HAL
open science

Immersion visuelle tridimensionnelle haute performance par suivi du mouvement des yeux

David Aurat

To cite this version:

David Aurat. Immersion visuelle tridimensionnelle haute performance par suivi du mouvement des yeux. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Paris sciences et lettres, 2016. Français. NNT : 2016PSLEM014 . tel-01444955

HAL Id: tel-01444955

https://pastel.hal.science/tel-01444955v1

Submitted on 24 Jan 2017

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.

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à MINES ParisTech

Immersion visuelle tridimensionnelle haute performance par suivi du mouvement des yeux

Ecole doctorale n°432

Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Spécialité Informatique temps réel, robotique et automatique

COMPOSITION DU JURY :

Mme. Zoï KAPOULA
Présidente du jury

M. Malik MALLEM
Rapporteur

M. Daniel MESTRE
Rapporteur

M. Andras KEMENY
Membre du jury

M. Philippe FUCHS
Directeur de thèse

Mme. Laure LEROY
Maître de thèse

Soutenue par David AURAT
le 30 mai 2016

Dirigée par **Philippe FUCHS**

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à MINES ParisTech

Immersion visuelle tridimensionnelle haute performance par suivi du mouvement des yeux

Ecole doctorale n°432

Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Spécialité Informatique temps réel, robotique et automatique

COMPOSITION DU JURY :

Mme. Zoï KAPOULA
Directrice de Recherche - CNRS,
Présidente du jury

M. Malik MALLEM
Professeur à l'Université Evry Val d'Essonne, Rapporteur

M. Daniel MESTRE
Directeur de recherche à l'Université de la Méditerranée, Rapporteur

M. Andras KEMENY
Directeur du LIV, Professeur associé - ENSAM, Membre du jury

M. Frédéric MERIENNE
Professeur à l'Institut Image - ENSAM, Chercheur invité

M. Philippe FUCHS
Professeur à MINES ParisTech - PSL, Directeur de thèse

Mme. Laure LEROY
Maître de conférences à l'Université Paris 8, Maître de thèse

Soutenue par David AURAT
le 30 mai 2016

Dirigée par **Philippe FUCHS**
Encadrée par **Laure LEROY**

Remerciements

Je remercie tout d'abord les membres du jury de m'avoir fait l'honneur d'évaluer mon travail de thèse. En particulier les rapporteurs de ce manuscrit, Malik Mallem et Daniel Mestre, pour les commentaires constructifs qu'ils ont émis. J'aimerai également remercier les examinateurs, Zoï Kapoula, Andras Kemeny et Frédéric Merienne, pour leurs remarques judicieuses et les discussions intéressantes lors de ma soutenance. Un grand merci à Philippe Fuchs de m'avoir guidé durant cette thèse et de m'avoir donné tant de judicieux conseils. Cela a été un grand honneur de travailler avec toi tout au long de ces années. Merci également à Laure Leroy pour m'avoir encadré : tu m'as permis de me surpasser et d'avoir une bonne compréhension du système visuel, ta bonne humeur constante ne sera également pas oubliée.

Ce travail de thèse n'aurait pas été le même sans la bonne ambiance qui règne dans le laboratoire. Pour cela, je voudrais remercier Arnaud de la Fortelle, directeur du laboratoire, de m'avoir accueilli chaleureusement au CAOR. Je voudrai également remercier les autres personnes du laboratoire que j'ai croisées durant mon doctorat : Alexis, Axel, Bruno, Christine, Christophe, Cyril, Dieu Sang, Edgar, Eva, Florent A., Florent T., Fabien, François, Hassan, Houssem, Jacky, Jean-Emmanuel, Jean-François, Joël, Li, Lucile, Martin, Martyna, Olivier H., Olivier H. (l'autre), Manu, Marie-Anne, Philip, Philippe, Raoul, Raphaëlle, Silvère, Simon, Tony, Victor, Victorin, Vincent, Xavier, XiangJun et Yannick. En particulier, un grand merci à Olivier Hugues pour tout le temps qu'il m'a accordé tout au long de cette thèse, que ce soit pour la relecture du manuscrit ou pour la préparation de mes expérimentations.

Durant cette thèse, j'ai également croisé ou revu d'autre personnes que je remercie également pour leur bonne humeur et les discussions passionnantes : Alia, Ari, Aurélien, Dimitri, Grégoire, Gen, Haïtem, Lynda, Rémi, Sobbhi, Vincent. Je remercie également l'ensemble des personnes ayant participé à mes expérimentations. Même si elles n'ont pas été forcément passionnantes, tous ont eu la patience de les faire jusqu'au bout. Je souhaite donc leur dire un grand « Merci pour votre aide ! ».

Enfin, je compte remercier toute ma famille pour m'avoir encouragé et soutenu tout au long de ces années de thèse ainsi que de m'avoir fourni des moments de détente bienvenus. Sans vous, il est certain que cette thèse n'aurait pas été la même. Merci pour tout.

Table des matières

Remerciements 1
Table des illustrations 7
Introduction 13
La vision binoculaire naturelle et artificielle 17
1. Quelques aspects du système visuel 19
1.1. Physiologie de l'œil 19
1.2. La vision périphérique 20
1.3. Accommodation et convergence 21
1.4. Les disparités 21
2. Perception de la profondeur 23
3. Lien entre l'accommodation et la convergence 23
4. Restitution visuelle 24
4.1. Restitution monoscopique 24
4.2. Restitution stéréoscopique 26
État de l'art de la fatigue visuelle en vision artificielle 27
1. Introduction 29
2. Causes de la fatigue visuelle en vision stéréoscopique 29
2.1. Fatigue visuelle et confort visuel en vision stéréoscopique 29
2.2. Différentes causes de fatigue visuelle 29
2.3. Conflit vergence accommodation 29
2.4. Contraintes liées au conflit vergence accommodation 30
3. Diminution de la fatigue visuelle 33
4. Mesure de fatigue et de confort visuels 35
4.1. Mesures subjectives 36
4.2. Mesures des capacités oculomotrices 36
4.2.1. Acuité visuelle 36
4.2.2. Acuité stéréoscopique 37
4.2.3. Capacités accommodatives 38
4.2.4. Limite de fusion 39
4.2.5. Mesures physiques 40
4.3. Choix des mesures 40

5. Conclusion 41
Effet d'un flou en vision périphérique sur la fatigue visuelle 43
1. Introduction 45
2. Choix d'un oculomètre 45
2.1. Calcul du temps de latence théorique 45
2.2. Mesure du temps de latence du matériel 47
2.3. Conclusion 48
3. Première expérimentation : effet d'un flou en vision périphérique 49
3.1. Hypothèse 49
3.2. Les différents types de traitements possibles 49
3.3. Protocole expérimental 54
3.4. Résultats 58
3.5. Discussion 66
4. Conclusion 66
État de l'art de la convergence des yeux et des caméras virtuelles sur la perception des formes et des distances 67
1. Introduction 69
2. Effet des disparités verticales en vision naturelle 69
2.1. Perception des distances 69
2.2. Perception des formes 69
3. Effet des parallaxes verticales en vision artificielle 70
3.1. Définitions 70
3.2. Perception des distances 71
3.3. Perception des formes 72
4. Implémentation des parallaxes verticales 72
4.1. Processus de rendu 73
4.2. Modification du processus 76
5. Conclusion 80
Restitution visuelle stéréoscopique améliorée et perception des formes 81
1. Introduction 83
2. Méthode psychophysique 83
2.1. Description des méthodes psychophysiques classiques 83
2.2. Choix de la méthode 85
3. Expérimentation 85
3.1. Hypothèse 85
3.2. Protocole expérimental 85

3.3. Résultats 89
3.4. Discussion 92
4. Conclusion 93
Conclusion 95
1. Contexte et problématique 97
2. Nouveau traitement pour réduire la fatigue visuelle 97
2.1. Notre apport 97
2.2. Quelques perspectives 97
2.3. Effets annexes du traitement 98
3. Amélioration de la perception des formes 98
3.1. Notre apport 98
3.2. Quelques perspectives 98
Bibliographie 101
Annexe 107
1. Test de contrôle – test « Petite zone nette » 109
1.1. Acuité stéréoscopique 109
1.2. *Proximum* d'accommodation 109
1.3. Facilité d'accommodation 109
1.4. Questionnaire par thème 110
1.5. Questionnaire détaillé 110
2. Test « Grande zone nette » - test « Petite zone nette » 111
2.1. Acuité stéréoscopique 111
2.2. *Proximum* d'accommodation 112
2.3. Facilité d'accommodation 112
2.4. Questionnaire par thème 112
2.5. Questionnaire détaillé 113
3. Test « Contrôle » - test « Sans oculomètre » 114
3.1. Acuité stéréoscopique 114
3.2. *Proximum* d'accommodation 114
3.3. Facilité d'accommodation 114
3.4. Questionnaire par thème 115
3.5. Questionnaire détaillé 115

Table des illustrations

Figure 1 : principales caractéristiques de l'œil humain (image provenant de(Fuchs et al. 2006)). 19
Figure 2 : la structure anatomique de la rétine (image provenant de (ANSES 2014)) 20
Figure 3 : la répartition des cônes et des bâtonnets sur la rétine. Le point aveugle correspond au passage du nerf optique. 20
Figure 4 : l'accommodation (image provenant de(Fuchs et al. 2006)) 21
Figure 5 : la convergence (image provenant de(Fuchs et al. 2006)) 21
Figure 6 : si l'on regarde le point F, la disparité rétinienne horizontale DRH au point A vaut DRH=|α-β| 21
Figure 7 : si on regarde le point F, le point P est perçu avec une disparité verticale de valeur $\boldsymbol{\beta G - \beta D}$. 22
Figure 8 : représentation vectorielle des disparités d'un plan fronto-parallèle si nous regardons l'étoile rouge au centre(Nakayama 1983). 22
Figure 9 : indices visuels de la perception de la profondeur (image provenant de (Fuchs et al. 2006)) 23
Figure 10 : lien entre l'accommodation et la vergence, modèle simplifié de Schor (Schor & Kotulak 1986) (fait par Neveu (Neveu et al. 2009)). 24
Figure 11 : un *frustum* est défini par les distances *near*, *far*, *left*, *right*, *bottom* et *top*. Le *far plane* est en rose, le *near plane* est en vert. 25
Figure 12 : les *frustums* pour la caméra gauche et pour la caméra droite sont différents et asymétriques. 26
Figure 13 : effet des parallaxes verticales sur la face avant d'un cube. En haut, les caméras sont parallèles (gauche) et le cube est vu comme deux carrés (droite). En bas, les caméras convergent sur la face avant du cube (gauche) et cette face est affichée comme étant deux trapèzes (droite). 26
Figure 14 : le conflit vergence accommodation 30
Figure 15 : graphique montrant les zones de confort visuel en fonction des distances d'accommodation et de convergence (Shibata et al. 2011). La ligne en pointillés représente le cas où la distance d'accommodation et la distance de convergence sont les mêmes (cas de la vision naturelle). 30
Figure 16 : les grandes disparités (en rouge) augmentent le conflit vergence-accommodation. 31
Figure 17 : confort visuel en fonction de la vitesse des objets (Speranza et al. 2006). 31
Figure 18 : influence de la DIO sur la perception pour une parallaxe donnée. Une petite DIO (en rouge) permet de percevoir les objets plus proches qu'une grande DIO (en bleu). Toutefois, le conflit vergence accommodation est plus important dans le cas d'une petite DIO ($\boldsymbol{Drouge > Dbleu}$). 32
Figure 19 : score à un questionnaire sur le confort visuel. Comparaison entre des personnes ayant une bonne acuité stéréoscopique (GBS) et d'autres ayant une acuité stéréoscopique moyenne (MBS) (Lambooij et al. 2011). 32
Figure 20 : confort stéréoscopique en fonction des disparités et de la fréquence spatiale (Perrin 1998). 33
Figure 21 : à gauche, l'environnement de test. La position du regard de l'utilisateur est au point blanc dans le carré blanc. À droite, le résultat de l'expérimentation : score du ressenti des utilisateurs pour (de gauche à droite) le réalisme, l'amusement, la perception de la profondeur et l'impression d'immersion (Hillaire et al. 2008). 34

Figure 22 : expérimentation de (Leroy et al. 2010). À gauche, la scène originale. À droite, la scène avec un flou appliqué aux objets ayant des grandes disparités. Le cylindre du milieu est au niveau de l'écran : il est toujours vu net. 34
Figure 23 : résultat du test de la fonction proximum d'accommodation. Sans traitement les sujets perdent en moyenne 1,21cm ce qui indique une baisse des capacités du système visuel. Avec traitement, la fonction proximum d'accommodation n'est pratiquement pas modifiée (Leroy et al. 2010)..... 35
Figure 24 : anneaux de Landolt (à gauche) et E de Raskin (à droite)..... 36
Figure 25 : tableau de Snellen..... 37
Figure 26 : test des points de Wirt..... 38
Figure 27 : test de la mouche..... 38
Figure 28 : les lentilles du "Flipper Lens Test". 39
Figure 29 : le test proposé par (ITU 2012) pour mesurer la limite de fusion..... 40
Figure 30 : zone nette et zone floue sur l'écran. L'utilisateur regarde au point F. S'il décide de regarder sur le côté droit de l'écran, l'affichage doit prendre en compte le regard avant qu'il arrive au point A. 46
Figure 31 : temps de latence limite en fonction de la distance entre le sujet et l'écran et le rayon de la zone nette..... 46
Figure 32 : mesure du temps de latence. Le sujet est dos à l'écran et une caméra haute fréquence filme à la fois les yeux du sujet et l'écran. 47
Figure 33 : temps de latence moyen des oculomètres testés. 48
Figure 34 : courbe du rayon de la zone nette en fonction de la distance sujet-écran pour avoir une limite de temps de latence de 160ms. 49
Figure 35 : flou en profondeur..... 50
Figure 36 : fonction de transition entre la zone nette et la zone floue : en bleu, une transition avec un créneau, en rouge une transition linéaire et en vert, une transition gaussienne. 51
Figure 37 : exemples de flou en moyenne pondérée. À gauche, l'image de base. Au milieu, l'image est traitée avec des coefficients unitaires et à droite, l'image est traitée avec des coefficients exponentiels. La différence importante entre les images du milieu et de droite provient directement des coefficients. En effet, avec les coefficients exponentiels, le pixel à flouter a un poids beaucoup plus important que les autres pixels dans le résultat final. Si les coefficients sont unitaires, le pixel à flouter a le même poids que les autres pixels, ce qui limite son importance dans le résultat final. 53
Figure 38 : en haut, le monde virtuel tel que le voit le sujet. En bas, le même monde virtuel colorié avec de fausses couleurs. Le bleu clair correspond au fond, le bleu foncé aux deux boules et le rouge aux cylindres. 54
Figure 39 : la condition 1 de l'expérimentation 56
Figure 40 : condition 2 de l'expérimentation. Le petit cercle rouge correspond à la limite entre la zone nette et la zone de transition. Le grand cercle rouge correspond à la limite entre la zone de transition et la zone floue. Les deux cercles ne sont ici qu'à titre indicatif, ils ne sont pas visibles par les sujets. 57
Figure 41 : condition 3 de l'expérimentation. Le petit cercle rouge correspond à la limite entre la zone nette et la zone de transition. Le grand cercle rouge correspond à la limite entre la zone de transition et la zone floue. Les deux cercles ne sont ici qu'à titre indicatif, ils ne sont pas visibles par les sujets. 57
Figure 42 : condition 4 de l'expérimentation. Le petit cercle rouge correspond à la limite entre la zone nette et la zone de transition. Le grand cercle rouge correspond à la limite entre la zone de transition et la zone floue. Les deux cercles ne sont ici qu'à titre indicatif, ils ne sont pas visibles par les sujets. 58

Figure 43 : résultats du test de Wirt sans et avec traitement. L'acuité stéréoscopique est notée sur une échelle de 1 à 10. Plus la valeur est grande, meilleure est l'acuité stéréoscopique. 59
Figure 44 : résultat des mesures du test du punctum proximum d'accommodation. La note correspond à la distance minimale d'accommodation. Plus elle est faible, moins le système visuel est fatigué..... 59
Figure 45 : note de la facilité d'accommodation. La note correspond au nombre de changements de puissance de lentilles en 30 secondes. Une note élevée indique une grande facilité du système visuel à accommoder. 60
Figure 46 : réponses aux questions posées avant et après les tests « Contrôle » et « Petite zone nette ». Les réponses sont classées par thème..... 60
Figure 47 : résultat du test de l'acuité stéréoscopique lors des tests « Grande zone nette » et « Petite zone nette ». 61
Figure 48 : variation du punctum proximum d'accommodation lors des tests « Grande zone nette » et « Petite zone nette ». 62
Figure 49 : comparaison des résultats du test de facilité d'accommodation en fonction de la taille de la zone nette. 62
Figure 50: réponses au questionnaire sur le confort visuel pour les tests « Grande zone nette » et « Petite zone nette ». 63
Figure 51: mesure de l'acuité stéréoscopique lors du test de contrôle et lors du test sans oculomètre. 64
Figure 52 : résultats des mesures du punctum proximum d'accommodation lors des tests de contrôle et sans oculomètre.Plus la distance est faible, plus le sujet a une bonne capacité d'accommodation sur un objet proche. 64
Figure 53 : résultat du test de la facilité d'accommodation lors des tests de contrôle et sans oculomètre. Plus le résultat est faible, plus le sujet a une faible capacité à accommoder. 65
Figure 54 : résultat au questionnaire pour la condition de contrôle et la condition « Sans oculomètre ». 65
Figure 55 : définition des ratios HSR et VSR..... 70
Figure56 : différences de parallaxes entre le cas « caméras parallèles » et le cas « caméras convergentes ». À gauche, nous avons le monde virtuel représenté vu de dessus filmé avec les caméras gauche (en rouge) et droite (en vert). À droite, le rendu sur écran des caméras. L'image pour l'œil gauche est représentée en rouge et l'image pour l'œil droit en vert. Les caméras sont en configuration parallèles en haut et convergentes en bas. Notons que les déformations ont été exagérées pour être plus facilement visibles sur cette figure. 71
Figure 57 : exemple de monde virtuel utilisé par (Stelmach et al. 2003). 71
Figure 58 : résultat de l'expérimentation de (Stelmach et al. 2003). Ce graphique représente les notes attribuées par les participants à propos du confort visuel (cercles vides) et la profondeur apparente (cercles pleins). L'axe des abscisses représente la déformation de l'image qui correspond à une distance de convergence des caméras. À gauche, deux mesures sont particulières : « mono » représente l'expérience réalisée avec un affichage monoscopique et « inf » correspond à une distance de convergence de caméras infinie, c'est-à-dire que les axes des caméras sont parallèles. . 72
Figure 59 : rendu final désiré pour l'exemple du processus de rendu habituel. 73
Figure 60 : résultat de la première étape d'un processus de rendu. 74
Figure 61: résultat de la deuxième étape d'un processus de rendu. 74
Figure 62: résultat de la troisième étape d'un processus de rendu. 75
Figure 63: résultat de la quatrième étape d'un processus de rendu. 75
Figure 64 : résultat de l'exécution d'un *vertex shader*. À gauche, nous avons le monde virtuel avec quatre cubes et le *frustum* dessiné en fil de fer. À droite, le vertex shader a transformé le monde

virtuel, c'est-à-dire les quatre cubes, en quatre hexaèdres. Pour chaque point dans le *frustum* transformé (à droite), les deux premières coordonnées correspondent à la position du point sur l'écran et la troisième coordonnée correspond à la profondeur du point utilisé par le test du *z-buffer*. 76

Figure 65 : le *frustum* avec les données nécessaires pour calculer la matrice de projection..... 77

Figure 66 : application de notre méthode de projection. À gauche, nous voyons que le *frustum* utilisé est à base quelconque. Il va donc s'adapter à la forme de l'écran, quelle que soit la forme perçue de l'écran. Ici, la caméra est positionnée du côté gauche des cubes. Les côtés gauches des cubes doivent apparaitre plus gros que les côtés droits des cubes et les cubes de gauche sont également plus gros que les cubes de droite. La partie droite du schéma représente le résultat de notre transformation. Le *frustum* devient donc un cube de côté 2 et les cubes sont déformés. Dans ce schéma, l'effet de la convergence des caméras a été accentué pour bien comprendre l'effet de la transformation. 79

Figure 67 : exemple d'histogramme représentant le taux de détection du stimulus en fonction son niveau. La fonction psychométrique associée à cet histogramme est affichée en bleu. 84

Figure 68 : le monde virtuel vu par les participants. Sur cette image, le cuboïde et la croix sont positionnés devant l'écran. Notons que cette capture d'écran a été réalisée en anaglyphe pour pouvoir différencier l'image gauche de l'image droite. Durant la vraie expérimentation, la croix est verte et le cuboïde est rouge. 86

Figure 69 : l'ensemble des positions et des tailles possibles pour le cuboïde de $\mathbf{20}\boldsymbol{cm}$ de largeur. La longueur M a pour valeur $\mathbf{24}\boldsymbol{cm}$ et celle de m est de 16$\boldsymbol{cm}$. Pour le cuboïde de $\mathbf{35}\boldsymbol{cm}$ de largeur, M a pour valeur $\mathbf{42}\boldsymbol{cm}$ et m a pour valeur $\mathbf{28}\boldsymbol{cm}$. 87

Figure 70 : résultat de l'influence de la taille de l'objet regardé sur l'effet des parallaxes verticales pour les cuboïdes situés à $\mathbf{70}\boldsymbol{cm}$ du participant. Le graphique représente le JND calculé selon la taille du cuboïde (petit ou grand) et de la configuration des caméras (convergente ou parallèle). Un petit JND indique une plus grande facilité de reconnaissance de la forme pour la configuration donnée. 90

Figure 71 : influence de la distance des objets sur l'effet des parallaxes verticales pour les petits cuboïdes. Le graphique représente le JND calculé en fonction de la position du cuboïde (proche ou loin) et de la configuration des caméras (parallèles ou convergentes). Une petite valeur de JND indique une plus grande facilité à discerner la forme. 91

Figure 72 : influence de la distance des objets sur l'effet des parallaxes verticales pour les grands cuboïdes. Le graphique représente le JND calculé en fonction de la position du cuboïde (proche ou loin) et de la configuration des caméras (parallèles ou convergentes). Une petite valeur de JND indique une plus grande facilité à discerner la forme. 91

Figure 73 : graphique représentant l'effet des parallaxes verticales en fonction de la distance au participant (en abscisse) et de l'excentricité des sommets (en ordonnée). Chaque sommet d'un trapèze représente un sommet du cube idéal. La correspondance entre numéros de trapèze et les cubes associés sont indiqués dans le Tableau 12. Un trapèze vert signale un effet positif des parallaxes vertical et un trapèze rouge représente un effet négatif ou une absence d'effet. 93

Figure 74 : comparaison de l'acuité stéréoscopique pour les tests "Contrôle" et "Petite zone nette"..... 109

Figure 75 : comparaison de la distance des yeux au punctum proximum d'accommodation pour les tests « Contrôle » et « Petite zone nette ». 109

Figure 76 : comparaison de la facilité d'accommodation pour les tests « Contrôle » et « Petite zone nette »..... 110

Figure 77 : réponses aux questionnaires triées par thèmes pour les tests « Contrôle » et « Petite zone nette ». 110

Figure 78 : réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Contrôle » et « Petite zone nette » (1/2). 111
Figure 79: réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Contrôle » et « Petite zone nette » (2/2). 111
Figure 80 : résultats des tests d'acuité stéréoscopique pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette ». 111
Figure 81 : résultats de la mesure du punctum proximum d'accommodation pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette ». 112
Figure 82 : résultats du test de facilité d'accommodation pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette ». 112
Figure 83 : réponses au questionnaire classées par thème pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette ». 113
Figure 84 : réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette » (1/2). 113
Figure 85 : réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette » (2/2). 113
Figure 86 : résultats des mesures d'acuité stéréoscopique pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre ». 114
Figure 87 : résultat des mesures du punctum proximum d'accommodation pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre ». 114
Figure 88 : résultats de mesure de facilité d'accommodation pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre ». 115
Figure 89 : réponses au questionnaire regroupées par thème pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre ». 115
Figure 90 : réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre » (1/2). 116
Figure 91 : réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre » (2/2). 116

Chapitre 1

Introduction

Ma première expérience en stéréoscopie date de la fin des années 1990 et fut un film *Guillaumet, les ailes du courage*, qui retrace l'histoire de la survie d'un pilote dont l'avion s'est écrasé dans la Cordillère des Andes. Une des scènes qui m'a le plus marqué est la suivante : le héros et ses amis sont dans un restaurant et discutent pendant un apéritif. Ce qui a retenu mon attention dans cette scène, ce n'est pas la scène elle-même, mais plutôt les spectateurs du cinéma qui ont tous tendu leurs mains pour prendre les verres avec les personnages… Cette scène représente bien l'immersion des spectateurs dans l'histoire et l'environnement du film. Ils étaient à la fois assis dans le cinéma avec leur famille ou leurs amis, mais ils étaient également dans l'histoire du film, comme s'ils pouvaient interagir avec les éléments du film. Cette expérience amène plusieurs questions : comment peut-on réaliser et projeter un film de telle sorte que les objets soient perçus *devant* l'écran ? Comment peut-on amener les spectateurs à se croire à l'intérieur de l'histoire d'un film alors qu'ils sont confortablement assis dans un fauteuil de cinéma ? Les années ont passé et j'ai appris qu'il était assez simple de réaliser la stéréoscopie, qu'il suffisait pour cela d'effectuer deux prises de vue au lieu d'une seule et d'utiliser des technologies pour que chaque œil ne perçoive que la prise de vue qui lui est associée. Ainsi, les spectateurs peuvent percevoir des objets du film devant ou derrière l'écran. Toutefois, cette réponse amène d'autres questions : la stéréoscopie rend-elle les environnements virtuels plus réalistes ? Quel est l'impact de la stéréoscopie sur la perception du contenu visualisé ? Comment réagit le système visuel face à ce stimulus qui s'éloigne de son fonctionnement habituel ? S'il réagit mal, peut-on réduire ou supprimer complètement ces problèmes ? Dans la suite de ce manuscrit, nous répondrons à certaines de ces questions.

Ce travail de thèse fait partie d'un projet français de recherche collaborative (FUI) : le projet SI2M. Le but de ce projet est de créer et valider des outils permettant de diminuer les coûts liés aux développements de systèmes d'aide à la conduite (systèmes ADAS). Dans ce projet, le travail de mon laboratoire d'accueil consiste à exploiter le suivi du regard de l'utilisateur afin d'améliorer l'immersion visuelle de l'utilisateur du simulateur. Actuellement, lors du rendu d'un environnement virtuel sur un écran, le point de regard de l'utilisateur n'est pas pris en compte, car il est inconnu. Toutefois, si ce point de regard est connu, est-il possible d'effectuer un rendu plus adapté ? Dans ce manuscrit, deux pistes vont être explorées pour améliorer l'expérience de l'utilisateur.

La première piste concerne la fatigue visuelle induite par la vision de contenu stéréoscopique. En effet, le matériel utilisé impose des contraintes au système visuel qui ne sont pas les mêmes que dans la vision naturelle, ou même contraire à son fonctionnement habituel. Ainsi, le système visuel doit s'adapter à des contraintes inhabituelles, ce qui provoque une fatigue visuelle. Différentes méthodes permettent d'atténuer cette dernière en traitant les images affichées. Nous verrons plusieurs de ces méthodes et nous proposerons et évaluerons notre propre méthode. Cette nouvelle méthode consiste à flouter la vision périphérique d'un utilisateur en fonction de son point de regard afin de diminuer l'impact des contraintes liées à la vision stéréoscopique sur son système visuel.

La deuxième piste concerne la perception de l'environnement virtuel. En effet, il est important pour une simulation d'avoir une bonne cohérence entre la perception de l'environnement virtuel et la forme de l'objet tel qu'il serait dans la réalité. Cette cohérence est essentielle, par exemple pour des concepteurs d'objets ou des designers, car ils vont créer des objets sans avoir la possibilité de toucher ni de voir réellement les objets créés. Dans ce manuscrit, nous contribuerons à améliorer les simulations par un rapprochement entre la vision artificielle et la vision naturelle. Pour cela, nous prendrons en compte l'orientation des yeux et nous appliquerons cette orientation aux caméras virtuelles stéréoscopiques de façon à ajouter des parallaxes verticales sur l'écran pour reproduire les disparités verticales présentes dans la vision naturelle.

Ce manuscrit se composera de 7 chapitres :

Le premier chapitre, celui-ci, introduit les différentes problématiques qui seront abordées dans ce manuscrit.

Le deuxième chapitre sera composé de rappels concernant le fonctionnement de la vision humaine, ainsi qu'un résumé du fonctionnement des caméras virtuelles.

Dans le troisième chapitre, nous verrons les causes de la fatigue visuelle, plusieurs méthodes permettant de la réduire, ainsi que les mesures ophtalmologiques permettant de mesurer les capacités oculomotrices du système visuel. À la fin de ce chapitre, nous formulerons une hypothèse pour réduire la fatigue visuelle en vision stéréoscopique qui est : un flou en vision périphérique réduit la fatigue visuelle. Nous aurons également sélectionné des mesures ophtalmologiques pour surveiller les capacités du système visuel des participants à nos expérimentations.

Le quatrième chapitre sera consacré à une expérimentation permettant de vérifier ou d'infirmer l'hypothèse formulée dans le chapitre précédent. Dans cette expérimentation, nous étudierons l'influence d'un flou en vision périphérique sur la fatigue visuelle. Ce traitement sera appliqué en fonction du point de regard, qui sera connu en utilisant un oculomètre. Pour surveiller les capacités du système visuel de nos participants, nous utiliserons les mesures ophtalmologiques sélectionnées précédemment. En plus de cette étude, nous évaluerons également deux paramètres pouvant modifier l'effet du traitement : la taille de la zone nette ainsi que la latence de l'oculomètre.

Dans le cinquième chapitre, nous verrons en quoi la convergence des yeux améliore la perception de notre environnement et comment reproduire techniquement ce phénomène avec des caméras virtuelles. Nous conclurons ce chapitre par la proposition d'une nouvelle méthode de rendu permettant de faire converger les caméras stéréoscopiques virtuelles sur le point regardé.

Le sixième chapitre portera sur l'intérêt de cette nouvelle méthode du point de vue perceptif. Nous verrons donc comment évaluer la perception des personnes à l'aide de méthodes psychophysiques et nous réaliserons une expérimentation dans laquelle l'impact de notre méthode sur la perception des formes sera évalué. Nous verrons également si la distance de visualisation ainsi que la taille des objets regardés ont un impact significatif sur les effets des parallaxes verticales.

Enfin, le septième et dernier chapitre conclura ce travail en reprenant les résultats que nous avons obtenus qui répondent aux questions initiales, mais qui ouvrent aussi de nouvelles perspectives pour les travaux à venir dans ce domaine.

Chapitre 2

La vision binoculaire naturelle et artificielle

1. Quelques aspects du système visuel

La vision humaine est un sens complexe et souvent mal connu des non-spécialistes. Pourtant, à cause de son utilisation courante et de sa simplicité d'utilisation, sa complexité ainsi que ses capacités informatives sont ignorées. Pour comprendre le fonctionnement de la vision humaine, il est important d'aborder le fonctionnement physiologique, physique et cognitif.

La première étape du fonctionnement de l'œil se base sur la projection de la lumière sur la rétine. Ensuite, d'autres mécanismes d'analyse sont utilisés pour percevoir le monde. Lorsque les rayons lumineux arrivent sur la rétine, ceux-ci sont interprétés et l'information extraite est envoyée au cortex visuel, zone du cerveau dédiée au traitement de l'information visuelle. Les informations reçues sont traitées en parallèle pour être décomposées suivant différents critères : la profondeur, les formes, les couleurs perçues ainsi que les mouvements. Avant cette décomposition, des informations de plus bas niveau sont analysées.

1.1. Physiologie de l'œil

Les principales parties de l'œil sont indiquées sur la Figure 1. Sur cette image nous pouvons voir le cristallin, un dioptre de puissance variable, la cornée, la pupille qui laisse entrer la lumière dans l'œil, l'iris permettant de réguler la quantité de lumière se projetant sur la rétine, qui reçoit et interprète les rayons lumineux, la fovéa (la zone centrale de la rétine) et le nerf optique qui transmet toutes les informations issues de la rétine vers les zones du cerveau traitant la vision.

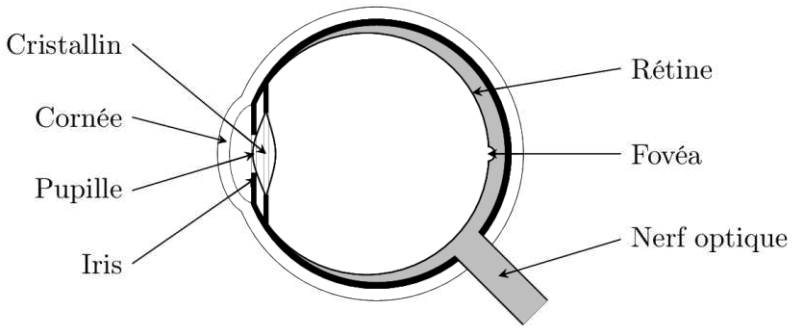

Figure 1 : principales caractéristiques de l'œil humain (image provenant de(Fuchs et al. 2006)**).**

L'œil permet donc la canalisation, la régulation et la projection de la lumière sur la rétine en la faisant passer par plusieurs milieux transparents. Chacun de ces milieux se comporte comme une lentille, l'accumulation de ces lentilles permettant de projeter une image nette sur la rétine, au niveau de la fovéa.

Lorsqu'elle arrive sur la rétine, la lumière traverse plusieurs couches de cellules (les cellules ganglionnaires puis les cellules amacrines, les cellules bipolaires et enfin les cellules horizontales). Après avoir traversé ces cellules, la lumière arrive sur les récepteurs : les cônes et les bâtonnets (Figure 2). Les cônes et les bâtonnets vont décoder respectivement la couleur et l'intensité de la lumière. Ces informations vont ensuite repasser par les cellules dans chacune des couches mentionnées ci-dessus, dans le sens opposé au trajet de la lumière. Une fois arrivée dans la couche de cellule ganglionnaire, l'information est transmise au cerveau en passant par le nerf optique.

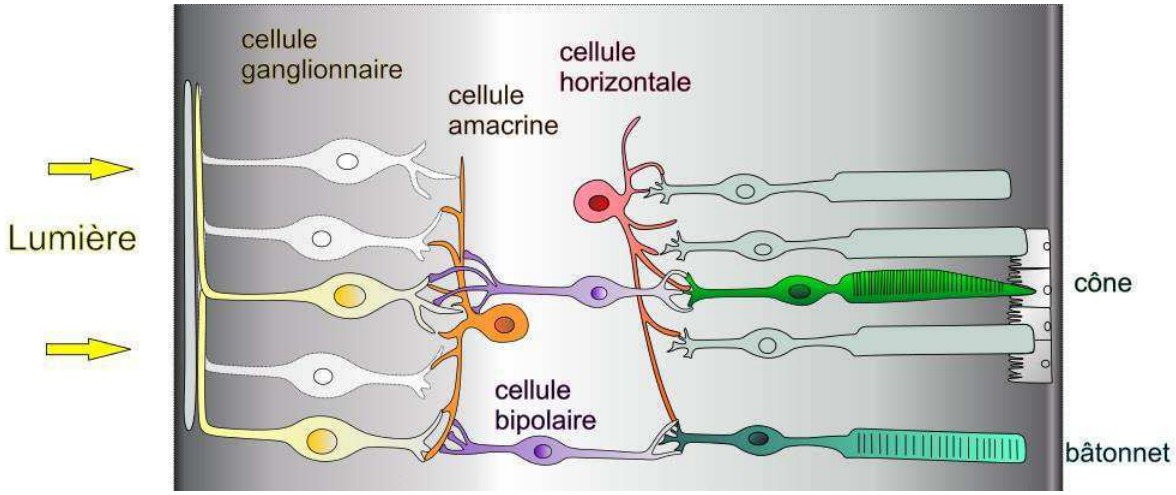

Figure 2 : la structure anatomique de la rétine (image provenant de (ANSES 2014))

Les cônes permettent de percevoir les couleurs tandis que les bâtonnets servent à détecter la luminosité. Les cônes et les bâtonnets ont une répartition différente sur la rétine (Figure 3). Les cônes se situent majoritairement dans la fovéa, ce qui permet d'avoir une acuité visuelle maximale au point de regard. Les bâtonnets sont situés sur le reste de la rétine avec un maximum de densité aux alentours d'une excentricité de 10°.

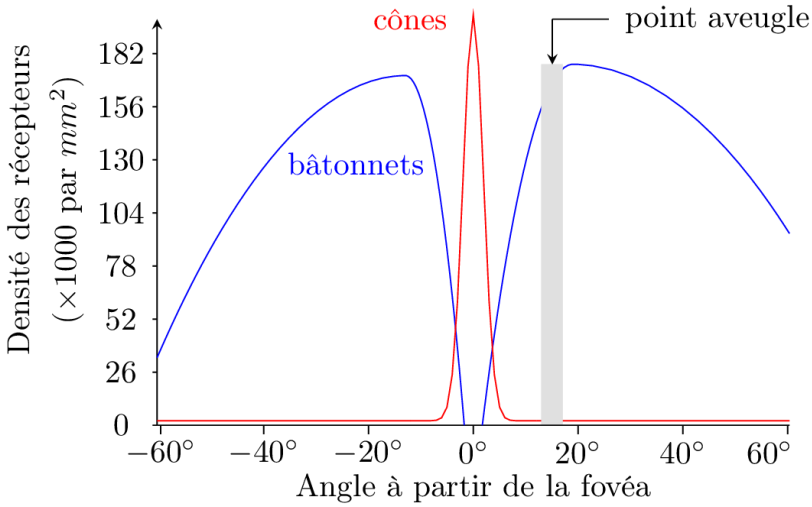

Figure 3 : la répartition des cônes et des bâtonnets sur la rétine. Le point aveugle correspond au passage du nerf optique.

1.2. La vision périphérique

En vision périphérique, l'acuité visuelle diminue fortement (Mochizuki et al. 2012). Cette diminution est provoquée par les propriétés optiques de l'œil (Navarro et al. 1993), la baisse de densité des cônes et des bâtonnets, mais également par d'autres mécanismes du système visuel (Anderson et al. 1991).

La vision périphérique permet de percevoir globalement l'environnement qui nous entoure. Lorsque nous détectons un changement en vision périphérique, nous avons tendance à tourner nos yeux vers ce changement pour avoir une meilleure vision de celui-ci. La vision périphérique joue donc plus un rôle de surveillance de l'environnement contrairement à la vision centrale qui nous sert à percevoir précisément notre environnement (Anstis 1998).

1.3. Accommodation et convergence

L'accommodation permet d'observer les objets nets quelle que soit la distance entre ces objets et les yeux. Pour cela, les muscles ciliaires modifient la courbure du cristallin et donc sa puissance, afin de faire la mise au point sur la rétine. Cette mise au point s'appelle l'accommodation (Figure 4).

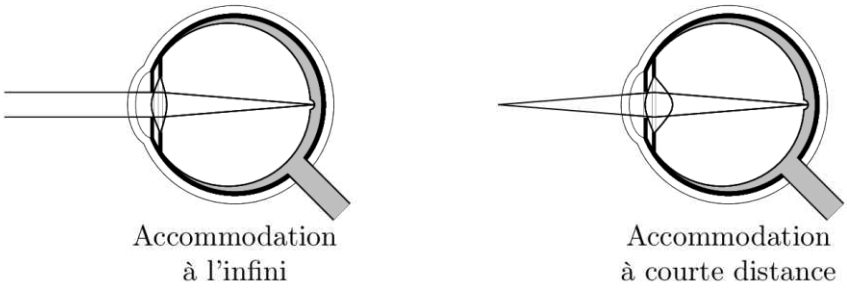

Figure 4 : l'accommodation (image provenant de(Fuchs et al. 2006)**)**

Dans l'orbite, des muscles permettent d'orienter l'œil pour orienter son axe optique vers l'objet regardé : c'est le phénomène de convergence (Figure 5). Ce phénomène se fait généralement inconsciemment et est très rapide. Chaque œil tourne autour d'un point fixe appelé le point nodal de l'œil.

Figure 5 : la convergence (image provenant de(Fuchs et al. 2006)**)**

1.4. Les disparités

Sur la Figure 6, les points F_g et F_d sont la projection du point Frespectivement via les points nodaux Get D. De même, les points A_g et A_d sont les projections du point A respectivement via les points nodaux Get D. Lorsqu'on regarde le point F, il y a une différence d'angle entre les projections des points A et F sur la rétine. Cette différence s'appelle la disparité rétinienne horizontale.

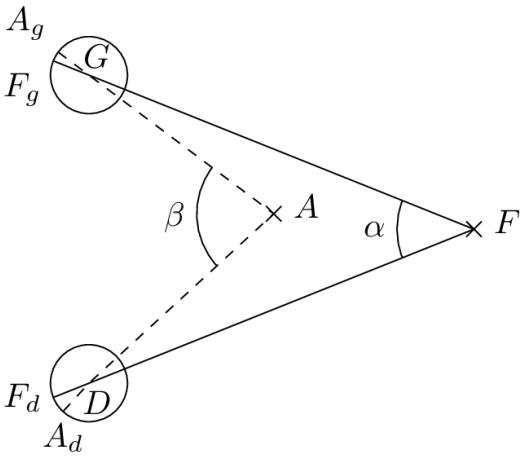

Figure 6 : si l'on regarde le point F, la disparité rétinienne horizontale DRH au point A vaut DRH=|α-β|

Sur la Figure 7, les deux yeux regardent le point F. Si nous traçons les projections du point P sur la rétine passant par les points nodaux de chaque œil, nous pouvons définir la disparité rétinienne verticale comme étant la différence d'angle entre les angles $\beta_G$etβ_D.

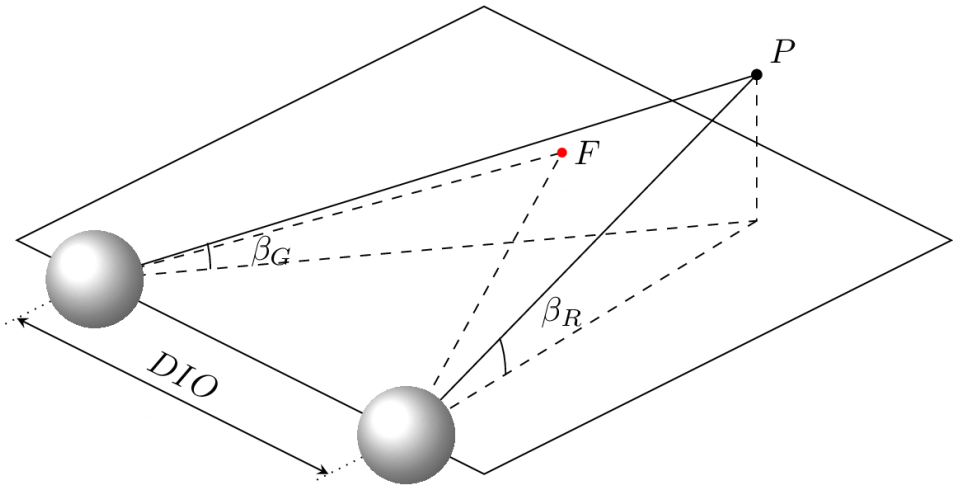

Figure 7 : si on regarde le point F, le point P est perçu avec une disparité verticale de valeur $|\beta_G - \beta_D|$.

La vision naturelle traite donc toujours les disparités horizontales et verticales, mais les disparités verticales se concentrent dans la périphérie du regard. Elles sont notamment utiles lors de la perception de formes en améliorant l'impression de relief créé par les parallaxes horizontales (Devisme 2008). Sur la Figure 8, nous pouvons voir les composantes horizontales et verticales de chaque point d'un plan fronto-parallèle.

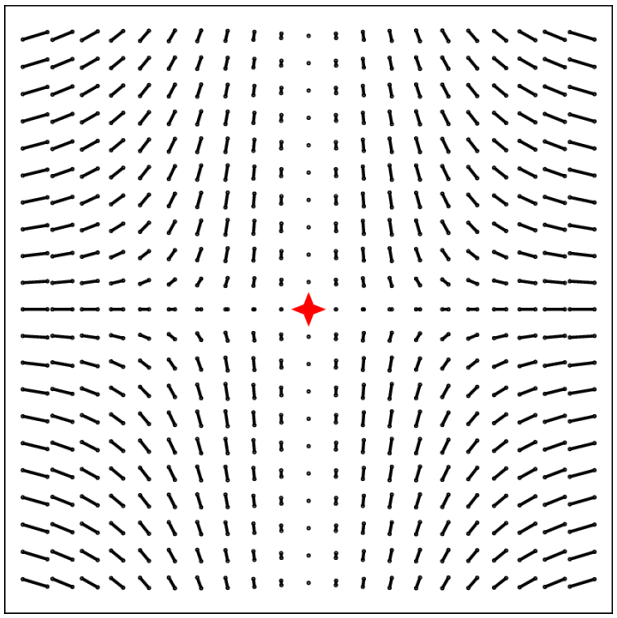

Figure 8 : représentation vectorielle des disparités d'un plan fronto-parallèle si nous regardons l'étoile rouge au centre(Nakayama 1983)**.**

Ces disparités sont en partie responsables de la perception de la profondeur. Nous allons maintenant voir les autres indices.

2. Perception de la profondeur

Nos sens nous permettent de percevoir la profondeur relative et absolue des objets qui nous entourent. Par exemple, l'ouïe nous permet de déterminer la direction de l'origine d'un son. En ce qui concerne la vision, il existe quatre types d'indices permettant la perception du relief : les indices monoculaires statiques, au nombre de 7, les parallaxes de mouvements, les indices binoculaires et les indices proprioceptifs (Figure 9).

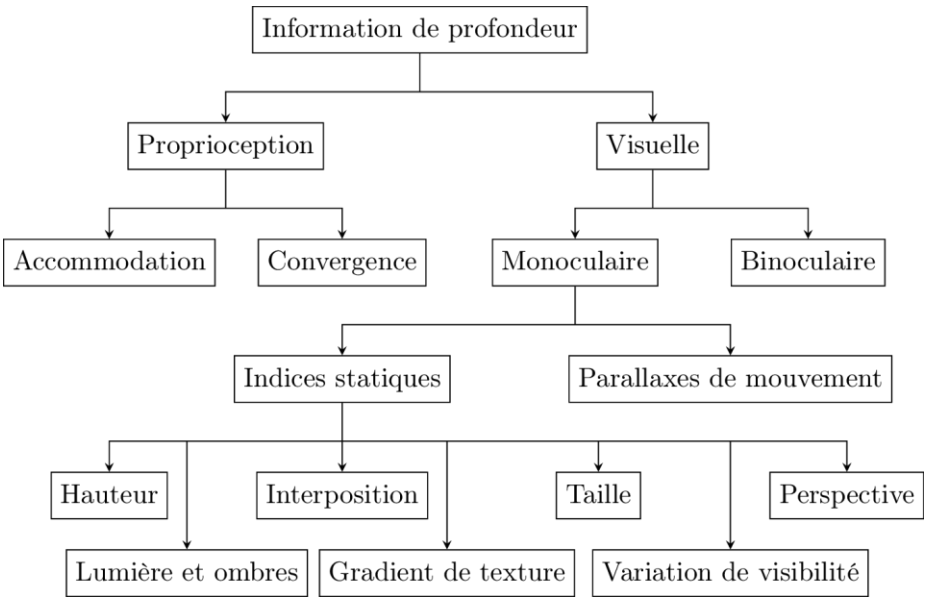

Figure 9 : indices visuels de la perception de la profondeur (image provenant de (Fuchs et al. 2006)**)**

3. Lien entre l'accommodation et la convergence

Précédemment, nous avons vu deux caractéristiques importantes du système visuel : la convergence et l'accommodation. Sur la Figure 10, nous voyons les relations entre le flou perçu, les disparités, l'accommodation et la convergence. Nous pouvons distinguer deux boucles : une pour l'accommodation (au-dessus) et une pour la convergence (au-dessous). Chaque boucle comporte deux composantes, une composante rapide et une composante lente. Les composantes rapides servent lors des grands mouvements de vergence de l'œil, les composantes lentes servent à affiner l'accommodation et la vergence pour respectivement avoir une image plus nette et maintenir une vision simple de l'objet regardé.

En vision naturelle, la convergence et l'accommodation se font sur le point regardé. Il existe une synergie entre ces deux caractéristiques, c'est-à-dire que tout changement d'accommodation entraîne une réponse en vergence et tout changement en vergence entraîne une réponse accommodative. Sur la Figure 10, cette synergie est indiquée par les liens CA/C (en bleu) et AC/A (en rouge). Le rapport CA/C indique la quantité d'accommodation induite par unité de vergence. De même, le rapport AC/A indique la quantité de vergence induite par unité d'accommodation.

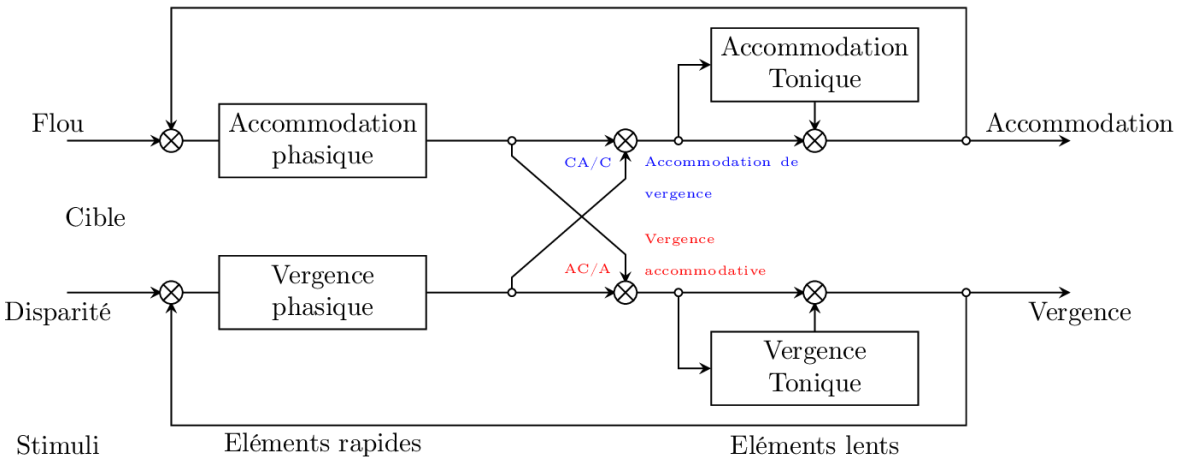

Figure 10 : lien entre l'accommodation et la vergence, modèle simplifié de Schor (Schor & Kotulak 1986) **(fait par Neveu** (Neveu et al. 2009)**).**

Nous avons rappelé quelques aspects du système visuel. Nous allons maintenant voir comment la vision est reproduite lors des rendus sur un écran.

4. Restitution visuelle

Nous avons vu comment le système visuel humain fonctionne, nous allons maintenant voir comment imiter cette vision de manière numérique et restituer un environnement virtuel sur un écran. Nous allons d'abord voir une méthode de rendu monoscopique, nous nous intéresserons ensuite à une méthode de rendu stéréoscopique.

4.1. Restitution monoscopique

Une métaphore souvent utilisée pour expliquer les techniques de rendu est la métaphore de la fenêtre : un écran est une « fenêtre » ouverte sur un monde virtuel. Nous allons donc afficher sur l'écran les objets contenus dans une pyramide dont le sommet est à la position de la caméra virtuelle et dont la forme est déterminée par les caractéristiques (taille, position, orientation) de l'écran. Comme l'écran est rectangulaire, la base de la pyramide est aussi rectangulaire.

Pour des raisons de calculs, nous fixons une distance maximale au-delà de laquelle les objets ne seront plus affichés. Le plan perpendiculaire à l'axe optique de la caméra et situé à cette distance s'appelle le *far plane*. On définit également un plan appelé *near plane* situé entre la caméra et le *far plane* sur lequel sont projetés tous les objets situés entre les deux plans. Le volume situé entre le *near plane* et le *far plane* et à l'intérieur de la pyramide décrite précédemment est appelé le *frustum* de visualisation (*viewing frustum* en anglais). On peut définir un *frustum* par la distance au *near plane*, la distance au *far plane*, les angles de vue des côtés gauche, droit, haut, bas de la caméra. Un exemple de *frustum* est donné sur la Figure 11.

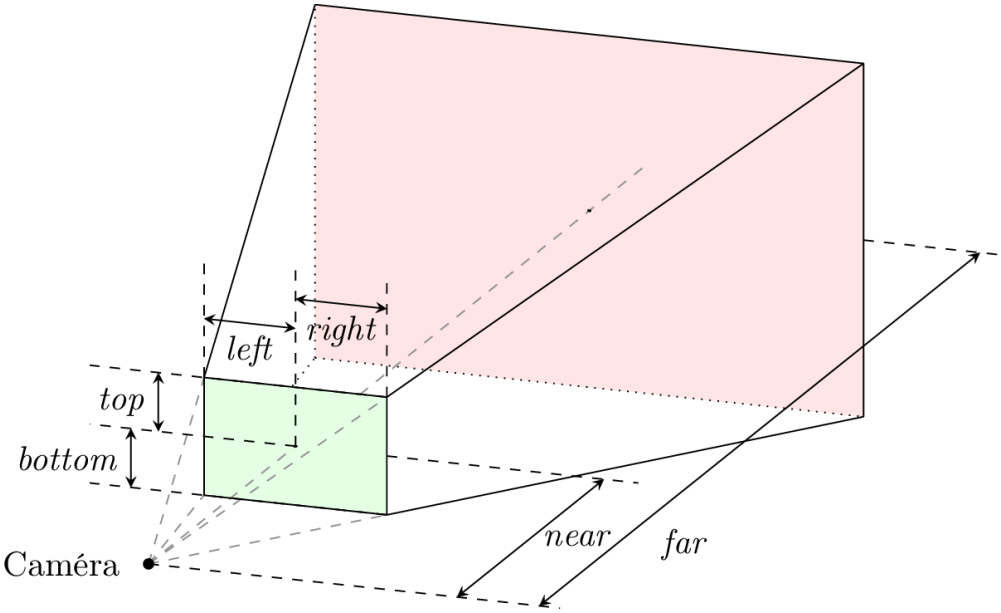

Figure 11 : un *frustum* est défini par les distances *near*, *far*, *left*, *right*, *bottom* et *top*. Le *far plane* est en rose, le *near plane* est en vert.

Les méthodes de rendu actuelles transforment le *frustum* de visualisation en un cube unitaire en multipliant les points constituant les objets par une matrice, la matrice de projection. Pour un *frustum* comme celui de la Figure 11, la matrice de projection est la suivante[1] :

$$\begin{pmatrix} \frac{2 \times near}{right - left} & 0 & \frac{right + left}{right - left} & 0 \\ 0 & \frac{2 \times near}{top - bottom} & \frac{top + bottom}{top - bottom} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{far + near}{far - near} & -\frac{2 \times far \times near}{far - near} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Généralement, pour les rendus sans suivi de point de vue, on prend $right = -left$ et $top = -bottom$ pour simplifier les calculs. La matrice de projection devient :

$$\begin{pmatrix} \frac{near}{right} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{near}{top} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{far + near}{far - near} & -\frac{2 \times far \times near}{far - near} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Lorsque les objets sont projetés sur le *near plane*, qui est rectangulaire, il suffit de redimensionner le résultat pour avoir le rendu à l'écran.

[1] Le détail de l'obtention de cette matrice est visible sur le site web suivant : http://www.songho.ca/opengl/gl_projectionmatrix.html

4.2. Restitution stéréoscopique

Frustums

Pour avoir un rendu stéréoscopique, il faut mettre deux caméras dans la scène virtuelle, une pour chaque œil. La distance entre les caméras est choisie suivant le cas d'utilisation. Dans le cas d'un rendu à l'échelle 1, la distance entre les deux caméras doit être égale à la distance interoculaire. Pour avoir un rendu correct, il faut adapter les *frustums* de chaque caméra pour qu'ils prennent en compte le décalage des caméras, comme sur la Figure 12. Ces *frustums* sont appelés des *frustums* asymétriques. Les *frustums* asymétriques sont également utilisés pour des rendus monoscopiques ou stéréoscopiques avec suivi de point de vue. Il suffit de prendre en compte la position de la tête dans les équations.

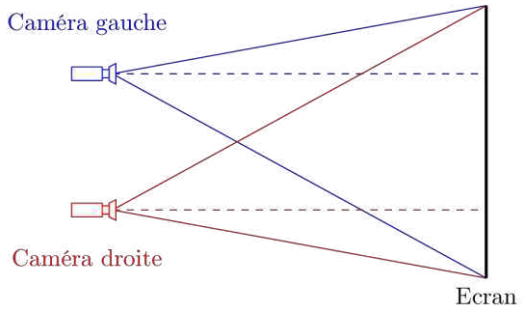

Figure 12 : les *frustums* pour la caméra gauche et pour la caméra droite sont différents et asymétriques.

Axes optiques des caméras virtuelles

Comme nous le voyons sur la Figure 12, les axes optiques des caméras sont perpendiculaires à l'écran réel. Si les caméras convergent par exemple au niveau de l'écran, cela créera des déformations, appelées parallaxes verticales. Un exemple de parallaxe verticale est visible sur la Figure 13.La convergence des caméras doit servir à reproduire la convergence des yeux. Cependant, elle n'est pas utilisée dans les méthodes actuelles de rendu, car l'ordinateur ne sait pas quelle partie de l'écran l'utilisateur regarde. Ainsi, pour éviter à l'utilisateur de regarder une image déformée et provoquer de la fatigue, les méthodes de rendu stéréoscopique actuelles utilisent des caméras avec des axes optiques parallèles.

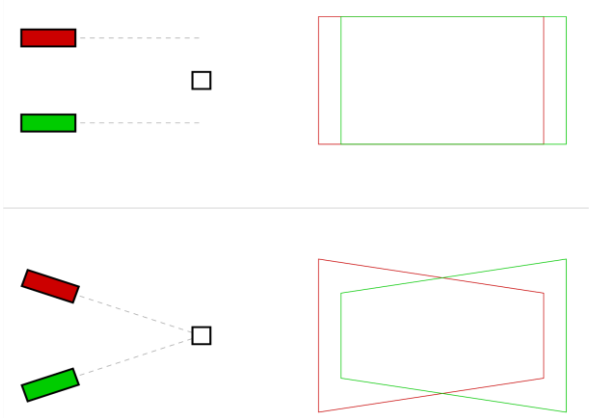

Figure 13 : effet des parallaxes verticales sur la face avant d'un cube. En haut, les caméras sont parallèles (gauche) et le cube est vu comme deux carrés (droite). En bas, les caméras convergent sur la face avant du cube (gauche) et cette face est affichée comme étant deux trapèzes (droite).

Après avoir vu le fonctionnement de la vision humaine ainsi que de la restitution stéréoscopique, nous allons maintenant voir les différences entre les deux, et comment rapprocher cette vision artificielle de la vision naturelle.

Chapitre 3

État de l’art de la fatigue visuelle en vision artificielle

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons abordé les différents mécanismes de la vision naturelle et de la vision artificielle. Ces mécanismes sont mis en œuvre lors de la vision de contenus stéréoscopiques. Toutefois, la création et l'affichage de contenu stéréoscopiques possèdent des caractéristiques différentes de la vision naturelle. Il est admis dans la communauté que ces différences dérangent le comportement du système visuel et peuvent provoquer une gêne, une fatigue ou des problèmes physiologiques passagers. Forts de ce constat, nous pouvons nous poser les questions suivantes : qu'est-ce que la fatigue visuelle ? Comment la détecter et la mesurer ? Et surtout, existe-t-il des méthodes pour la diminuer, ou même la supprimer complètement ? Ce sont ces questions auxquelles nous allons tenter de répondre dans ce chapitre.

Ce chapitre est articulé en deux parties. Dans la première partie, nous allons expliquer les différentes causes de fatigue visuelle, ainsi que des méthodes permettant de la réduire. Dans la seconde partie, plusieurs méthodes pour mesurer la fatigue visuelle seront comparées et nous présenterons le protocole de mesure choisi pour nos expérimentations.

2. Causes de la fatigue visuelle en vision stéréoscopique

2.1. Fatigue visuelle et confort visuel en vision stéréoscopique

Dans la littérature, la plupart des études ne font pas la différence entre le confort visuel et la fatigue visuelle. Toutefois (Lambooij et al. 2007) décrivent bien la différence entre les deux. D'après leur article, la fatigue visuelle est une diminution des performances du système visuel pouvant être mesurée objectivement, alors que le confort visuel est son pendant subjectif. Par la suite, nous ferons la différence entre fatigue visuelle et confort visuel.

2.2. Différentes causes de fatigue visuelle

Parmi les différentes causes de fatigue visuelle, certaines sont d'ordre technologique comme le *crosstalk* (problème de séparation entre les deux images) (Lambooij et al. 2007). D'autres sont liées à la méthode d'acquisition par caméras qui provoque des asymétries dans les deux images. Ces asymétries peuvent être des rotations, des translations, par exemple (Kooi & Toet 2004).

Ces problèmes liés aux méthodes d'acquisition sont très importants. Cependant, comme nous travaillons sur des méthodes de rendus purement informatiques, nous ne nous pencherons pas plus sur ces problématiques. De même, nous ne nous intéresserons pas aux problèmes technologiques, car ceux-ci ne peuvent pas être résolus avec des méthodes de rendu.

2.3. Conflit vergence accommodation

La principale cause de la fatigue visuelle provient d'une différence importante entre la vision naturelle et artificielle appelée le conflit vergence accommodation. En vision naturelle, lorsque nous regardons un objet, la convergence des yeux et l'accommodation se font sur ce même objet. En revanche, en vision artificielle stéréoscopique, alors que les axes optiques des yeux se croisent en un point situé sur l'objet regardé, l'accommodation se fait sur l'écran (Figure 14). Cette différence de distances provoque le conflit vergence accommodation. Ce conflit altère le lien entre l'accommodation et la vergence décrit dans le chapitre précédent (voir page 23), ce qui peut entrainer des problèmes de vision, tout particulièrement chez l'enfant (Rushton & Riddell 1999; ANSES 2014)[2].

[2]Dans un rapport publié en juillet 2014, l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire a recommandé de limiter l'exposition aux technologies 3D stéréoscopique et de ne pas utiliser des technologies 3Ds chez l'enfant de moins de 6 ans.

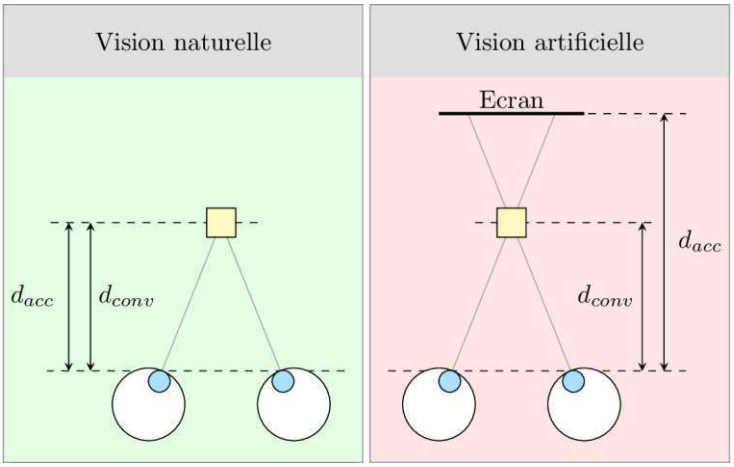

Figure 14 : le conflit vergence accommodation

La Figure 15 montre les résultats des travaux de (Percival 1892; Sheard 1934; Shibata et al. 2011) concernant le confort visuel en fonction de la distance d'accommodation et de convergence. D'après ce graphique, il existe une zone de confort dans laquelle le système arrive à s'accommoder d'une faible différence entre la distance d'accommodation et la distance de convergence. Au-delà de ces zones, le conflit vergence accommodation provoque de l'inconfort.

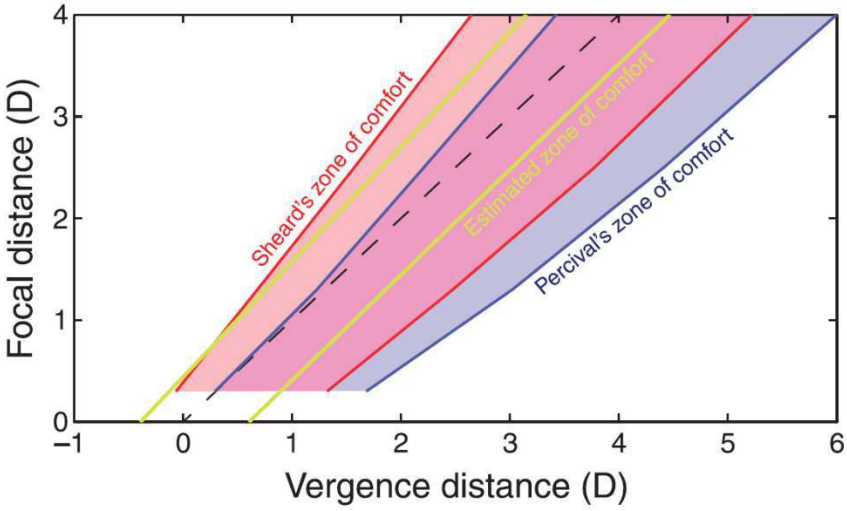

Figure 15 : graphique montrant les zones de confort visuel en fonction des distances d'accommodation et de convergence (Shibata et al. 2011)**. La ligne en pointillés représente le cas où la distance d'accommodation et la distance de convergence sont les mêmes (cas de la vision naturelle).**

2.4. Contraintes liées au conflit vergence accommodation

Généralités

Lorsqu'une personne voit un objet proche de lui en vision stéréoscopique artificielle, il se crée de grandes disparités horizontales au niveau de ses yeux. Sur la Figure 16, des disparités importantes (en rouge, de valeurα_R) vont provoquer plus de fatigue visuelle que des disparités moins importantes (en bleu, de valeur α_B) à cause d'un conflit vergence accommodation plus important. Bien que la limite des disparités acceptable pour avoir un certain confort visuel varie selon les individus, (Lambooij et al. 2011) la situe aux alentours de $\alpha = 0.75°$ pour certaines personnes. Globalement, les études indiquent une valeur de disparité de $\alpha = 1°$ comme limite de confort (Bando et al. 2011). Notons que des disparités trop importantes empêchent de fusionner les images gauches et droites, provoquant une vision double et donc de la fatigue visuelle. Pour cette limite, (Fuchs et al. 1995)

donnent une valeur de $\alpha = 1{,}2°$ et (Valyus 1966) donne une valeur légèrement supérieure de $\alpha = 1{,}5°$. Fort de ces données, nous considèrerons qu'une disparité supérieure à $\alpha = 1°$ est inconfortable et qu'une disparité supérieure à $\alpha = 1{,}35°$est susceptible de générer une fatigue visuelle importante, voire des troubles visuels passagers.

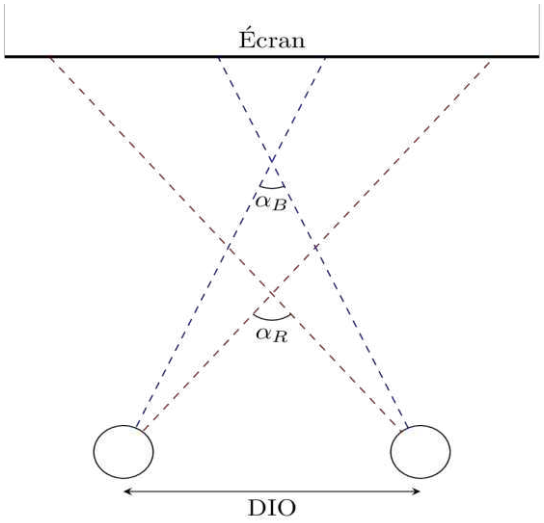

Figure 16 : les grandes disparités (en rouge) augmentent le conflit vergence-accommodation.

Les travaux précédents ont permis de montrer que des disparités élevées provoquent un inconfort visuel. (Speranza et al. 2006) ont également montré qu'une forte variation des disparités provoque une diminution du confort visuel. Dans leur expérience, des boules se déplaçaient perpendiculairement à l'écran à trois vitesses possibles : 130cm/s, 260cm/s et 390cm/s ; les boules se déplaçant rapidement étaient trouvées plus fatigantes que celles se déplaçant lentement (Figure 17).

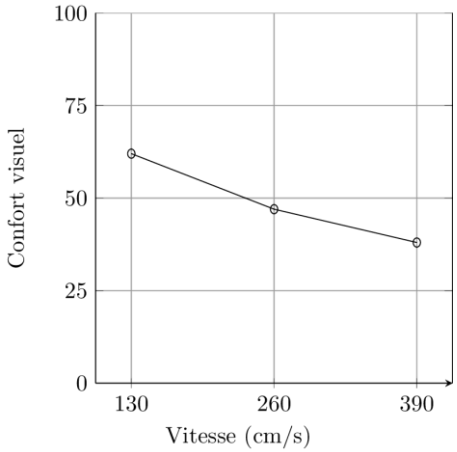

Figure 17 : confort visuel en fonction de la vitesse des objets (Speranza et al. 2006)**.**

Temps d'exposition

Nous avons vu plusieurs facteurs provoquant de l'inconfort ou de la fatigue visuelle. En plus de ces facteurs, le temps d'exposition à un contenu stéréoscopique est un paramètre important pouvant amplifier les problèmes liés à la vision stéréoscopique artificielle. En effet, plus une personne est exposée longtemps à un contenu stéréoscopique, plus elle est fatiguée (Li et al. 2008). Cela est dû à l'effort continu demandé au système visuel pour découpler l'accommodation et la vergence.

Particularités personnelles

Les personnes visionnant des contenus stéréoscopiques ont chacune un système visuel différent. Ces différences influencent sur les capacités à percevoir la stéréoscopie et à s'accommoder au conflit vergence accommodation. Par exemple, pour une disparité donnée, une personne avec une petite distance interoculaire (DIO) percevra un relief plus prononcé qu'une autre personne ayant une grande DIO (Figure 18). En contrepartie, le conflit vergence accommodation sera plus important, provoquant plus rapidement une fatigue visuelle (Lambooij et al. 2007).

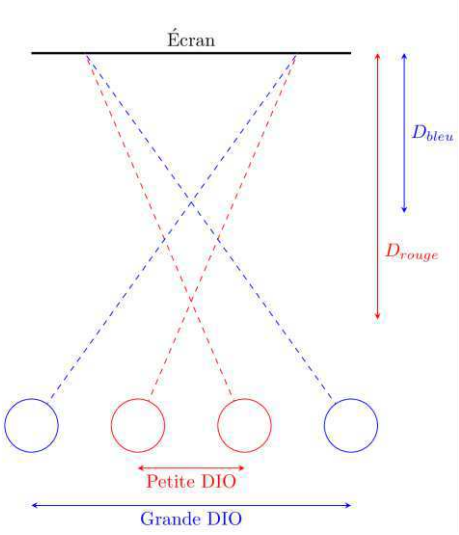

Figure 18 : influence de la DIO sur la perception pour une parallaxe donnée. Une petite DIO (en rouge) permet de percevoir les objets plus proches qu'une grande DIO (en bleu). Toutefois, le conflit vergence accommodation est plus important dans le cas d'une petite DIO ($D_{rouge} > D_{bleu}$).

Une autre source possible de fatigue visuelle est l'acuité stéréoscopique des personnes. (Lambooij et al. 2011) ont en effet séparé leurs sujets en deux groupes à l'aide d'un questionnaire : un avec une bonne acuité stéréoscopique et l'autre avec une acuité stéréoscopique moyenne. Lorsqu'ils ont comparé les résultats de fatigue des deux groupes, ils ont trouvé que le groupe possédant une acuité stéréoscopique moyenne était plus incommodé que celui avec une bonne acuité stéréoscopique (Figure 19). Cela s'explique par le fait que le travail demandé au système visuel est plus important lorsque les personnes ont une faible acuité stéréoscopique.

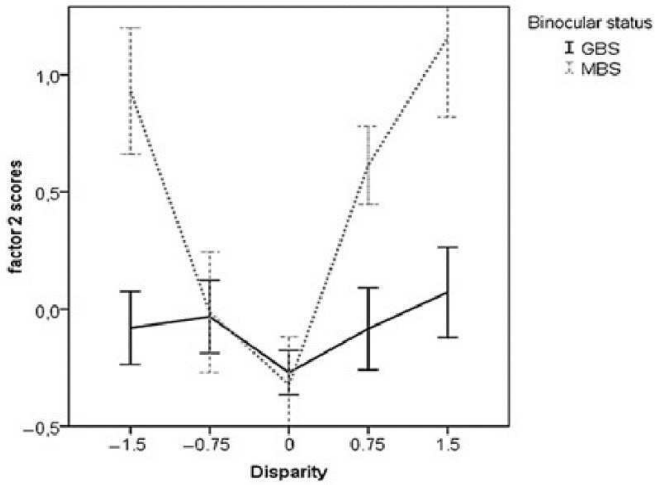

Figure 19 : score à un questionnaire sur le confort visuel. Comparaison entre des personnes ayant une bonne acuité stéréoscopique (GBS) et d'autres ayant une acuité stéréoscopique moyenne (MBS) (Lambooij et al. 2011).

Contenu visualisé

Nous avons vu que des facteurs techniques ainsi que physiologiques peuvent provoquer une fatigue visuelle. Maintenant nous allons voir que le contenu stéréoscopique lui-même peut provoquer une fatigue. En effet, Wöpking a étudié le confort en fonction des fréquences spatiales et des disparités présentes dans un couple d'images stéréoscopiques (Wopking 1995). Il a présenté à 12 sujets une paire d'images stéréoscopiques dont les contenus en fréquences spatiales et en disparités étaient calibrés. Les sujets devaient fixer un objet réel plat attaché au centre d'un écran. Sur l'écran, une photographie avec des disparités évoluant de 0 à 140 secondes d'arc était affichée. Le contenu en fréquences spatiales était contrôlé en réglant la focale du projecteur : elles s'étalaient de 1 à 23 cycles par degré. Les sujets devaient alors évaluer leur inconfort de -2 (très incommodant) à 2 (imperceptible). Cette étude a ainsi montré que des grandes disparités et/ou des hautes fréquences spatiales diminuent le confort stéréoscopique du testeur. Roumes a réalisé une expérience similaire, en utilisant un stimulus légèrement différent, et a obtenu le même résultat (Roumes 1995).

Perrin a interpolé les données de Wöpkins et a obtenu une fonction de confort stéréoscopique en fonction de la disparité et de la fréquence (Perrin 1998). La représentation graphique obtenue de cette fonction illustre clairement le lien entre le confort stéréoscopique, les disparités et les fréquences spatiales (Figure 20). Selon ce graphique, une image contenant des grandes disparités et des hautes fréquences spatiales implique une visualisation moins confortable.

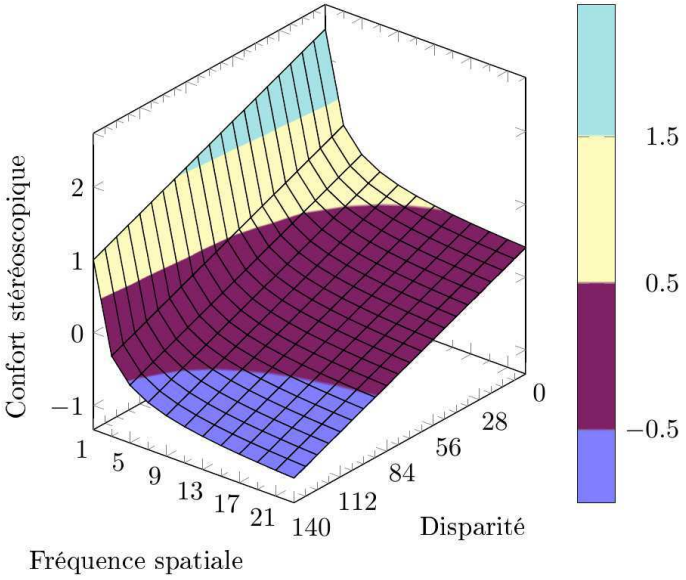

Figure 20 : confort stéréoscopique en fonction des disparités et de la fréquence spatiale (Perrin 1998).

3. Diminution de la fatigue visuelle

Nous venons de voir plusieurs facteurs influençant les capacités visuelles. S'il est parfois possible de limiter l'effet de ces facteurs (limiter le temps d'exposition par exemple), d'autres sont plus difficiles à limiter. Nous allons maintenant passer en revue plusieurs méthodes permettant de soulager le système visuel en réduisant l'impact de ces contraintes.

Pour contrer cet effet, (Hillaire et al. 2007; Hillaire et al. 2008) ont flouté les objets situés loin du point de regard et en vision périphérique de l'utilisateur. Trois conditions ont été testées : une condition de contrôle, une condition avec un flou en fonction de la profondeur et une troisième condition avec un flou en fonction de la profondeur et du point de regard. Ils ont ensuite proposé à des testeurs de jouer à des parties d'un jeu (Quake III) et d'évaluer le confort visuel ressenti en

répondant à quatre questions (Comment jugez-vous le réalisme, l'amusement, la perception de la profondeur et l'impression d'immersion ?) ainsi que les performances lors de ce jeu. D'après leurs résultats, les performances des joueurs ne dépendent pas de la présence ou non du flou. Parmi les participants, certains ont préféré lorsque le flou était présent et d'autres ont préféré lorsque le flou était absent. Les testeurs ont trouvé le jeu plus réaliste, plus amusant, avec une meilleure perception de profondeur et une meilleure immersion lorsque le flou était présent (Figure 21).

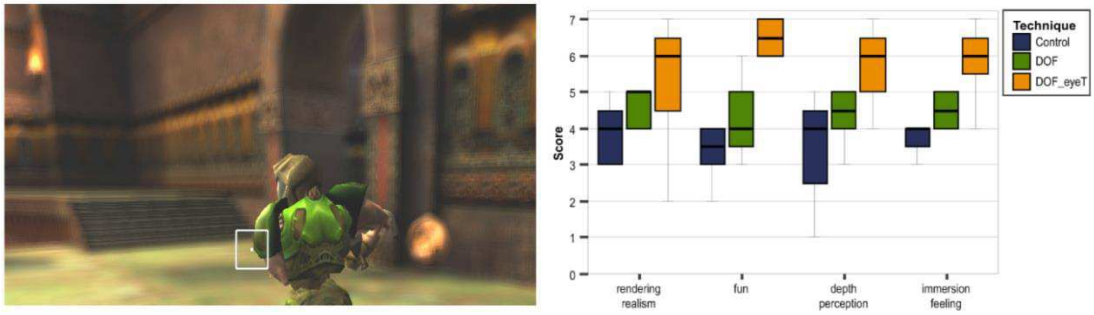

Figure 21 : à gauche, l'environnement de test. La position du regard de l'utilisateur est au point blanc dans le carré blanc. À droite, le résultat de l'expérimentation : score du ressenti des utilisateurs pour (de gauche à droite) le réalisme, l'amusement, la perception de la profondeur et l'impression d'immersion (Hillaire et al. 2008)**.**

Pour atténuer ce problème causé par les hautes fréquences spatiales, Leroy a flouté les objets situés aux endroits de grandes disparités (Leroy et al. 2010). Dans son expérimentation, les utilisateurs devaient poser une sphère sur un cylindre désigné avec un carré rouge parmi cinq cylindres possibles. Tous les objets de la scène ont des textures contenant des hautes fréquences (Figure 22).

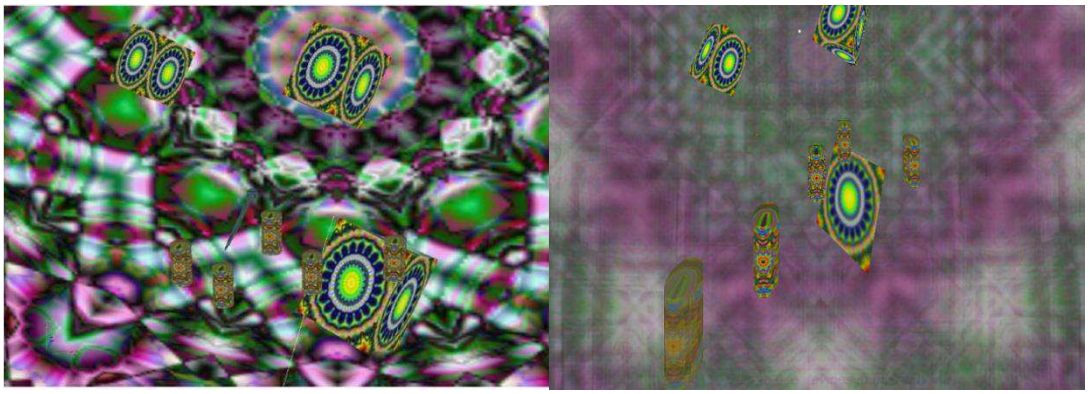

Figure 22 : expérimentation de (Leroy et al. 2010)**. À gauche, la scène originale. À droite, la scène avec un flou appliqué aux objets ayant des grandes disparités. Le cylindre du milieu est au niveau de l'écran : il est toujours vu net.**

Dans cette expérimentation la fatigue visuelle était évaluée en mesurant les capacités du système avant et après l'expérience et en comparant les deux résultats. Les résultats montrent que l'ajout d'un flou sur les objets ayant des disparités élevées permet de diminuer la fatigue visuelle (Figure 23).

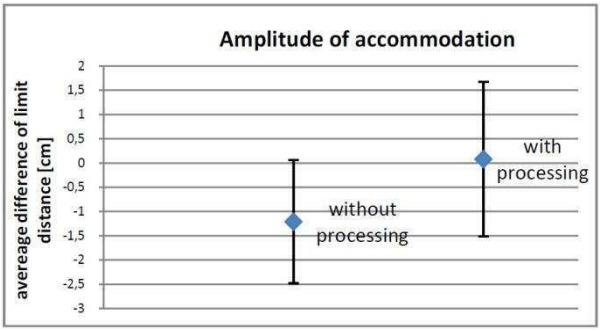

Figure 23 : résultat du test de la fonction proximum d'accommodation. Sans traitement les sujets perdent en moyenne 1,21cm ce qui indique une baisse des capacités du système visuel. Avec traitement, la fonction proximum d'accommodation n'est pratiquement pas modifiée (Leroy et al. 2010).

Dans une autre étude, (Blum et al. 2010) ont ajouté un flou en fonction de la profondeur par rapport au point de regard à des images stéréoscopiques réelles et virtuelles à la fois sur un visiocasque (HMD[3]) et sur un écran stéréoscopique. Des participants ont ensuite noté la qualité des images visualisées. Leurs résultats ont montré que dans le cas d'une scène virtuelle, les images traitées avec un flou sont perçues de meilleure qualité.

Dans les affichages stéréoscopiques classiques, la distance d'accommodation reste toujours la même. (Akeley et al. 2004) ont construit un dispositif autorisant plusieurs distances d'accommodation sans connaître l'endroit regardé par l'utilisateur. Avec ce dispositif, les stimuli sont perçus plus rapidement, l'acuité stéréoscopique est augmentée pour une tâche limitée dans le temps et la fatigue et l'inconfort visuels sont diminués(Hoffman et al. 2008). Cependant, ces dispositifs ne permettent pas de reproduire correctement l'occultation ni le champ lumineux d'une scène réelle, ce qui diminue la sensation de relief (Matusik & Pfister 2004).

4. Mesure de fatigue et de confort visuels

Les études précédentes ont permis d'observer que la fatigue visuelle est l'une des conséquences néfastes d'une exposition à un affichage stéréoscopique. Toutefois, aucune méthode directe de mesure de fatigue visuelle n'a été mise en évidence. Nous allons donc employer l'approche utilisée dans les autres références : nous allons mesurer les capacités du système visuel avant et après une expérimentation pour connaître la fatigue visuelle induite par cette expérimentation.

Il existe différentes méthodes pour mesurer les capacités du système visuel chez un sujet. Dans ce paragraphe, nous allons décrire plusieurs de ces méthodes. Ces méthodes peuvent être classées dans deux catégories : les mesures subjectives et les mesures des capacités oculomotrices. Les mesures subjectives ont pour but de connaître des symptômes issus des sensations de l'utilisateur. Les mesures objectives ont pour but d'observer directement les capacités du système visuel de l'utilisateur.

[3] Abréviation utilisée pour désigner un visiocasque (*Head Mounted Display* en anglais).

4.1. Mesures subjectives

Certains symptômes peuvent être utilisés pour caractériser une fatigue visuelle. (Blehm et al. 2005) ont classé des symptômes en quatre catégories (Tableau 1).

Asthénopiques	Yeux douloureux
	Vision difficile
	Inflammation des yeux
Lié à la surface oculaire	Yeux secs
	Yeux larmoyants
	Yeux irrités
	Problèmes de lentilles de contact
Visuel	Vision floue
	Difficultés d'accommodation
	Vision double
	Presbytie
Extraoculaire	Cou douloureux
	Dos douloureux
	Épaules douloureuses

Tableau 1 : liste de symptômes de fatigue visuelle (Blehm et al. 2005)[4].

Ces symptômes permettent d'avoir une estimation grossière de la fatigue visuelle. Par exemple, des yeux larmoyants peuvent être provoqués par une fatigue visuelle importante.

Pour savoir si une personne ressent ces symptômes, des questions lui sont posées et le sujet doit répondre par une note, généralement sur une échelle de Likert. Cette méthode est préconisée par l'Union International des Télécommunications (ITU) au travers de la recommandation ITU-R BT 2021 (ITU 2012). De telles procédures ont été utilisées par (Kooi & Toet 2004) et (Blum et al. 2010).

4.2. Mesures des capacités oculomotrices

Outre les mesures subjectives vues précédemment, il est possible d'avoir la confirmation des résultats obtenus par des mesures quantitatives plus précises en testant les capacités du système visuel. Nous allons passer en revue plusieurs de ces tests.

4.2.1. Acuité visuelle

Anneaux de Landolt

Les anneaux de Landolt sont un des optotypes utilisés dans les laboratoires. Ce test mesure l'acuité visuelle d'une personne. Un anneau de Landolt est un cercle comportant une ouverture. Le diamètre du trait du cercle ainsi que la largeur de l'ouverture sont égaux à un cinquième du diamètre extérieur du cercle ((Danilova & Bondarko 2007), Figure 24, partie gauche).

Figure 24 : anneaux de Landolt (à gauche) et E de Raskin (à droite).

[4] Traduit depuis l'anglais

L'ouverture peut être orientée de huit manières différentes selon les points cardinaux. On place le sujet devant un tableau blanc. Des anneaux de Landolt sont affichés sur le tableau, chaque ligne ayant sa propre taille. Le sujet se place à une certaine distance du tableau et doit dire dans quel sens est l'ouverture du cercle. Plus il reconnait les ouvertures dans les anneaux de petite taille, meilleure est son acuité visuelle. Un autre optotype couramment utilisé est le 'E' de Raskin (Figure 24, partie droite).

Tableau de Snellen

Un autre exemple d'optotype bien connu est le tableau de Snellen. Dans ce test, une affiche comportant des lignes de lettres dans différentes tailles (Figure 25) est présentée à une personne à plusieurs mètres de celle-ci. La personne doit lire les lettres de la plus grosse police à la plus petite police. Lorsqu'elle n'arrive plus à lire les lettres correctement, elle a atteint la limite de son acuité visuelle.

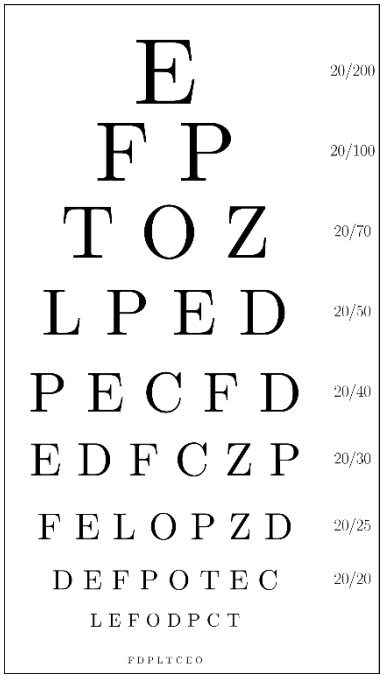

Figure 25 : tableau de Snellen

4.2.2. Acuité stéréoscopique

Points de Wirt

Ce test permet de mesurer l'acuité stéréoscopique d'un sujet avec une photo polarisée d'un point parmi un ensemble de 4 points et dans une série de 9 figures (Figure 26). Dans ce test, le sujet porte des lunettes stéréoscopiques. Il doit indiquer quel point est en relief par rapport aux autres. Par exemple, dans la partie 1 de la Figure 26, le sujet voit le point du bas se surélever par rapport aux autres points. Les acuités mesurées peuvent varier de 800 secondes d'arc pour le test numéro 1 à 40 secondes d'arc pour le test numéro 9. Une mesure avant l'effort est prise pour avoir une référence. Une deuxième mesure est prise après l'expérience. Un sujet fatigué par une expérience verra sa deuxième mesure inférieure à la première. En revanche, si sa fatigue est limitée, les deux mesures seront assez proches, ou identiques.

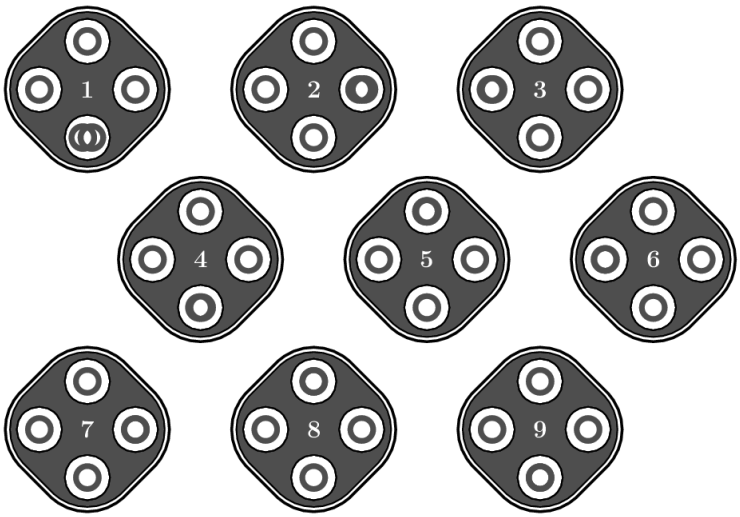

Figure 26 : test des points de Wirt.

Test de la mouche

Le test de la mouche permet également de mesurer l'acuité stéréoscopique d'une personne. Dans ce test, le sujet observe une mouche avec des lunettes stéréoscopiques polarisées (Figure 27). Les ailes de la mouche sont situées à 2 ou 3 centimètres de la surface de l'image. Il est demandé au sujet d'attraper les ailes de la mouche avec ses doigts. La rapidité d'exécution et la hauteur de la main sont notées. De même que le test précédent, un sujet fatigué aura plus de mal à trouver le bout de l'aile de la mouche qu'un sujet reposé. Toutefois, les mesures précises de la hauteur de la main ainsi que du temps d'exécution sont assez difficiles et imprécises.

Figure 27 : test de la mouche.

4.2.3. Capacités accommodatives

Fonction proximum d'accommodation

Ce test permet de connaître le *punctum proximum* d'accommodation, qui est le point net le plus proche des yeux. Si ce point est éloigné des yeux de l'utilisateur, cela signifie que la personne a des difficultés à accommoder donc que son système visuel a une amplitude d'accommodation réduite.

Pour réaliser cette mesure, on place une mire ou un texte à 40cm des yeux du sujet et on la rapproche à une vitesse comprise entre 5 et 7.5cm par seconde. Lorsque la mire devient floue pour le sujet, il le signale et nous mesurons la distance entre ses yeux et la mire. Une distance mesurée importante indique une faible amplitude d'accommodation. Pour plus de précision, ce test peut être effectué plusieurs fois successivement, la distance retenue est alors la distance moyenne.

Pour connaître la fatigue visuelle induite par une expérience, il faut faire ce test avant puis après l'expérience et comparer les deux résultats. S'il y a une différence entre les deux mesures, cela signifie que les capacités du système visuel ont évolué. Plus la mesure est basse, plus la capacité d'accommoder à courte distance est faible (Benjamin 2006).

Test de facilité d'accommodation

Ce test est aussi connu comme étant le « Flipper Lens Test ». En réalisant ce test, nous mesurons le temps nécessaire pour accommoder rapidement à un nouveau stimulus. Pour cela, nous plaçons une mire à 40cm des yeux du sujet (le sujet garde ses lunettes ou ses lentilles s'il en a), ainsi que des lentilles de +2 dioptries (Figure 28) entre les yeux du sujet et cette mire. Lorsque l'accommodation s'est faite sur la mire, c'est-à-dire que la personne voit net, nous remplaçons les lentilles de +2 dioptries par des lentilles de -2 dioptries et la personne doit à nouveau signaler lorsqu'elle voit la cible nette. Sur la durée du test (30 secondes), il y a une alternance entre les lentilles de -2 et +2 dioptries. À la fin des 30 secondes, le nombre de changements de lentilles est relevé. Le nombre moyen de cycles est de 5. Un nombre inférieur de cycles signifie que le système visuel du sujet est fatigué (Benjamin 2006).

Figure 28 : les lentilles du "Flipper Lens Test".

4.2.4. Limite de fusion

Pour mesurer la limite de fusion des deux images, la recommandation ITU-R BT 2021 propose un test constitué d'une paire stéréoscopique de barres présentées sur un fond noir (Figure 29). La disparité entre les barres augmente ou diminue au cours du temps et le sujet indique lorsque la barre se dédouble ou inversement (ITU 2012). Si un sujet est fatigué, la barre se dédoublera plus rapidement que s'il n'est pas fatigué. Dans ce test, nous mesurons la disparité à partir de laquelle l'objet est perçu double (si l'objet se rapproche) ou la distance à partir de laquelle l'objet est perçu simple (dans le cas de la divergence). Comme cette mesure donne la disparité limite pour la fusion, elle permet de quantifier la capacité de fusion du système visuel. Cette mesure étant sujette au phénomène d'hystérésis, elle doit se faire en convergence et en divergence. Nous faisons ensuite la moyenne des deux pour déterminer la valeur de la limite de fusion.

Figure 29 : le test proposé par (ITU 2012) **pour mesurer la limite de fusion.**

4.2.5. Mesures physiques

Clignement des yeux

Cette méthode consiste à mesurer le nombre de clignements des yeux de l'utilisateur durant l'expérimentation. Plus les yeux sont fatigués et plus il y aura de clignements (Kaneko & Sakamoto 2001). Pour mesurer le clignement des yeux, un logiciel est nécessaire, car l'observation manuelle est sujette à erreurs. Cette méthode est également sensible aux erreurs de détections du matériel utilisé.

Mesure de l'activité cérébrale

Pour mesurer la fatigue visuelle, (Li et al. 2008) ont mesuré les ondes bêta émises par le cerveau à l'aide d'un électroencéphalogramme. Ils ont montré que la puissance des fréquences des ondes bêta est représentative de la fatigue visuelle : plus cette puissance est grande, plus la fatigue visuelle est importante.

Mesure de la température faciale

Récemment, (Bang et al. 2014) ont surveillé la température faciale ainsi que d'autres paramètres (clignement des yeux, activité cérébrale, questionnaire) sur des personnes visionnant un contenu stéréoscopique fatigant. D'après leurs résultats, une diminution d'amplitude de température indique une augmentation de fatigue visuelle. Nous n'avons trouvé aucune autre équipe utilisant cette méthode pour mesurer la fatigue visuelle.

4.3. Choix des mesures

Nous avons vu plusieurs méthodes pour connaître l'état du système visuel d'une personne à un moment donné. Ces méthodes montrent bien qu'il est très difficile et délicat de mesurer la fatigue visuelle pour deux raisons : il existe de grandes variations entre les individus, certains tests sont très difficiles à mettre en œuvre pour différentes raisons et provoquent eux-mêmes de la fatigue, car ils testent les limites du système visuel. Suivant les données récoltées dans les différentes études, nous pouvons comparer les différentes mesures dans le Tableau 2 ci-dessous.

	Test normalisé	Matériel spécifique requis.	Influence du sujet	Précision du test	Rapidité de la mesure	Reproductibilité	Test non fatigant	Facilité de la mise en place
Anneaux de Landolt	Oui	Non	Oui	+	+	+	+	+
Tableau de Snellen	Oui	Non	Oui	+	+	+	+	+
Points de Wirt	Oui	Oui*	Oui	+	+	+	+	+
Test de la mouche	Oui	Oui*	Oui	-	+	+	+	+
Punctum proximum d'accommodation	Oui	Non	Oui	-	+	-	-	+
Test du *flipper lens*	Oui	Oui*	Oui	+	+	+	-	+
Limite de fusion	Oui	Non	Oui	+	+	+	-	-
Clignement des yeux	Non	Oui*	Non	-	-	-	+	-
Activité cérébrale	Non	Oui	Non	-	-	-	+	-
Température faciale	Non	Oui	Non	-	-	-	+	-

* : le laboratoire dispose de ce matériel, ce n'est donc pas vraiment une contrainte pour nous

Tableau 2 : comparaison des points positifs (en vert) et négatifs (en rouge) des différentes mesures vues précédemment.

Pour mesurer les variations des capacités du système visuel, nous allons choisir un protocole qui sera utilisé lors de nos expérimentations. Nous voulons mesurer les capacités de vision stéréoscopique du sujet ainsi que les fluctuations au niveau de l'accommodation. Pour ces raisons, les tests « Anneaux de Landolt », « Tableau de Snellen » et « Limite de fusion » seront écartés. Les tests « Activité cérébrale » et « Température faciale » seront également écartés, car ils demandent un matériel très spécifique et qu'il y a encore un peu de reculs sur les conclusions à tirer de ces tests. Par ailleurs, le test « Activité cérébrale » demande des connaissances spécifiques sur les ondes cérébrales qui nous sont inconnues. Après quelques tests, nous nous sommes rendu compte que le « Test de la mouche » ne permettait vraiment pas d'avoir des mesures précises, nous l'avons donc mis de côté. Parmi tous les tests présentés, nous allons donc choisir le test de Wirt, le test du *punctum proximum* d'accommodation ainsi que le test du *flipper lens*.

5. Conclusion

Nous avons vu plusieurs causes de fatigue visuelle ainsi que des méthodes pour les réduire. Parmi ces nombreuses méthodes, (Hillaire et al. 2008) ont donc combiné deux types de flou pour réduire la fatigue visuelle, un flou en vision périphérique et un autre sur les objets éloignés du point de regard. Cependant, nous pouvons nous demander si parmi ces deux traitements, il n'y en aurait pas un qui serait meilleur que l'autre ou influencerait les effets de l'autre. (Leroy et al. 2010) ont démontré que l'application d'un flou sur les objets situés aux grandes disparités permettait de diminuer la fatigue visuelle. Dans ce cas, l'ajout d'un flou en vision périphérique permet-il de réduire également la fatigue visuelle ? Si oui, comment réaliser le meilleur flou en vision périphérique ? Dans le chapitre suivant, nous tenterons de répondre à ces questions.

Plusieurs méthodes pour mesurer la perte de capacités du système visuel ont également été passées en revue. Parmi ces méthodes, trois ont été sélectionnées et seront utilisées pour nos

expérimentations : le test de Wirt, la mesure du *punctum proximum* d'accommodation et le test du *flipper lens*.

Chapitre 4

Effet d'un flou en vision périphérique sur la fatigue visuelle

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons proposer et tester une nouvelle méthode pour réduire la fatigue visuelle. Cette méthode consiste à faciliter l'accommodation d'un utilisateur en floutant sa vision périphérique afin de réduire le conflit vergence accommodation. Pour réaliser ce flou en vision périphérique, nous avons besoin de connaître la direction du regard de l'utilisateur. Deux solutions sont possibles : soit utiliser un oculomètre permettant de connaître le point regardé sur l'écran, soit fixer le regard de l'utilisateur. Dans le premier cas, la latence de l'oculomètre doit être très faible pour que la partie floue de l'écran reste en vision périphérique de l'utilisateur. Dans le deuxième cas, il faut être sûr de l'endroit regardé par la personne. Ces deux solutions seront comparées dans ce chapitre. Une caractéristique importante du flou en vision périphérique est qu'il ne doit pas gêner l'utilisateur. Nous verrons comment traiter les images pour que le résultat soit calculable en temps réel. Nous étudierons également l'influence de la taille de la zone nette sur la performance du traitement proposé.

Ce chapitre sera constitué de deux parties. Dans la première, nous allons proposer une nouvelle méthode permettant de mesurer le temps de latence d'un oculomètre, tester cette méthode sur trois périphériques et choisir le plus rapide pour la suite de nos expérimentations. La deuxième partie se concentrera sur l'étude de l'effet d'un flou en vision périphérique sur la fatigue visuelle.

2. Choix d'un oculomètre

Notre expérimentation consiste à flouter l'environnement virtuel situé en périphérie de la direction du regard. Elle possède une contrainte forte : l'adaptation aux déplacements du regard doit avoir un temps de latence minimal afin de ne pas gêner le système visuel de l'utilisateur. Dans le cas idéal, notre traitement s'adapte en temps réel sans que le sujet en soit conscient. Cette contrainte est une contrainte forte, car l'utilisateur dirige naturellement son regard vers des zones nettes (Kosara et al. 2001; Huynh-Thu et al. 2013) et comme les mouvements de l'œil sont très rapides, l'utilisateur risque de percevoir le flou en vision périphérique.

Dans cette section, nous allons calculer le temps de latence théorique maximal pour éviter cette contrainte. Puis nous allons définir un protocole pour mesurer le temps de latence d'un oculomètre, tester le temps de latence de trois oculomètres et choisir le plus rapide pour la suite de ces travaux.

2.1. Calcul du temps de latence théorique

Puisque l'œil humain perçoit net dans un cône de deux degrés environ (voir Chapitre 1 section 1.1), la zone nette doit être représentée par un cercle sur l'écran. Nous avons donc le schéma de la Figure 30. Supposons que le regard de la personne est au point F au centre de la zone nette et considérons le cas dans lequel le temps de latence du système doit être minimal : l'utilisateur déplace son regard en ligne droite vers l'extérieur du cercle. Dans ce cas précis, l'ensemble du système doit réagir avant que le regard de l'utilisateur n'atteigne la zone floue (au plus tard au point A) pour que l'utilisateur ne perçoive pas le flou.

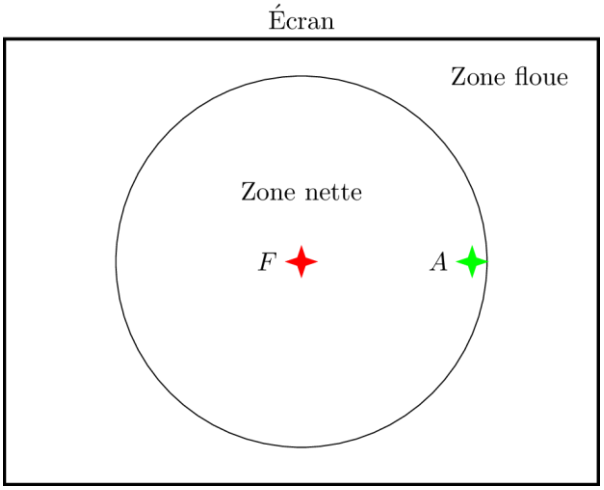

Figure 30 : zone nette et zone floue sur l'écran. L'utilisateur regarde au point F. S'il décide de regarder sur le côté droit de l'écran, l'affichage doit prendre en compte le regard avant qu'il arrive au point A.

Le temps de latence maximal dépend de la taille du cercle entourant la zone nette, de la position de l'utilisateur devant l'écran et de la vitesse de rotation des yeux. Si on note T_{max} le temps de latence maximal (en seconde), d la distance de l'utilisateur à l'écran en mètre, t_{pix} la taille des pixels (en m) sur l'écran, r le rayon de la zone nette en pixel et v_{max} la vitesse angulaire maximale de rotation des yeux, nous avons :

$$T_{max} = \frac{\tan^{-1} \frac{t_{pix} * r}{d}}{v_{max}}$$

Sachant que la vitesse maximale de rotation des yeux est de 500°/s (Yang & Kapoula 2004) et qu'avec le matériel à notre disposition, les pixels ont une taille de 1.6mm x 1.6mm, l'équation devient :

$$T_{max} = \frac{\tan^{-1} \frac{1.6 * r}{1000 * d}}{500}$$

Cette courbe est visible sur la Figure 31. Sur cette figure, nous voyons que plus le sujet s'éloigne de l'écran et plus le rayon de la zone nette augmente, plus le temps limite de latence est grand.

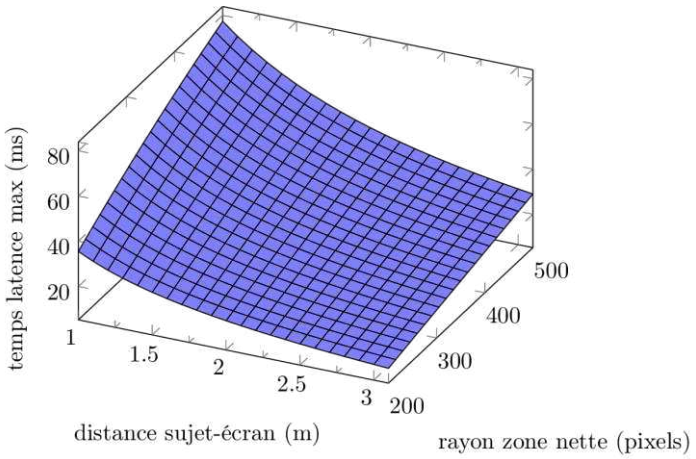

Figure 31 : temps de latence limite en fonction de la distance entre le sujet et l'écran et le rayon de la zone nette.

2.2. Mesure du temps de latence du matériel

Après avoir calculé le temps de latence maximum admissible théorique, nous allons mesurer la latence d'un système composé d'un ordinateur et de plusieurs oculomètres afin de vérifier si leur temps de latence est compatible avec nos besoins. Pour cette mesure, nous allons définir la latence comme étant le temps mis par le système pour détecter et s'adapter à un changement de direction du regard. Ce temps de latence comprendra donc les données suivantes :

- Temps de latence de l'oculomètre ;
- Temps de transmission de l'information de l'oculomètre vers l'ordinateur ;
- Temps de traitement de l'information par l'ordinateur ;
- Temps de rendu en fonction de la nouvelle position du regard ;
- Temps de mise à jour de l'affichage.

Forts de ces informations, nous allons maintenant définir un protocole pour réaliser cette mesure.

2.2.1. Protocole de mesure du temps de latence

(Saunders & Woods 2014) ont proposé une méthode pour mesurer la latence d'un oculomètre. Leur méthode consiste à aveugler brièvement l'oculomètre avec une LED infrarouge. L'oculomètre détecte cet aveuglement et envoie un événement correspondant à l'ordinateur pouvant être utilisé pour changer l'affichage de l'ordinateur. Le temps écoulé entre ces deux événements, l'aveuglement de l'oculomètre et le changement d'affichage, peut être mesuré à l'aide d'une caméra haute fréquence, ce qui donne le temps de latence de l'oculomètre.

Cette méthode est intéressante, car elle prend en compte toutes les étapes que nous avons décrites dans le paragraphe précédent. Toutefois, les oculomètres testés ne différencient pas les erreurs de détection des yeux, les aveuglements par LED infrarouge et la non-détection des yeux. Nous allons légèrement modifier cette méthode pour pouvoir l'appliquer à ces oculomètres.

Dans notre méthode, nous allons simultanément filmer l'œil d'une personne et l'écran de retour à l'aide d'une caméra haute fréquence. Le sujet est positionné dos à l'écran et l'oculomètre surveille le regard de la personne (Figure 32). Un retour sur un écran matérialisé par une croix ou un point lumineux sur un fond noir indique la direction du regard du sujet.

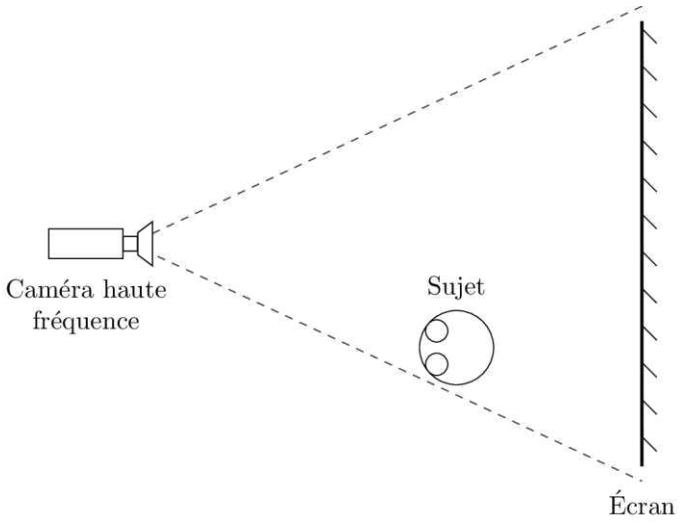

Figure 32 : mesure du temps de latence. Le sujet est dos à l'écran et une caméra haute fréquence filme à la fois les yeux du sujet et l'écran.

Après avoir calibré l'oculomètre, nous demandons au sujet de déplacer son regard en diagonale entre deux points. Sachant le nombre d'images filmées par la caméra entre le moment où le participant bouge son œil et celui du mouvement du retour sur l'écran ainsi que la fréquence d'acquisition de la caméra (120Hz), nous pouvons comparer le temps de latence des oculomètres.

2.2.2. Matériel testé et résultat

Nous avons testé trois périphériques différents :

- Un oculomètre de la société ASL[5], modèle *Head Mounted H6*
- Un oculomètre de la société Tobii[6], modèle Rex, *Developperedition*, *Desktop edition*
- Un oculomètre de la société SMI[7], modèle *Eye Tracking Glasses*

Après avoir testé les périphériques à l'aide du protocole ci-dessus, nous avons obtenu les résultats visibles sur la Figure 33. Ce graphique nous indique que l'oculomètre « Tobii » possède la plus faible latence parmi les trois testés. C'est donc ce modèle que nous allons utiliser par la suite.

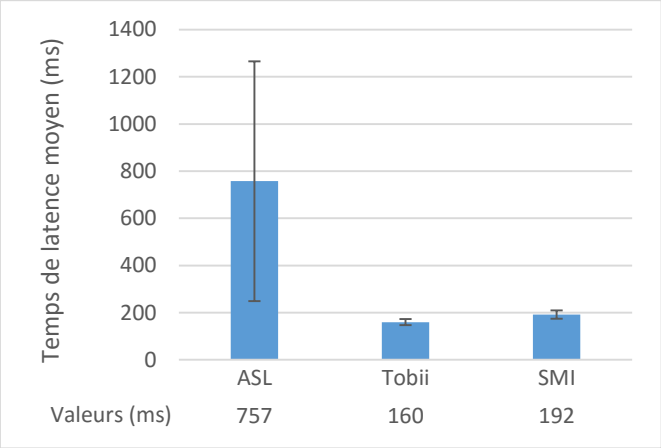

Figure 33 : temps de latence moyen des oculomètres testés.

2.3. Conclusion

Si nous reprenons l'équation du temps de latence théorique en fixant un temps de latence maximal de 160ms, nous obtenons une relation entre le rayon de la zone nette et la distance sujet-écran nécessaire pour avoir le temps de latence voulu. Cette relation est illustrée sur la Figure 34.

[5] http://www.asleyetracking.com/Site/
[6] http://www.tobii.com/
[7] http://www.smivision.com/en.html

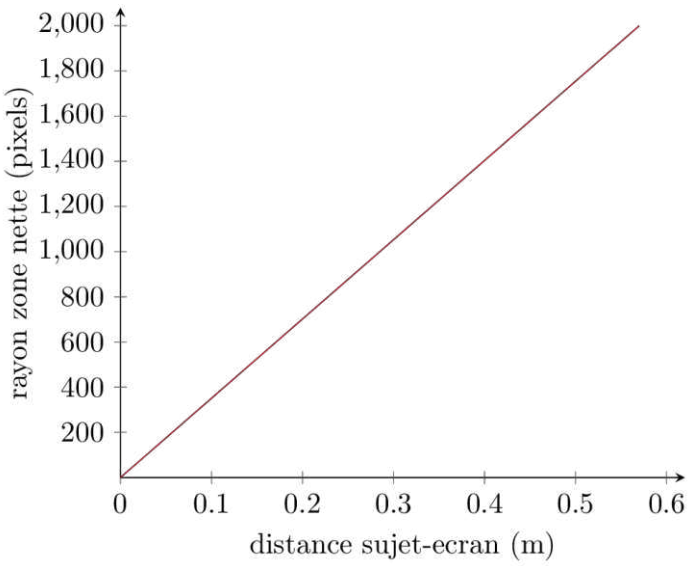

Figure 34 : courbe du rayon de la zone nette en fonction de la distance sujet-écran pour avoir une limite de temps de latence de 160ms.

D'après le graphique de la Figure 34, il faut placer les sujets à moins de $50cm$ de l'écran pour que la latence de l'oculomètre n'influe pas sur les résultats obtenus. Toutefois, l'oculomètre choisi possède une contrainte technique : afin de suivre le regard du participant sur l'ensemble de l'écran, la largeur d'écran doit recouvrir au maximum 36° d'angle visuel. Pour respecter cette contrainte, cela impose de positionner le participant au-delà de$2{,}13m$ de l'écran. Dans le cas contraire, la latence de notre oculomètre aura une influence sur nos résultats.

3. Première expérimentation : effet d'un flou en vision périphérique

3.1. Hypothèse

Nous voulons tester l'effet d'un flou en vision périphérique. Si la vision périphérique est floutée, le système visuel se concentrera davantage sur la zone nette pour accommoder, ce qui relâchera la contrainte accommodative en vision périphérique. Notre hypothèse est donc la suivante : l'ajout d'un flou en vision périphérique va amoindrir le conflit vergence accommodation, provoquant une diminution de fatigue visuelle lors de la visualisation d'un contenu stéréoscopique.

3.2. Les différents types de traitements possibles

Pour vérifier notre hypothèse, il est nécessaire de tester l'effet d'un flou en vision périphérique sur un ensemble d'utilisateurs. Toutefois, il existe plusieurs types de flou possibles. Un flou possède deux caractéristiques : sa localisation et sa méthode de calcul. Dans ce paragraphe, plusieurs techniques concernant ces deux caractéristiques vont être détaillées.

Localisation du flou

La localisation du flou est particulièrement importante, car cela va déterminer les régions du monde virtuel qui seront vues nettes, ce qui peut modifier l'effet sur le système visuel.

En fonction des disparités

Ce flou s'applique aux objets situés aux endroits de grande disparité. En effet, plus la disparité est grande, plus les personnes ont des difficultés à fusionner les images gauches et droites. (Leroy 2009) applique son flou en fonction des disparités et a montré que cette localisation du flou permettait de réduire la fatigue visuelle en vision stéréoscopique.

En fonction de la profondeur

Ce flou est appliqué de la manière suivante : si le sujet regarde un point F et que le point A se trouve à une profondeur différence du point F, le flou est appliqué au point A en fonction de la profondeur relative par rapport au point F. Cette situation est représentée sur la Figure 35 dans laquelle le niveau de gris correspond à la profondeur relative par rapport au point F. Dans son expérimentation, (Hillaire et al. 2008) utilisent une combinaison de flou dont un flou en profondeur et ont démontré qu'il permettait de réduire l'inconfort visuel.

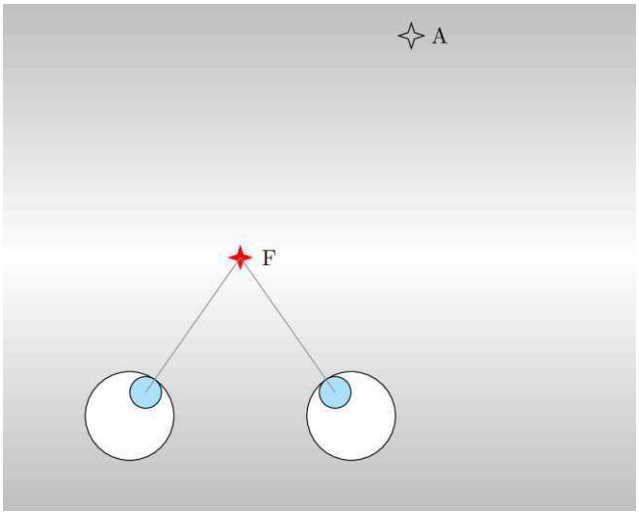

Figure 35 : flou en profondeur.

En vision périphérique

Les humains ne perçoivent l'environnement net que dans un cône de 2° puisque la densité des cônes de l'œil est très grande au niveau de la fovéa et diminue très rapidement en s'éloignant de celle-ci (voir Chapitre 1 section 1.1). Pour reproduire cette variation de densité en vision artificielle, il est possible de réaliser un flou uniquement en vision périphérique. Le flou de (Hillaire et al. 2008) est en partie calculé avec un flou en vision périphérique.

En vision naturelle, la séparation entre la vision centrale nette et la périphérie se fait de manière progressive. Plusieurs méthodes de calcul sont possibles pour réaliser cette transition. La plus simple consiste à réaliser un échelon (en bleu sur la Figure 36), mais elle ne rend pas compte de la progressivité de la transition. Il est également possible de réaliser une transition linéaire (en rouge sur la Figure 36). La dernière méthode présentée ici se rapproche de la transition de la vision humaine (en vert sur la Figure 36) par une fonction dont l'équation est définie ci-dessous :

$$Net(d) = \begin{cases} 100, d < 2 \\ 100 \times e^{-\left((d-2)\times\sqrt{-\ln 0.5}\right)^2}, d \geq 2 \end{cases}$$

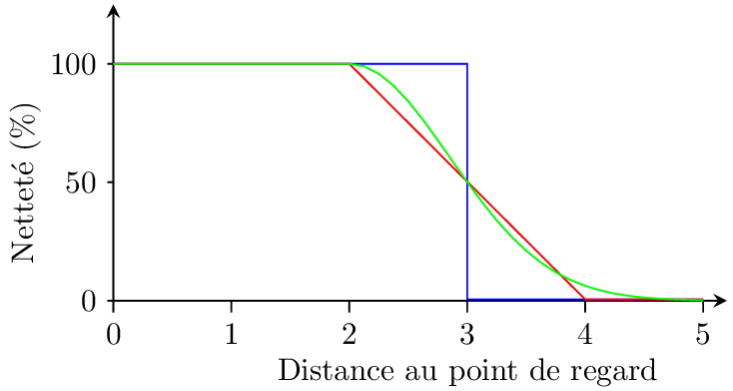

Figure 36 : fonction de transition entre la zone nette et la zone floue : en bleu, une transition avec un créneau, en rouge une transition linéaire et en vert, une transition gaussienne.

Notons que parmi les fonctions de transition présentées ci-dessus, aucune ne représente la courbe réelle de transition, car aucune étude sur cette transition n'a été trouvée.

Nous avons vu plusieurs localisations possibles du flou ainsi que leurs conséquences sur le confort visuel ou la fatigue visuelle. Nous allons maintenant voir les méthodes pour calculer un flou.

Méthode de calcul

Plusieurs types de flou sont applicables, chacun possédant ses propres caractéristiques. Deux types de flou vont être présentés ici : le flou en ondelettes, et le flou en moyenne pondérée. Le flou en ondelettes est intéressant, car il traite directement les fréquences dans l'image. Le flou en moyenne pondérée est quant à lui très facilement utilisable, car il utilise les méthodes classiques de traitement d'image. Nous allons maintenant voir les fondements mathématiques de ces deux types de flou.

Le flou en ondelettes

Pour appliquer le flou à une image, une méthode mathématique consiste à utiliser une décomposition en ondelettes. Le flou en ondelettes est le flou traitant l'image en utilisant directement ses fréquences spatiales. Pour cela, il faut décomposer l'image en fonction de ses fréquences localisées, supprimer les fréquences non voulues, et recomposer l'image. Ce traitement est celui se rapprochant le plus de la compression des informations visuelles dans le système visuel humain, il est donc peut-être plus adapté pour un traitement cherchant à imiter le fonctionnement physiologique de notre système visuel (Woods & O'Neil 1986; Adelson et al. 1987).

Le flou en ondelettes est basé sur une décomposition en ondelettes en deux dimensions. Le Tableau 3 reprend les équations des ondelettes pour une et deux dimensions.

1D	Famille	$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi(\frac{x-b}{a})$
	Décomposition	$WT_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\,\overline{\psi(\frac{x-b}{a})}dx$
2D	Famille	$\psi_{a,b,R_\theta}(x) = \frac{1}{a}\psi(R_\theta\frac{x-b}{a})$
	Décomposition	$WT_f(a,b,R_\theta) = \frac{1}{a}\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\,\overline{\psi(R_\theta\frac{x-b}{a})}dx$

Tableau 3 : équations de la décomposition en ondelettes pour une et deux dimensions

Dans les équations ci-dessus, a correspond au pas de dilatation, b au pas de translation et R_θ à la matrice de rotation d'angle θ. Le pas de translation correspond à la position de l'ondelette dans l'image et le pas de dilatation correspond à la largeur de l'ondelette.

Toutefois, ce flou ne peut pas être calculé en temps réel pour deux raisons : il nécessite de transférer l'image de rendu de la carte graphique vers le microprocesseur, ce qui est très lent, et c'est un algorithme ayant une complexité algorithmique importante. En effet, dans sa version optimisée (l'algorithme de transformée en ondelettes rapides), la complexité est quasi-linéaire ($O(n \log^2 n)$ d'après (Mallat 1991)).

Bien que certaines études utilisent cette technique pour des images précalculées (Perrin 1998), nous n'avons pas trouvé d'étude utilisant cette technique de réalisation du flou en temps réel. Nous n'allons donc pas utiliser cette méthode dans notre expérimentation.

Le flou en moyenne pondérée

Le flou en moyenne pondérée est un flou consistant à appliquer un masque aux pixels de l'image. Soit un pixel $P(x, y)$ à la position (x, y) de l'écran. Notons $P(x, y)^*$ la valeur du pixel après le traitement. Cette valeur est une moyenne pondérée de ce pixel et des pixels avoisinants. En pratique, si l'ensemble des pixels voisins est un rectangle de 2n+1 de largeur et de 2m+1 de hauteur et si le poids d'un pixel à la position (i, j) est $p_{i,j}$, alors la nouvelle valeur du pixel se calcule avec la formule suivante :

$$P(x, y)^* = \frac{1}{(2n+1)(2m+1)} \frac{\sum_{i=-n}^{n} \sum_{j=-m}^{m} p_{i;j} \times P(x+i, y+j)}{\sum_{i=-n}^{n} \sum_{j=-m}^{m} p_{i;j}}$$

Le choix des coefficients détermine l'effet produit du flou. Deux types de coefficients vont être passés en revue : des coefficients constants de même valeur et des coefficients suivant une gaussienne.

Pour un flou en moyenne pondérée unitaire, tous les poids ont la même valeur, c'est-à-dire :

$$\forall (i, j) \in [-n, n] \times [-m, m], p_{i,j} = \lambda$$

(Leroy 2009) a utilisé un flou de ce type pour éliminer les hautes fréquences spatiales sur les objets situés à de grandes disparités.

Pour un flou en moyenne pondérée exponentielle, les poids sont répartis sur une courbe exponentielle en base B centrée au point de regard :

$$\forall (i, j) \in [-n, n] \times [-m, m], p_{i,j} = B^{m-|j|} \times B^{n-|i|}$$

(Rokita 1996) a réalisé un masque assez similaire à ce type de flou, il utilise comme exponentielle une exponentielle en base 2 et comme masque un carré de 3 pixels de côté, le coefficient central prenant une valeur supérieure ou égale à 4.

La complexité de cet algorithme est importante, car elle est en $O(nlog(n)\mathrm{mlog}(m))$. Toutefois, comme cet algorithme est techniquement implémentable sur une carte graphique, cela augmente considérablement le temps de calcul.

La Figure 37 donne un exemple de l'effet des flous en moyenne pondérée avec les coefficients décrits ci-dessus.

Figure 37 : exemples de flou en moyenne pondérée. À gauche, l'image de base. Au milieu, l'image est traitée avec des coefficients unitaires et à droite, l'image est traitée avec des coefficients exponentiels. La différence importante entre les images du milieu et de droite provient directement des coefficients. En effet, avec les coefficients exponentiels, le pixel à flouter a un poids beaucoup plus important que les autres pixels dans le résultat final. Si les coefficients sont unitaires, le pixel à flouter a le même poids que les autres pixels, ce qui limite son importance dans le résultat final.

Choix du traitement

Après avoir vu plusieurs méthodes de calcul de flou, nous allons choisir quel traitement sera appliqué lors de notre expérimentation. Étant donné que nous n'avons pas trouvé d'études comparant les effets de ces différents types de flou, nous allons faire notre choix sur un autre critère important : le temps de traitement des images. Comme notre oculomètre possède un temps de latence important, le traitement choisi sera le plus rapide à calculer pour ne pas ajouter trop de temps de latence au système.

Pour savoir comment réaliser un flou le plus rapidement possible, nous avons comparé plusieurs méthodes. Deux variables ont été testées : la méthode de transition et l'influence du calcul des coefficients. La méthode de comparaison consiste à appliquer le flou sur l'écran en simulant le point de regard au centre de l'écran. Pour chaque méthode, une note est attribuée qui correspond au nombre moyen d'images qu'il est possible de calculer par seconde. Les résultats sont visibles dans le Tableau 4. Les calculs ont été réalisés à l'aide d'un programme utilisant la bibliothèque OpenGL sur un ordinateur ayant pour carte graphique une NVIDIA GeForce GT520 et un écran possèdant une résolution de 1366 par 768 pixels.

		Transition	
		Linéaire	Gaussienne
Flou	Unitaire	62	38
	Exponentiel	12	7.6

Tableau 4 : résultats de mesure du temps de calcul du flou.
Les résultats correspondent au nombre moyen d'images par seconde.

Les résultats montrent que la méthode de calcul la plus rapide correspond à une moyenne pondérée unitaire et une transition linéaire. Pour notre expérimentation, nous allons donc utiliser un flou en moyenne pondérée unitaire et une transition linéaire.

3.3. Protocole expérimental

Méthode expérimentale

La tâche effectuée

Le sujet est immergé dans un monde virtuel composé de dix cylindres fixes et de deux boules se déplaçant dans un volume englobant les cylindres. L'ensemble des objets ainsi que le fond sont recouverts de textures comportant des hautes fréquences spatiales (Figure 38).

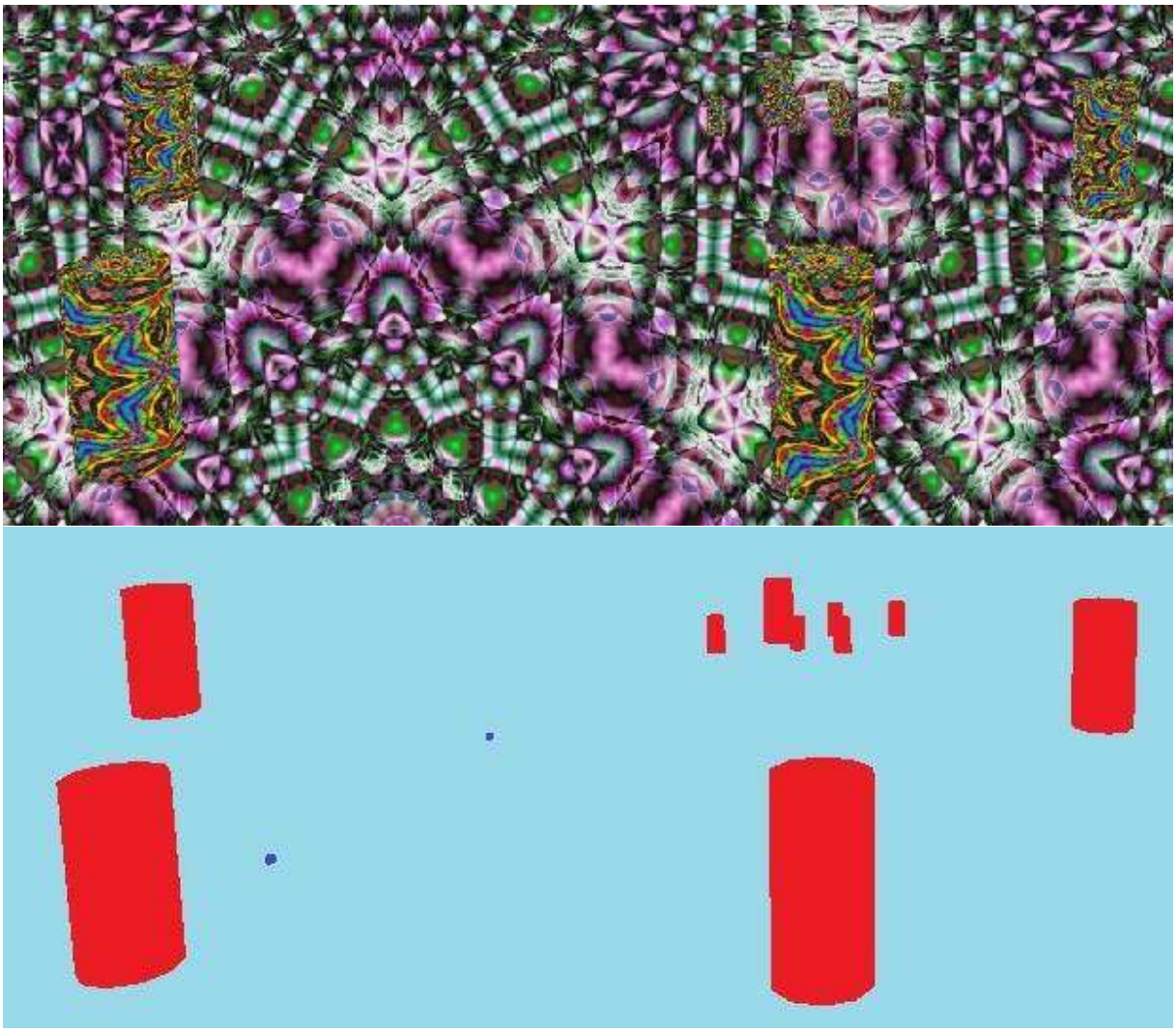

Figure 38 : en haut, le monde virtuel tel que le voit le sujet. En bas, le même monde virtuel colorié avec de fausses couleurs. Le bleu clair correspond au fond, le bleu foncé aux deux boules et le rouge aux cylindres.

Le sujet est assis à 2.4m de l'écran, centré par rapport à celui-ci et possède une souris d'ordinateur dans une main. La position de l'utilisateur est contrainte par l'oculomètre choisi, la distance à l'écran étant nécessaire pour permettre à l'oculomètre de pouvoir suivre le regard du participant sur l'ensemble de l'écran.

Durant 30 minutes, le sujet va surveiller les boules se déplaçant dans le monde virtuel. Lorsqu'une des deux boules entre en collision avec un cylindre, il doit cliquer sur le bouton gauche de la souris. Lors du clic, les deux boules ainsi que le traitement vont disparaître et vont réapparaître

trois secondes après, ailleurs dans le monde virtuel. Ainsi, durant l'expérimentation, les participants seront concentrés sur les objets. Ils sont donc actifs tout au long de l'expérimentation et leur système visuel sera fatigué par les hautes fréquences spatiales, ce qui est le but de cette tâche.

Mesures de fatigue visuelle utilisées

Comme décrit dans le chapitre précédent (Chapitre 3 section 4.3), trois mesures seront utilisées pour détecter une diminution des capacités du système visuel. Tout d'abord, l'acuité stéréoscopique sera mesurée à l'aide d'un test de Wirt. Les capacités accommodatives du système visuel seront également évaluées à l'aide de deux tests : la détermination du *punctum proximum* d'accommodation ainsi que le test dit du *flipper lens*.

Un questionnaire a également été préparé afin de détecter une variation du confort visuel perçu par les sujets. Il est composé de 13 questions dont les réponses sont basées sur une échelle de Likert de 0 à 5. L'échelle comporte 6 points pour éviter les réponses neutres. Une note de 5 à une question posée correspond à une réponse positive, une note de 0 correspond à une réponse négative. Les questions sont classées en trois thèmes : le ressenti du monde virtuel, les sensations physiques et les impressions sur l'état du système visuel (Tableau 5). Les questions du thème « Général » ont été posées uniquement après l'expérimentation.

Thème	**Question**	**Code**
Généralités	Le monde était-il agréable à regarder?	G1
	Avez-vous trouvé le monde réaliste ?	G2
	Avez-vous ressenti une bonne sensation d'immersion ?	G3
	Avez-vous eu une bonne perception de la profondeur ?	G4
Sensation de fatigue	Avez-vous l'impression d'être fatigué visuellement ?	Sf1
	Avez-vous l'impression d'être fatigué de manière générale ?	Sf2
Sensations physiologiques	Avez-vous les yeux qui piquent ?	Sp1
	Avez-vous des maux de tête ?	Sp2
	Avez-vous mal à la nuque ?	Sp3
	Avez-vous les paupières lourdes ?	Sp4
	Avez-vous des larmes dans les yeux ?	Sp5
	Avez-vous une sensation de nausée ?	Sp6

Tableau 5 : liste des questions posées triées par thèmes. La colonne « Code » correspond à un code donné à la question qui sera utilisé dans le reste du chapitre.

Les sujets et le matériel utilisé

Dix-huit sujets ont participé aux trois premiers tests, quatre femmes et quatorze hommes (âge moyen de 26,2 ans). Trois sujets avaient une acuité stéréoscopique supérieure à 100 secondes d'arc, ils ont donc été écartés des résultats. Les sujets portent leur dispositif de correction s'ils en ont un.

L'affichage est réalisé par un projecteur F85 de la société *Projection Design* disposant d'une résolution d'affichage de 1920x1080 pour une fréquence de 120Hz. L'image est projetée sur un écran LUMIN d'une largeur de 3.1m et d'une hauteur de 1.74m. La direction du regard est acquise par un oculomètre Tobii Rex *Developper Desktop Edition* choisi selon les critères décrits précédemment (section 2 de ce chapitre). Il est placé à 40cm devant le sujet, sur une petite table installée devant le sujet de manière à ne pas gêner la vision des sujets. Les sujets sont assis à une distance de $2.4m$ de l'écran et sont centrés par rapport à celui-ci.

Paramètres étudiés

Afin de tester l'effet d'un flou en vision périphérique ainsi que différents paramètres comme le temps de latence de l'oculomètre, l'influence de la taille de la zone nette, quatre conditions seront réalisées.

Impact d'un flou sur la fatigue visuelle

Pour connaître l'impact d'un flou en vision périphérique sur la fatigue visuelle, nous allons réaliser deux tests, avec et sans flou et comparer les résultats obtenus. Le premier test sera un test de contrôle, la totalité de l'écran restera nette (Figure 39). Ce test va permettre à la fois de vérifier que le stimulus utilisé est fatigant pour le système visuel (à cause de hautes fréquences spatiales), mais aussi d'avoir le niveau de fatigue de référence de notre expérimentation. Ce test sera appelé test de « contrôle » par la suite.

Figure 39 : la condition 1 de l'expérimentation

Nous avons vu que la densité des cônes se concentre dans un cône de 10° d'ouverture (Chapitre 2 section 1.1). L'intersection de ce cône et de l'écran est un cercle d'environ 135 pixels[8]. Comme la densité des bâtonnets diminue à partir de 20° d'angle visuel, nous allons fixer la limite de la zone de transition et la zone floue à 25°, soit 735 pixels (Figure 40). Ce test sera appelé le test de la « petite zone nette » par la suite.

[8] La conversion à partir de l'angle de vision vers le rayon de la zone nette en pixels dépend des équipements utilisés. Par la suite, toutes les conversions seront indiquées selon nos équipements.

Figure 40 : condition 2 de l'expérimentation. Le petit cercle rouge correspond à la limite entre la zone nette et la zone de transition. Le grand cercle rouge correspond à la limite entre la zone de transition et la zone floue. Les deux cercles ne sont ici qu'à titre indicatif, ils ne sont pas visibles par les sujets.

Influence de la taille de la zone nette

Pour ce test, nous allons reprendre les résultats obtenus lors du test avec une petite zone nette et nous allons en faire un nouveau. Nous avons choisi de doubler le rayon de la zone nette pour tester l'influence de la taille de la zone nette, la distance entre la zone nette et la zone floue restant la même. Cela donne un rayon de 300 pixels (11° d'angle visuel) pour la zone nette et un rayon de 900 pixels (31° d'angle visuel) pour la limite entre la zone de transition et la zone floue (Figure 41). Par la suite, nous appellerons ce test le test de « la grande zone nette ».

Figure 41 : condition 3 de l'expérimentation. Le petit cercle rouge correspond à la limite entre la zone nette et la zone de transition. Le grand cercle rouge correspond à la limite entre la zone de transition et la zone floue. Les deux cercles ne sont ici qu'à titre indicatif, ils ne sont pas visibles par les sujets.

Influence de l'oculomètre

Nous avons vu précédemment que la latence de l'oculomètre avait une influence possible sur les résultats. Dans ce test, nous nous abstrairons des contraintes de l'oculomètre pour enlever l'influence de ce temps de latence des résultats. Le sujet ne pouvant pas regarder à deux endroits en même temps, une des deux boules est enlevée ; le sujet devant regarder l'autre. Dans ce test, le flou est centré sur la boule restante et les diamètres de la zone nette et de la zone de transition sont réduits, car le sujet va regarder un point déterminé. Le diamètre de la zone nette sera de 70 pixels

(2.7° d'angle visuel) ce qui est légèrement supérieur au cône de vision nette (vu dans le Chapitre 2), celle de la zone de transition sera de 170 pixels (6.5° d'angle visuel) (Figure 42). L'oculomètre est utilisé pour vérifier que le sujet regarde bien la boule. Dans le cas contraire, un bip sonore est émis. Le résultat de ce test sera comparé avec celui du test de contrôle. Ce test sera appelé « Sans oculomètre » dans la suite du document.

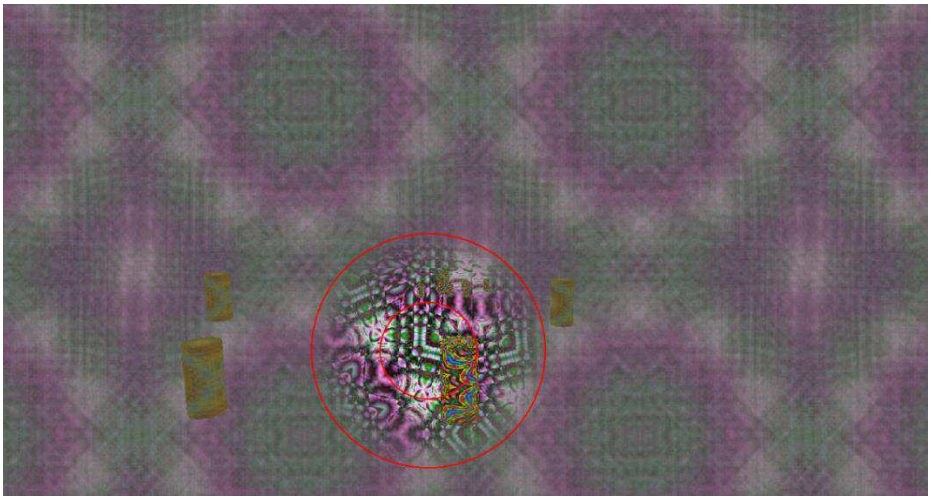

Figure 42 : condition 4 de l'expérimentation. Le petit cercle rouge correspond à la limite entre la zone nette et la zone de transition. Le grand cercle rouge correspond à la limite entre la zone de transition et la zone floue. Les deux cercles ne sont ici qu'à titre indicatif, ils ne sont pas visibles par les sujets.

3.4. Résultats

Nous allons maintenant voir les résultats de cette expérimentation. Les résultats sont présentés en trois parties. Dans la première partie, nous allons étudier l'effet d'un flou en vision périphérique sur la fatigue visuelle et le confort visuel. La seconde partie se concentrera sur l'influence de la taille de la zone nette sur la fatigue visuelle. Dans la troisième partie, nous étudierons l'effet de la latence sur notre traitement.

Pour vérifier la significativité de nos résultats, nous avons tout d'abord évalué la normalité des populations observée à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov, ce test permettant de savoir si les deux populations étudiées suivent la même loi. Ce test nous a indiqué que les résultats obtenus ne suivent pas une loi normale. Pour déterminer si nos résultats sont significatifs, nous allons donc utiliser un test non paramétrique, le test de Kruskal et Wallis, afin de connaitre la significativité des résultats obtenus.

Étude initiale : effet d'un flou en vision périphérique sur la fatigue visuelle

Pour réaliser cette étude initiale, nous avons choisi de réaliser les expérimentations « Contrôle », c'est-à-dire un monde virtuel contenant des hautes fréquences spatiales et la même expérimentation avec un flou en vision périphérique avec suivi du regard de l'utilisateur. Pour la deuxième expérimentation à réaliser, nous avons donc le choix entre le test « Grande zone nette » et le test « Petite zone nette ». Nous avons choisi de comparer le test « Contrôle » au test « Petite zone nette », car nous espérons maximiser l'effet du traitement en augmentant la quantité de flou à l'écran.

Acuité stéréoscopique

Les variations de l'acuité stéréoscopique pour les deux premiers tests sont visibles sur la Figure 43.

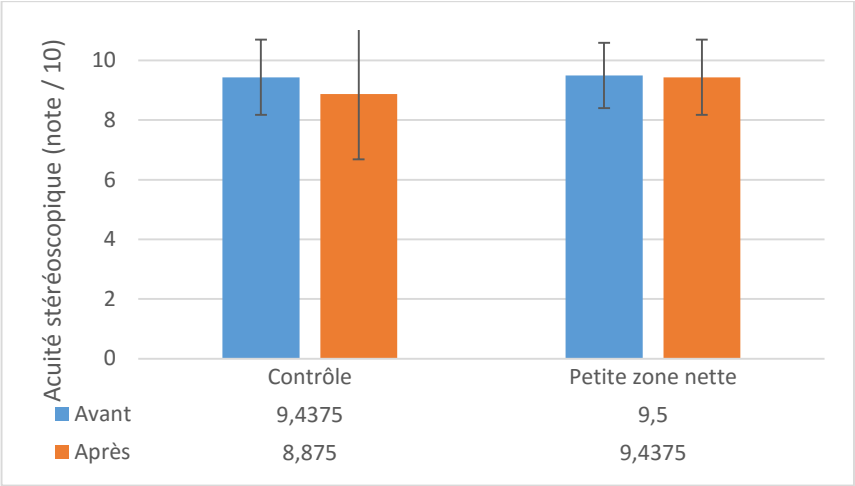

Figure 43 : résultats du test de Wirt sans et avec traitement. L'acuité stéréoscopique est notée sur une échelle de 1 à 10. Plus la valeur est grande, meilleure est l'acuité stéréoscopique.

Apparemment, notre traitement avec suivi du regard de l'utilisateur limite la diminution d'acuité stéréoscopique, mais ce résultat n'est pas significatif ($p>0.05$). Toutefois, nous avons remarqué que 12 sujets sur 16 ont une acuité stéréoscopique supérieure à 20 secondes d'arc, ce qui est la limite supérieure de notre matériel. Il est donc possible que l'acuité stéréoscopique des sujets ait diminué, mais que le matériel dont nous disposons ne soit pas assez précis pour détecter cette variation.

Punctum proximum d'accommodation

Les mesures du *punctum proximum* d'accommodation (voir Figure 44) n'ont pas permis de déceler une différence entre le test de contrôle et le test avec notre traitement.

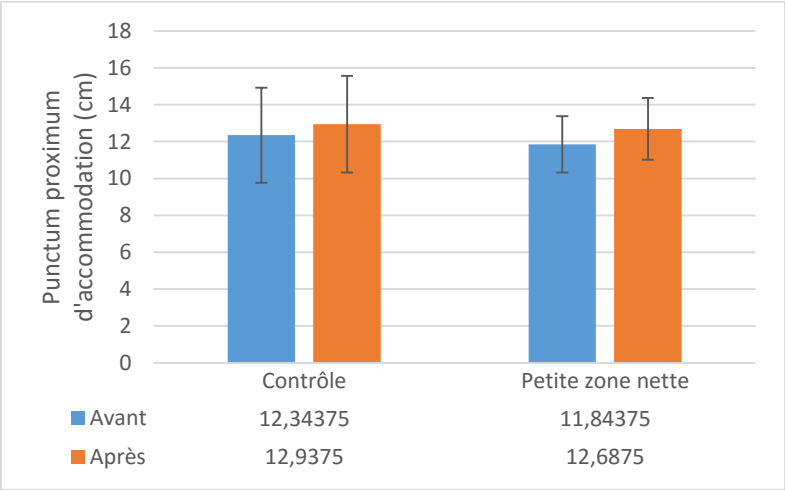

Figure 44 : résultat des mesures du test du punctum proximum d'accommodation. La note correspond à la distance minimale d'accommodation. Plus elle est faible, moins le système visuel est fatigué.

Facilité d'accommodation

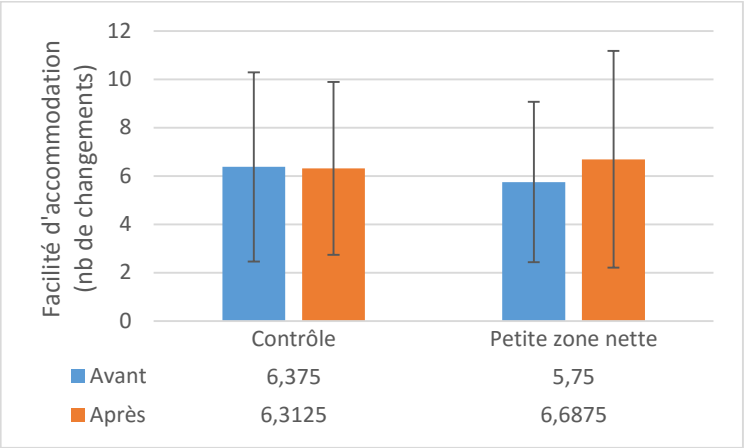

Figure 45 : note de la facilité d'accommodation. La note correspond au nombre de changements de puissance de lentilles en 30 secondes. Une note élevée indique une grande facilité du système visuel à accommoder.

Les résultats du test mesurant la facilité d'accommodation sont visibles sur la Figure 45. Apparemment, notre traitement améliore la facilité d'accommodation du sujet. Toutefois, la différence entre les deux cas n'est pas significative (p=0.17).

Confort visuel

Les réponses aux questions posées avant et après les tests sont reportées sur la Figure 46.

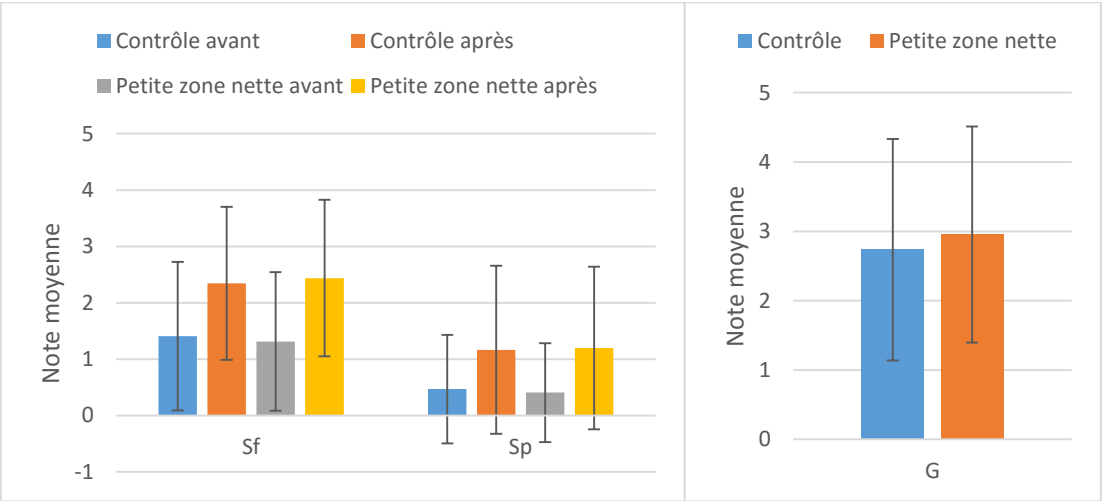

Figure 46 : réponses aux questions posées avant et après les tests « Contrôle » et « Petite zone nette ». Les réponses sont classées par thème.

Sur ce graphique, nous pouvons voir que les sujets ont trouvé l'expérimentation assez inconfortable pour les deux tests. Toutefois, il n'y a pas de différence significative d'inconfort entre les deux parties. Notons que les symptômes d'inconfort regroupés dans le thème (Sp) sont très faibles ce qui indique que le stimulus utilisé, même s'il est inconfortable, n'est pas ressenti comme extrêmement inconfortable par les sujets. L'étude des réponses données n'a pas permis de trouver de différence significative entre les deux tests.

Discussion intermédiaire

La comparaison entre les tests « Contrôle » et « Grande zone nette » donne des résultats similaires à la comparaison présentée ici. Malgré les variations non significatives des capacités visuelles des sujets, nous avons pu observer une variation qui semble corroborer notre hypothèse.

Concernant les réponses au questionnaire, nous faisons le même constat. Les sujets ont ressenti de l'inconfort lors de notre expérimentation, ce qui est un des buts recherchés. En effet, nous voulons stimuler suffisamment le système visuel de l'utilisateur pour générer une fatigue et un inconfort visuels. Ainsi, si notre traitement améliore le confort visuel ou limite la diminution des capacités du système visuel, nous sommes en mesure de le détecter. Toutefois, notre traitement ne diminue pas l'inconfort ressenti par le sujet. Par la suite, deux pistes vont être explorées pour comprendre la cause de ces résultats. Tout d'abord, l'influence de la taille de la zone nette sur les résultats va être étudiée. Nous verrons ensuite si la latence de l'oculomètre influence les résultats obtenus.

Influence de la taille de la zone nette

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence de la taille de la zone nette sur le résultat obtenu précédemment. Deux tests sont comparés : celui avec une grande zone nette et celui avec une petite zone nette, les deux traitements s'adaptant au point de regard de la personne. Nous étudierons l'effet de la latence dans la section suivante afin de ne pas faire varier plusieurs paramètres à la fois.

Acuité stéréoscopique

Les résultats pour l'acuité stéréoscopiques sont reportés sur la Figure 47.

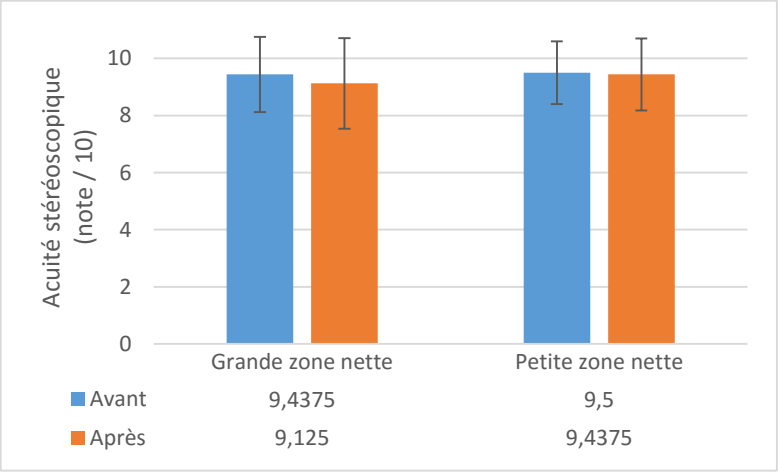

Figure 47 : résultat du test de l'acuité stéréoscopique lors des tests « Grande zone nette » et « Petite zone nette ».

Lors des deux tests, l'acuité stéréoscopique des sujets a diminué de la même manière. La taille de la zone nette n'influe donc pas sur l'acuité stéréoscopique du système visuel.

Punctum proximum d'accommodation

Les résultats du test du *punctum proximum* d'accommodation sont visibles sur la Figure 48.

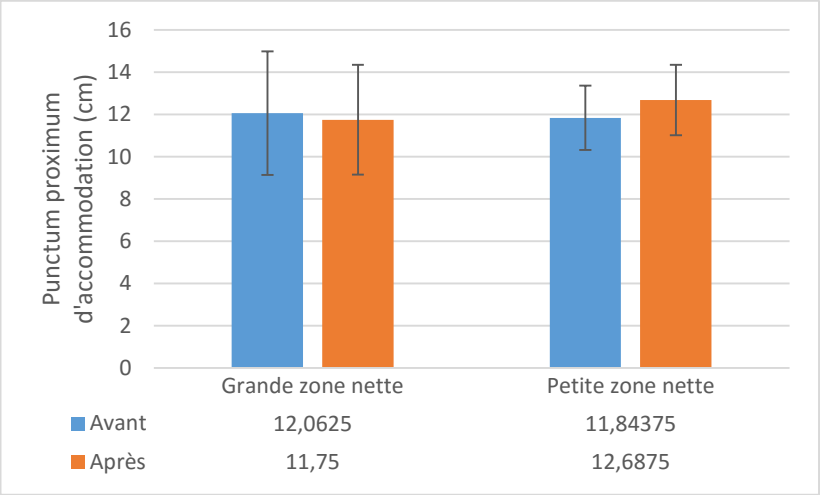

Figure 48 : variation du punctum proximum d'accommodation lors des tests « Grande zone nette » et « Petite zone nette ».

Lors du test avec une grande zone nette, la distance au *punctum proximum* d'accommodation a très légèrement diminué, alors qu'elle a augmenté pour le test avec une petite zone nette. Cela signifie que le test « Petite zone nette » a diminué la capacité à accommoder à courte distance. La petite diminution lors du test « Grande zone nette » est surprenante, car elle n'était pas présente lors du test de contrôle. Cependant, au regard de sa faible valeur (0.3125cm), cette différence est sans doute induite par la précision de la mesure. Des tests statistiques sur les données ont permis d'établir que la différence n'est pas significative.

Facilité d'accommodation

Les résultats de la mesure de facilité d'accommodation pour les tests « Grande zone nette » et « Petite zone nette » sont visibles sur la Figure 49.

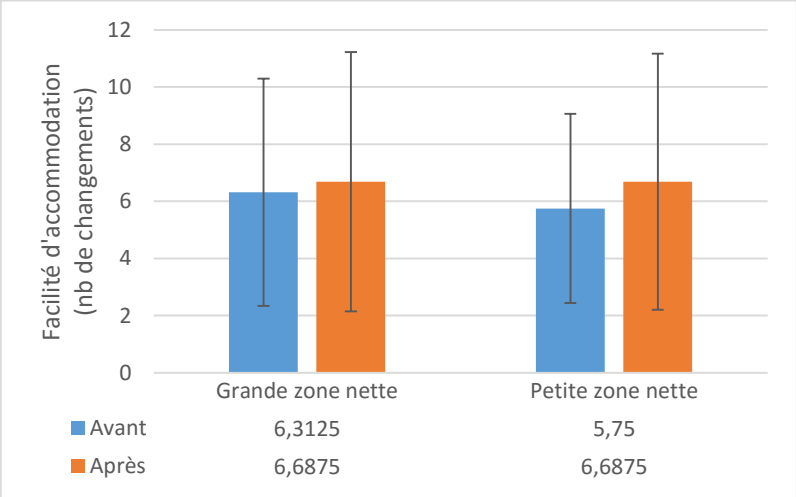

Figure 49 : comparaison des résultats du test de facilité d'accommodation en fonction de la taille de la zone nette.

Lors des deux tests, les notes des facilités d'accommodation ont diminué, indiquant une diminution des capacités d'accommodation du système visuel. La diminution des capacités est un peu plus importante avec une zone nette plus petite. Les tests statistiques effectués sur les données n'ont pas permis de trouver de différence significative.

Confort visuel

Les résultats du questionnaire sur le confort visuel sont indiqués sur la Figure 50.

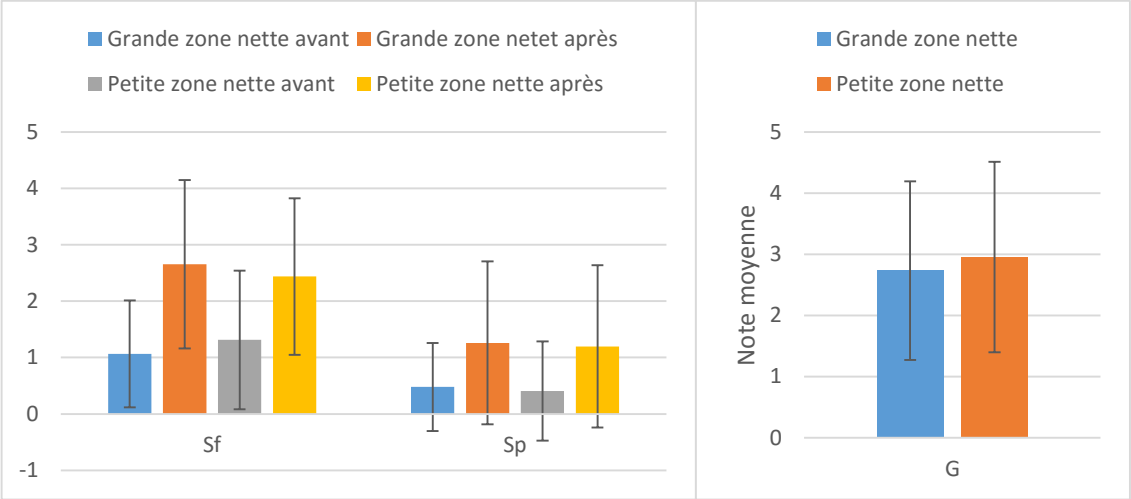

Figure 50: réponses au questionnaire sur le confort visuel pour les tests « Grande zone nette » et « Petite zone nette ».

Comme pour les tests précédents les questionnaires (Sf) et (Sp) indiquent que les sujets trouvent l'expérimentation inconfortable même en floutant la vision périphérique. Toutefois, les différences trouvées ne sont statistiquement pas significatives.

Discussion intermédiaire

Lors de ces deux tests, nous avons testé si la taille de la zone nette impactait la fatigue visuelle et le confort visuel de l'utilisateur. Nous avons vu qu'une petite zone nette dégradait les capacités accommodatives des sujets alors qu'une grande zone nette les conservait davantage. Toutefois, cette différence peut être due à la latence de l'oculomètre. Cette latence va être testée dans la partie suivante.

Influence du temps de latence de l'oculomètre

Dans cette partie, nous allons voir l'influence de la latence de l'oculomètre sur les résultats obtenus précédemment. Nous allons donc comparer les résultats obtenus lors de l'expérimentation « Contrôle » avec ceux de l'expérimentation « Sans oculomètre » afin de savoir si notre traitement diminue la fatigue visuelle et si la raison de la non-significativité des résultats précédents est bien la latence trop importante du matériel utilisé. L'expérimentation a été réalisée avec une petite zone nette, car celle-ci semble donner de meilleurs résultats qu'une grande zone nette. Par ailleurs, la taille de la zone nette peut encore être réduite, car la méthode de calcul du rayon prenait en compte la latence du système. Comme ce temps de latence est réduit, le rayon de la zone nette peut également être réduit.

Acuité stéréoscopique

Les résultats des mesures de l'acuité stéréoscopique sont visibles sur la Figure 51.

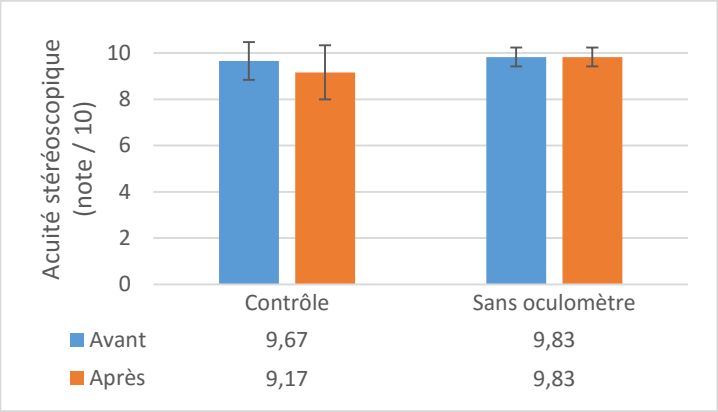

Figure 51: mesure de l'acuité stéréoscopique lors du test de contrôle et lors du test sans oculomètre.

Nous voyons dans ce graphique que lorsque le traitement est appliqué sans oculomètre, l'acuité stéréoscopique reste la même. Dans le test de contrôle, cette acuité stéréoscopique avait baissé d'un demi-point en moyenne. Cela voudrait dire que notre traitement permet de conserver une acuité stéréoscopique stable lors de la visualisation de contenu stéréoscopique. Les tests statistiques appliqués à nos résultats montrent que ceux-ci sont pratiquement significatifs (p=0.0755).

Punctum proximum d'accommodation

Les résultats de cette mesure sont visibles sur la Figure 52.

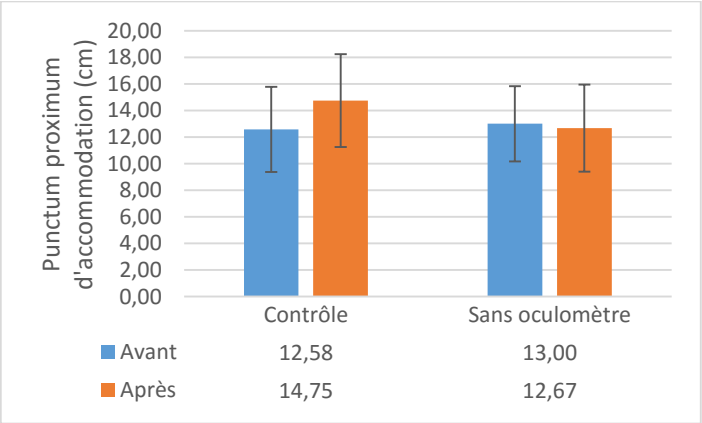

Figure 52 : résultats des mesures du punctum proximum d'accommodation lors des tests de contrôle et sans oculomètre.Plus la distance est faible, plus le sujet a une bonne capacité d'accommodation sur un objet proche.

Lors de la condition de contrôle, la capacité d'accommodation à courte distance des sujets diminuait. Avec notre traitement et en fixant le point de regard, cette capacité augmente légèrement. Notre traitement permet donc d'éviter une perte de capacité d'accommodation à courte distance. Ce résultat a été confirmé statistiquement (p<1%).

Facilité d'accommodation

Les résultats des mesures de facilité d'accommodation ont été reportés sur la Figure 53.

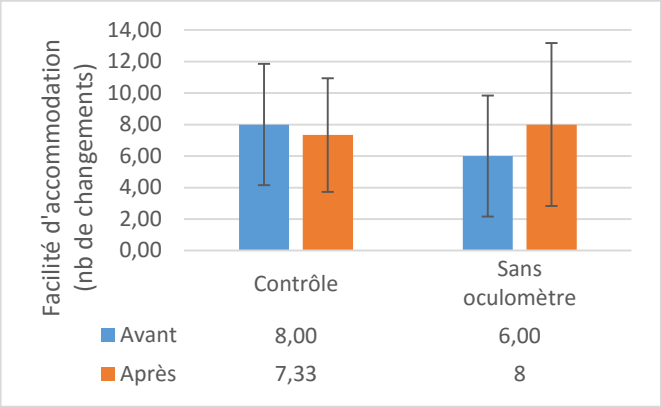

Figure 53 : résultat du test de la facilité d'accommodation lors des tests de contrôle et sans oculomètre. Plus le résultat est faible, plus le sujet a une faible capacité à accommoder.

Lors de la condition de contrôle, les sujets ont vu leurs capacités accommodatives diminuées. Au contraire, avec le traitement et sans oculomètre, les sujets ont conservé leur capacité d'accommodation. Cela montre que notre traitement réduit la fatigue accommodative induite par l'affichage stéréoscopique. D'après les tests statistiques effectués sur les données, la différence entre les deux tests est significative ($p<1\%$).

Confort visuel

Les résultats du questionnaire sur le confort visuel pour la condition de contrôle et la condition avec traitement sans oculomètre sont disponibles sur la Figure 54.

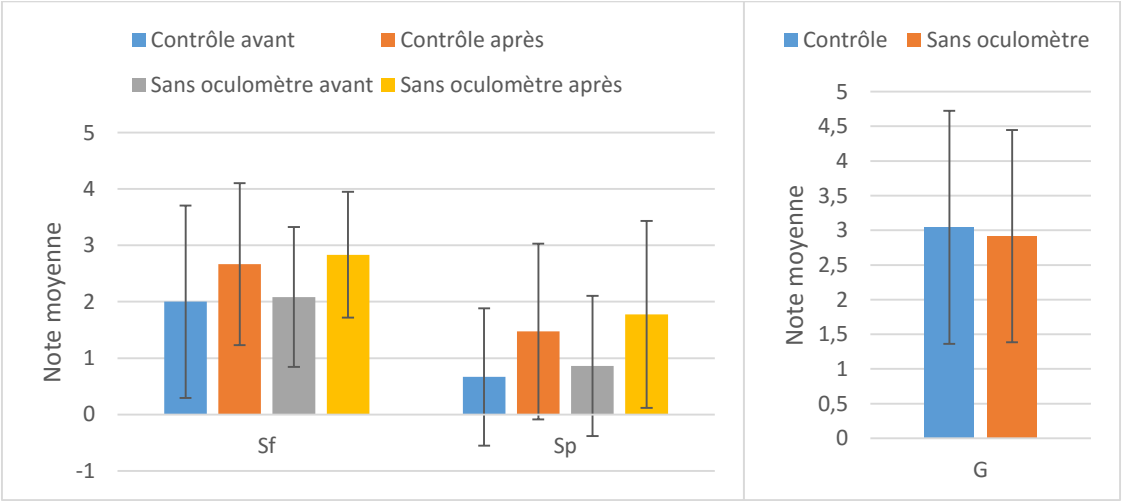

Figure 54 : résultat au questionnaire pour la condition de contrôle et la condition « Sans oculomètre ».

D'après ce graphique, l'expérience est toujours aussi inconfortable à regarder dans les deux tests. Toutefois, nous n'avons pas relevé de différence entre les deux tests.

Discussion intermédiaire

En comparant le test de contrôle avec le test sans oculomètre, nous avons trouvé que le test avec traitement permet de limiter les pertes d'acuité stéréoscopique et d'accommodation à courte distance lors de la vision de contenu stéréoscopique. Ce résultat est intéressant, car il montre ainsi que la latence de l'oculomètre est une cause possible de la non-significativité des résultats précédents.

3.5. Discussion

Les résultats obtenus montrent que notre traitement permet de réduire fortement la perte d'acuité stéréoscopique lors de la vision d'un contenu stéréoscopique et les capacités d'accommodation sont conservées. Cela permet soit de regarder plus longtemps un contenu stéréoscopique, soit d'être moins fatigué visuellement après avoir vu un contenu stéréoscopique.

Contrairement aux expérimentations de (Leroy et al. 2010; Hillaire et al. 2008), notre traitement ne produit pas d'effet sur le confort visuel ressenti par les sujets. Ce résultat est intéressant, car il montre que le confort visuel dépend plus de la vision centrale d'une personne que de la vision périphérique.

Dans les paramètres de l'expérimentation, nous avons choisi d'appliquer un flou en moyenne pondérée à coefficients unitaires. Ce choix a été motivé par une contrainte technique forte : la latence de notre système. Toutefois, il serait intéressant de connaître l'effet du traitement avec un autre choix pour le flou, comme le flou en moyenne pondérée à coefficients exponentiels.

La latence de l'oculomètre joue un grand rôle pour notre traitement. Avec une latence élevée, nous avons vu que la fatigue accommodative pouvait être plus importante avec le traitement que sans le traitement. Cette latence provoque un chevauchement de la vision centrale de l'utilisateur et de la zone floue entraînant un travail de l'accommodation. C'est ce travail qui provoque de la fatigue visuelle. Le choix d'un oculomètre ayant un faible temps de latence est donc décisif dans notre cas. Un critère essentiel à étudier est le temps de latence maximum acceptable pour que l'effet du flou soit positif. En effet, nous savons que ce temps maximum est entre 160ms (notre oculomètre) et 0ms (cas idéal), mais nous n'avons pas plus d'information sur cette limite.

4. Conclusion

Nous avons montré qu'un flou en vision périphérique permet de réduire les pertes de capacités d'accommodation lors du visionnage d'un contenu stéréoscopique. Toutefois, les sujets ressentent quand même l'inconfort dû aux hautes fréquences spatiales, même avec notre traitement. Nous avons également montré que cette diminution était influencée par le temps de latence de l'oculomètre utilisé. Si ce temps de latence est trop important, l'effet positif est annulé, voire peut-être inversé.

Chapitre 5

État de l'art de la convergence des yeux et des caméras virtuelles sur la perception des formes et des distances

1. Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons étudié la fatigue visuelle en vision stéréoscopique artificielle. Après avoir passé en revue différentes causes de fatigue visuelle et de confort visuel ainsi que des méthodes pour les réduire, nous avons démontré que l'ajout d'un flou en vision périphérique permet de réduire la fatigue visuelle en vision stéréoscopique artificielle si le flou en vision périphérique s'adapte suffisamment rapidement au regard de l'utilisateur. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à une autre problématique de la vision artificielle stéréoscopique qui est la perception des formes et des distances. Nous avons vu que la vergence des yeux créée des disparités verticales sur la rétine. Nous verrons que d'après plusieurs études, ces disparités améliorent la perception des objets en vision stéréoscopique naturelle. En vision stéréoscopique artificielle, les deux caméras utilisées pour filmer la scène sont toujours parallèles entre elles et perpendiculaires à l'écran. Cette configuration ne permet pas de reproduire les disparités verticales. Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord étudier l'impact précis des disparités horizontales et verticales sur notre perception du monde environnant. Ensuite, nous nous concentrerons sur l'effet des parallaxes verticales pour la perception des distances et des formes. Pour finir, nous allons présenter notre méthode de rendu pour ajouter les disparités verticales sur la rétine de l'utilisateur.

2. Effet des disparités verticales en vision naturelle

Les êtres humains possèdent deux yeux, chaque œil possédant un champ visuel horizontal de 140° et un champ visuel vertical de 130°. Ces deux champs visuels se recoupent horizontalement sur environ 100° rendant possible la vision binoculaire dans cette zone. Lorsqu'un objet se trouve dans la zone de vision binoculaire, l'image de sa projection sur chacune des rétines provoque des disparités horizontales et verticales, comme expliqué dans la section 1.4 Chapitre 2. Ces disparités participent à la perception de notre environnement. Par exemple, (Julesz 1962) a montré que les disparités rétiniennes horizontales permettaient à elles seules de percevoir des différences de profondeur. Une question se pose alors : qu'en est-il des disparités verticales ? Jouent-elles un rôle dans la perception ? Étant donné que les disparités horizontales ont des valeurs plus élevées que les disparités verticales, il serait naturel de penser que les disparités verticales jouent un rôle moindre que les disparités horizontales dans le processus de la perception. Dans cette section, nous allons passer en revue l'influence des disparités verticales sur la perception des distances et des formes.

2.1. Perception des distances

Il est bien connu que les disparités horizontales permettent de percevoir les distances et les formes (voir par exemple (Julesz 1962)). Cependant, peu d'études se sont intéressées aux disparités verticales. (Durand et al. 2002) ont trouvé qu'une partie des neurones du cortex cérébral décodent à la fois les disparités horizontales et les disparités verticales. Les deux disparités ont donc leurs importances dans le processus de perception.

D'après l'étude menée par (Devisme 2008), les disparités verticales améliorent la sensibilité aux disparités horizontales. Cela signifie que les disparités verticales permettent de mieux percevoir les disparités horizontales. (Duke & Howard 2005) ont déterminé que cette relation dépendait de la distance. Toutefois, d'après (Sobel & Collett 1991), les disparités verticales ne permettent pas de déterminer une distance précise.

2.2. Perception des formes

Avant d'étudier la relation entre disparités verticales et perception des formes, il faut définir deux notions utilisées dans les études. Le ratio des tailles horizontales (*Horizontal Size Ratio*, HSR en anglais) et le ratio des tailles verticales (*Vertical Size Ratio*, VSR en anglais) sont définis sur la Figure 55.

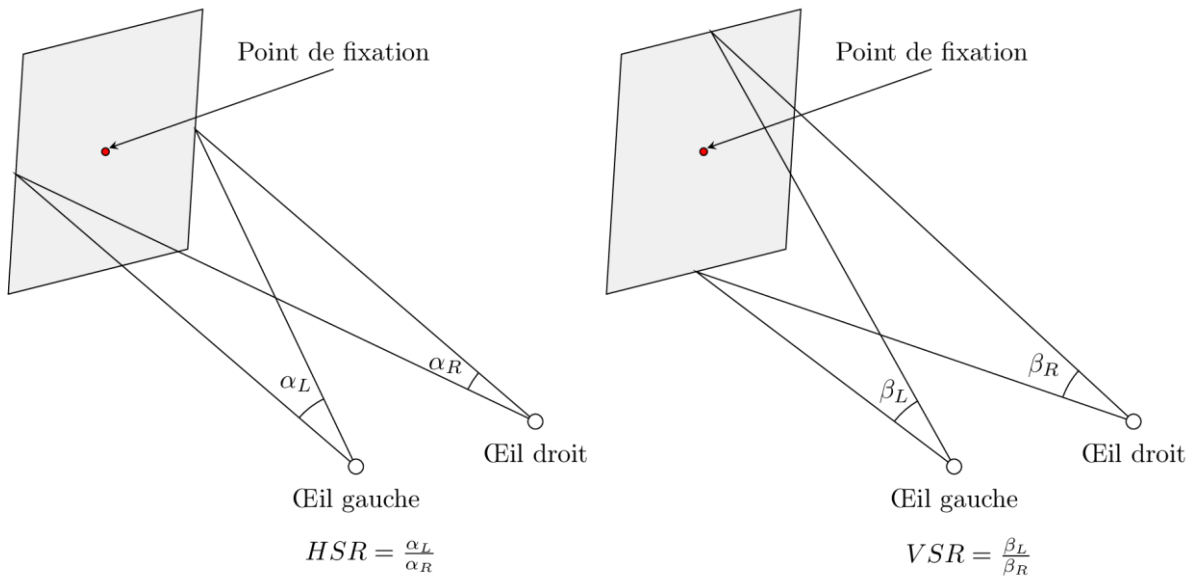

Figure 55 : définition des ratios HSR et VSR.

Ces deux ratios, qui sont des valeurs découlant des disparités, permettent de mesurer les inclinaisons des plans (Backus et al. 1999). (Rogers & Bradshaw 1993) ont montré que le système visuel humain est capable d'utiliser les disparités verticales ainsi que les ratios HSR et VSR pour redimensionner les surfaces perçues en profondeur et en taille si le champ de vue est suffisamment large.

Les études vues jusqu'à présent nous indiquent que les disparités verticales améliorent la perception des distances en complément des disparités horizontales. Ces disparités verticales ainsi que les ratios HSR et VSR permettent également une meilleure perception des inclinaisons. Certaines modélisations récentes du fonctionnement de la vision humaine intègrent même ces disparités verticales pour améliorer la précision du modèle (Held & Banks 2008). Nous allons maintenant voir l'effet des parallaxes verticales, le pendant des disparités verticales en virtuel, sur la perception.

3. Effet des parallaxes verticales en vision artificielle

Dans cette section, nous allons parler de l'effet des parallaxes verticales sur la perception des distances et des formes. Avant cela, nous allons définir les parallaxes verticales.

3.1. Définitions

Les parallaxes verticales sont les déformations obtenues lors de la convergence de caméras stéréoscopiques. Sur la Figure56, nous avons un exemple de l'effet des parallaxes verticales sur la face avant d'un cube virtuel situé entre l'écran et l'utilisateur. En haut, les caméras sont parallèles, il n'y a que des parallaxes horizontales. En revanche, dans la partie basse de la Figure56, comme les caméras convergent sur le cube, le rendu de ce cube sur l'écran est déformé. Ces déformations verticales sont appelées des parallaxes verticales. Ces parallaxes verticales modifient les disparités verticales perçues par le système visuel de l'utilisateur, ce qui modifie sa perception de la scène virtuelle. Très peu d'études ont été réalisées au sujet de l'impact des parallaxes verticales sur la perception. Nous allons en présenter quelques-unes.

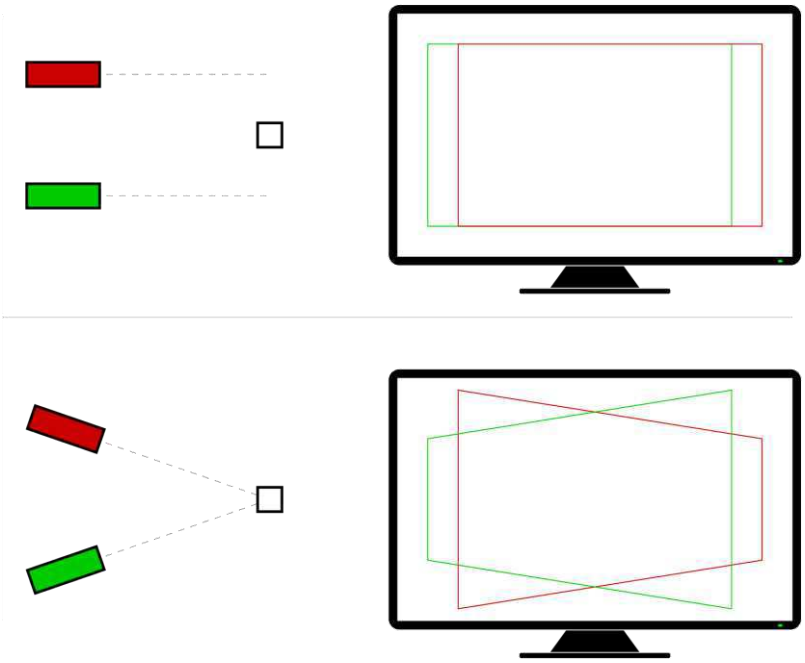

Figure56 : différences de parallaxes entre le cas « caméras parallèles » et le cas « caméras convergentes ». À gauche, nous avons le monde virtuel représenté vu de dessus filmé avec les caméras gauche (en rouge) et droite (en vert). À droite, le rendu sur écran des caméras. L'image pour l'œil gauche est représentée en rouge et l'image pour l'œil droit en vert. Les caméras sont en configuration parallèles en haut et convergentes en bas. Notons que les déformations ont été exagérées pour être plus facilement visibles sur cette figure.

3.2. Perception des distances

(Stelmach et al. 2003) ont testé l'effet des parallaxes verticales sur la perception de la profondeur et le confort visuel. Ils ont pour cela créé un monde virtuel composé de différents objets (Figure 57) et ont demandé à des utilisateurs de noter le confort visuel sur une échelle de 0 (extrêmement inconfortable) à 100 (très confortable) ainsi que la perception de la profondeur sur une échelle de 0 (mauvais) à 100 (excellente). La convergence des caméras stéréoscopiques s'effectuait sur un point de la droite perpendiculaire à l'écran et passant par le centre de l'écran. Quatre distances de convergence de caméras donnant des parallaxes verticales différentes ont été testées : 60cm, 120cm, 180cm et 240cm.

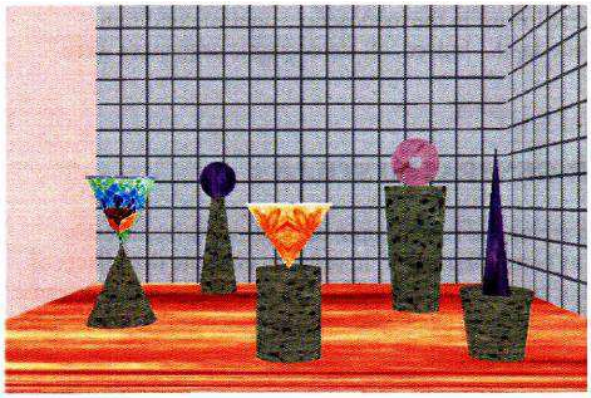

Figure 57 : exemple de monde virtuel utilisé par (Stelmach et al. 2003)**.**

D'après leurs résultats (voir Figure 58), les parallaxes verticales diminuent le confort visuel et la profondeur perçue. Ce résultat est étonnant, car nous avons vu précédemment que les disparités verticales permettaient de mieux percevoir les distances. Toutefois, lors de cette expérimentation, la convergence des caméras se faisait sur une droite centrée par rapport à l'écran et perpendiculaire à

l'écran. Or, nous avons vu que les disparités verticales dépendaient du point de regard. Cela montre bien que si les parallaxes verticales ne sont pas adaptées en temps réel en accord avec le point de regard de l'utilisateur, les parallaxes verticales peuvent avoir un effet négatif sur la perception et le confort visuel de l'utilisateur.

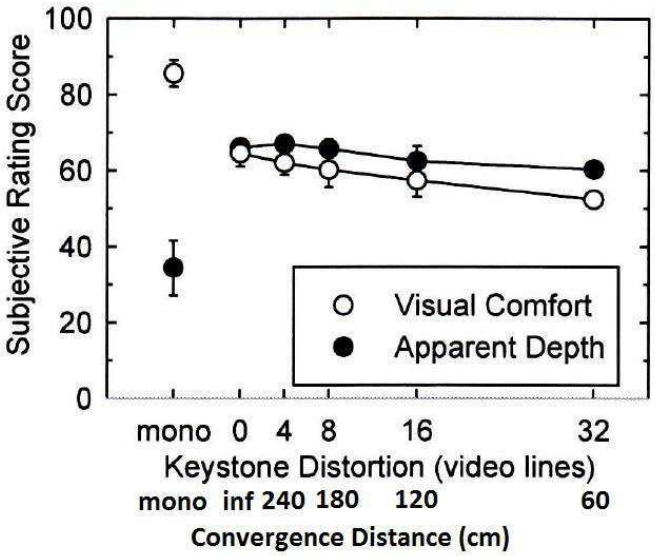

Figure 58 : résultat de l'expérimentation de (Stelmach et al. 2003)**. Ce graphique représente les notes attribuées par les participants à propos du confort visuel (cercles vides) et la profondeur apparente (cercles pleins). L'axe des abscisses représente la déformation de l'image qui correspond à une distance de convergence des caméras. À gauche, deux mesures sont particulières : « mono » représente l'expérience réalisée avec un affichage monoscopique et « inf » correspond à une distance de convergence de caméras infinie, c'est-à-dire que les axes des caméras sont parallèles.**

(Allison 2007) a également montré que les parallaxes verticales sont fatigantes pour le système visuel. Il note également que la convergence des caméras stéréoscopiques produit des disparités verticales qui permettent de percevoir les objets plus proches de l'utilisateur. D'après lui, cette différence de distance provoque un conflit d'estimation de distance avec d'autres indices comme l'accommodation et la vergence. Il préconise donc de restreindre les parallaxes verticales pour limiter ce conflit et percevoir les objets à la bonne distance. (Woods et al. 1993) ont montré le même résultat avec une précision supplémentaire : les objets sont perçus plus proches lorsqu'ils sont situés au centre de l'écran et plus éloignés lorsqu'ils sont situés aux coins de l'écran.

3.3. Perception des formes

Nous avons vu précédemment que les disparités verticales améliorent la perception des formes. Il devrait donc en être de même pour les parallaxes verticales. Toutefois, nous n'avons pas trouvé d'études permettant d'accréditer cette affirmation. Nous allons donc nous pencher sur ce point pour l'éclaircir et donner une réponse à la question : les parallaxes verticales ont-elles une influence sur la perception des formes ?

4. Implémentation des parallaxes verticales

Comme l'explique (Allison 2007), les effets de la convergence des caméras dépendent de la méthode de convergence employée. Dans cette section, nous allons d'abord décrire le processus de rendu habituel puis nous allons préciser quelle partie de ce processus sera remplacée. Ensuite, nous allons expliquer notre méthode de calcul.

4.1. Processus de rendu

Le fonctionnement d'un processus de rendu classique va être décrit au travers d'un exemple. Dans cet exemple, nous allons effectuer un rendu de trois faces d'un cube. Le rendu final désiré est visible sur la Figure 59. Les coordonnées des points utilisés sont notées dans le Tableau 6. Toutes les étapes décrites ci-dessous sont effectuées en parallèle sur la carte graphique pour une plus grande rapidité.

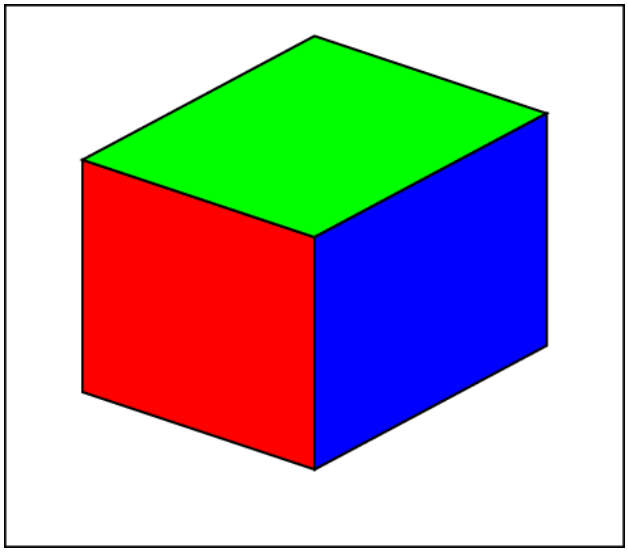

Figure 59 : rendu final désiré pour l'exemple du processus de rendu habituel.

A	B	C	D	E	F	H
(1,1,-1)	(1,1,1)	(-1,1,1)	(-1,1,-1)	(1,-1,-1)	(1,-1,1)	(-1,-1,-1)

Tableau 6 : coordonnées des sommets utilisés par l'exemple du processus de rendu.

Première étape du processus de rendu

La première étape du processus de rendu consiste à projeter l'ensemble des sommets de la scène sur le *near plane* afin d'avoir leur position sur l'écran. Le résultat de cette opération sur notre exemple est visible sur la Figure 60. Dans les langages de programmation 3D, cette étape est réalisée à l'aide de *vertex shaders*, des programmes informatiques très courts et effectués sur carte graphique. Un *vertex shader* réalise une transformation sur l'ensemble des sommets de la scène virtuelle. Cette transformation permet de transformer le *frustum* pyramidal de la caméra en un cube de 2 unités de côté. Elle est modélisée par une matrice appelée matrice de projection. Ainsi, un *vertex shader* prend en entrée la position des sommets dans l'espace virtuel et renvoie la position de chaque sommet sur le *near plane*, ainsi que la profondeur de ce point par rapport à la caméra. Les *vertex shaders* permettent également de faire transiter la couleur d'un sommet provenant du programme exécuté vers la carte graphique.

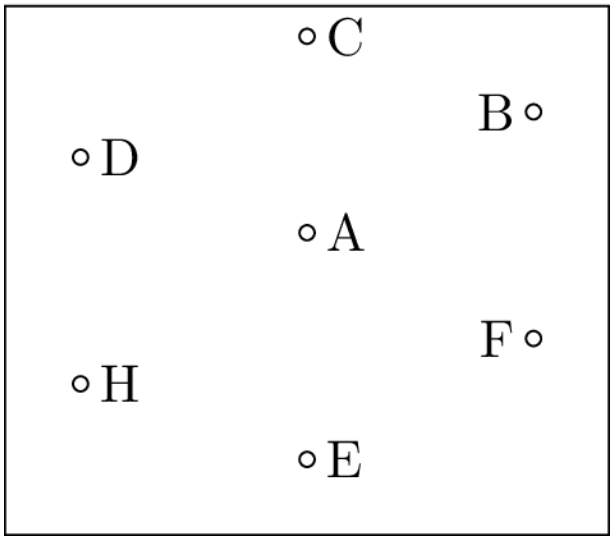

Figure 60 : résultat de la première étape d'un processus de rendu.

Seconde étape du processus de rendu

La seconde étape du rendu consiste à reformer des primitives à partir des sommets projetés sur le *near plane*. Une primitive est un triangle, c'est-à-dire la plus petite forme pouvant être utilisée pour créer des formes 3D plus complexes. Cette étape est souvent appelée la rastérisation. Pour notre exemple, le résultat de la rastérisation est visible sur la Figure 61.

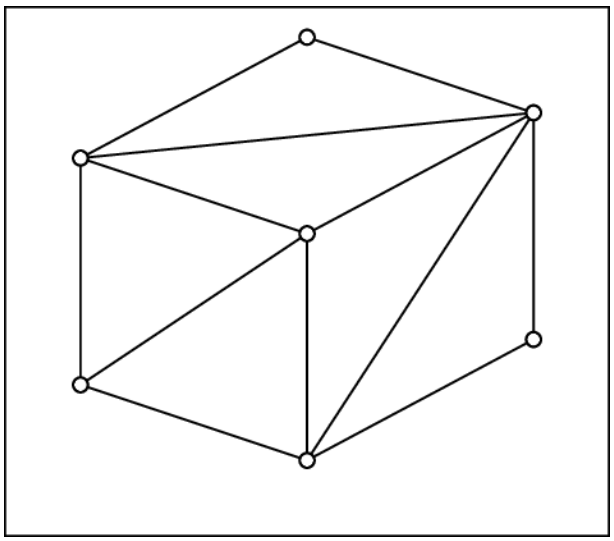

Figure 61: résultat de la deuxième étape d'un processus de rendu.

Troisième étape du processus de rendu

La troisième étape consiste à pixéliser les triangles obtenus lors de l'étape précédente. Chaque triangle est découpé en fragment, chaque fragment représentant un pixel. Si le *vertex shader* a assigné des couleurs différentes à des sommets d'un triangle, la rastérisation se chargera d'interpoler la couleur de chaque fragment pour réaliser des dégradés.

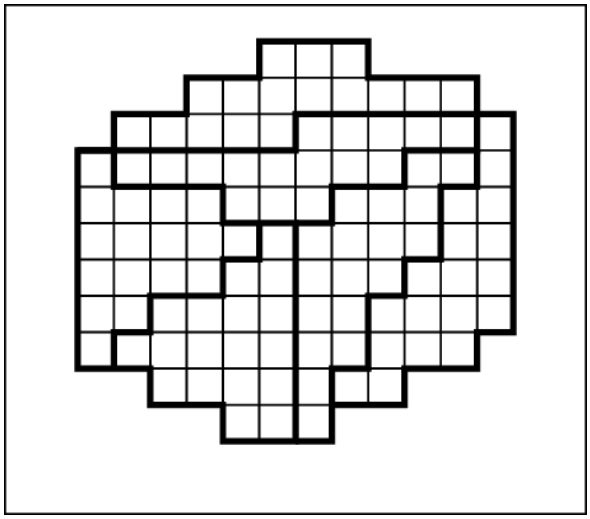

Figure 62: résultat de la troisième étape d'un processus de rendu.

Quatrième étape du processus de rendu

La quatrième étape de rendu consiste à colorier chaque fragment à l'aide d'un *fragment shader*. Un *fragment shader* est un petit programme informatique s'exécutant sur la carte graphique pour chaque fragment de l'image. Son but est de colorier chaque fragment en fonction de l'éclairage, de la transparence et de la couleur des objets. Pour notre exemple, le résultat de l'application d'un *fragment shader* est visible sur la Figure 63. Les *fragment shaders* sont souvent utilisés pour réaliser des effets au niveau des textures ou sur l'image. Dans l'expérimentation du Chapitre 4, nous avons utilisé des *fragment shaders* pour pouvoir calculer le flou très rapidement.

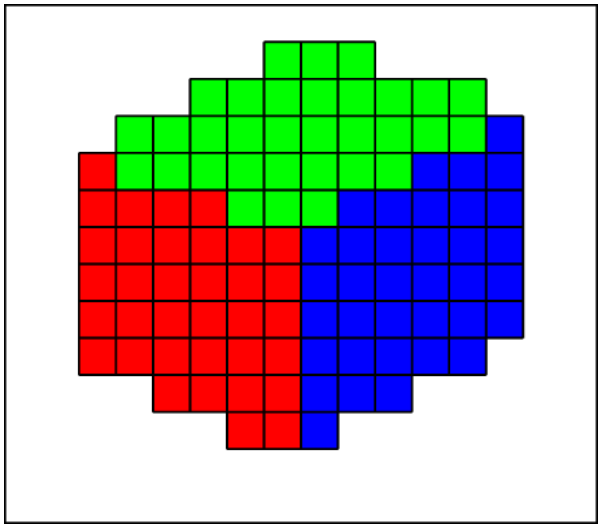

Figure 63: résultat de la quatrième étape d'un processus de rendu.

Cinquième étape du processus de rendu

La cinquième étape consiste à sélectionner les fragments qui seront affichés à l'écran. Pour cela, deux tests sont effectués. À chaque pixel de l'écran peut correspondre plusieurs fragments, ce cas est présent lorsque plusieurs objets sont les uns derrière les autres. Le premier test consiste à comparer les fragments correspondant à un pixel donné et de choisir le plus proche de la caméra. Ce test est appelé le test du *z-buffer*. Lors d'un rendu, il n'est possible d'effectuer le rendu que d'une partie de l'image. Le deuxième test consiste à filtrer les pixels qui doivent être recolorés. Cela permet de ne dessiner qu'une partie de l'image si besoin. Pour notre exemple, le test du *z-buffer* serait utilisé pour cacher les faces arrière du cube s'il y en avait eu.

4.2. Modification du processus

Nous avons vu le processus de rendu dans sa globalité. Toutefois, ce processus n'est utilisable que si les deux caméras ont leurs axes optiques parallèles entre eux et perpendiculaires à l'écran. Dans le cas contraire, comme l'écran n'est pas vu rectangulaire et comme le *frustum* est de base rectangulaire, il ne s'adaptera pas à l'écran. Certains points de l'espace seront donc affichés sur l'écran alors qu'ils ne doivent pas et d'autres ne seront pas affichés sur l'écran alors qu'ils le doivent. Il est donc nécessaire de modifier le processus de rendu et plus précisément la méthode de projection (la première étape) pour prendre en compte cette déformation.

Dans la suite de cette section, nous allons décrire plus en détail la méthode de projection habituelle. Ensuite, notre méthode de projection permettant de modifier l'orientation de la caméra sera à son tour expliquée.

Méthode de projection classique

Nous avons vu que la méthode de projection utilisée actuellement consistait à projeter chaque sommet de l'espace sur le *near plane* selon l'axe sommet-caméra. Si nous définissons le *frustum* de la caméra de manière identique qu'au Chapitre 2, les calculs de projection peuvent être réalisés à l'aide de coordonnées homogènes et d'une opération matricielle. La Figure 64 illustre la déformation réalisée par cette transformation.

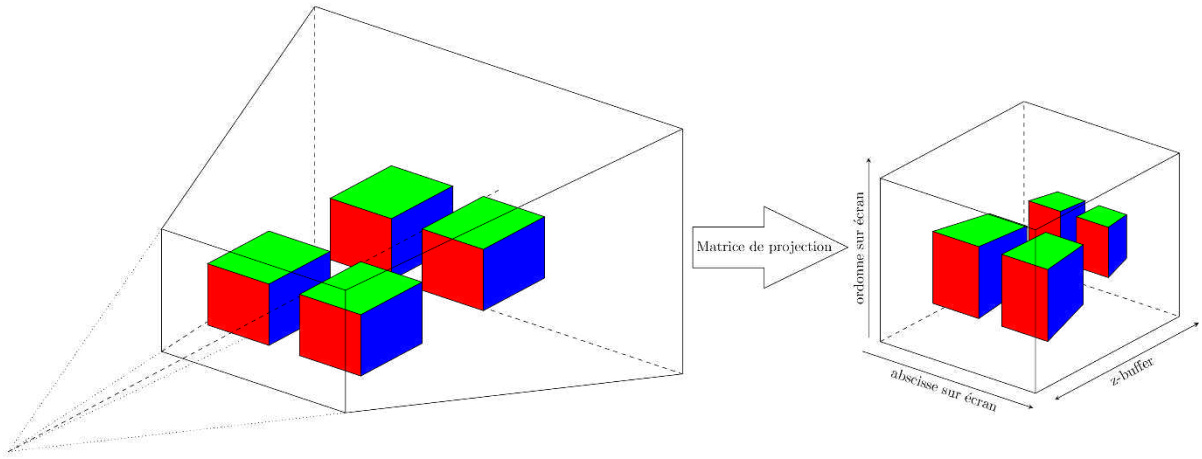

Figure 64 : résultat de l'exécution d'un *vertex shader*. À gauche, nous avons le monde virtuel avec quatre cubes et le *frustum* dessiné en fil de fer. À droite, le vertex shader a transformé le monde virtuel, c'est-à-dire les quatre cubes, en quatre hexaèdres. Pour chaque point dans le *frustum* transformé (à droite), les deux premières coordonnées correspondent à la position du point sur l'écran et la troisième coordonnée correspond à la profondeur du point utilisé par le test du *z-buffer*.

Nous allons maintenant décrire la méthode de calcul de la matrice de projection. Soit un point P de coordonnées homogènes $(x, y, z, 1)$ et soit P_1 la projection de P sur le *near plane* de coordonnées homogènes $(x', y', z', 1)$.Nous allons noter les caractéristiques du *frustum*en utilisant les abréviations notées dans le Tableau 7. Nous nous plaçons dans le repère de la caméra. L'axe (Ox) est orienté vers la droite, l'axe (Oy) est orienté vers le haut et l'axe (Oz) est orienté vers l'arrière de la caméra. L'ensemble de ces données est représenté sur la Figure 65.

Nom complet	near	far	right	left	top	Bottom
Abréviation	n	f	r	l	t	b

Tableau 7: tableau des abréviations utilisées dans cette section.

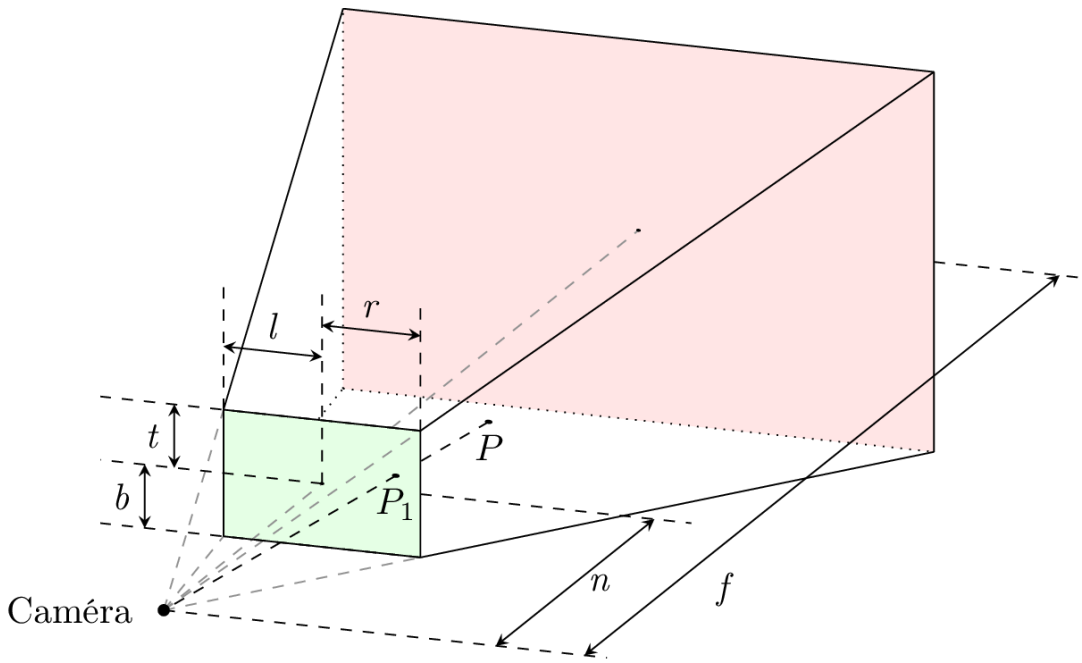

Figure 65 : le *frustum* avec les données nécessaires pour calculer la matrice de projection.

Le point P_1 qui est la projection du point P sur le *near* plane a pour coordonnées $(-n \times x \div z, -n \times y \div z, -n)$. L'étape suivante consiste à normaliser la taille du *near plane* à l'aide de la fonction suivante :

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R} \times \mathbb{R} & \rightarrow & \mathbb{R} \times \mathbb{R} \\ (x, y) & \mapsto & \left(\frac{2x}{r-l} - \frac{r+l}{r-l}; \frac{2y}{t-b} - \frac{t+b}{t-b}\right) \end{array}$$

La composition des deux transformations précédentes permet d'obtenir la transformation $Proj_{hab}$ suivante pour la variable x :

$$Proj_{hab,x} : x \mapsto \frac{2}{r-l}\frac{-nx}{z} - \frac{r+l}{r-l}$$

Soit :

$$Proj_{hab,x} : x \mapsto -\frac{1}{z}\left(\frac{2n}{r-l}x + \frac{r+l}{r-l}z\right)$$

De même, nous avons une fonction similaire pour la coordonnée y :

$$Proj_{hab,y} : y \mapsto -\frac{1}{z}\left(\frac{2n}{t-b}y + \frac{t+b}{t-b}z\right)$$

La coordonnée z est un peu particulière puisqu'elle ne dépend ni de x ni de y. La fonction associée à z est donc de la forme :

$$Proj_{hab,z} : z \mapsto -\frac{1}{z}(Az + B)$$

Sachant que $Proj_{hab,z}(-n) = -1$ et que $Proj_{hab,z}(-f) = 1$, nous obtenons :

$$\begin{cases} A = \dfrac{f+n}{f-n} \\ B = \dfrac{2fn}{f-n} \end{cases}$$

Comme nous utilisons les coordonnées homogènes $(x; y; z; w)$, nous allons diviser le résultat par w pour trouver des coordonnées spatiales tridimensionnelles classiques. Ici, nous pouvons prendre $w = -z$ et nous retrouvons la matrice de projection classique, à savoir :

$$\begin{pmatrix} \dfrac{2n}{r-l} & 0 & \dfrac{r+l}{r-l} & 0 \\ 0 & \dfrac{2n}{t-b} & \dfrac{t+b}{t-b} & 0 \\ 0 & 0 & -\dfrac{f+n}{f-n} & -\dfrac{2nf}{f-n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Les coordonnées de P_1 sont ensuite envoyées par le *vertex shader* puis, une fois que toutes les projections des sommets ont été calculées, le processus de rendu passe à l'étape suivante.

Un lecteur attentif aura remarqué que la troisième coordonnée calculée du point P_1 n'est pas égale à la distance entre le point P_1 et le *near plane*. En pratique, cette coordonnée représente la « profondeur » du point P dans le frustum. Elle sera utilisée par l'algorithme du *z-buffer* pour déterminer quel point est le plus proche de la caméra pour trouver la bonne couleur pour le pixel en question.

Méthode de projection en fonction du point de fixation

Nous avons vu en détail la projection des sommets sur le *near plane*. Nous allons maintenant expliquer notre méthode de projection. Avant d'expliquer les calculs de la projection, nous allons expliquer comment les caméras virtuelles ont été imaginées.

Pour expliquer le modèle de caméra, la métaphore de la fenêtre est souvent utilisée : l'écran est une fenêtre ouverte sur le monde virtuel. Il est donc naturel que la caméra adapte son *frustum* pour correspondre aux côtés de l'écran. Cette idée est utilisée dans le cas des *frustums* asymétriques. Dans le cas d'une caméra non perpendiculaire à l'écran, l'écran est perçu comme étant un quadrilatère quelconque. Or, les *frustums* habituels ont une base rectangulaire (voir section 4.2). Il est donc nécessaire de repenser la méthode de projection pour l'adapter à cette nouvelle configuration. Notre méthode consiste à adapter le *frustum* à la forme de l'écran lorsque celui-ci est vu de côté. La Figure 66 représente l'application de notre méthode sur quatre cubes.

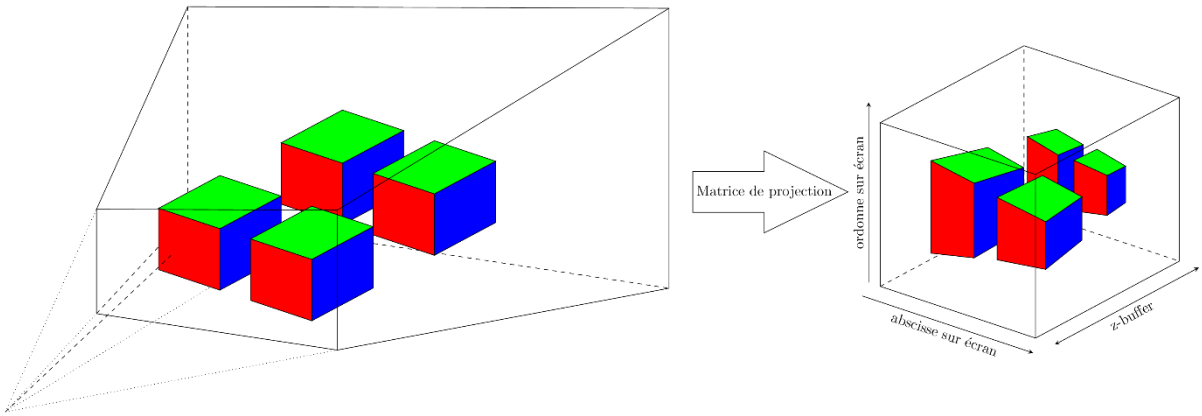

Figure 66 : application de notre méthode de projection. À gauche, nous voyons que le *frustum* utilisé est à base quelconque. Il va donc s'adapter à la forme de l'écran, quelle que soit la forme perçue de l'écran. Ici, la caméra est positionnée du côté gauche des cubes. Les côtés gauches des cubes doivent apparaitre plus gros que les côtés droits des cubes et les cubes de gauche sont également plus gros que les cubes de droite. La partie droite du schéma représente le résultat de notre transformation. Le *frustum* devient donc un cube de côté 2 et les cubes sont déformés. Dans ce schéma, l'effet de la convergence des caméras a été accentué pour bien comprendre l'effet de la transformation.

Nous allons maintenant développer les calculs permettant de réaliser cette transformation. Nous nous plaçons dans le repère de la caméra. Notre méthode commence par projeter les sommets sur le *near plane*. Un point P de coordonnées (x, y, z) sera donc projeté selon l'axe point caméra sur le *near plane* au point P_1 de coordonnées $(n \times x \div z; n \times y \div z; n)$. La deuxième partie de notre méthode de projection consiste à normaliser la surface du *near plane* correspondant au *frustum*. La normalisation est calculée à l'aide des équations suivantes :

$$\begin{cases} x' = \alpha_x x + \beta_x y + \gamma_x xy + \delta_x \\ y' = \alpha_y x + \beta_y y + \gamma_y xy + \delta_y \end{cases}$$

Les calculs des coefficients α_x, β_x, γ_x, δ_x, α_y, β_y, γ_y et δ_y sont les suivants. Soient A', B', C' et D' les projections des sommets sur le *near plane* et A, B, C et D les points du *near plane* de coordonnées respectives $(-1; -1)$, $(1; -1)$, $(1; 1)$ et $(-1; 1)$. Nous avons donc les équations suivantes pour les abscisses :

$$\begin{cases} x_A = \alpha_x x_{A'} + \beta_x y_{A'} + \gamma_x x_{A'} y_{A'} + \delta_x \\ x_B = \alpha_x x_{B'} + \beta_x y_{B'} + \gamma_x x_{B'} y_{B'} + \delta_x \\ x_C = \alpha_x x_{C'} + \beta_x y_{C'} + \gamma_x x_{C'} y_{C'} + \delta_x \\ x_D = \alpha_x x_{D'} + \beta_x y_{D'} + \gamma_x x_{D'} y_{D'} + \delta_x \end{cases}$$

Si nous posons $H = \begin{pmatrix} x_{A'} & y_{A'} & x_{A'} y_{A'} & 1 \\ x_{B'} & y_{B'} & x_{B'} Y_{B'} & 1 \\ x_{C'} & y_{C'} & x_{C'} y_{C'} & 1 \\ x_{D'} & y_{D'} & x_{D'} y_{D'} & 1 \end{pmatrix}$, l'équation ci-dessus devient :

$$\begin{pmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \\ x_D \end{pmatrix} = H \times \begin{pmatrix} \alpha_x \\ \beta_x \\ \gamma_x \\ \delta_x \end{pmatrix}$$

Donc : $\begin{pmatrix} \alpha_x \\ \beta_x \\ \gamma_x \\ \delta_x \end{pmatrix} = H^{-1} \begin{pmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \\ x_D \end{pmatrix}$ si la matrice H est inversible[9].

Pour les ordonnées, nous obtenons les mêmes équations, d'où :

$$\begin{pmatrix} \alpha_y \\ \beta_y \\ \gamma_y \\ \delta_y \end{pmatrix} = H^{-1} \begin{pmatrix} y_A \\ y_B \\ y_C \\ y_D \end{pmatrix}$$

Une fois que les coefficients sont calculés, nous pouvons en déduire les équations recherchées. Les équations finales de projection du point P sur le *near plane* en un point P_n de coordonnées $(x_n; y_n; z_n)$ sont les suivantes :

$$\begin{cases} x_n = -\frac{1}{z}\left(n\alpha_x x + n\beta_x y - n^2\gamma_x \frac{xy}{z} - \delta_x z\right) \\ y_n = -\frac{1}{z}\left(n\alpha_y x + n\beta_y y - n^2\gamma_y \frac{xy}{z} - \delta_y z\right) \end{cases}$$

Ces équations n'étant pas linéaires, il n'est pas possible d'utiliser un produit matriciel pour réaliser ces opérations. Elles seront donc implémentées telles quelles dans notre programme. Une fois que cette projection a été réalisée, le processus graphique reprend de la manière habituelle.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons constaté que les disparités verticales sont complémentaires aux disparités horizontales et améliorent les perceptions des formes et des distances. Après avoir fait ce constat, nous nous sommes intéressés aux parallaxes verticales qui sont le pendant les disparités verticales dans les méthodes de rendus. Ces parallaxes verticales sont connues pour améliorer la perception des distances, mais l'effet de ces parallaxes sur la perception des formes est inconnu. Pourtant, étant donné que les disparités verticales améliorent la perception des formes et que les parallaxes verticales reproduisent les disparités verticales, les parallaxes verticales devraient également améliorer la perception des formes. Cette affirmation va faire l'objet d'une expérimentation dans le prochain chapitre pour déterminer sa véracité.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons également discuté de méthodes pour faire converger correctement des caméras stéréoscopiques et nous avons présenté notre méthode de convergence de caméras stéréoscopiques virtuelles. Dans le prochain chapitre, cette méthode sera évaluée afin de savoir son impact sur la perception de formes.

[9] En pratique, la matrice H est presque toujours inversible. Il existe des rares cas ponctuels dans lesquels le programme indique que cette matrice est non inversible. Cela est sans doute causé par la précision des calculs.

Chapitre 6

Restitution visuelle stéréoscopique améliorée et perception des formes

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que les disparités verticales améliorent la perception de l'environnement réel. Nous avons également vu que lors de la visualisation d'un contenu stéréoscopique artificiel, la perception des utilisateurs est erronée à cause de l'absence de parallaxes verticales sur l'écran (section 3 du Chapitre 5). Cette erreur est provoquée par la génération des images stéréoscopiques à l'aide de caméras dont les axes optiques sont parallèles. Si les axes optiques des caméras convergent sur le point de regard de l'utilisateur, les parallaxes verticales seront recréées correctement sur l'écran et l'utilisateur devrait mieux percevoir le contenu stéréoscopique. Suite à cette réflexion, nous allons réaliser une expérimentation afin de tester l'effet de la convergence des caméras stéréoscopiques sur la perception des formes.

2. Méthode psychophysique

Pour savoir si les parallaxes verticales améliorent la perception des formes, nous allons réaliser une expérimentation dans laquelle l'utilisateur devra identifier une forme. Nous voulons donc relier un stimulus physique (la forme) à la perception du stimulus. Les méthodes psychophysiques permettent de déterminer cette relation. Nous allons nous appuyer sur ces méthodes afin de réaliser notre expérimentation. Il existe deux classes de méthodes psychophysiques : les méthodes classiques et les méthodes adaptatives permettant de trouver le seuil de détection du stimulus. Le principal inconvénient des méthodes classiques est le nombre de tests très important à réaliser si une valeur approximative du seuil n'est pas connue (Plaghki & Mouraux 2001). Les méthodes adaptatives n'ont pas cet inconvénient. En effet, ces méthodes s'adaptent aux réponses du participant afin de déterminer le seuil. Dans notre cas, comme le seuil sera compris dans un intervalle bien délimité, nous disposons d'une valeur très approximative du seuil voulu. Nous allons donc utiliser les méthodes classiques. Dans cette section, nous allons présenter plusieurs méthodes psychophysiques différentes et choisir la plus adaptée pour réaliser notre expérimentation.

2.1. Description des méthodes psychophysiques classiques

Fonction psychométrique

Avant de présenter les méthodes psychophysiques, nous allons expliquer ce qu'est la fonction psychométrique à l'aide d'un exemple. Nous voulons déterminer quel niveau d'un stimulus permet de détecter celui-ci. Kniveaux de stimulus sont testés, avec un même nombre de tests pour chaque niveau. Ensuite, pour chaque niveau de stimulus, le pourcentage de réussite (ou pourcentage de détection de stimulus) est calculé et reporté sur un histogramme (en gris sur la Figure 67). La courbe passant par chaque sommet des barres de l'histogramme est appelée fonction psychométrique (en bleu sur la Figure 67).

La fonction psychométrique est souvent assimilée à une distribution gaussienne cumulée d'équation (Wetherill & Levitt 1965) :

$$F(x) = \int_{-\infty}^{(x-\mu)/\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Les paramètres μ et σ définissent respectivement la position et la pente de la fonction psychométrique et leur interprétation dépend du phénomène étudié (Wetherill & Levitt 1965).

Le *JND* (*Just Noticeable Difference*) est défini comme étant l'intensité du premier niveau du stimulus ayant un taux de reconnaissance supérieur ou égal à 75%. Dans l'exemple de la Figure 67, le *JND* correspond à un niveau de stimulus de 6.

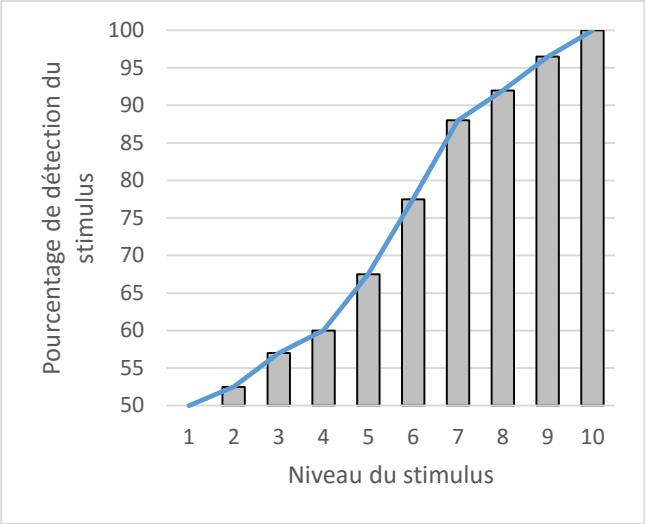

Figure 67 : exemple d'histogramme représentant le taux de détection du stimulus en fonction son niveau. La fonction psychométrique associée à cet histogramme est affichée en bleu.

Méthode des ajustements

Dans la méthode des ajustements, le participant va faire varier le stimulus jusqu'à ce qu'il aperçoive le stimulus (Plaghki & Mouraux 2001). Cette méthode est intéressante, car elle permet au participant de fixer lui-même sa limite de perception, ainsi, il n'est pas nécessaire de connaître approximativement le seuil. De plus, il s'agit d'une méthode très rapide à réaliser. Toutefois, elle demeure peu précise, car la mesure n'est pas normalisée (Ehrenstein & Ehrenstein 1999) et elle ne permet pas de connaître la fonction psychométrique (Plaghki & Mouraux 2001).

Méthode des limites

La méthode des limites consiste à faire varier la valeur du stimulus de manière croissante ou décroissante. À chaque stimulus, le participant doit indiquer s'il perçoit ou non le stimulus. Pour une série, le seuil de détection est la valeur du stimulus pour laquelle la réponse des participants s'est inversée (Plaghki & Mouraux 2001). Cette méthode est utilisée par la recommandation ITU-R BT 2021 (ITU 2012) pour mesurer la limite de fusion des images stéréoscopiques d'une personne, comme nous l'avons vu dans le Chapitre 3, section 4.2.4. Cette méthode est assez rapide et simple. Toutefois, elle présente un risque d'apprentissage et d'hystérésis, car les stimuli présentés seront toujours dans le même ordre (Plaghki & Mouraux 2001). En effet, la limite de différentiation lorsque la valeur du stimulus augmente et lorsque la valeur du stimulus diminue n'est pas forcément la même. Il faut donc soit traiter les deux cas, soit faire la moyenne des deux valeurs obtenues (Ehrenstein & Ehrenstein 1999).

Méthode des stimuli constants

Dans la méthode des stimuli constants, un nombre déterminé de niveaux du stimulus est présenté successivement au sujet dans un ordre aléatoire. Pour chaque valeur, le sujet doit informer s'il perçoit ou non le stimulus. Ainsi, pour chaque niveau du stimulus, cette méthode donne le pourcentage de reconnaissance du stimulus (Plaghki & Mouraux 2001). Nous pouvons donc tracer la fonction psychométrique et ainsi déterminer le niveau du stimulus pour lequel la reconnaissance est de 50%. Cette méthode permet d'avoir un seuil selon des valeurs normalisées, mais elle possède deux inconvénients : il est nécessaire de réaliser un grand nombre de tests afin de trouver le seuil avec une bonne précision (Plaghki & Mouraux 2001) et il est nécessaire de connaître un encadrement de la valeur recherchée. Pour cela, il est possible d'utiliser une des deux autres méthodes (Ehrenstein & Ehrenstein 1999).

2.2. Choix de la méthode

Pour notre expérimentation, nous avons besoin d'une méthode fiable, avec peu de risque d'apprentissage. Nous pouvons facilement borner la valeur du seuil de détection afin de limiter le nombre de mesures inutiles (celles pour lesquelles le sujet ne sait pas détecter le stimulus et celles dans lesquelles la détection du stimulus est évidente). Enfin, comme le stimulus est assez court (environ 5 secondes par stimulus), nous pouvons réaliser un grand nombre de tests pour chaque niveau de stimulus. La méthode correspondant le mieux à nos besoins est donc la méthode des stimuli constants.

3. Expérimentation

Après avoir vu quelle méthode psychophysique nous allons utiliser, nous allons maintenant décrire l'expérimentation.

3.1. Hypothèse

Cette expérimentation a pour but de savoir si l'ajout de parallaxes verticales en vision périphérique permet d'améliorer la perception des formes en vision stéréoscopique artificielle. Nous pensons que cette hypothèse sera vérifiée, car les parallaxes verticales reproduisent les disparités verticales en vision périphérique et les disparités verticales servent à améliorer la perception des formes en vision naturelle.

3.2. Protocole expérimental

Dans cette section, nous allons décrire précisément quels paramètres nous voulons étudier ainsi que la manière de les étudier.

Paramètres étudiés

Dans cette expérimentation, nous allons tester les effets et les limites de la convergence des caméras stéréoscopiques. En particulier, deux paramètres seront évalués. Il s'agit de l'influence de la distance de convergence par rapport au participant et de la limite périphérique de l'effet des parallaxes verticales.

Effet des parallaxes verticales sur la perception des formes

Tout d'abord, nous allons vérifier notre hypothèse principale, c'est-à-dire que nous allons tester si les parallaxes verticales ont un impact sur la perception des formes.

Effet des parallaxes verticales et distance au point de regard

Lorsque les yeux regardent un point proche, les axes optiques des yeux se coupent en formant un angle. Plus ce point de fixation est éloigné et plus cet angle va diminuer. C'est-à-dire que plus le point de fixation est éloigné, plus les caméras se rapprocheront de la configuration parallèle. Pour cette raison, le point de convergence testé sera au niveau de l'écran ou entre l'écran et l'utilisateur. Nous allons tester les deux distances suivantes $1.2m$ (au niveau de l'écran, c'est-à-dire avec peu de parallaxes horizontales et des parallaxes verticales peu importantes) et $0.7m$ (devant l'écran, avec des parallaxes horizontales et verticales plus importantes). Si le point de convergence des caméras est situé derrière l'écran, les parallaxes verticales créées sont inférieures à la taille d'un pixel (1.6mm pour notre configuration), ce qui les rend invisibles sur l'écran. L'objectif est de savoir si les parallaxes verticales ont un effet à ces deux distances.

Effet des parallaxes verticales en fonction de la taille des objets

Comme nous l'avons vu, les parallaxes verticales entrainent des disparités verticales sur la rétine, ces parallaxes verticales sont principalement localisées en vision périphérique, de la même manière que les disparités verticales. Nous avons également vu que la vision périphérique était moins performante que la vision centrale à cause de la diminution de l'acuité stéréoscopique dans cette zone (Chapitre 2). Les parallaxes verticales vont être testées sur des objets de deux tailles différentes afin de savoir si elles ont moins d'impact sur des grands objets par rapport à leur impact sur des objets plus petits.

Méthode expérimentale

Nous allons maintenant décrire l'expérience réalisée afin de valider ou d'infirmer notre hypothèse. Pendant l'expérimentation, l'utilisateur sera immergé dans un monde virtuel composé d'une croix de couleur verte vive, d'un cuboïde de couleur rouge assez sombre affiché en fil de fer, le tout disposé dans un environnement noir (Figure 68). Ainsi, le regard sera attiré par l'objet de couleur vive et nous connaîtrons précisément le point de regard du participant. L'affichage du cuboïde en fil de fer permet d'avoir une transition entre l'objet et le fond en haute fréquence spatiale et facilite la perception de la profondeur de la face arrière, comparé à un cube plein. De plus, un cuboïde est une forme simple et symétrique qui ne nécessite pas de référentiel. Cette forme est également connu des participants, ce qui les aidera à la percevoir (Rock 1985). Des couleurs unies ont été utilisées pour colorier les arêtes du cuboïde et la croix, car l'utilisation de textures risque de modifier la perception des participants et donc de fausser l'expérimentation. Le fond est noir afin de forcer l'utilisateur à se concentrer sur les autres objets. (Luo et al. 2007) a montré qu'ajouter un fond permettait de mieux percevoir les distances donc un fond noir va également éviter que les participants se basent sur le fond pour percevoir la forme. La face avant du cuboïde sera carrée, mais la profondeur du cuboïde va changer. Cette profondeur sera soit plus petite que la largeur, soit plus grande que la largeur et ne sera en aucun cas identique à la largeur tout au long du test afin de forcer le participant à donner une réponse non neutre. Lorsque le participant verra un cuboïde, il devra dire si la profondeur est plus grande ou plus petite que la largeur de ce cuboïde tout en fixant son regard sur la croix verte.

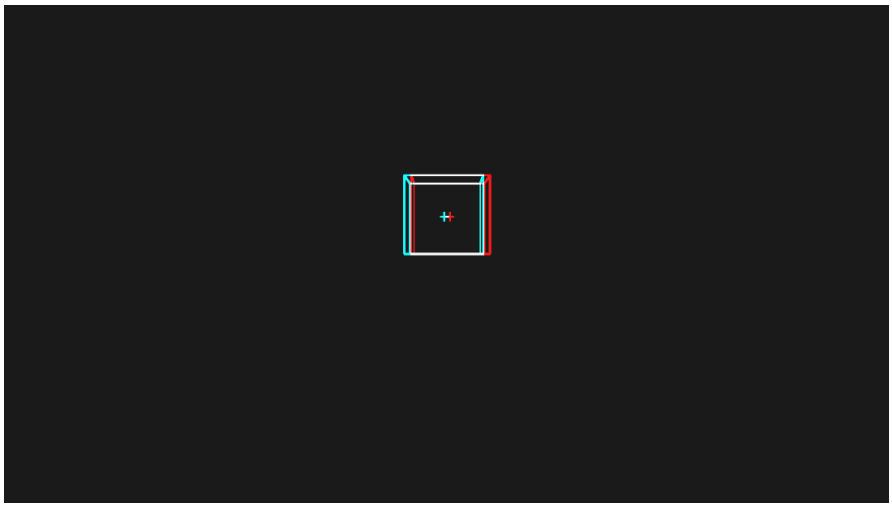

Figure 68 : le monde virtuel vu par les participants. Sur cette image, le cuboïde et la croix sont positionnés devant l'écran. Notons que cette capture d'écran a été réalisée en anaglyphe pour pouvoir différencier l'image gauche de l'image droite. Durant la vraie expérimentation, la croix est verte et le cuboïde est rouge.

Le participant est assis à $1.2m$ de l'écran et est centré par rapport à l'écran. Il tient dans sa main une manette de jeu sans fil comportant un bouton '+' et un bouton '-'. Si le participant pense

que le cuboïde visionné a une profondeur plus grande que la largeur, il devra appuyer sur le bouton '+' de la manette. Dans le cas contraire, il devra appuyer sur le bouton '-'. Lorsqu'il appuie sur le bouton, le cuboïde et la croix disparaissent progressivement dans un fondu afin de ne pas fatiguer le système visuel du participant avec des hautes fréquences temporelles, puis, après 2 secondes, la croix et un cuboïde avec une profondeur potentiellement différente et une taille potentiellement différente réapparaissent. Le temps d'attente a été ajouté après quelques tests pour que le participant ne puisse pas comparer deux formes successives et pour éviter un effet de mémorisation visuelle. La profondeur du cuboïde varie entre -3% (aucune modification visible du cuboïde ; il y aura donc un taux de reconnaissance de 50% de la forme) et -20% (le taux de reconnaissance de la forme sera de 100%) pour un cuboïde avec une profondeur plus petite que la largeur et entre $+3\%$ et $+20\%$ pour un cuboïde avec une profondeur plus grande que la largeur. Les pourcentages de variation du cuboïde ont été déterminés par prétests. La Figure 69 résume l'ensemble des positions et des profondeurs minimales et maximales du cuboïde présenté aux participants. Les tableaux Tableau 8, Tableau 9, Tableau 10 et Tableau 11 résument les excentricités auxquelles les cubes idéaux sont perçus. Notons que ces excentricités changent légèrement tout au long de l'expérimentation, car le sujet voit un cuboïde et non un cube. Elles varient aussi selon le mouvement de la tête de nos participants.

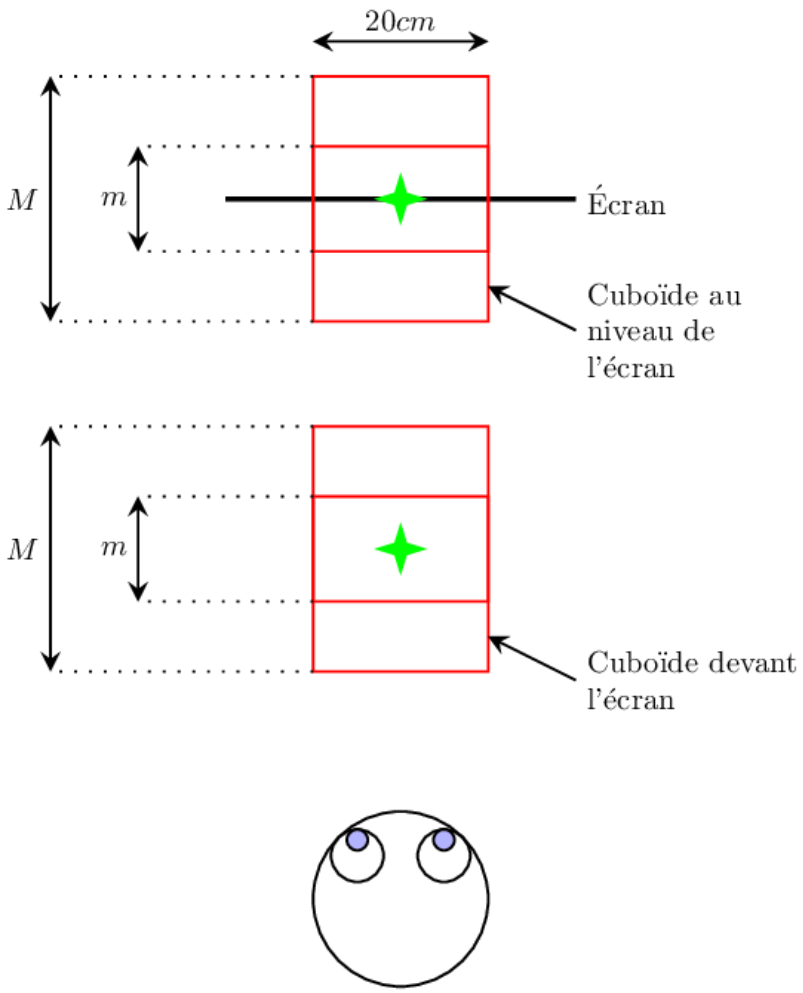

Figure 69 : l'ensemble des positions et des tailles possibles pour le cuboïde de $20cm$ de largeur. La longueur M a pour valeur $24cm$ et celle de m est de $16cm$. Pour le cuboïde de $35cm$ de largeur, M a pour valeur $42cm$ et m a pour valeur $28cm$.

		Côté du sommet	
		Gauche	Droit
Position du sommet	Proche	13.6°	18.4°
	Loin	7.6°	10.4°

Tableau 8 : excentricités des sommets du cube idéal pour un petit cube proche du participant. Ces excentricités sont celles de l'œil gauche.

		Côté du sommet	
		Gauche	Droit
Position du sommet	Proche	32.8°	37.8°
	Loin	12.1°	14.5°

Tableau 9: excentricités des sommets du cube idéal pour un grand cube proche du participant. Ces excentricités sont celles de l'œil gauche.

		Côté du sommet	
		Gauche	Droit
Position du sommet	Proche	6.9°	9.4°
	Loin	4.9°	6.8°

Tableau 10: excentricités des sommets du cube idéal pour un petit cube au niveau de l'écran. Ces excentricités sont celles de l'œil gauche.

		Côté du sommet	
		Gauche	Droit
Position du sommet	Proche	14.9°	17.7°
	Loin	8.3°	9.9°

Tableau 11: excentricités des sommets du cube idéal pour un grand cube au niveau de l'écran. Ces excentricités sont celles de l'œil gauche.

Déroulement de l'expérimentation

L'expérimentation se déroule de la manière suivante : le participant est accueilli et il s'assoit sur une chaise située à $1.5m$ de l'écran. La position des sujets a été calculée afin que ceux-ci puissent voir la totalité du stimulus sans avoir besoin de déplacer la tête et qu'ils soient suffisamment proches de l'écran pour que l'angle de convergence des axes optiques de leurs yeux soit important. Ensuite, la tâche à effectuer est décrite. Après avoir vérifié que le participant n'a pas de question à propos de la tâche à effectuer, un programme d'entrainement de 3 minutes de la tâche est lancé afin d'habituer le sujet à fixer la croix verte sans regarder le cube rouge. Cet entrainement va également permettre de vérifier que le participant a bien compris la tâche à effectuer. À la fin de cet entrainement et après vérification auprès du participant qu'il n'a pas de question, la véritable expérimentation démarre. Après 30 minutes, le programme s'arrête automatiquement et le participant peut repartir. Les durées de l'entrainement et de l'expérimentation ont été fixées lors de prétests afin d'avoir suffisamment de données.

Mesures effectuées

Durant l'expérimentation, nous avons enregistré la profondeur du cuboïde, la profondeur du cube associée à ce cuboïde et la réponse des participants à la question posée (le cuboïde est plus grand ou plus petit que le cube associé). L'ensemble des réponses des participants va permettre de déterminer le pourcentage de reconnaissance de la forme pour une taille du cuboïde donnée et pour une configuration des caméras. Ainsi, nous pouvons tracer la fonction psychométrique et obtenir le *JND* recherché.

Les sujets et le matériel utilisé

Dix-neuf sujets ont participé à cette expérimentation (1 femme, 18 hommes, âge moyen de 28 ans). Trois sujets ont été écartés de l'interprétation des résultats, car l'analyse de leurs résultats montrait qu'ils n'ont pas bien réalisé la tâche malgré toutes les précautions prises. Les sujets portent leur dispositif de correction s'ils en ont un. Tous les sujets ont moins de 40 ans pour éviter des risques de presbytie et possèdent une acuité stéréoscopique d'au moins 40 secondes d'arc.

L'affichage est réalisé par un projecteur F85 de la société *Projection Design* disposant d'une résolution d'affichage de 1920x1080 pour une fréquence de 120Hz. L'image est projetée sur un écran LUMIN d'une largeur de 3.1m et d'une hauteur de 1.74m. Les sujets sont assis à une distance de $1.5m$ de l'écran et sont centrés par rapport à celui-ci.

Fatigue visuelle induite par les parallaxes verticales

D'après plusieurs études, les parallaxes verticales sont une cause possible de fatigue visuelle (Woods et al. 1993; Stelmach et al. 2003). Pour que la fatigue visuelle des participants n'influe pas sur leurs réponses, nous allons nous assurer que les valeurs des parallaxes verticales sont inférieures aux limites données par la littérature. D'après (Woods et al. 1993), les parallaxes verticales doivent être de moins de $7mm$ pour ne pas fatiguer le système visuel[10]. D'après nos calculs[11], les parallaxes verticales n'excéderont pas $5mm$, c'est-à-dire $0.25°$. La fatigue induite par les parallaxes verticales sera donc suffisamment faible pour ne pas gêner nos participants et ne pas influencer les résultats.

3.3. Résultats

Après avoir vu notre méthode d'évaluation, nous allons voir les résultats de notre expérimentation. Nous avons utilisé le test de Student afin de vérifier si nos résultats sont significatifs, après avoir vérifié avec succès que notre population est répartie suivant une distribution normale.

Le test de Student est le suivant :

Soient X_1 et X_2 deux variables aléatoires de moyennes μ_1 et μ_2 et d'écart-type $\sigma_1$et σ_2. Prenons deux échantillons de X_1 et X_2 avec pour moyenne et écart-type m_1 et s_1 pour l'échantillon de X_1 et m_2 et s_2 pour l'échantillon de X_2. Nous voulons tester l'hypothèse H_0 : $\mu_1 = \mu_2$ contre H_1 : $\mu_1 \neq \mu_2$ au risque α. Plusieurs cas se présentent alors.

a) Si $n_1 > 30$ et $n_2 > 30$

Soit $z = \frac{m_1 - m_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1-1} + \frac{s_2^2}{n_2-1}}}$

[10] Les auteurs de l'article donnent les valeurs des parallaxes verticales en distance. Nous allons faire de même pour pouvoir comparer nos valeurs aux leurs. Toutefois, il serait préférable de donner les valeurs en angle, car celle-ci ne dépend alors pas de la distance entre l'utilisateur à l'écran.

[11] Ces calculs ont été réalisés directement avec notre programme.

Alors, nous rejetons H_0 au risque α si $|z| > t_{1-\frac{\alpha}{2}}$où $t_{1-\frac{\alpha}{2}}$est lue dans la table de la loi centrée réduite.

b) Si $n_1 < 30$ ou $n_2 < 30$ et $\sigma_1 = \sigma_2$

Soit $z = \frac{m_1 - m_2}{\hat{\sigma}\sqrt{\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}}}$ avec $\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1+n_2-2}}$

Alors nous rejetons H_0 au risque α si $|z| > t_{1-\frac{\alpha}{2};n_1+n_2-2}$ où $t_{1-\frac{\alpha}{2};n_1+n_2-2}$ est lue dans la table de Student à $n_1 + n_2 - 2$ degrés de liberté.

c) Si $n_1 < 30$ ou $n_2 < 30$ et $\sigma_1 \neq \sigma_2$

Soient $z = \frac{m_1 - m_2}{\hat{\sigma}\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1-1}+\frac{s_2^2}{n_2-1}}}$et ν l'entier le plus proche de $\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1-1}+\frac{s_2^2}{n_2-1}\right)^2}{\frac{s_1^4}{(n_1-1)n_1^2}+\frac{s_2^4}{(n_2-1)n_2^2}}$

Alors nous rejetons H_0 au risque α si $|z| > t_{1-\frac{\alpha}{2};\nu}$où $t_{1-\frac{\alpha}{2};\nu}$ est lue dans la table de Student à ν degrés de liberté.

Parallaxes verticales et influence de la taille des objets

Les résultats de l'influence des parallaxes verticales sur la perception de deux cuboïdes de tailles différentes ($20cm$ et $35cm$) sont visibles sur la Figure 70. Nous allons comparer les résultats obtenus pour les deux tailles de cuboïde lorsqu'ils sont proches de l'utilisateur, c'est-à-dire lorsque les parallaxes verticales sont les plus importantes.

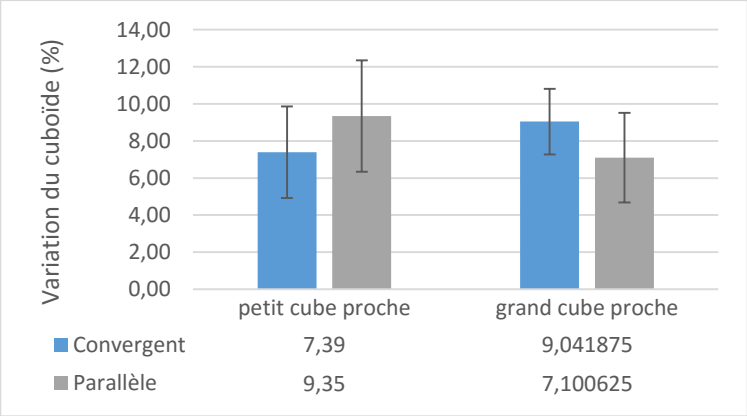

Figure 70 : résultat de l'influence de la taille de l'objet regardé sur l'effet des parallaxes verticales pour les cuboïdes situés à $70cm$ du participant. Le graphique représente le JND calculé selon la taille du cuboïde (petit ou grand) et de la configuration des caméras (convergente ou parallèle). Un petit JND indique une plus grande facilité de reconnaissance de la forme pour la configuration donnée.

Sur la Figure 70, nous pouvons voir que dans le cas du petit cube proche, le JND est plus faible lorsque les caméras sont dans la configuration convergente par rapport à la configuration parallèle. Cela signifie que les parallaxes verticales aident à la perception du cube dans ce cas précis ($p = 0.027$). Si le résultat est positif pour le petit cube proche, il est en revanche inversé pour le grand cube proche ($p < 10^{-2}$). Deux hypothèses peuvent expliquer ce résultat. Soit les parallaxes verticales provoquent des disparités verticales trop importantes en vision périphérique pour que le système visuel puisse les intégrer correctement aux disparités horizontales, soit la taille du cube fait apparaître celui-ci à une excentricité trop importante et le système visuel n'est plus capable de reconnaître aussi facilement les formes qu'en configuration parallèle.

Influence de la distance des objets

Après avoir étudié l'influence de la taille des objets, nous allons maintenant voir l'influence de la distance des objets. Les résultats concernant cette analyse sont visibles sur la Figure 71.

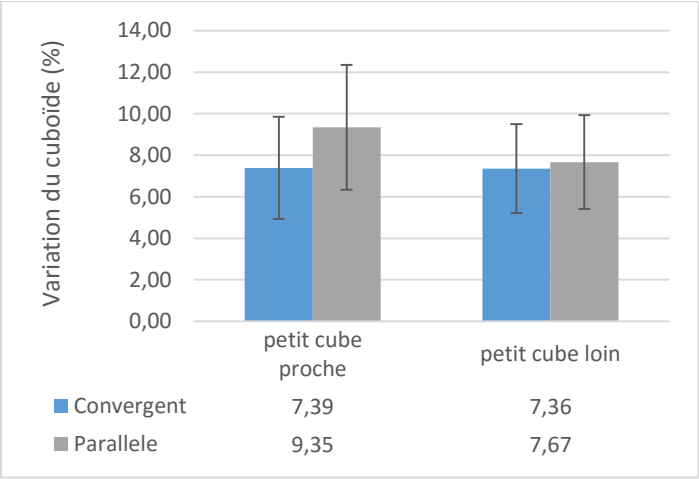

Figure 71 : influence de la distance des objets sur l'effet des parallaxes verticales pour les petits cuboïdes. Le graphique représente le JND calculé en fonction de la position du cuboïde (proche ou loin) et de la configuration des caméras (parallèles ou convergentes). Une petite valeur de JND indique une plus grande facilité à discerner la forme.

Sur la Figure 71, nous voyons que les parallaxes verticales améliorent la perception des formes lorsque le cuboïde est proche ($p = 0.027$). En revanche, cette amélioration diminue lorsque le cuboïde est au niveau de l'écran. Si nous nous plaçons dans ce cas, l'angle entre les axes optiques des caméras est très faible ($3.1°$ comparé à un angle de $5.3°$ en configuration convergente), la configuration des caméras est donc très proche de la configuration parallèle. Il est donc normal que les deux configurations, convergente et parallèle, donnent des résultats similaires.

Si nous comparons la même configuration en utilisant des cuboïdes de grande taille, nous obtenons des résultats différents. La Figure 72 montre les résultats obtenus.

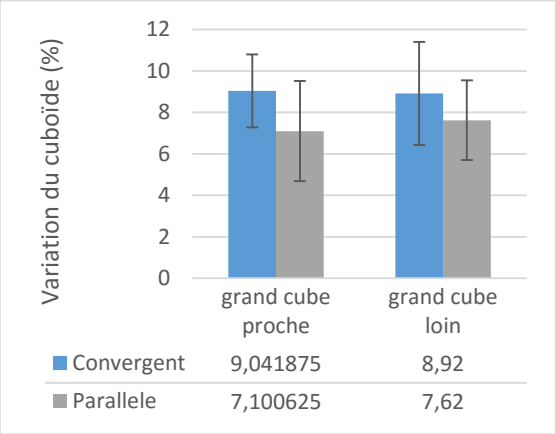

Figure 72 : influence de la distance des objets sur l'effet des parallaxes verticales pour les grands cuboïdes. Le graphique représente le JND calculé en fonction de la position du cuboïde (proche ou loin) et de la configuration des caméras (parallèles ou convergentes). Une petite valeur de JND indique une plus grande facilité à discerner la forme.

Sur le graphique de la Figure 72, nous voyons clairement que les participants ont perçu la forme plus facilement en configuration parallèle qu'en configuration convergence ($p < 0.01$ dans le cas du grand cube proche et $p = 0.055$ dans le cas du grand cube loin). Cela s'explique par la taille de l'objet, comme nous l'avons vu lors de la comparaison entre les petits cuboïdes proches et les grands cuboïdes proches. Notons que comme dans la comparaison précédente, l'écart entre les

configurations convergente et parallèle est plus faible lorsque le cuboïde est loin du participant que lorsqu'il est proche du participant. Cela confirme le résultat obtenu précédemment : les parallaxes verticales ont moins d'impact sur des objets situés à des grandes distances, car elles ont des valeurs plus faibles.

3.4. Discussion

D'après nos résultats, les parallaxes améliorent la perception des formes sous deux conditions. La première condition est la distance des objets virtuels par rapport à la personne. Lorsque le cuboïde est situé à $70cm$ devant le sujet (les axes optiques des caméras forment un angle de $2.7°$), l'effet des parallaxes verticales est positif. En revanche, l'effet est annulé lorsque le cuboïde est situé à $1.2m$ du participant, car l'angle entre les axes optiques des caméras est trop faible (seulement $1.6°$), réduisant les parallaxes verticales. Si les caméras convergent à une distance supérieure à $120cm$, l'angle diminuera encore plus. L'effet des parallaxes verticales devrait donc être pratiquement nul à partir d'une distance de convergence de $120cm$. Cela confirme les résultats obtenus par (Stelmach et al. 2003) qui n'ont pas perçu les effets des parallaxes verticales au-delà de $120cm$. Ces résultats sont également cohérents avec les résultats de (Duke & Howard 2005) qui ont montré que l'effet des disparités verticales dépendait de la distance : plus l'objet regardé est loin et moins les parallaxes verticales ont d'effet. La deuxième condition porte sur la taille des objets. Plus l'objet est grand, moins les parallaxes verticales ont d'effet. Cette condition peut également être interprétée autrement : plus les parallaxes verticales sont en périphérie du point de regard, moins elles ont d'effet sur la perception des formes. Cet effet est sans doute une conséquence de la perte d'acuité visuelle en vision périphérique, ce qui ne peut pas être amélioré en vision stéréoscopique artificielle.

(Devisme 2008) a montré que les disparités verticales améliorent la sensibilité aux disparités horizontales. D'après nos résultats, si les disparités verticales sont augmentées au niveau de l'écran, la perception des utilisateurs n'est pas améliorée. Notons qu'au niveau de l'écran, les parallaxes horizontales sont faibles. Dans ce cas précis, l'ajout de parallaxes verticales, donc de disparités verticales, au niveau de l'écran n'a pas permis d'améliorer la perception des formes. En revanche, l'ajout de parallaxes verticales à des objets situés devant l'écran, c'est-à-dire avec des parallaxes horizontales importantes, a permis d'améliorer la perception des formes. Ainsi, nos résultats tendent à montrer deux points. Premièrement, les disparités verticales améliorent la sensibilité aux disparités horizontales uniquement si les disparités horizontales sont importantes. Deuxièmement, les disparités verticales ne permettent pas de détecter plus facilement des faibles disparités horizontales.

Si nous représentons nos résultats sous la forme d'un graphe montrant l'effet des parallaxes verticales en fonction de la distance du participant et de l'excentricité de l'objet, nous obtenons la Figure 73 (les excentricités sont issues des tableaux Tableau 8, Tableau 9, Tableau 10 et Tableau 11).

Nous pouvons déduire de la Figure 73 qu'il existe une zone dans laquelle les parallaxes verticales améliorent la perception des formes. Cette zone est délimitée par la distance au participant et l'excentricité de l'objet regardé. À l'extérieur de cette zone, l'effet est soit inexistant, soit négatif.

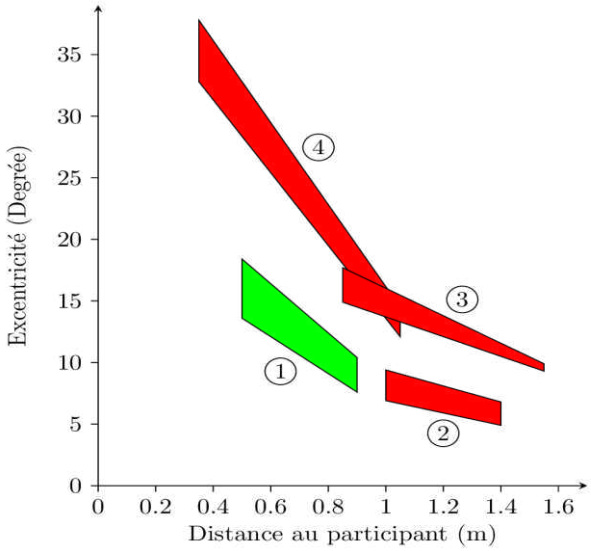

Figure 73 : graphique représentant l'effet des parallaxes verticales en fonction de la distance au participant (en abscisse) et de l'excentricité des sommets (en ordonnée). Chaque sommet d'un trapèze représente un sommet du cube idéal. La correspondance entre numéros de trapèze et les cubes associés sont indiqués dans le Tableau 12. Un trapèze vert signale un effet positif des parallaxes vertical et un trapèze rouge représente un effet négatif ou une absence d'effet.

NUMÉRO	CUBE ASSOCIÉ
1	Petit cube proche
2	Petit cube loin
3	Grand cube loin
4	Grand cube proche

Tableau 12 : correspondance entre numéro de trapèze et cube associé pour la Figure 73.

4. Conclusion

Dans le chapitre précédent, nous avions présenté une nouvelle méthode de projection pour obtenir des parallaxes verticales en vision périphérique. Dans ce chapitre, nous avons évalué l'apport de cette méthode en termes de perception des formes à l'aide d'une expérimentation. Nous avons constaté que les parallaxes verticales améliorent la perception en vision périphérique proche. Dans le chapitre précédent, nous avons également vu que les parallaxes verticales doivent être absentes de la vision centrale afin de ne pas créer de disparités verticales en vision centrale, ce qui peut gêner l'observateur. Ce résultat nous indique que nous pouvons créer artificiellement une zone contenant des parallaxes verticales. Cela permettrait d'avoir à la fois une meilleure perception des formes à faible excentricité et de réduire la fatigue visuelle causée par des disparités verticales trop importantes si l'excentricité est élevée. Ainsi, la fatigue visuelle induite par ces parallaxes serait limitée et la perception des formes serait améliorée. Cette hypothèse doit être vérifiée scientifiquement avant d'utiliser cette méthode mixant les deux configurations de caméras stéréoscopiques.

Chapitre 7

Conclusion

1. Contexte et problématique

De nos jours, la vision stéréoscopique artificielle est de plus en plus présente, que ce soit pour le grand public (cinémas, télévision, visiocasques, …) ou pour des domaines industriels variés (conception, apprentissage, tests, …). Toutefois, les technologies utilisées pour visualiser des contenus stéréoscopiques imposent des contraintes non naturelles au système visuel. Ces contraintes sont aujourd'hui la cause la plus importante de fatigue visuelle liée à la stéréoscopie. Comme les contenus sont de plus en plus stéréoscopiques, une question importante est la diminution de la fatigue visuelle par différentes méthodes.

Certains domaines, comme la conception d'objet ou le design, nécessitent une simulation se rapprochant le plus possible de la réalité et de l'objet voulu. Les méthodes actuelles de rendu sont perfectibles, car elles ne prennent pas en compte la position du regard sur l'écran. Les caméras stéréoscopiques ont donc leurs axes optiques toujours parallèles. En vision naturelle, la rotation des yeux crée des déformations sur la rétine (les disparités verticales) qui améliorent la perception de l'environnement. Toutefois, une incertitude demeure : si les caméras stéréoscopiques convergent au point de regard, cela va créer des parallaxes verticales sur l'écran et donc ajouter des disparités verticales sur la rétine. Est-ce que cette modification permet d'améliorer la perception de l'environnement virtuel ?

2. Nouveau traitement pour réduire la fatigue visuelle

2.1. Notre apport

En vision naturelle, la distance d'accommodation et la distance de vergence sont les mêmes. En revanche, lors de la visualisation de contenu stéréoscopique, ces deux distances sont différentes, provoquant un conflit entre la composante de vergence et la composante d'accommodation du système visuel. Ce conflit est une des causes de fatigue visuelle en vision stéréoscopique. Il existe également d'autres causes de fatigue visuelle comme les grandes fréquences spatiales. Dans la première partie, à l'aide d'une expérimentation, nous avons démontré que la diminution des hautes fréquences spatiales en vision périphérique permet de limiter la diminution des capacités du système visuel lors de la visualisation d'un contenu stéréoscopique. Les résultats nous ont aussi montré que si ce traitement est appliqué en suivant le regard de l'utilisateur à l'aide d'un oculomètre, alors le temps de latence de l'ensemble du système (de l'oculomètre jusqu'à l'affichage du rendu sur l'écran) doit être particulièrement faible. En effet, si ce temps de latence est trop élevé, l'effet positif du traitement peut être amoindri, voire transformé en effet négatif. Il faut donc vérifier le temps de latence avant d'appliquer le flou en vision périphérique afin de savoir si le traitement sera efficace. Enfin, nos résultats tendent à montrer que le rayon de la zone nette joue un rôle important dans l'effet du traitement. Plus le rayon de la zone nette est petit, plus l'acuité stéréoscopique semble conservée.

2.2. Quelques perspectives

Plusieurs questions se posent à propos de ce traitement, en particulier sur les méthodes permettant de l'améliorer. Quel est le rayon optimal de la zone nette ? Existe-t-il une méthode de calcul du flou permettant d'améliorer l'effet désiré ? Pour la première question, même si nous n'avons pas la réponse, nos expérimentations semblent prouver qu'il existe un rayon optimal. En effet, d'après nos résultats, le rayon de la zone nette a son importance dans l'effet du traitement : plus il est faible et plus le traitement permet de conserver l'acuité stéréoscopique. Une autre piste d'amélioration concerne la gestion du temps de latence de l'ensemble du système. Dans nos expérimentations, nous avons calculé le rayon de la zone nette en fonction de critères physiologiques, comme la densité des récepteurs sur la rétine. Serait-il plus efficace d'adapter cette distance en fonction des mouvements des yeux de l'utilisateur ? Dans le cas d'une fixation, le

diamètre serait faible. En revanche, plus les saccades sont importantes, plus le diamètre augmente. Ainsi, cette modification diminuerait l'impact du temps de latence sur le traitement.

Une autre possibilité d'amélioration des traitements existants consiste à combiner plusieurs traitements. Nous avons plusieurs traitement pour réduire la fatigue visuelle en réduisant les hautes fréquences spatiales ((Hillaire et al. 2008; Leroy 2009) ainsi que notre proposition). Une combinaison de ces différents traitements pourrait réduire encore plus la fatigue visuelle. Toutefois, lors de la combinaison de plusieurs traitements, le rendu peut se retrouver totalement flou, ce qui empêcherait le système visuel d'accommoder, provoquant de la fatigue visuelle. Avant d'appliquer une combinaison de plusieurs traitements, il faut donc vérifier que cette combinaison ne devienne pas une cause supplémentaire de fatigue visuelle avant d'appliquer plusieurs traitements simultanément.

2.3. Effets annexes du traitement

En dehors de l'effet sur les capacités oculomotrices, notre traitement a-t-il d'autres effets ? En particulier, (Kosara et al. 2001; Huynh-Thu et al. 2013) ont montré que le regard était attiré par les objets ou les zones nettes. Pour notre traitement, cela signifie que le regard de l'utilisateur est moins attiré par les objets situés en vision périphérique. Cette affirmation est à vérifier, car elle peut modifier le comportement des utilisateurs. Il pourrait également être intéressant de connaître l'effet du traitement en termes de perception de distance et de formes. En effet, lorsque les hautes fréquences spatiales sont enlevées en vision périphérique, les textures sur les objets situés dans cette zone sont modifiées. Or, la texture est un des indices de perception des formes (Figure 9), ce traitement peut donc modifier la perception en vision périphérique.

3. Amélioration de la perception des formes

3.1. Notre apport

La deuxième partie du manuscrit porte sur la perception des formes en vision stéréoscopique. Nous avons vu que le système visuel utilise, entre autres, les disparités horizontales et verticales pour percevoir les formes. En vision stéréoscopique artificielle, seules les parallaxes horizontales, donc aussi les disparités horizontales, sont créées par les processus de rendu, car la direction du regard de l'utilisateur est inconnue. Nous avons modifié le processus de rendu habituel afin de prendre en compte la direction du regard et de recréer les parallaxes verticales manquantes. Après avoir évalué ce nouveau processus de rendu, nous avons trouvé que les parallaxes verticales permettent d'améliorer la perception des formes en vision stéréoscopique. Toutefois, cette amélioration n'est valable que dans un espace restreint. En effet, nos résultats montrent que les parallaxes verticales n'ont plus d'effet sur des objets situés à$1.2m$ de l'utilisateur puisqu'elles sont trop faibles pour être prises en compte par le système visuel. Nous avons également montré que les parallaxes verticales ont moins d'importance sur les objets de grande taille, car sans doute leurs sommets sont trop loin du point de regard pour que le système visuel puisse prendre en compte les parallaxes verticales.

3.2. Quelques perspectives

Nous avons vu que les parallaxes verticales améliorent la perception des formes. Notre expérimentation a mis en évidence l'existence une distance entre l'utilisateur et l'écran à partir de laquelle les parallaxes verticales deviennent inutiles. Toutefois, nos travaux n'ont pas permis de borner cette distance. Des travaux futurs permettront de préciser cette distance en fonction de la distance de l'utilisateur à l'écran et de la taille des pixels de l'écran. Nous avons également remarqué que les parallaxes verticales n'ont pas d'influence sur des objets situés à des grandes excentricités. D'autres expérimentations sont nécessaires afin de préciser cette limite. Lorsque ces deux limites auront été étudiées, il sera alors possible de mettre en place un système complet permettant de

changer la configuration des caméras stéréoscopiques afin de bénéficier des avantages des parallaxes verticales en vision proche sans avoir les inconvénients des parallaxes verticales en vision lointaine.

Nous avons montré que les parallaxes verticales ont un impact sur la perception des formes, mais leur impact sur la perception des distances reste inconnu. Même si ces deux perceptions sont proches, le système visuel peut avoir des mécanismes différents pour chacune. Il serait donc intéressant d'évaluer l'influence des parallaxes verticales sur la perception des distances.

Pour finir, nous savons que les parallaxes verticales sont localisées en vision périphérique et qu'elles provoquent de la fatigue visuelle. L'effet bénéfique des parallaxes verticales est donc possible au prix d'une augmentation de la fatigue visuelle. Or, nous avons proposé un traitement permettant de réduire la fatigue visuelle en floutant la vision périphérique. Il est donc possible que la combinaison des parallaxes verticales ainsi que du flou en vision périphérique permette l'amélioration de la perception des formes tout en conservant les capacités oculomotrices des personnes.

Bibliographie

Adelson, E.H., Simoncelli, E. & Hingorani, R., 1987. Orthogonal pyramid transforms for image coding. *Processing*, 845(c), pp.50–58. Available at: http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-bib_query?bibcode=1987SPIE..845...50A.

Akeley, K. et al., 2004. A stereo display prototype with multiple focal distances. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 23(3), pp.804–813.

Allison, R.S., 2007. Analysis of the Influence of Vertical Disparities Arising in Toed-in Stereoscopic Cameras. *Journal of Imaging Science and Technology*, 51(4), p.317. Available at: http://www.cse.yorku.ca/percept/papers/jist paper.pdf\nhttp://www.ingentaconnect.com/content/ist/jist/2007/00000051/00000004/art00005.

Anderson, S.J., Mullen, K.T. & Hess, R.F., 1991. Human peripheral spatial resolution for achromatic and chromatic stimuli: limits imposed by optical and retinal factors. *The Journal of physiology*.

ANSES, 2014. *Effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en 3D stéréoscopique*,

Anstis, S., 1998. Picturing peripheral acuity. *Perception*, 27(7), pp.817–825.

Backus, B.T. et al., 1999. Horizontal and vertical disparity, eye position, and stereoscopic slant perception. *Vision Research*, 39, pp.1143–1170.

Bando, T., Iijima, A. & Yano, S., 2011. Visual fatigue caused by stereoscopic images and the search for the requirement to prevent them: A review. *Displays*, 33(2), pp.76–83. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141938211000825 [Accessed October 26, 2012].

Bang, J. et al., 2014. Assessment of Eye Fatigue Caused by 3D Displays Based on Multimodal Measurements. *Sensors*, 14(9), pp.16467–16485. Available at: http://www.mdpi.com/1424-8220/14/9/16467/.

Benjamin, W.J., 2006. *Borish's clinical refraction*, Butterworth-Heinemann St. Louis.

Blehm, C. et al., 2005. Computer vision syndrome: a review. *Survey of ophthalmology*, 50(3), pp.253–262.

Blum, T. et al., 2010. The effect of out-of-focus blur on visual discomfort when using stereo displays. *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp.13–17. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5643544.

Danilova, M. V & Bondarko, V.M., 2007. Foveal contour interactions and crowding effects at the resolution limit of the visual system. *Journal of vision*, 7(2).

Devisme, C., 2008. *Etude de l'influence des disparités horizontales et verticales sur la perception de la profondeur en champ visuel périphérique*. Université Paris 6.

Duke, P.A. & Howard, I.P., 2005. Vertical-disparity gradients are processed independently in different depth planes. *Vision research*, 45(15), pp.2025–35. Available at: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15820519.

Durand, J.-B. et al., 2002. Neurons in parafoveal areas V1 and V2 encode vertical and horizontal disparities. *Journal of neurophysiology*, 88(5), pp.2874–2879.

Ehrenstein, W.H. & Ehrenstein, A., 1999. Psychophysical Methods. In *Modern Techniques in Neuroscience Research*. pp. 1211–1241. Available at: http://books.google.com/books?id=cjCnNtIhjMQC&pgis=1.

Fuchs, P. et al., 2006. *Le traité de la réalité virtuelle: Volume 1, L'homme et l'environnement virtuel*, Presses des MINES.

Fuchs, P. et al., 1995. Téléprésence visuelle stéréoscopique. In *Congrès Informatique 95: interface des mondes réels et virtuels*. p. P.

Held, R.T. & Banks, M.S., 2008. Misperceptions in stereoscopic displays: a vision science perspective. *Proceedings of the 5th symposium on Applied perception in graphics and visualization*, pp.23–32. Available at: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3966488/.

Hillaire, S. et al., 2007. Depth-of-field blur effects for first-person navigation in virtual environments. *IEEE computer graphics and applications*, 28(6), pp.47–55. Available at: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19004684.

Hillaire, S. et al., 2008. Using an Eye-Tracking System to Improve Camera Motions and Depth-of-Field Blur Effects in Virtual Environments. *2008 IEEE Virtual Reality Conference*, pp.47–50. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4480749.

Hoffman, D.M., Girshick, A.R. & Banks, M.S., 2008. Vergence – accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. , 8, pp.1–30.

Huynh-Thu, Q., Vienne, C. & Blondé, L., 2013. Visual storytelling in 2D and stereoscopic 3D video: effect of blur on visual attention. , 8651, p.865112. Available at: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2006844.

ITU, 2012. *Subjective methods for the assessment of stereoscopic 3DTV systems*, Available at: https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.2021/en.

Julesz, B., 1962. Visual pattern discrimination. *Information Theory, IRE Transactions on*, 49, pp.41–46. Available at: http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1972\nhttp://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1057698.

Kaneko, K. & Sakamoto, K., 2001. Spontaneous blinks as a criterion of visual fatigue during prolonged work on visual display terminals. *Perceptual and motor skills*, 92(1), pp.234–250.

Kooi, F.L. & Toet, A., 2004. Visual comfort of binocular and 3D displays. *Displays*, 25(2-3), pp.99–108.

Kosara, R., Miksch, S. & Hauser, H., 2001. Semantic depth of field. *Proc. InfoVis*, p.97. Available at: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.28.9079&rep=rep1&type=pdf\nhttp://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.28.9079.

Lambooij, M. et al., 2011. Susceptibility to visual discomfort of 3-D displays by visual performance measures. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 21(12), pp.1913–1923.

Lambooij, M., IJsselsteijn, W. a & Heynderickx, I., 2007. Visual discomfort in stereoscopic displays: a review. *Proceedings of SPIE*, 6490(1584), pp.I1–13. Available at: http://link.aip.org/link/PSISDG/v6490/i1/p64900I/s1&Agg=doi.

Leroy, L., 2009. *Interfaçage visuel stéréosccopique: diminution de la fatigue visuelle et caractérisation de la perception des formes*. Mines ParisTech.

Leroy, L., Fuchs, P. & Moreau, G., 2010. Real time comfort enhancement in stereoscopic displays by disparity and content-adapted blur. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, (1), pp.3595–3600.

Li, H.O. et al., 2008. Measurement of 3D Visual Fatigue Using Event-Related Potential (ERP): 3D Oddball Paradigm. , pp.213–216.

Luo, X. et al., 2007. The Effects of Scene Complexity , Stereovision , and Motion Parallax on Size

Constancy in a Virtual Environment. *2007 IEEE Virtual Reality Conference*, pp.59–66.

Mallat, S., 1991. Zero-crossing of a Wavelet Transform. *IEEE Trans Information Theory*, 37(4), pp.1019–1033. Available at: http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Zero-Crossing+of+a+Wavelet+Transform#6.

Matusik, W. & Pfister, H., 2004. 3D TV: a scalable system for real-time acquisition, transmission, and autostereoscopic display of dynamic scenes. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 23(3), pp.814–824.

Mochizuki, H. et al., 2012. The magnitude of stereopsis in peripheral visual fields. *Kitasato Med J*, 41(May 2011), pp.1–5.

Nakayama, K., 1983. Kinematics of Normal and Strabismic Eyes. *Vergence Eye Movements: Basics and Clinical Aspects*.

Navarro, R., Artal, P. & Williams, D.R., 1993. Modulation transfer of the human eye as a function of retinal eccentricity. *JOSA A*.

Neveu, P. et al., 2009. Retentissement du sur-ecartement inter-pupillaire sur l'equilibre oculomoteur. *Journées de Médecine Aéronautique*.

Percival, A.S., 1892. The relation of convergence to accommodation and its practical bearing. *Ophthal. Rev*, 11, pp.313–328.

Perrin, J., 1998. *Profondeur et binocularité: algorithmie, étude psychophysique et intérêts dans l'ergonomie des interfaces stéréoscopiques*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Plaghki, L. & Mouraux, A., 2001. Fonctions psychométriques et méthodes psychophysiques adaptatives pour l'étude de la douleur. *Douleur et Analgésie*, 1, pp.73–78. Available at: http://mhsrvweb.medhyg.ch/revues/r_article.php4?article_id=60110195.

Rock, I., 1985. Perception and knowledge. *Acta Psychologica*, 59(1), pp.3–22. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0001691885900393.

Rogers, B. & Bradshaw, M., 1993. Vertical disparities, differential perspective and binocular stereopsis. *Nature*, 391, pp.253–255.

Rokita, P., 1996. Generating Depth-of-Field Effects in Virtual Reality Applications. *IEEE computer graphics and applications*, 16(2), pp.18–21.

Roumes, C., 1995. *Contenu fréquentiel de l'image et vision binoculaire. Etude Psychophysique chez l'homme.* Université Paris 6.

Rushton, S.K. & Riddell, P.M., 1999. Developing visual systems and exposure to virtual reality and stereo displays: some concerns and speculations about the demands on accommodation and vergence. *Applied ergonomics*, 30(1), pp.69–78. Available at: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10098818.

Saunders, D.R. & Woods, R.L., 2014. Direct Measurement of the System Latency of Gaze-Contingent Displays. *Behavior research methods*, 146(2), pp.439–447.

Schor, C.M. & Kotulak, J.C., 1986. Dynamic interactions between accommodation and convergence are velocity sensitive. *Vision research*.

Sheard, C., 1934. The prescription of prisms. *American Journal of Optometry*, 11(10), pp.364–378.

Shibata, T. et al., 2011. The zone of comfort : Predicting visual discomfort with stereo displays.

Journal of vision, 11(8), pp.1–29.

Sobel, E.C. & Collett, T.S., 1991. Does vertical disparity scale the perception of stereoscopic depth? *Proceedings of the Royal Society of London B*, 244(1310), pp.87–90. Available at: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1679553.

Speranza, F. et al., 2006. Effect of Disparity and Motion on Visual Comfort of Stereoscopic Images. In *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIII*. pp. 1–10.

Stelmach, L.B. et al., 2003. Improving the Visual Comfort of Stereoscopic Images. In *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems X*. pp. 269–282.

Valyus, N.A., 1966. *Sterescopy* F. Press, ed., London: Focal Press.

Wetherill, G.B. & Levitt, H., 1965. Sequential Estimation of Points on a Psychometric Function. *The British journal of mathematical and statistical psychology*, 18, pp.1–10.

Woods, A., Docherty, T. & Koch, R., 1993. Image Distortions in Stereoscopic Video Systems. *SPIE's Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology*, 36(February 1993), pp.36–48.

Woods, J. & O'Neil, S., 1986. Subband coding of images. *Acoustics, Speech and Signal …*, (8609292), pp.1278–1288. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1164962.

Wopking, M., 1995. Viewing comfort with stereoscopic pictures: An experimental study on the subjective effects of disparity magnitude and depth of focus. *Journal of the Society for Information Display*, 3, p.101.

Yang, Q. & Kapoula, Z., 2004. Saccade-vergence dynamics and interaction in children and in adults. *Experimental Brain Research*, 156(2), pp.212–223.

Annexe

Cette annexe regroupe l'ensemble des graphiques donnant les résultats concernant l'expérimentation sur l'effet d'un flou en vision périphérique sur la fatigue visuelle.

1. Test de contrôle – test « Petite zone nette »

1.1. Acuité stéréoscopique

Les résultats du test de l'acuité stéréoscopique pour les tests « Contrôle » et « Petite zone nette » sont visibles sur la Figure 74.

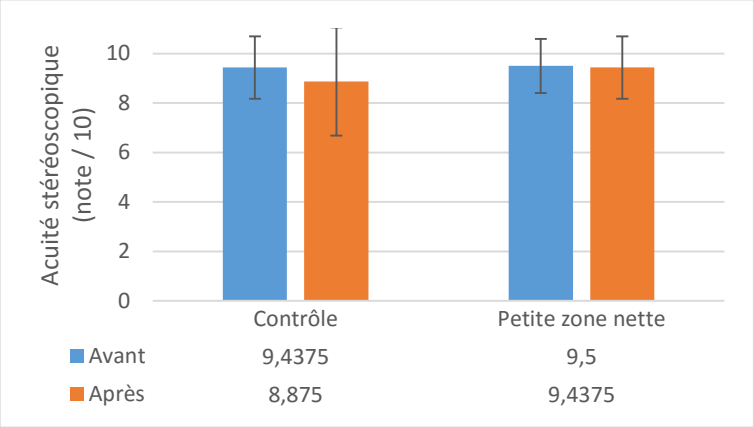

Figure 74 : comparaison de l'acuité stéréoscopique pour les tests "Contrôle" et "Petite zone nette".

1.2. *Proximum* d'accommodation

Les résultats de mesure du punctum proximum d'accommodation pour les tests «Contrôle » et « Petite zone nette » sont visibles sur la Figure 75.

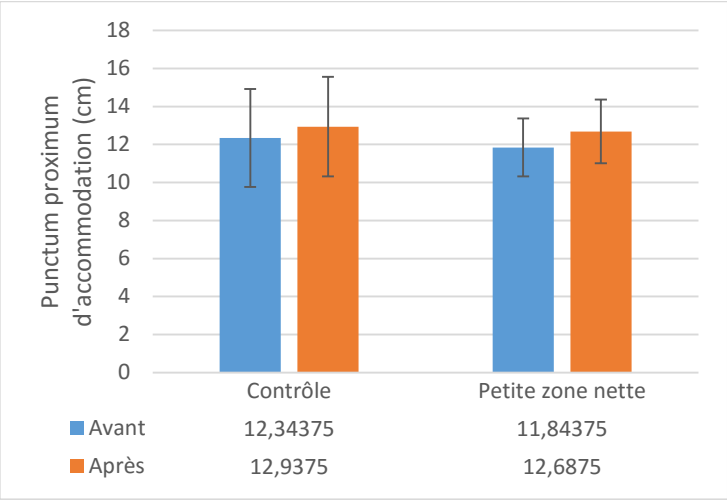

Figure 75 : comparaison de la distance des yeux au punctum proximum d'accommodation pour les tests « Contrôle » et « Petite zone nette ».

1.3. Facilité d'accommodation

Les résultats de mesure de facilité d'accommodation pour les tests « Contrôle » et « Petite zone nette » sont visibles sur la Figure 76.

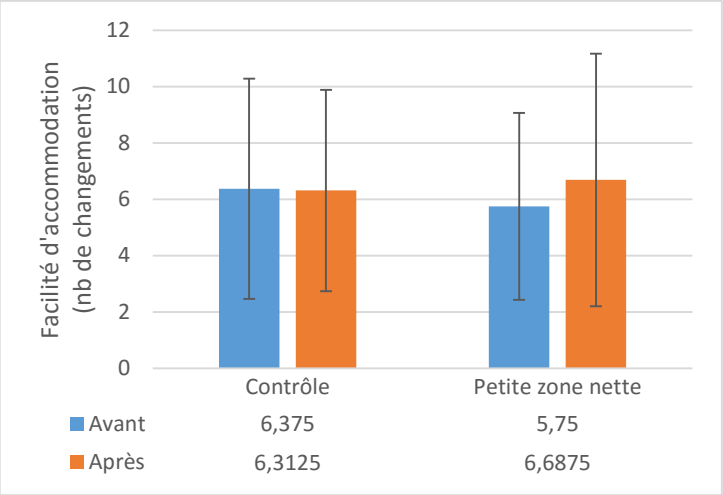

Figure 76 : comparaison de la facilité d'accommodation pour les tests « Contrôle » et « Petite zone nette ».

1.4. Questionnaire par thème

Les réponses au questionnaire triées par thèmes sont visibles sur la Figure 77.

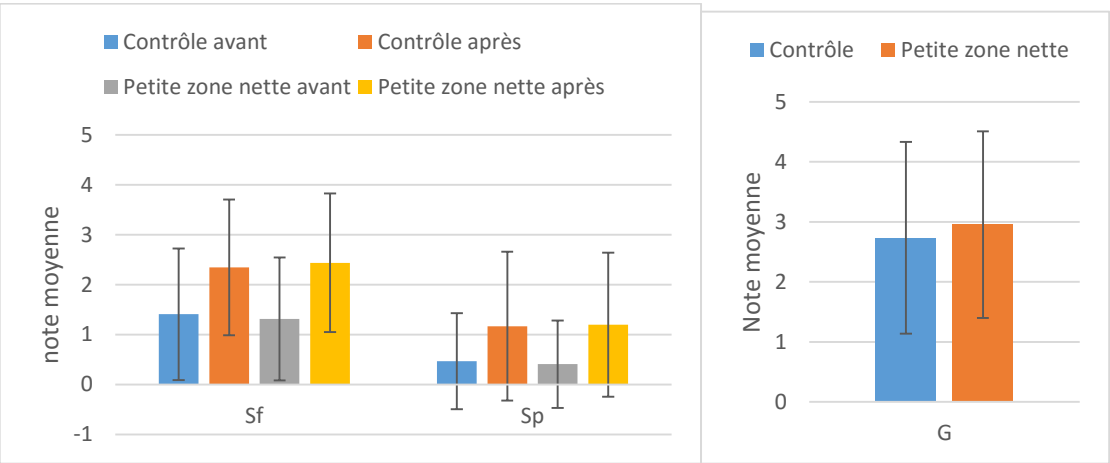

Figure 77 : réponses aux questionnaires triées par thèmes pour les tests « Contrôle » et « Petite zone nette ».

1.5. Questionnaire détaillé

Les réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Contrôle » et « Petite zone nette » sont visibles sur les figures Figure 78 & Figure 79.

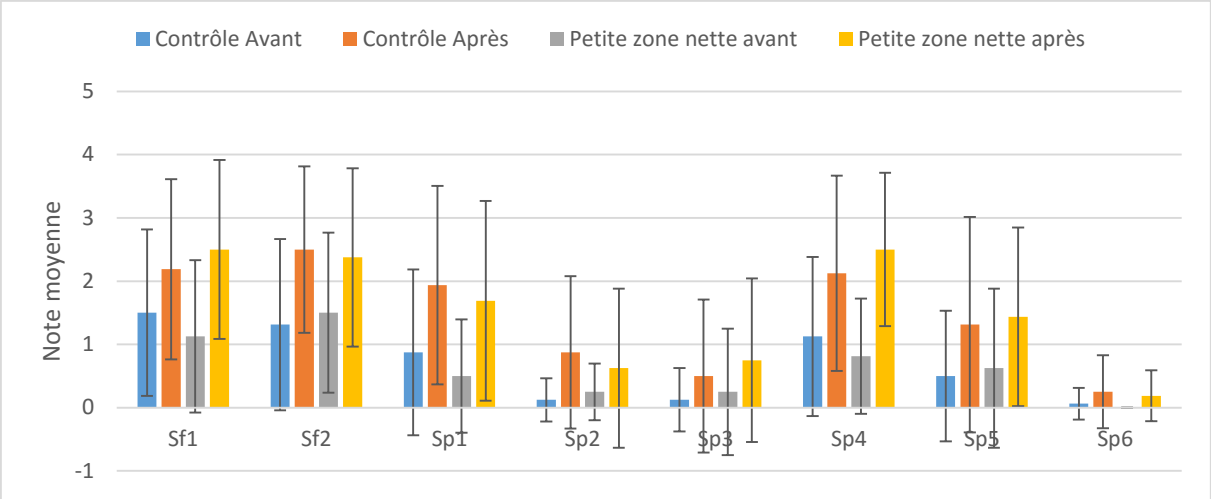

Figure 78 : réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Contrôle » et « Petite zone nette » (1/2).

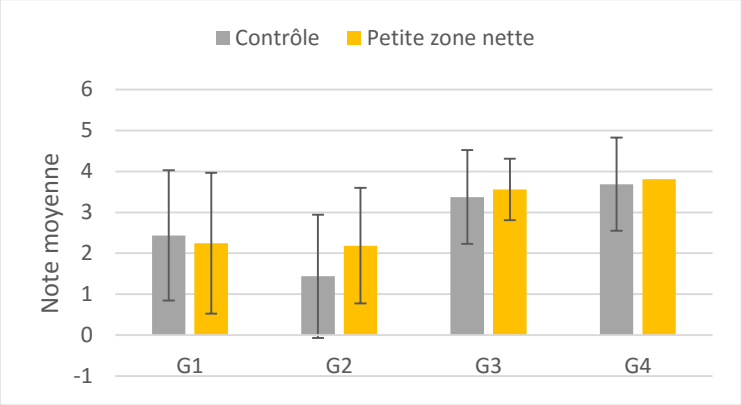

Figure 79: réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Contrôle » et « Petite zone nette » (2/2).

2. Test « Grande zone nette » - test « Petite zone nette »

2.1. Acuité stéréoscopique

Les résultats du test d'acuité stéréoscopique pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette » sont visibles sur la Figure 80.

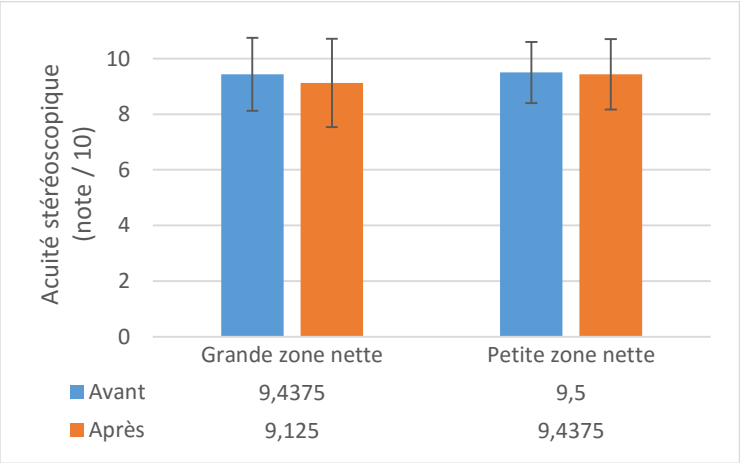

Figure 80 : résultats des tests d'acuité stéréoscopique pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette ».

2.2. *Proximum* d'accommodation

Les résultats de la mesure du *punctum proximum* d'accommodation pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette » sont visibles sur la Figure 81.

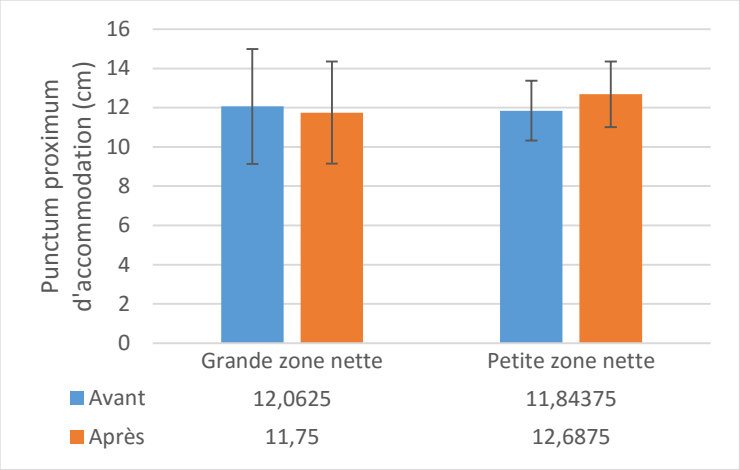

Figure 81 : résultats de la mesure du punctum proximum d'accommodation pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette ».

2.3. Facilité d'accommodation

Les résultats du test de facilité d'accommodation pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette » sont visibles sur la Figure 82.

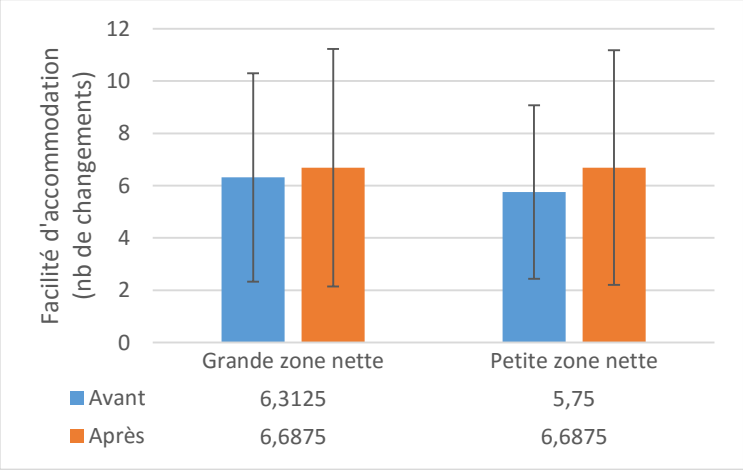

Figure 82 : résultats du test de facilité d'accommodation pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette ».

2.4. Questionnaire par thème

Les réponses au questionnaire classées par thème pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette » sont visibles sur la Figure 83.

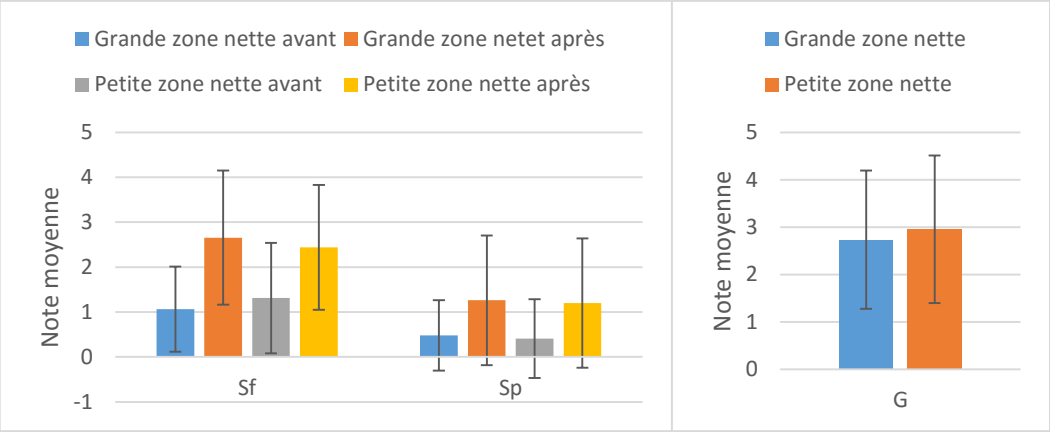

Figure 83 : réponses au questionnaire classées par thème pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette ».

2.5. Questionnaire détaillé

Les réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette » sont visibles sur les figures Figure 84&Figure 85.

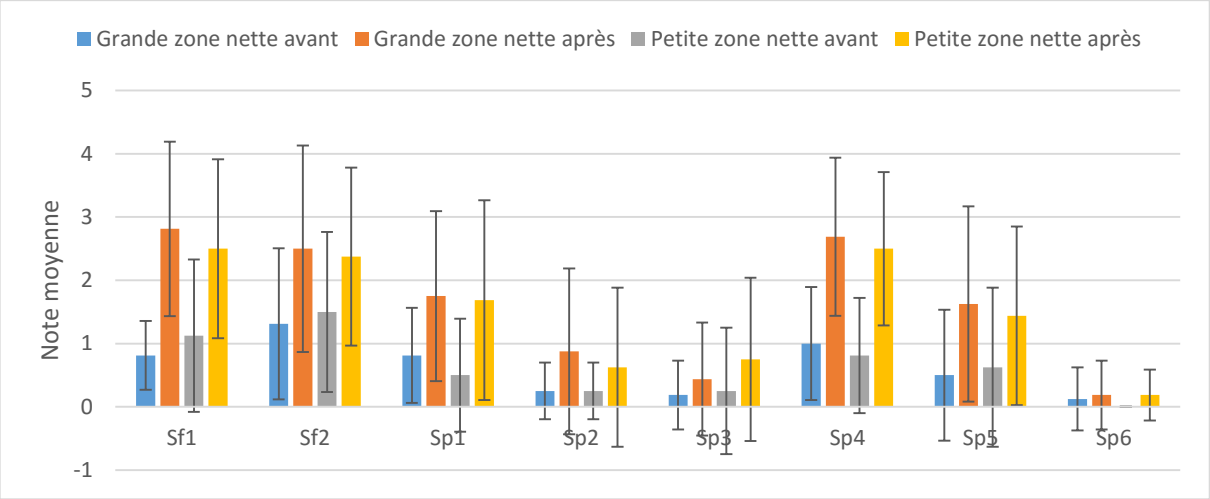

Figure 84 : réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette » (1/2).

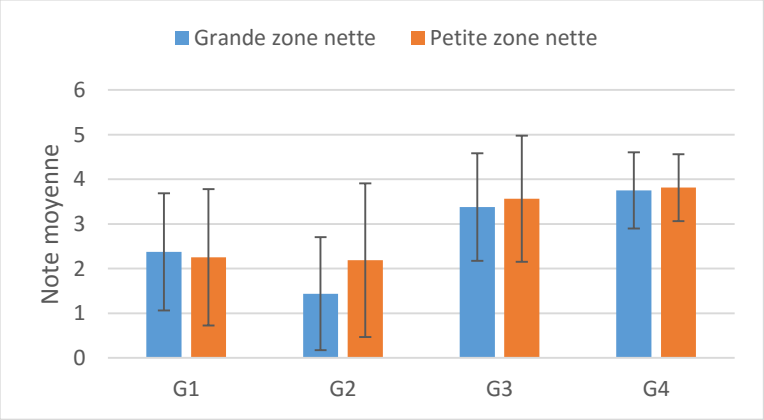

Figure 85 : réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Grande zone nette et « Petite zone nette » (2/2).

3. Test « Contrôle » - test « Sans oculomètre »

3.1. Acuité stéréoscopique

Les résultats du test de l'acuité stéréoscopique pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre » sont visibles sur la Figure 86.

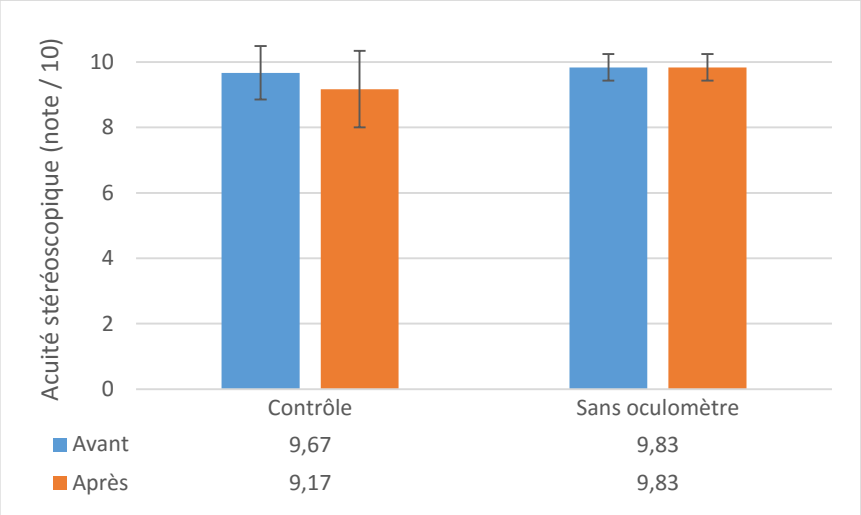

Figure 86 : résultats des mesures d'acuité stéréoscopique pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre ».

3.2. *Proximum* d'accommodation

Les résultats de mesure du *punctum proximum* d'accommodation pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre » sont visibles sur la Figure 87.

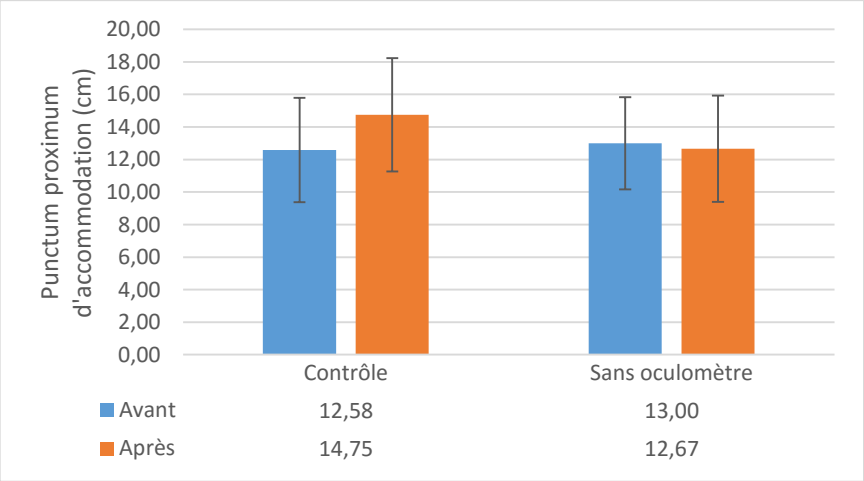

Figure 87 : résultat des mesures du punctum proximum d'accommodation pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre ».

3.3. Facilité d'accommodation

Les résultats de la mesure de facilité d'accommodation sont visibles sur la Figure 88.

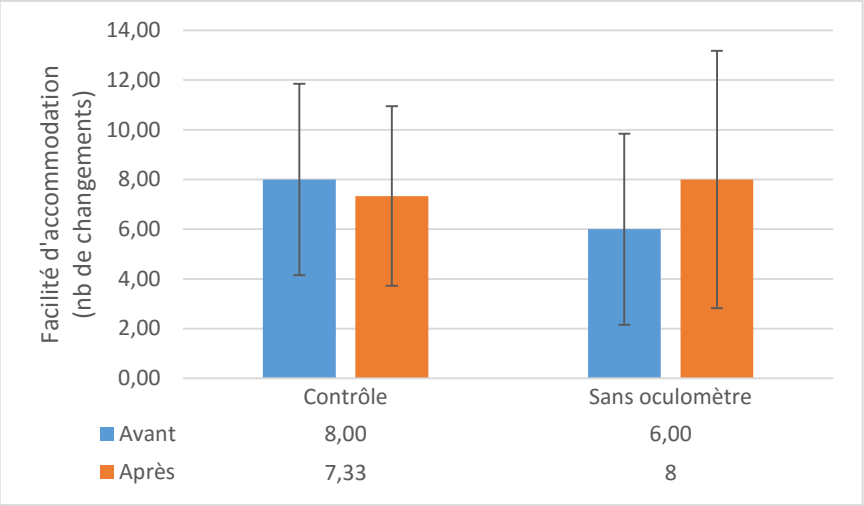

Figure 88 : résultats de mesure de facilité d'accommodation pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre ».

3.4. Questionnaire par thème

Les réponses au questionnaire regroupées par thème pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre » sont visibles sur la Figure 89

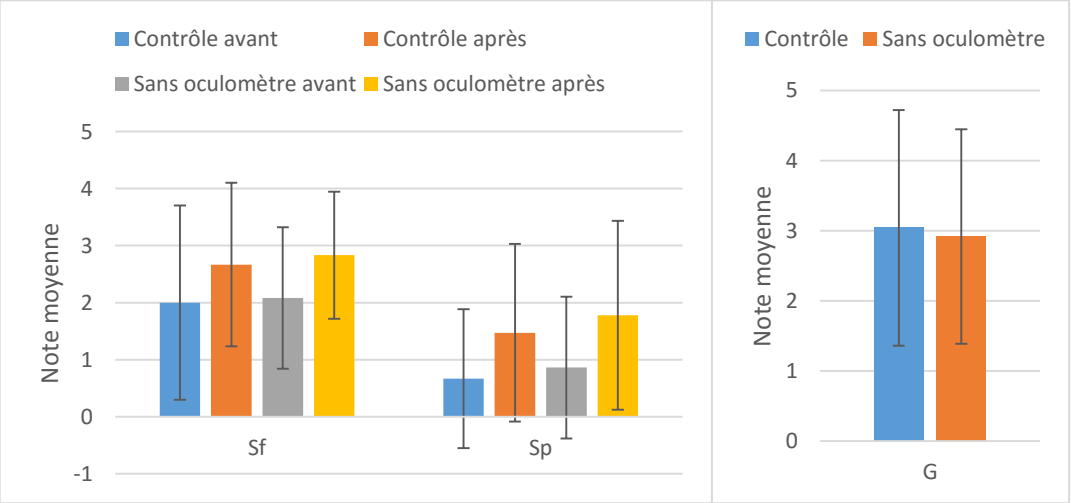

Figure 89 : réponses au questionnaire regroupées par thème pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre ».

3.5. Questionnaire détaillé

Les réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre » sont visibles sur les figures Figure 90&Figure 91.

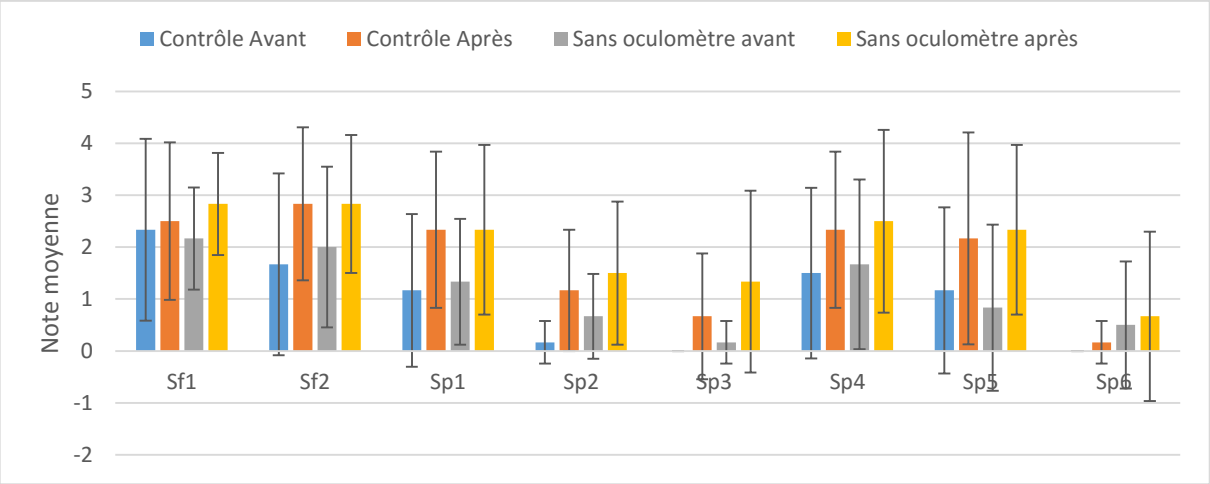

Figure 90 : réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre » (1/2).

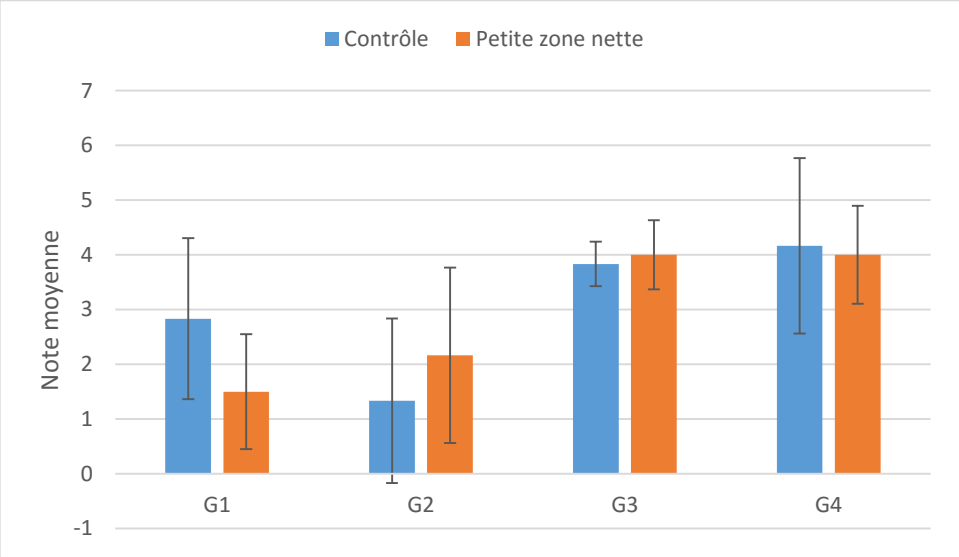

Figure 91 : réponses détaillées au questionnaire pour les tests « Contrôle » et « Sans oculomètre » (2/2).

Résumé

Les simulateurs sont de plus en plus intégrés dans le milieu industriel car ils facilitent les processus de fabrication et de test des objets. Dans ces simulateurs, comme dans d'autres domaines d'application de la réalité virtuelle, des écrans stéréoscopiques sont utilisés afin de rapprocher la vision sur écran de la vision naturelle. Toutefois, l'ajout de la stéréoscopie pose des problèmes au niveau physiologique, comme le conflit vergence-accommodation. Ce conflit est une des causes majeures de fatigue visuelle en vision stéréoscopique.

Dans une première partie nous allons nous intéresser aux différentes méthodes permettant de réduire les effets du conflit vergence-accommodation. Puis, nous proposerons, expérimenterons et validerons un nouveau traitement : l'ajout d'un flou en vision périphérique. Ce traitement nous a permis de réduire la fatigue visuelle. Nous avons de plus trouvé que plus la zone nette est petite, plus le traitement est efficace.

La deuxième partie de ce manuscrit sera consacrée à l'amélioration de la perception des formes en vision stéréoscopique artificielle. L'apport principal sera la prise en compte du point de regard dans le processus de rendu afin de reproduire l'impact de la direction du regard sur la perception de l'environnement et ainsi améliorer la perception de l'environnement virtuel. Cela génère des parallaxes verticales en vision périphérique. Cette nouvelle méthode de rendu permet d'améliorer la perception des formes lorsque celles-ci sont proches de l'utilisateur.

Abstract

Simulators are more and more used in industry because they help for making and testing objects. Like in other domains, simulators use stereoscopic screen to get closer natural vision and artificial vision. However, stereoscopy create some physiological problems like vergence-accommodation conflict. This conflict is one of the main cause of visual strain while viewing stereoscopic contents. In a first part, we will see some methods to reduce visual fatigue due to vergence-accommodation conflict. Then, we will propose, test and validate a new method: a blur in peripheral vision. This treatment reduce eye strain. In addition, we found out that the smaller the sharp area is, the more effective the treatment is. In the second part, we will focus on the shape perception in stereoscopic vision and how to improve it. The main contribution will be to take into account the user's gaze point in the rendering process to reproduce the effect of the gaze direction in natural vision and improve the perception of the virtual environment. This camera convergence create deformations – called vertical parallaxes – on the screen in peripheral vision. This new method improve shape perception if objects are located close to the user.

Mots Clés

Vision stéréoscopique, Fatigue visuelle, Perception des formes, Vision artificielle, Disparité rétinienne verticale, Parallaxe verticale, Processus de rendu, Réalité virtuelle

Keywords

Stereoscopic vision, Visual strain, Shape perception, Artificial vision, Vertical disparity, Vertical parallaxes, Rendering process, Virtual reality