nous appliquons un filtre gaussien dans chaque point de l'image perçue en fonction de la profondeur de chacun de ces mots. Moins un point de l'image est profond, plus grande est la taille du filtre, et par conséquent l'image en ce point est plus floue.

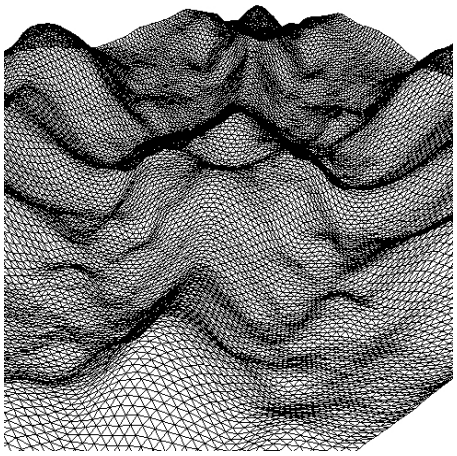


Figure 4-3. maillage de terrains.

Figure 4-4. exemple de texture à utiliser pour le maillage de terrain.

A la fin du test nous calculons les taux de mots observés en fonction de la taille du filtre appliqué sur la région de l'image contenant le mot. Si l'hypothèse qu'on veut tester est vraie, nous devrons constater que le taux de lecture des mots est inversement proportionnel à la taille du filtre correspondant.

Test 6 : ajout d'un filtre anti-aliasing

Objectif

L'objectif de ce test est de déterminer si l'ajout d'un filtre anti-aliasing permet de réduire l'inconfort visuel. Un test objectif par la formule (1) n'est pas concluant puisque tous les paramètres du calcul de la fatigue visuel de la formule restent invariants avant ou après l'application de filtre. c'est pour cette raison que nous serons amenés à mettre en place un autre test subjectif.

Expérimentation

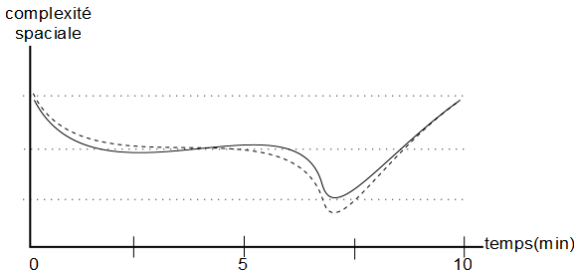
Deux textes de mêmes caractéristiques (longueur, clarté, complexité, taille et type de police, …) seront affichés sur un écran stéréoscopique. Les deux textes doivent être sortants de l'écran de tel sorte à accentuer l'effet d'aliasing. Nous appliquerons un filtre anti-aliasing sur l'un des deux et nous mesurerons la vitesse de lecture des deux textes par un même sujet. Nous admettrons que plus l'effet stéréoscopique est confortable, plus la lecture des textes sera facile et donc plus rapide.

Si notre hypothèse est correcte (le filtre anti-aliasing réduit la fatigue visuelle), nous nous attendons à voir que les vitesses de lecture des textes filtrés seront plus grandes que les autres.

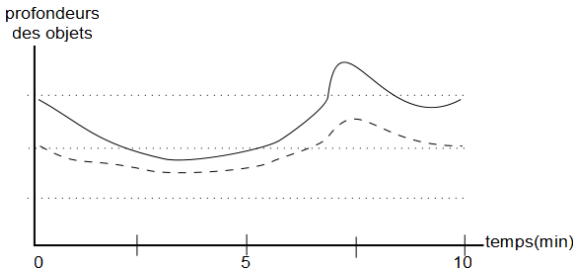
4.2. Résultats

Test 1. inconfort visuel

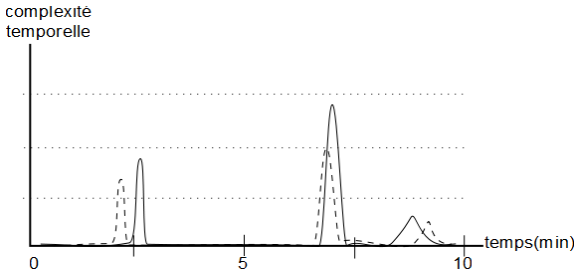
Le scénario de navigation a duré 10 minutes. Nous avons présenté l'évolution de chacun des paramètres en fonction du temps. Les graphes 1 à 4 pour des scènes (sans compression et avec compression) de la figure 4.6 présentent dans l'ordre la complexité spatiale, la profondeur des objets, la complexité temporelle et les mouvements des deux scènes en fonction du temps. Les formules de calcul de chacun de ces paramètres sont développées dans [5].



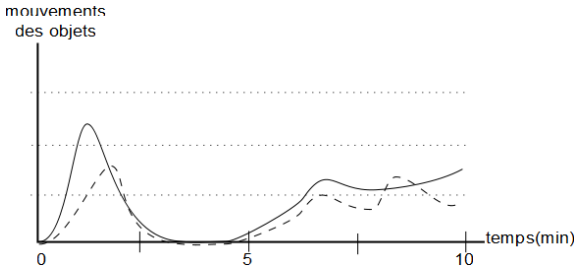
graphe 1. Complexité spatiale : C_{spac}



graphe 2. Profondeurs des objets : A_{spac}



graphe 3. Complexité temporelle : C_{tmp}



graphe 4. Mouvement des objets : A_{tmp}

Figure 4-5. Fatigue visuelle engendrée par les différents facteurs de fatigue selon (5) pour le scénario de test. Ligne continue : scène originale (sans compression), ligne discontinue : la scène compressée progressivement.

La fatigues visuelle, étant égale à une combinaison linéaire de ces quatre paramètres avec des coefficients positifs ($F = \alpha\ C_{spac} + \beta\ A_{spac} + \gamma\ C_{tmp} + \delta\ A_{tmp}$), elle est donc moins importante pour les scènes ayant subi une compression progressive de la profondeur. Comme nous l'avons indiqué auparavant, cette conclusion est évidente et attendue. Cette expérience n'a servi qu'à confirmer numériquement ce que nous savions déjà.

Test 2. perception de la profondeur

Nous avons résumé les résultats des tests subjectifs dans le tableau 4.1. Les colonnes représentent les réponses des sujets. Le tableau 4.2. contient une synthèse du premier tableau.

Tableau 4-1. Réponses des sujets pour le test 2.

Stimuli\réponse			Très sortant	sortant	Sur l'écran	Derrière l'écran
Objet non déformé	Objet texturé	Très sortant	2	1		
		sortant		3		
		Sur l'écran		1	2	
		Derrière l'écran			2	1
	Objet redu avec une couleur unie	Très sortant	2	1		
		sortant		2	1	
		Sur l'écran			3	
		Derrière l'écran			1	2
Objet compressé	Objet texturé	Très sortant	1	2		
		sortant		3		
		Sur l'écran			3	
		Derrière l'écran			1	2
	Objet redu avec une couleur unie	Très sortant	1	2		
		sortant		2	1	
		Sur l'écran			3	
		Derrière l'écran			2	1

Tableau 4-2. Synthèse des résultat du test 2. Proportions de bonnes perceptions par classe d'objet

Stimuli\réponse		Réponses correctes	Réponses étonnés
Objet non déformé	Objet texturé	8	4
	Objet redu avec une couleur unie	9	3
Objet compressé	Objet texturé	9	3
	Objet redu avec une couleur unie	7	5

Nous remarquons dans le tableau 4.2 que la perception des profondeurs est bien évaluée dans l'ensemble. En outre, le taux global de perception correcte est plutôt équilibrée entre les objets non déformés ou compressés. Mais en regardant attentivement le tableau 4.1, nous constatons que la perception des objets très sortants est moins bien évaluée dû à la compression progressive de l'espace selon l'axe des profondeurs.

Nous considérons que ces résultats sont très encourageants puisque la plupart des valeurs sont situées sur les diagonales du tableau 4.1. De plus, il est à signaler que l'un des sujets n'a pu évaluer

correctement la perception de la profondeur. Il est peut être *stéréo-aveugle*. La suppression des réponses données par ce sujet améliore encore davantage les résultats que nous avons obtenus.

Test 3 : test de déformation de formes géométriques classiques

Les résultats de la première expérience du test 3 sont résumés dans tableau 4.3.

Tableau 4-3. Résultats de la première expérience du test 3. Perception des déformation sur les objets.

Déformation de l'objet	Réponse des sujets	
	naturel	déformé
aucune	10	0
Algorithme des 3 régions	4	6
Compression progressive de l'espace	10	0

Comme attendu, les sujets n'ont remarqué aucune anomalie de forme des objets ayant subi compressés progressivement. En revanche, pour les objets déformés par l'algorithme des trois régions, 60% des sujets détectent des anomalies de forme. En conclusion, notre amélioration résout le problème de déformation des géométries simples.

Par contre, lors de la deuxième expérience, les sujets ne sont pas arrivés à détecter le seul segment de droite différent du reste. Nous avons espéré démontrer que lors de la déformation de tous les objets de l'espace, les sujets arrivent à croire que la seule ligne droite dans l'espace est la seule déformée. D'un autre coté, ce résultat nous satisfait puisqu'il confirme le résultat ci-dessus.

Test 4 : test sur la perception de la profondeur avec adaptation d'éclairage

Après avoir effectué 6 expériences impliquant 3 sujets, 4 réponses sur 6 indiquent que l'objet éclairé à l'aide du nouveau modèle d'éclairage est moins profond. Dans les deux autres réponses, les sujets estiment que les objets ont la même profondeur. Nous concluons donc que l'utilisation du nouveau modèle d'éclairage améliore la perception de la profondeur, ou plutôt corrige la perte de perception de profondeur qui peut être causée par des algorithmes de compression de la profondeur.

Test 5 et test 6

Les résultats de ces tests ne sont pas encore disponibles.

4.3. Complexité de calcul

Nous terminons ce chapitre par donner un aperçu sur la complexité de calculs des différentes améliorations. Nous nous satisfaisons de donner des ordres de grandeur de la complexité puisque nous nous sommes pas particulièrement intéressés par l'aspect temps de calcul dans ce stage.

L'implémentation de la compression progressive de la profondeur sur cartes graphiques correspond à l'ajout de quelques opérations flottantes pendant la phase de projection, ce qui n'a pas d'effet sur le temps de calcul.

Par contre, la deuxième amélioration est assez couteuse pour des maillages à basse résolution. Rappelons qu'elle consiste à ajouter des sommets intermédiaires entre les sommets existants dans le but de réduire les artefact causé par les maillages à basse résolution.

La complexité de l'application d'un filtre anti-aliasing dépend de trois facteurs essentiels : la profondeur des objets, la résolution des images planes constituant l'image stéréoscopique, et le nombre d'images planes nécessaires pour le rendu stéréoscopique dans le cas d'écrans stéréoscopiques multi-vues. D'après nos expériences, l'application de ce filtre ne pénalise pas trop la complexité du processus du rendu.

Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté la phase expérimentation de notre stage. Dans une première sous-section, nous avons détaillé les différentes expériences que nous avons réalisées. Les expériences sont réparties selon la contribution qu'on veut tester. Nous avons précisé l'objectif et expliqué le mode opératoire de chacun des tests. Ensuite, dans une autre sous-sections, nous avons présenté et discuté les résultats des différentes expériences. Sur six tests prévus, quatre sont déjà finalisés. Les deux derniers seront effectuées prochainement.

Nous avons réussi à prouver que l'application de la compression progressive de la profondeur permet de réduire considérablement la fatigue visuelle, sans altérer considérablement la perception des profondeurs. Nous également montré que les sujets ne remarquent pas que les objets sont déformés avec notre solution de compression, contrairement à l'algorithme des trois régions qui présente un artefact gênant sur les frontières entre régions. Puis, nous avons testé une technique que nous avons proposée pour résoudre un problème généré lors du rendu de maillages à basse résolution. Nous avons pu voir que notre solution permet d'éliminer ce phénomène. Ensuite nous avons proposé de modifier l'éclairage pour accentuer la perception de la profondeur. L'étude comparative que nous avons effectuée, montre que les profondeurs deviennent plus apparentes en appliquant notre modèle d'éclairage. Finalement nous avons préparé des tests pour l'apport de l'ajout d'un flou anti-aliasing dans des images stéréoscopiques de synthèse. Les résultats de ces test ne sont pas encore disponibles.

5. Conclusion et perspectives

Durant notre stage, nous nous sommes intéressés à l'aspect fatigue visuelle engendré par la stéréoscopie dans des applications interactives contenant des scènes de synthèse. La plupart des travaux existants traitant l'inconfort sont principalement réalisés pour des images du monde réel, notamment l'adaptation de scenarii, la réduction des disparités excessives et l'ajout du flou en post production.

Nous nous sommes basés sur l'algorithme de trois régions [2] que nous avons adapté pour des scènes de synthèse, pour proposer des améliorations visant à réduire, voire annuler, quelques artefacts de perception engendrés par cet algorithme. La première amélioration consiste en l'application d'une compression progressive et continue de l'axe de profondeur au lieu de définir 3 régions distinctes comme dans [2]. Nous avons ensuite proposé une solution pour résoudre un problème lié à la compression des maillages constitués de grands triangles. La troisième amélioration consiste à proposer un nouveau calcul de l'éclairage afin de tromper l'observateur et rendre imperceptible la déformation de l'espace virtuel. Nous avons également pensé à ajouter des filtres anti-aliasing à nos images stéréoscopiques pour réduire davantage l'inconfort. Pour cela, nous avons proposé d'effectuer d'abord des tests pour confirmer la valeur ajoutée de ces filtres.

Des tests ont été établis pour chacune des propositions. Mise à part les tests concernant les filtres anti-aliasing qui ne sont pas encore finalisés, les résultats sont présentés et commentés dans la dernière sections de ce rapport. Nous avons conclu que notre solution réduit considérablement la fatigue visuelle sans nuire à la perception de la 3D stéréoscopique. Nous avons réussi à améliorer le rapport perception de la stéréoscopie/fatigue visuelle.

L'aspect temps de calcul, bien que primordiale pour des applications interactives, n'a pas été pris en considération pour le sujet de stage. Nous avons implémenté nos solutions sur des processeurs graphiques pour optimiser de calculs de rendu. Mais il sera intéressant d'aborder cet aspect comme un sujet séparé.

Bibliographie

1. *Visual comfort of binocular and 3D displays.* Frank L. Kooi, Alexander Toet. 2-3, DE Soesterberg, The Netherlands : elseivier, 2004, ELSEVIER, Vol. 25.

2. *Mapping Perceived Depth to Regions of Interest in Stereoscopic Images.* Holliman, Nick. 117-128, California : Proc. SPIE, 2004, Vol. 5291.

3. *Effects of stereoscopic filming parameters and display duration on the subjective assessment of eye strain.* IJsselsteijn W., De Ridder H., Vliegen J. 12, s.l. : Proc. SPIE, 2000, Vol. 3957.

4. MERABTI, Billal. *PLACEMENT DE CAMERA ET AJUSTEMENT AUTOMATIQUE DES PARAMETRES DE STEREOSCOPIE.* Rennes : université de Rennes 1, 2010.

5. *VISUAL FATIGUE EVALUATION AND ENHANCEMENT FOR 2D-PLUS-DEPTH VIDEO.* Jaeseob Choi, Donghyun Kim, Bumsub Ham, Sunghwan Choi and Kwanghoon Sohn. 2981 - 2984, Hong Kong : Image Processing (ICIP) IEEE, 2010, Vol. 17.

6. Mendiburu, Bernard. *3D Movie Making.* s.l. : Elsevier, 2009. 9780240811376.

7. Toutin, Thierry et Vester, Corinna. Perception de la profondeur. *Radar et stéréoscopieVision en 3D.* [En ligne] 07 02 2008. [Citation : 01 05 2010.] http://cct.rncan.gc.ca/resource/tutor/stereo/chap2/chapter2_5_f.php.

8. *3-D Displays in the Home.* Woods, Andrew. s.l. : Information display, 2009, Information Display 7/09, Vol. 7.

9. Eijk, R.L.J. van. *Beyond the flat screen - Minimal and optimal camera-base distances for viewing 3-D images - rapport de Master.* Eindhoven : Eindhoven University of Technology, 2003.

10. *A Viewer-Centric Editor for Stereoscopic Cinema.* Koppal, Sanjeev J. et al. s.l. : IEEE Computer Graphics and Applications, 2011, IEEE.

11. *An Evaluation of visual fatigue in 3-D displays : Focusing in the mismatching of convergence and accomodation.* Toshiaki SUGIHARA, Tsutomu MIYASATO, Ryohei NAKATSU. 10, s.l. : IEICE TRANSACTIONS on Electronics, 1999, IEICE TRANS. ELECTRON. , Vol. E82-C.

12. *Controlling Perceived Depth in Stereoscopic Images.* Graham Jones, Delman Lee, Nicolas Holliman, David Ezra. 8, CiteSeerX, Warwickshire, UK : Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems, 2001, Citeseer, Vol. 4297.

13. *An Objective Metric for Assessing Quality of Experience on Stereoscopic Images.* Liyuan Xing, Junyong You, Touradj Ebrahimi, Andrew Perkis. 373 - 378 , Hong Kong : Multimedia Signal Processing (MMSP), IEEE International Workshop, 2010.

14. *Nonlinear Disparity Mapping for Stereoscopic 3D.* Manuel Lang, et al. 4, New York, USA : ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2010, ACM Transactions on Graphics, Vol. 29.

15. *Analysis on the Spectrum of a Stereoscopic 3-D Image and Disparity-Adaptive Anti-Aliasing Filter.* Kim, Wook-Joong, Kim, Seong-Dae et Kim, Jinwoong. 10, s.l. : IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS FOR VIDEO TECHNOLOGY, 2009, Vol. 19.

16. KAWASTUDIO. Oasis 3D Relief - Version anaglyphe. *youtube.* [En ligne] 23 07 2010. [Citation : 15 04 2011.] http://www.youtube.com/watch?v=dkIAq_yxfYo.

17. *Perceptual evaluation of JPEG coded stereoscopic images.* Seuntiëns P., Meesters L., IJsselsteijn, W. 381-391, s.l. : IEEE Proceedings of the SPIE, 2004, Vol. 14.

18. *Improving the visual comfort of stereoscopic images.* Stelmach L., Tam W. 269–282, s.l. : IEEE procedings of SPIE, 2003, Vol. 5006.

19. Arlettaz, Damien. flou allié. *mémoire.* Paris : Ensci - Les Ateliers, 2010.

20. *Using Blur to Affect perceived Distance and Size.* HELD, ROBERT T., et al., et al. 2, California : ACM Transactions on Graphics, 2010, Vol. 29.

21. *TOWARDS A PERCEPTUAL QUALITY METRIC FOR COLOR STEREO IMAGES.* Rafik BENSALMA, Mohamed-Chaker LARABI, Senior member, IEEE. Hong Kong : IEEE International Conferences on image processing, 2010, Vol. 17.

22. Dave Astle, Kevin Hawkins. *Beginning OpenGL game programming "Safari Books Online".* s.l. : Course Technology, 2009. 159863528X, 9781598635287.

23. Perry, David. Wikipédia. *Video game forum.* [En ligne] Wikipédia, 2002. [Citation : 15 05 2011.] http://www.dpfiles.com/dpfileswiki.