



HAL
open science

Système de réduction de contraintes physiologiques pour une cohérence sensori-motrice en réalité virtuelle

Laure Leroy

► **To cite this version:**

Laure Leroy. Système de réduction de contraintes physiologiques pour une cohérence sensori-motrice en réalité virtuelle. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. Université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis, 2020. tel-03553048

HAL Id: tel-03553048

<https://hal.science/tel-03553048>

Submitted on 2 Feb 2022

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.



UNIVERSITÉ PARIS 8 - VINCENNES - SAINT-DENIS

Habilitation à diriger des recherches

Présentée et soutenue par

Laure LEROY

Systeme de réduction de contraintes physiologiques pour une cohérence sensori-motrice en réalité virtuelle

Garant : **Mehdi Ammi**

Préparée au Laboratoire **Paragraphe**

21 septembre 2020

Jury

Indira THOUVENIN, Professeur Université de Technologie de Compiègne

Bruno ARNALDI, Professeur INSA de Rennes

Daniel MESTRE, Directeur de recherche Aix-Marseille Université

Dominique Bechmann, Professeur Université de Strasbourg

Imad Saleh, Professeur Université Paris 8

Evelyne Klinger, Docteur HDR BPH U1219 Inserm-Université de Bordeaux

Mehdi Ammi, Professeur Université Paris 8

Rapporteur

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier les membres de mon jury : j'ai l'immense chance d'avoir un jury composé de gens que j'admire énormément et qui ont vraiment été pour moi des modèles autant scientifiquement, qu'humainement.

Indira, tu es la première à m'avoir poussée à écrire cette HDR, et sans toi elle n'aurait clairement pas été ce qu'elle est aujourd'hui, mais je ne serai probablement pas non plus ce que je suis aujourd'hui. Tu m'a toujours guidée avec énormément de bienveillance et j'en t'en serai toujours reconnaissance.

Bruno, je me souviens encore quand tu m'a accueillie dans le CA de l'AFRV j'étais hyper impressionnée par toutes les grandes peintures qu'il y avait autour de la table et je me demandais comment j'allais faire pour trouver ma place. Tu as tout de suite trouvé les mots qui m'ont mise à l'aise, et depuis, tu n'as pas changé. Un immense scientifique avec un cœur et une bienveillance encore plus grands.

Daniel, outre ta gentillesse et ton humour, j'ai été très vite fascinée par tout l'aspect « facteurs humain » que tu apportes à la communauté RV. Cette obstination à remettre les gens au centre des dispositifs est probablement ce qui a aussi marqué ma propre voie scientifiquement

Dominique, je voulais te remercier de la confiance que tu m'a accordée si souvent. Ta gestion et ta maîtrises des projets d'animation m'a toujours impressionnée et je suis très heureuse de pouvoir apprendre à tes côtés en espérant pouvoir, peut-être un jour, avoir ta carrière en gardant ton sourire.

Evelyne, j'ai eu l'immense honneur de pouvoir travailler avec toi sur un de tes projets où la réalité virtuelle était entièrement tourné vers l'amélioration de la condition humaine. J'y ai beaucoup beaucoup appris à tes côtés, la rigueur bien sûr, mais aussi le fait que la technologie ne devait jamais prendre le pas sur la santé, mais qu'elle pouvait l'aider si elle était bien manipulée, en d'autres termes, qu'elle pouvait être éthique.

Imad, j'admire beaucoup ta façon de gérer tes équipes, toujours très présent pour chacun, faisant passer le bien-être de tout le monde avant le reste mais tout en gardant le laboratoire sur les rails. Tu as toujours été là dans les moment de doutes, ou les moments difficiles

Medhi, on se connaissait scientifiquement depuis très longtemps, mais j'ai eu le plaisir de te découvrir humainement pendant cet HDR. Sans toi, elle n'aurait pas été non plus ce qu'elle est, merci beaucoup.

J'aurais aimé avoir deux autres personnes dans mon jury, mais cela faisait beaucoup de monde après :

Philippe Fuchs, mon directeur de thèse, tu m'as fait découvrir la réalité virtuelle et le côté un peu sombre de la stéréoscopie, tu m'a donné envie de me consacrer entièrement à la réduction des problèmes sensori-moteurs de la RV, tu m'as poussés très fort (il faut dire que j'en avais besoin) vers l'animation scientifique avec rêverie et l'AFRV. Sans toi ma carrière n'aurait jamais été ce qu'elle est. J'espère que tu pourras être fier de ton ancienne étudiante.

Ghislaine Azémard, tu as été un modèle dans beaucoup beaucoup de domaines. Tes analyses très précises, ta finesse humaine et stratégique m'éblouissent et m'impressionnent toujours. Tu as été d'un soutien sans faille dans ma carrière universitaire, sans toi, je ne serais peut-être plus chercheuse à l'heure actuelle.

J'aimerais également remercier toutes les personnes que j'ai eu l'honneur d'encadrer parce que sans eux, cette HDR n'aurait pas pu voir le jour, notamment Saleh et David auprès de qui j'ai pu apprendre ce qu'était une direction de thèse. Mais certains sont devenus des amis, pour qui j'ai toujours une pensée très affectueuse et admirative.

Sobhi, ta gentillesse et ta ténacité m'ont beaucoup marquée, nous avons pu partager non seulement les joies des découvertes scientifiques, mais beaucoup de très belles conversations, j'espère qu'on pourra retravailler ensemble, malgré la distance.

Alexis, ton engagement et ta rigueur m'ont beaucoup impressionnée, j'ai beaucoup appris à tes côtés. On a traversé des moments qui n'étaient pas faciles l'un comme l'autre, mais je crois qu'on a toujours pu compter l'un sur l'autre et je suis extrêmement fier d'avoir pu apporter une petite pierre au scientifique que tu es devenu.

Ari, je ne sais pas si ce qui m'impressionne le plus c'est ton côté chercheur ou ta sagesse de vie. L'un de mes plus grands regrets, c'est de ne pas avoir pu encadrer ta thèse, tu aurais un scientifique exceptionnel en plus d'un être exceptionnel.

Elodie, même si je ne suis pas ton encadrante principale, j'en apprends un peu plus chaque jour à tes côtés, tu es et sera une scientifique brillante, n'en doute pas. Ton humour et ton sourire rayonne sur mes journées à l'IRBA

J'aimerais également remercier très spécifiquement des collègues et amis qui m'ont fait grandir jour après jour depuis mes débuts :

Safwan, tu as accompagné mes tous premiers pas de chercheuses et encore maintenant, c'est vers toi que je me tourne en cas de coup dur ou de grande joie. Tes conseils ont toujours été des phares pour moi.

Pascaline, c'est une immense joie d'avoir la chance de pouvoir travailler avec toi, ça faisait longtemps que j'en rêvais, et ça comble toutes mes espérances, autant scientifiques qu'humaines, j'aime vraiment apprendre et réfléchir à tes côtés.

Jean-François et Vincent, votre sourire et nos discussions sont toujours un grand ressourcement pour moi

Alexis Paljic, j'ai beaucoup appris à tes côtés, et nos conversations me manquent beaucoup, j'espère qu'on pourra retravailler ensemble un de ces jours.

J'aimerais remercier mes collègues de paragraphe et du département avec qui j'ai grand plaisir de travailler, je ne vais pas tous les citer, j'ai peur d'en oublier, mais vos sourires m'apportent énormément quand je viens à l'université.

Je tiens aussi à remercier les collègues de l'IRBA, parmi lesquels Françoise et Justin de m'avoir accueillie dans votre unité, mais également tous les autres avec qui j'ai énormément de plaisir, aussi bien à travailler, qu'à discuter en salle café. Les journées à l'IRBA sont un immense ressourcement pour moi grâce à vous tous.

J'aimerais remercier tous les autres collègues dans les autres laboratoires de l'université, comme l'INREV ou le LIASD, si nous n'avons pas assez de temps de se poser pour discuter tranquillement, je profite à fond de chacune de nos discussions de couloir

Mes collègues de la chaire Unesco et du Leden et du master CEN, j'aime énormément vous retrouver et apprendre à vos côtés. À mon arrivée à Paris 8, vous m'avez accueillie comme si j'avais toujours

été là et vous avez su me mettre à l'aise tout de suite. Un petit clin d'œil supplémentaire A Jean-pierre D'Albéra pour le temps que tu pris pour reprendre chaque phrase de mon manuscrit, sans toi, il aurait été beaucoup plus difficile à lire.

J'aimerais remercier aussi Alexis et Jérôme, non seulement parce que sans eux, je n'aurais pas d'ordinateur pour faire cette présentation, parce que leur doigts de fée l'ont ressuscité un paquet de fois, mais également pour toutes nos discussions et leur soutien sans faille.

Un grand merci aussi à toute l'équipe administrative qui s'occupe de nos masters, ça serait beaucoup plus compliqué sans vous.

Merci au bureau des thèses qui ont été d'une grande gentillesse et qui se sont vraiment décarcassé pour que je puisse enfin soutenir cette HDR, malgré les circonstances qui ont été compliqués dès le début, je suis désolée de vous avoir donné autant de travail.

Du côté plus personnel, j'aimerais bien sûr remercier ma famille : ma mère, mon père, ma sœur, Greg, Richard, Patricia et Jean-Michel, Seb et Sonia pour tout le soutien qu'ils ont pu m'apporter.

Mes amis, aussi bien la team « copain d'amour », mes amis de la danse, particulièrement Jean-Pascal, qui ont toujours été là pour moi.

Et pour finir, j'aimerais remercier Mathieu d'avoir toujours toujours été à mes côté et de me supporter dans tous les sens du terme depuis plus de 22 ans. Et à Alizé qui enchante ma vie depuis deux ans et demi.

Table des matières

1.	Introduction – enjeux et positionnement	7
1.1.	Les différents modules système de réduction des contraintes sensori-motrices.....	8
1.2.	Les expériences augmentant la base de connaissance	9
2.	Contexte : un constat des écueils à éviter.....	11
2.1.	Réalité virtuelle : rêve et réalité	11
2.2.	Effets négatifs du passage au numérique	12
2.3.	Arrondis numériques.....	13
2.3.1.	Modèle, sens commun	13
2.3.2.	Arrondis et sens humains	14
2.4.	Plasticité neuronale.....	14
2.4.1.	Recyclage et plasticité	14
2.4.2.	Vers un être adapté aux nouvelles technologies	15
2.5.	Technologie en marche	16
2.6.	Conclusion : Pertinence de mes apports et questionnements éthiques	17
3.	État de l’art sur les contraintes sensori-motrices en réalité virtuelle et les tentatives pour les réduire	19
3.1.	Troubles d’intégrité physique	20
3.1.1.	Blessures dues aux chocs	20
3.1.2.	Hygiène et maladie de peau.....	20
3.2.	Troubles physiologiques.....	20
3.2.1.	Stéréoscopie	20
3.2.2.	Cybermalaise	58
3.2.3.	Troubles musculosquelettiques	65
3.2.4.	Autres troubles.....	77
3.3.	Conclusion de l’état de l’art	78
4.	Réduction des contraintes physiologiques.....	81
4.1.	Réduction des conflits visuels	81

4.1.1.	Réduction du conflit accommodation vergence par relâchement de l'accommodation	81
4.1.2.	Réduction du conflit accommodation vergence par relâchement de la vergence	92
4.2.	Réduction des contraintes musculosquelettiques	102
4.2.1.	Amélioration du retour haptique	102
4.2.2.	Réduction des contraintes musculosquelettiques lors d'interactions gestuelles	106
4.3.	Conclusion	114
5.	Etudes psychophysiques liées aux systèmes de réduction des contraintes physiologiques	117
5.1.	Perception du relief en fonction des interfaces	117
5.1.1.	Introduction.....	117
5.1.2.	Études de l'influence des différents paramètres visuels.....	118
5.1.3.	Préconisation pour l'utilisation des modules.....	139
5.2.	Perception de la fatigue gestuelle.....	140
5.2.1.	Contexte	140
5.2.2.	Protocole	141
5.2.3.	Résultats	141
5.2.4.	Préconisation.....	145
6.	Synthèse et Perspectives.....	147
6.1.	Synthèse et perspectives pour le système visuel.....	147
6.1.1.	Synthèse	147
6.1.2.	Perspectives.....	150
6.2.	Synthèse et perspectives pour le système musculosquelettique	154
6.2.1.	Synthèse	154
6.2.2.	Perspectives.....	155
6.3.	Lien entre fatigue visuelle et musculosquelettique	156
6.4.	Positionnement des Perspectives	156
7.	Conclusion	159
8.	Bibliographie.....	161
	Annexe A : Causes des vibrations d'un système à retour d'effort	177

1. Introduction – enjeux et positionnement

Ces dernières années, la réalité virtuelle a pris de plus en plus son essor dans l'esprit du grand public, il y a de plus en plus d'applications de divertissement proposées, des médiations culturelles en réalité augmentée font leur apparition, le cinéma en relief est déjà bien implanté, des arcades de jeux en réalité virtuelle se créent... L'engouement des médias pour ces « nouvelles » technologies ne cesse de croître. Ces technologies sont pourtant utilisées dans des contextes industriels et de recherche depuis de nombreuses années déjà et ces années d'études ont permis d'identifier certains risques liés à l'utilisation abusive ou erronée de telles interfaces. Mes recherches visent donc à faire en sorte que les interfaces destinées au grand public et aux travailleurs qui les utilisent pendant des heures ne leur soient pas dommageables. Le plaisir des utilisateurs lié à la découverte ou au divertissement créé par ces nouvelles interfaces ne doit pas mener à un problème sanitaire de société, sans quoi, celles-ci seront abandonnées. Il convient donc de permettre des immersions et des interactions ayant le moins d'impact physiologique sur les personnes immergées.

Si les interfaces visuelles en relief sont les plus nombreuses en réalité virtuelle et sont celles qui ont été les plus étudiées, les interfaces gestuelles sont également très présentes, c'est pourquoi mes recherches ont porté sur les deux types. Une très grande partie de mon travail consiste à réduire les impacts des images en relief sur le système visuel, mais une autre partie consiste à étudier les possibles troubles musculo-squelettiques liés aux interfaces gestuelles, accessibles au grand public sous forme de manette de jeux comme la Kinect, la Wii...

Mon travail s'est concentré sur la réduction de ces impacts par des moyens informatiques et systémiques. Ce mémoire est structuré en deux parties : une partie constituée des modules systèmes permettant de réduire les contraintes sensori-motrices des interfaces de réalité virtuelle. L'autre partie présente les expériences qui m'ont permis ou me permettront d'affiner et d'optimiser des modules existants ou futurs. En effet, les modules proposés se reposent sur la littérature en psychophysique, voire en médecine, mais lors de la création de modules, certaines questions se posent et ne trouvent pas encore de réponse dans cette littérature.

Ces modules logiciels sont à voir comme un empilement de précautions à prendre pour les utilisateurs. Si celui-ci n'est immergé dans un mode virtuel que quelques secondes pour une petite démonstration, il n'est peut-être pas nécessaire de mettre en place tous les modules présentés. Par contre, s'il s'agit d'un travailleur susceptible de passer plusieurs heures par jour dans un monde virtuel, il conviendra de mettre en place des protections pour ne pas abîmer ses systèmes visuels et musculo-squelettiques. Le nombre et le type de modules à mettre en place dépendent du type d'interface utilisée, du monde virtuel, de la tâche demandée... Les expériences de la seconde partie sont réalisées et présentées également pour mieux décider quelles protections sont à mettre en œuvre en fonction de la tâche à réaliser, pour maximiser la perception nécessaire pour l'effectuer.

1.1. Les différents modules système de réduction des contraintes sensorimotrices

La première partie de mon travail part des données connues sur les impacts des interfaces de réalité virtuelle pour tenter de proposer des systèmes les minimisant. Chaque module proposé dans cette partie répond à une problématique soulevée par différentes études physiologiques, de médecine... Dans la mesure du possible, chaque module est ensuite testé (certains sont en cours de test, il n'y aura donc pas d'étude d'efficacité présentée) pour vérifier si la solution proposée répond bien au problème soulevé.

Réduction des contraintes visuelles	
Réduction du conflit accommodation-vergence par relâchement de l'accommodation	<p>RAFA 1 : Relâchement de l'accommodation aux endroits où le conflit est le plus fort</p> <p>Ce module supprime les hautes fréquences lorsque les disparités horizontales sont trop fortes, donc, lorsque le conflit accommodation-vergence est trop important. La suppression de ces hautes fréquences permet de relâcher l'accommodation qui suivra la vergence et réduira le conflit entre ces deux indices.</p>
	<p>RAFA 2 : Relâchement de l'accommodation aux endroits non regardés</p> <p>Ce module supprime les hautes fréquences en vision périphérique. Elle supprime moins de conflits accommodation-vergence que RAFA 1, mais permet de garder une vision centrale nette.</p>
Réduction du conflit accommodation-vergence par relâchement de la vergence	<p>SIRC : stéréoscopie intermittente pour relâchement de la convergence</p> <p>Ce module permet de réduire voire supprimer le relief de façon temporelle sans que les utilisateurs s'en aperçoivent. Cette technique se base sur le rapprochement des caméras virtuelles par rapport à la distance entre les yeux du sujet. Elle relâche donc le conflit accommodation-vergence en faisant en sorte que la vergence soit au même endroit que le plan d'accommodation.</p>
	<p>PECA : Placement de l'écran pour convergence adaptée</p> <p>Ce module est spécifique aux casques immersifs bon marché. Il détermine la position des écrans pour une réduction du conflit accommodation-vergence en fonction de la distance entre les deux yeux et la distance focale des lentilles tout en évitant les disparités verticales et les distorsions liées aux déplacements des lentilles souvent pratiqués.</p>

Réduction des contraintes musculosquelettiques	
Réduction des contraintes de vibration des retours d'effort	<p>RéViSPID : Système de Réduction des Vibrations d'un système de retour d'effort par câble de type SPIDAR</p> <p>Ce module se sert de l'ajout d'un capteur de force sur le câble et l'ajout d'une régulation de type PI ou PID et de système de détection de détente des câbles.</p>
Réduction des contraintes musculosquelettiques lors d'interactions gestuelles	<p>FuMus : Fusion multisquelette</p> <p>Ce module permet d'utiliser plusieurs Kinect pour améliorer la captation du squelette. Elle servira principalement à améliorer le module suivant pour qu'elle puisse capter plus de mouvements.</p>
	<p>DALATR : Détection automatique de LATR</p> <p>Ce module permet de détecter les mouvements jugés dangereux pour le système musculosquelettique par les normes de santé au travail. Il permettra aux concepteurs de choisir les mouvements utilisés pour leur interaction de façon à ce qu'ils ne soient pas dangereux. Contrairement aux autres modules, celui-ci s'utilise en amont de l'immersion et interaction des sujets.</p>

1.2. Les expériences augmentant la base de connaissance

Il arrive parfois que pour créer un module ou améliorer ceux existants, les données dont j'ai besoin sont manquantes dans la bibliographie, cette seconde partie du manuscrit présente donc les expériences réalisées pour permettre de recueillir ces données. Certaines de ces expériences sont réalisées à partir d'un module exposé ci-dessus (colonne « Module de base ») afin de l'améliorer ou de proposer des variantes. Elles permettent également d'étudier l'impact de ces modules sur l'efficacité des sujets pour un type de tâche donné. En fonction de ce que demande l'application, cela permet de préconiser certains modules plutôt que d'autres afin de minimiser les impacts négatifs tout en gardant le plus d'impacts positifs.

D'autres sont des expériences réalisées avant la création d'un nouveau module pour recueillir des données afin de pouvoir le paramétrer ou le concevoir. Certains de ces modules ont déjà vu le jour (colonne « Module Conçu ») d'autres sont en cours de conception ou d'amélioration (colonne « Module Futur »).

Le tableau ci-dessous montre le lien entre les modules futurs et existants et les expériences réalisées.

Optimisation des réductions de contraintes visuelles			
Expérience	Module de base	Module conçu	Module futur
Influence de la parallaxe de mouvement sur la perception des courbures		SIRC : explique le fait que la perception du relief soit maintenue même lors de la disparition temporaire de la stéréoscopie	SIRC : permettra de supprimer la stéréoscopie lorsque le sujet se déplace pour favoriser le maintien de la perception du relief
Influence de		SIRC : montre que la	SIRC : permettra de

l'hyperstéréoscopie et de l'orthostéréoscopie		stéréoscopie a une influence sur la perception du relief, mais n'est pas indispensable	rajouter du relief lorsque la perception de la courbure sera vraiment nécessaire
Influence de la stéréoscopie intermittente	Étude de l'influence de SIRC actuel sur la perception du relief		Permettra de décider quand diminuer le relief et quand le remettre en fonction de la tâche de perception demandée
Influence de la parallaxe horizontale			Permettra de concevoir un module ajoutant ou supprimant de la parallaxe horizontale pour se rapprocher de la vision naturelle et d'en vérifier l'impact sur la fatigue visuelle
Influence du flou sur la perception du relief	RAFA 1 : permet d'évaluer l'effet de RAFA 1 sur la perception du relief pour savoir dans quel cas l'utiliser		

Optimisation des réductions de contraintes musculosquelettiques			
Expérience	Module de base	Module conçu	Module futur
Comparaison fatigue gestuelle en environnement réel ou virtuel			Conception de module permettant de prendre en compte les différences

Dans tout le document qui suit, vous trouverez pour chaque travail :

Les publications qui s'y rapportent dans des cadres bleus

Les projets qui s'y rapportent dans des cadres rouges

Les stages et thèses qui s'y rapportent dans des cadres jaunes

Les liens entre les expériences et les modules dans des cadres verts

2. Contexte : un constat des écueils à éviter

« Il n’y a point de vrai progrès dans l’espèce humaine parce que tout ce que l’on gagne d’un côté, on le perd de l’autre » (Rousseau 1959)

2.1. Réalité virtuelle : rêve et réalité

La réalité virtuelle est de plus en plus présente, elle s’impose dans beaucoup d’usages de la vie quotidienne ou professionnelle. Certains grands médias n’hésitent pas à la présenter comme une alternative à la vie réelle, par exemple, des articles du Parisien affirment qu’il est possible de visiter un appartement en virtuel, le voir, le percevoir et ressentir comme si on y était (« Avant d’acheter, testez en 3D »¹), d’autres indiquent qu’il est possible de voler comme Icare au-dessus de New-York (« Réalité virtuelle : on a testé le survol de New York »²). Ces articles encensent la réalité virtuelle en laissant entendre qu’elle peut tromper complètement nos sens et qu’une expérience virtuelle est identique à une expérience réelle.

Mais si la réalité virtuelle est un formidable outil, nous n’en sommes pas au point de tromper totalement nos sens, il persiste certains biais liés à la technologie provoquant des conflits sensorimoteurs. Les biais perceptifs sont très loin d’être nouveaux, Magritte les dénonçait déjà en 1928 dans son célèbre tableau « La trahison de l’image » (Figure 1). En effet, selon l’interprétation de Michel Foucault dans « Ceci n’est pas une pipe », le peintre a voulu signifier que l’image d’un objet (ici une pipe) n’est pas l’objet lui-même (Foucault 1973).

¹ Parisien : « Avant d’acheter, testez en 3D » : <http://www.leparisien.fr/vie-quotidienne/conso/avant-d-acheter-testez-en-3d-19-01-2017-6587409.php>, consulté le 30 janvier 2017

² Parisien : « Réalité virtuelle : on a testé le survol de New York » : <http://www.leparisien.fr/culture-loisirs/on-a-teste-le-survol-de-new-york-08-12-2016-6427671.php>, consulté le 30 janvier 2017



Figure 1 : René Magritte, "La trahison de l'image"³

De la même façon, une reproduction en réalité virtuelle n'est pas complètement la réalité, il existe de nombreuses différences entre un stimulus réel et sa reproduction en réalité virtuelle.

Si Magritte et Foucault parlaient probablement de différences philosophiques, ce mémoire parle plutôt de différences sensori-motrices. Ces différences ne seraient pas très gênantes si elles n'occasionnaient pas des perturbations physiques, physiologiques et cognitives. Nous pourrions approuver certains scientifiques, estimant que le numérique et plus particulièrement la réalité virtuelle est « dangereuse » (Spitzer 2014) pour l'homme et la société et qu'il vaut mieux l'éviter, mais nous préférons étudier les problèmes que posent ces différences entre le réel et le virtuel pour mieux y palier de façon active ou passive et profiter des apports de ces technologies.

2.2. Effets négatifs du passage au numérique

Quelques auteurs dénoncent l'impact du numérique dans nos vies et son ingérence dans notre fonctionnement intime.

Le fait que, dans la plupart des états des États-Unis d'Amérique, l'écriture cursive ne soit plus enseignée aux élèves au profit de l'écriture sur clavier (pour l'instant, seule la Californie apprend encore l'écriture cursive à ses enfants) a fait couler beaucoup d'encre. Il semblerait que lorsque nous n'apprenons pas l'écriture cursive, certains mécanismes ne se développent pas correctement. Stanislas Dehaene indique qu'il existe plusieurs canaux pour apprendre à lire et que le canal induit par l'écriture est important (Dehaene 2008). Ainsi, ne plus apprendre à écrire pourrait freiner l'apprentissage de la lecture même, mais également le contrôle fin des mouvements. En effet, l'écriture cursive demande plus de précision dans le geste que taper sur un clavier et plus de concentration. Il est difficile de laisser son esprit vagabonder lorsqu'il doit se concentrer sur la main en train d'écrire (Cairn 2013) (Tan et al. 2012). Les mêmes auteurs estiment que le fait que l'écriture soit limitée aux gestes du clavier et non à une graphie qui est très personnelle et propre à chaque personne restreint la créativité. Jolly et Gentaz montrent que c'est bien le geste qui se perd puisque le même geste reproduit sur tablette facilite également l'apprentissage (Jolly and Gentaz 2013).

De même, certains auteurs ont étudié l'influence de l'utilisation du GPS par les taxis de Londres (Minaei 2014) et de Tokyo (Yoshiki, Itoh, and Nagam 2011). Ils montrent par exemple que les taxis utilisant le GPS connaissant une adresse sont deux fois moins nombreux que ceux n'utilisant pas le

³ MAGRITTE, René (1898-1967), « La trahison des images », 1928–29, huile sur toile, 59 × 65 cm ; Los Angeles County Museum of Art

GPS. En effet, ces conducteurs font plus souvent confiance à leur GPS et ne mémorisent plus les adresses. L'étude sur les taxis de Tokyo montre que les conducteurs de taxi sans GPS ont également une meilleure spatialisation relative des lieux de leur ville. Ces deux études mettent en évidence une perte de certaines capacités cognitives liée à l'utilisation du GPS.

De la même façon, le fait d'avoir les informations disponibles à tout moment déformerait notre façon de les mémoriser. Carr indique que "*quand les faits et les expériences entrent dans notre mémoire à long terme, nous sommes capables de les combiner à nos idées complexes qui enrichissent notre pensée.*" (Carr 2011). Il estime que notre intelligence dépend de notre faculté à mémoriser ce qui nous entoure et que le fait de sortir son téléphone pour chercher la réponse à une question dès qu'elle se pose est dommageable à notre structuration mentale. De même, prendre une photo d'un objet ou d'un moment altère sa mémorisation. Henkel a séparé un groupe d'étudiants en deux : ceux qui devaient regarder des objets dans un musée et ceux qui devaient les photographier. Ceux qui les photographiaient sans faire de zoom sur un point particulier avaient du mal à mémoriser ces objets (Henkel, Parisi, and Web 2016).

La réalité virtuelle n'est pas encore assez répandue dans le grand public pour que des études semblables y soient consacrées, mais nous pouvons prendre les devants et nous assurer que ce que nous gagnons avec l'avènement de celle-ci ne se paie pas trop cher.

2.3. Arrondis numériques

Toute donnée numérique est une donnée foncièrement échantillonnée et discrète, c'est-à-dire qu'elle n'est continue ni en temps ni en valeur, contrairement à notre vie réelle dont les données sont essentiellement analogiques, continues en temps et en valeur. Le monde n'est pas composé de valeur binaire comme le codage informatique. Il y a forcément une perte de valeur et de données dans un monde numérique par rapport à ce que peut nous apporter le monde réel, une approximation que Miguel Benasayag appelle « arrondi numérique » (Benasayag 2016).

2.3.1. Modèle, sens commun

Un monde virtuel tentant de reproduire un monde réel se base sur un modèle de celui-ci. Il ne peut être une reproduction exacte, il ne veut probablement pas l'être. Est-ce nécessaire de représenter une mouche volant dans le champ d'à côté lorsque le but est d'immerger quelqu'un sur une tâche de sécurité à l'intérieur d'une usine ? Si cette mouche n'est pas nécessaire, est-ce que l'éternuement d'un collègue a du sens ? Il pourrait perturber l'ouvrier dans sa tâche, provoquer un éclat de rire qui renforce la cohésion d'équipe, transmettre un bon gros rhum à la moitié de l'équipe... Même si cet éternuement peut être lourd de conséquences, est-ce qu'il est vraiment opportun de l'inclure dans la modélisation ? Est-ce que le ratio apport à l'immersion et au réalisme du monde sur le cout informatique et humain (des personnes vont devoir modéliser cet éternuement) est vraiment intéressant ? J'ai été immergée dans beaucoup d'usines numériques, mais je n'ai encore jamais vu d'ouvrier virtuel éternuer, donc nous pouvons probablement penser que les concepteurs de ces mondes virtuels ont estimé qu'un éternuement n'était pas très important, en tout cas, pas suffisamment important. Et à vrai dire, je le pense aussi. Cela montre que les concepteurs de mondes virtuels et de systèmes de réalité virtuelle se basent sur des modèles restrictifs par rapport au monde.

Il peut se passer beaucoup plus de choses dans la vie réelle que dans le monde virtuel. Cette diminution du monde réel peut être volontaire ; par exemple, le concepteur peut souhaiter supprimer l'éternuement du collègue justement pour favoriser la concentration d'un élève. Un élève en chirurgie n'a pas besoin d'avoir les discussions entre collègues, sans rapport avec la tâche qui

peuvent avoir lieu dans la salle d'opération, il a besoin au début de se concentrer. L'inverse est vrai également : dans le cas de simulation virtuelle pour l'apprentissage, il peut se passer beaucoup de chose en virtuel qui ne se dérouleront peut-être jamais dans la vie réelle pour que l'apprenant y soit confronté au moins une fois. « Dans tout modèle, il y a à la fois plus et moins que ce que le modélisateur initial a voulu y mettre » (Le Moigne and Groupe de recherche en analyse de système et calcul 1987).

Le monde virtuel, même lorsqu'il se veut le plus réaliste possible présente donc des différences avec le monde réel, il est probable que ces différences ne soient pas « importantes en soi », mais il est également possible qu'elles le soient, au vu des expériences présentées au paragraphe précédent.

2.3.2. Arrondis et sens humains

Il y a un autre type « d'arrondi numérique » en réalité virtuelle, un arrondi sensoriel. En effet, nos sens sont capables de percevoir des stimulus avec une précision que nos interfaces (à part les interfaces auditives) ne sont pas encore capables de transmettre.

Reprenons les calculs de Philippe Fuchs dans « le sens et les réponses motrices de l'homme » du traité de la réalité virtuelle (Fuchs 2003), considérant que l'acuité visuelle moyenne est égale à 1' d'angle, cela permet de différencier deux points séparés de 0,1mm à 35cm de distance. Pour la même distance, un écran carré de 25cm devra posséder 2500 pixels de côté. Or, si nous en croyons le site [screenresolution⁴](http://fr.screenresolution.org/), en 2017, les deux résolutions les plus courantes sont 1366x768 HD (18%) et 1920x1080 (11%), la plus haute résolution recensée était 2880x1620 avec une occurrence de 0,01% des écrans et rien n'indique la largeur de l'écran ni sa distance de visionnement.

Cependant, la résolution des écrans professionnels est beaucoup plus élevée et proche de l'acuité visuelle. Des écrans dits « 4k » sont devenus disponibles. Cette dénomination fait référence au nombre de pixels les composant, soit 4000 pixels minimum. Prenons un écran dit « 4k » courant, pour une diagonale de 101cm et une résolution de 3840x2160⁵, le pixel mesure 0,22mm de côté, il est encore 2 fois trop grand pour un écran situé à 25 cm des yeux. Par contre, situé à 55cm, le pixel correspond à l'acuité visuelle. À cette distance, le champ visuel couvert par cet écran est de 77° en horizontal et 49° en vertical, nous sommes donc très en dessous du champ visuel humain de 100° horizontalement si la personne ne bouge pas les yeux et 170° si on lui permet de bouger les yeux (Fuchs 2003).

Nous voyons donc que dans l'état actuel de la technologie, un compromis est nécessaire pour atteindre les caractéristiques sensorielles de l'homme. Pour les interfaces haptiques ainsi que celles qui actualisent le contenu visuel en fonction des mouvements de la tête, le virtuel est souvent plus pauvre sensoriellement que le réel.

2.4. Plasticité neuronale

2.4.1. Recyclage et plasticité

La plasticité neuronale est la capacité de notre système nerveux de se transformer pour arriver à un état de fonctionnement optimal en fonction de son environnement. Schiffmann la définit comme étant « L'ensemble de ces processus de modification, de remodelage subtil du système nerveux »

⁴ Screenresolution, <http://fr.screenresolution.org/>, consulté le 21/02/2017

⁵ Boulanger, "TV 4K UHD Samsung UE40KU6000 1300 PQI HDR SMART TV", <https://www.boulanger.com/ref/1069149?xtor=SEC-1299-GOO&xts=171153&origin=%7Badtype%7D&kwd=%7Bkeyword%7D&gclid=CMWyyu69odICFQoA0wodixEENw> , consulté le 21/02/2017

(Schiffmann 2006). Cette plasticité est notamment à l'œuvre dans tout processus d'apprentissage, elle est plus active chez un sujet jeune que chez un sujet âgé.

Nous savons que les circuits cérébraux se modifient lors de l'apprentissage de la lecture (Turkeltaub, Gareau, and Flowers 2003), mais également lorsque le cerveau a été abîmé très jeune, par exemple, sur la patiente de la Figure 2, à qui on a dû enlever le lobe occipital (normalement nécessaire pour la lecture) et qui a appris à lire sans grand problème (Cohen et al. 2004).

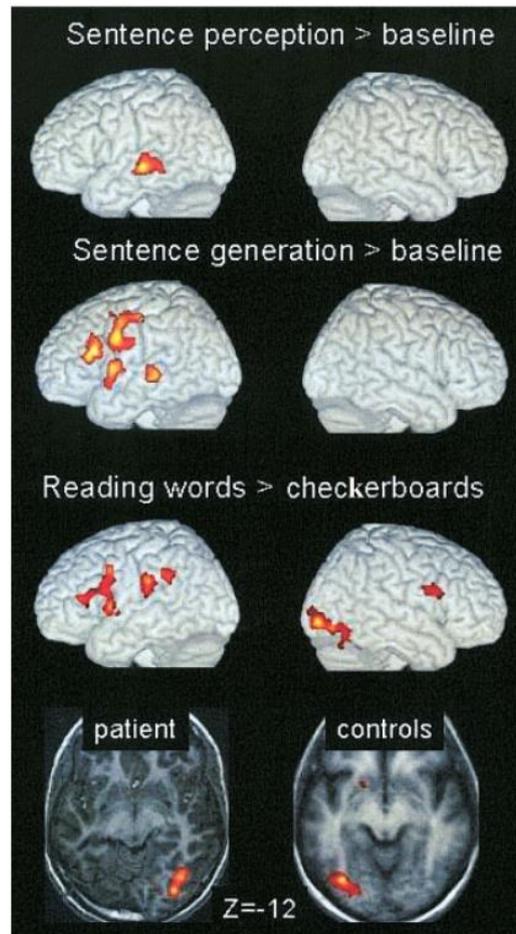


Figure 2 : modification des zones actives dans le cerveau d'une patiente dont on a enlevé le lobe occipital (Cohen et al. 2004)

2.4.2. Vers un être adapté aux nouvelles technologies

Lors d'une conférence organisée pour nos élèves sur les nouvelles technologies, une personne représentant son entreprise a présenté les lunettes de réalité augmentée qu'elle fabriquait. Intriguée, et pensant que cette personne pourrait donner des exemples de ce que j'essaie d'enseigner à mes élèves, je lui ai demandé d'expliquer comment son entreprise prenait en compte les conflits oculomoteurs provoqués par leur interface. Sa réponse ? « Nous ne les prenons pas en compte, nous pensons que le système visuel s'adaptera, il s'adapte à tout ! » Je n'ai pas insisté pour ne pas mettre mal à l'aise notre invité devant les élèves, mais je ne partage pas son optimisme. Cependant, cette remarque montre bien les deux écoles de pensée : les uns pensent que le « système humain » s'adaptera à la réalité virtuelle et à la stéréoscopie artificielle en particulier, les autres sont beaucoup plus réservés et pensent qu'il conviendrait de limiter le plus possible les contraintes sensori-motrices pour que notre corps n'ait pas à subir le stress d'une adaptation.

Cette personne faisait peut-être référence à cette expérience de George Stratton (Stratton 1897) qui consistait à faire porter à un sujet des lunettes renversant l'image. Pendant trois jours, ce dernier a

eu une vision perturbée, mais, après cette période d'adaptation, il a pu vaquer à ses activités normalement en n'ayant plus conscience de l'inversion des images. Cependant, ce que notre invité a oublié, c'est qu'en retirant ses lunettes, le sujet a mis également trois jours pour voir normalement, il était « adapté » aux lunettes, mais plus à la vision « normale ». Cette expérience a été reprise par le professeur Erismann sur son élève Ivo Kohler en 1950 ce dernier a mis 10 jours à s'adapter aux lunettes⁶. Ce type d'expérience a été également refaite avec d'autres stimulus perturbés, par exemple un décalage horizontal provoqué par des lunettes prismatiques (Rossetti et al. 1999) provoquant le même type d'adaptation durable dans le temps.

Il est donc possible que la physiologie humaine s'adapte à la technologie, la vraie question est « à quel prix ? ». Certains chercheurs nous ont affirmé avoir tenté de montrer qu'il existait deux états stables mais ils n'ont pas publié leur travaux. C'est-à-dire, que l'homme serait capable de basculer très rapidement entre deux modes : un mode artificiel (dans la discussion avec ces chercheurs, c'était même plus précisément une stéréoscopie artificielle) et un mode naturel, de la même façon que nous sommes capables de passer d'un déplacement à pied qui pourrait être considéré comme naturel à un déplacement en vélo, qui pourrait être considéré comme technologiquement assisté. Cependant, cette bascule n'a pas pu encore être montrée.

Imaginons que cet état bistable n'existe pas, est-ce judicieux de modifier notre physiologie pour qu'elle soit plus adaptée à un environnement virtuel qu'à un environnement naturel ? Seul l'avenir nous le dira. Certains philosophes pensent que notre cerveau s'adaptera de plus en plus rapidement à l'usage de la technologie (Thompson 2013), mais qu'en est-il de notre physiologie ?

2.5. Technologie en marche

Nombre d'artefacts utilisés quotidiennement par les humains ont des effets sur leur santé et leurs capacités cognitives. Par exemple, il est connu que regarder la télévision est néfaste pour le développement des enfants (Martin 2011) (Berros 2008), limite les capacités cognitives des adultes, favorise l'obésité, les comportements agressifs et les pratiques sexuelles à risque, augmente la consommation de tabac et d'alcool et favorise une mauvaise image de soi (Desmurget 2012). Les possibles effets néfastes des ondes électromagnétiques émises par les téléphones ont été dénoncés de nombreuses fois (Agence nationale de sécurité sanitaire, alimentation, environnement, travail 2013) sans que nous abandonnions son utilisation. Si nous acceptons ces risques, c'est que les avantages nous semblent supérieurs aux inconvénients.

Nous pouvons toujours refuser les avancées technologiques, ne pas posséder un téléphone et un ordinateur, ne pas utiliser internet et la télévision. Rien ne nous oblige à posséder tous ces dispositifs dans notre vie courante. Refuser les réseaux sociaux est toujours possible, mais certaines informations ne sont plus disponibles que sur ces plateformes (dates de concerts, expositions...). Beaucoup de procédures de recherche d'emploi se font par mail, un site spécialisé dans la recherche d'emploi mentionne sur sa page « Les 8 meilleurs outils pour une recherche d'emploi » qu'un CV doit contenir « votre adresse mail, un numéro de téléphone et, bien sûr, un lien vers un CV ou profil en ligne » et qu'il est très utile de « retwitter » (Chaudeau 2015). Est-ce qu'un employeur ne va pas préférer un employé qui sait se servir d'un ordinateur pour faciliter les échanges de documents en interne (et en externe) ? Si nous refusons les technologies, cela ne signifie pas que nous ne trouverons pas d'emploi, mais cela peut affecter le temps mis avant d'en trouver un et fermer certaines portes.

⁶Erismann and Kohler: Inversion goggles, YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=jKUVpBJaINQ>, mis en ligne le 11/11/2011 par BioMotionLab, consulté le 21/20/2017

S'il faut combattre la fracture numérique dans la population, c'est bien parce que le fait de ne pas être « connecté » peut mener à l'exclusion (Vodoz 2010). Pour l'instant, les réalités virtuelles et augmentées ne sont pas concernées par ce phénomène, mais vu le battage médiatique autour du « casque de réalité virtuelle », il n'est pas exclu que l'immersion revête un caractère socialement obligatoire dans les dix ans à venir. C'est pourquoi les travaux de recherche visant à minimiser les impacts négatifs de celle-ci sont si importants. Il est préférable de mener ces travaux bien avant son « imposition » à la société tout entière, pour en tirer le plus de bénéfices possibles.

2.6. Conclusion : Pertinence de mes apports et questionnements éthiques

J'inscris ces questionnements dans une démarche éthique qui me pousse à faire ces recherches : « a-t-on le droit d'imposer à une population une technologie dont on sait déjà qu'elle créera des dégâts sur le corps humain ? », « Est-ce que le bénéfice en vaut le risque encouru ? ». Pour les professionnels dont la pénibilité du travail est amoindrie par la réalité virtuelle et qui voient leurs troubles musculosquelettiques évités grâce, par exemple, à la manipulation de prototype virtuel plutôt que dans la manipulation de leurs lourds homologues réels, le risque est probablement intéressant pour leur propre santé. Pour les personnes dont le travail consiste à sauver ou sécuriser des vies, comme les chirurgiens, les contrôleurs nucléaires, les pilotes d'avion pour qui la moindre erreur peut avoir des conséquences énormes, dans ce cas, il est possible également que le risque pour leur système visuel lors de leur apprentissage soit acceptable pour sauver beaucoup de vies. Je serais cependant beaucoup réservée sur la réalité virtuelle à but purement ludique, particulièrement lorsque la cible a moins de 16 ans.

Il existe de nombreuses études montrant l'utilité de la réalité virtuelle dans l'apprentissage (Lourdeaux 2001) (Schmoll et al. 2014), dans les thérapies cognitives (Klinger 2006) et psychologiques (North, S. M., and J. R. 1997) (Rothbaum et al. 1995) (Choi et al. 2001), ainsi que dans beaucoup d'autres domaines. Il serait extrêmement dommage de ne pas profiter de tout ce qu'elle nous offre sous prétexte qu'il pourrait y avoir certains effets physiques et cognitifs encore inconnus. Plutôt que de prôner une abstinence totale, nous préférons étudier les effets négatifs possibles et tenter d'y remédier avant l'arrivée dans les maisons et le grand public pour tenter de profiter des avantages sociétaux en réduisant les inconvénients.

Pour Benasayag « *Les possibles technologiques s'imposent au-dessus des limites de compossibilité biologiques, culturelles, psychologiques* » (Benasayag 2016) en page 93), rien ne nous empêche d'essayer de prendre en compte ces « compossibles » pour les imposer à la technologie. Ainsi, ce serait elle qui s'adapterait à notre physiologie et non l'inverse, rejoignant Milou quand il écrivait qu'« *avec la réalité virtuelle, l'enjeu n'est pas de libérer le corps, mais de l'assumer* » (Milou 2005).

Certains biais physiologiques, cognitifs et psychiques sont encore inconnus, la recherche avance et pourra nous les révéler. Cependant, certains effets sont déjà identifiés, nous essayerons donc de réduire quelques uns des biais connus et bien étudiés. Nous pensons comme Stanney, qu'il faut connaître les écueils potentiels de la réalité virtuelle pour la laisser prendre son plein potentiel (Stanney 1995). Ce mémoire s'inscrit précisément dans cette dynamique.

Dans un premier temps, je tenterai de montrer que certains conflits sensori-moteurs provoqués par la réalité virtuelle sont déjà connus et étudiés. Je me suis concentrée sur les immersions et interactions les plus courantes dans la réalité virtuelle, à savoir l'immersion stéréoscopique et l'interaction gestuelle. En effet, ces deux techniques sont présentes dans beaucoup d'applications de réalité virtuelle, mais comme nous le verrons dans le chapitre suivant, ne sont pas sans conséquence pour le système visuel et musculosquelettique. Mais nous verrons également que de plus en plus de

chercheurs s'emploient à minimiser ces risques potentiels. Mon travail, présenté au chapitre 4, s'inscrit dans cette mouvance : identifier les risques pour mieux y répondre en temps réel. Je présenterai donc quelques systèmes mis en place pour réduire les contraintes oculomotrices et musculosquelettiques, mais également de mesures d'impacts de ces dispositifs. Cependant, comme expliqué dans ce contexte, la réalité virtuelle a des avantages qu'il convient de ne pas anéantir sous prétexte de minimiser le risque sanitaire, donc le chapitre 5 se consacre à étudier d'une part l'impact de ces systèmes non sur les contraintes sensori-motrices, mais sur la perception visuelle et les mouvements des sujets, autrement dit, sur leurs performances physiques et psychophysiques. Dans ce chapitre, j'aborde également les mesures à prendre pour créer de nouveaux systèmes respectueux à la fois de la physiologie humaine et de l'efficacité des sujets. Enfin, je replacerai mon travail en regard des travaux des pairs présentés au chapitre 3 afin de souligner les complémentarités qui se sont tissées et nos éventuels désaccords, sources de nouvelles pistes de recherche vers une immersion et interaction toujours plus agréable et sécurisée.

3. État de l'art sur les contraintes sensori-motrices en réalité virtuelle et les tentatives pour les réduire

La réalité virtuelle est souvent composée autour d'interfaces visuelles, comme Costello, le disait :

"90 per cent of the received information is visual. It is therefore not surprising that manufacturers go to great lengths to provide a compelling visual environment." (Costello 1997)

D'un point de vue physiologique et nerveux, les fibres nerveuses sont beaucoup plus concentrées dans le système oculaire (et les mains) que dans les grands muscles comme ceux des jambes ou des bras, indiquant « l'importance de mouvements oculaires précis, la nécessité de manipuler les objets avec délicatesse » (Purves et al. 2015) .

C'est pourquoi mon travail va s'articuler plus sur la vision que sur les autres capacités sensori-motrices de l'homme. Cependant, bien que la vision soit souvent centrale dans les interfaces les autres seront traitées. En effet, l'interaction gestuelle étant très présente en réalité virtuelle, elle représentera l'autre partie conséquente de cet état de l'art. Dans ce chapitre, nous monterons les fatigues essentiellement physiologiques recensées en réalité virtuelle et leurs causes ainsi que les travaux de recherche tentant de réduire ces différentes fatigues de façons actives ou passives.

La différence entre troubles physiques et troubles physiologiques ne fait pas consensus. En effet si nous n'avons trouvé aucun auteur présentant les conflits oculomoteurs comme étant des phénomènes plus physiques que physiologiques, certains auteurs soutiennent que les troubles musculosquelettiques sont physiques (Costello 1997), alors que d'autres maintiennent qu'ils sont physiologiques (Waugh, Grant, and Cosserat 2011). Nous prendrons le parti de placer les troubles musculosquelettiques dans les problèmes physiologiques, mais cela n'a pas beaucoup d'influence sur la suite du propos.

En connaissant les conflits provoqués par la réalité virtuelle, certains auteurs et chercheurs tentent de modifier les différents paramètres de celle-ci pour réduire les malaises et autres problèmes physiologiques induits par ces technologies. Certains se concentrent sur une adaptation de l'environnement virtuel et modifient leurs scènes pour présenter des stimulus non dommageables, ce que j'appellerai « les méthodes passives », d'autres, optent plutôt pour une modification du stimulus en temps réel, sans se préoccuper de la scène virtuelle, ce que j'appellerai les « méthodes actives ». Dans les faits, il vaut probablement mieux coupler les deux.

3.1. Troubles d'intégrité physique

3.1.1. Blessures dues aux chocs

Dans un casque immersif, contrairement à une interaction avec le réel, nous ne voyons pas le monde nous entourant, il arrive que nous puissions nous blesser contre des objets (Costello 1997). En effet, lorsque nous manipulons des objets ou que nous nous déplaçons dans un monde virtuel visualisé dans un casque, il faut éviter les meubles ou autres objets, dans la mesure où ne les voyons plus, nous avons tendance à oublier qu'ils sont dans notre champ de mouvement et à les heurter. De même, dans une salle immersive avec un écran stéréoscopique, le relief proposé fait qu'au bout d'un moment, nous ne « voyons » plus l'écran réel. Je me suis moi-même cognée plusieurs fois contre un écran de salle immersive en essayant d'attraper un objet virtuel ou dans un meuble (voire un collègue) en casque immersif. Homola indique qu'il convient toujours d'avoir une personne qui n'est pas immergée à côté de soi pour éviter ce type de blessure (Homola et al. 1997).

Même lors d'une interaction gestuelle durant laquelle nous voyons le monde qui nous entoure, Jones et Hammig reportent des blessures de type contusion et abrasion, lacération, fracture voire commotion cérébrale (Jones and Hammig 2009). Les lacérations et contusions sont généralement causées par une collision avec la manette d'interaction, les fractures sont souvent des doigts cassés également par collision avec un meuble.

Il semblerait cependant que le problème pourrait être minimisé avec l'intégration de ce que les industriels appellent le *inside-out tracking* aux casques immersifs qui pourraient intégrer une connaissance de l'environnement extérieur par le casque et prévenir l'utilisateur lorsqu'il se rapproche d'un meuble.

3.1.2. Hygiène et maladie de peau

Gupta et Costello estiment qu'il peut y avoir des risques hygiéniques avec les casques immersifs dans la mesure où les germes d'une personne vont sur la peau d'une autre personne lorsque le casque passe d'une personne à l'autre (Gupta, Wantland, and Klein 1996) cité par (Costello 1997)). Cette étude est complétée par les études montrant que le téléphone mobile peut s'avérer un grand facteur de propagation de germes (Ulger, Ahmet, and Keramettin 2009) (Selim and Abaza 2015) (Tagoe, Gyande, and Ansah 2011). Notons que dans certains établissements, comme le palais de Tokyo, un cache en papier est changé entre chaque utilisateur.

3.2. Troubles physiologiques

3.2.1. Stéréoscopie

3.2.1.1. Perception du relief

a) Perception du relief en vision naturelle

1) L'œil

L'œil est le point d'entrée du système visuel, c'est par lui que notre perception commence (Figure 3). Les rayons lumineux traversent la cornée et la pupille pour être réfractés par le cristallin. Ce dernier focalise les rayons entrant sur la rétine tapissée de capteurs qui collectent les informations et les transmettent au corps genouillé, le cortex frontal et occipital via le nerf optique et le chiasma optique.

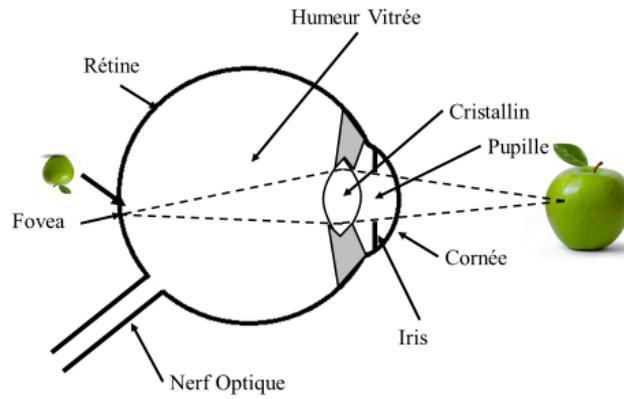


Figure 3 : l'œil

2) Indices monoculaires

- *Statiques*

Les indices monoculaires statiques sont les indices qui seraient interprétables avec un œil et sans aucun mouvement. Parmi ceux-ci, nous retrouvons les jeux d'ombres et de lumières (Figure 4). L'interprétation de l'orientation et les réflexions de la lumière sur la surface des objets permettent la perception de l'inclinaison et de l'orientation de celle-ci.

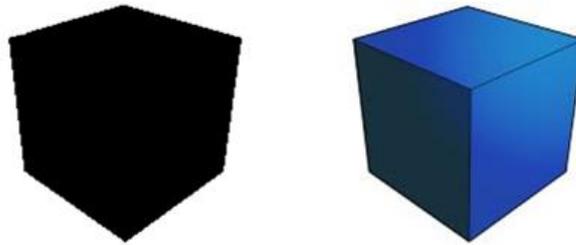


Figure 4 : les ombres et lumières

L'interposition intervient quand un objet en cache un autre (Figure 5). Le cerveau reconstitue la partie cachée et en déduit qu'elle est derrière l'objet qui est présenté entier.

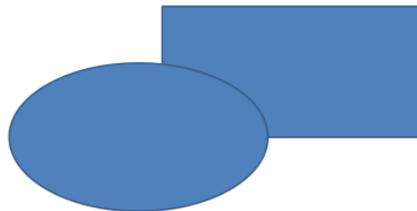


Figure 5 : l'interposition intervient quand un objet en cache un autre

Lorsque des objets normalement semblables présentent des projections de tailles différentes sur la rétine (Figure 6), le système visuel interprète cette différence de taille comme étant la conséquence d'un éloignement différent : les projections les plus petites sont celles des objets les plus éloignés.



Figure 6 : différence de taille relative

Lorsque les fréquences spatiales relatives aux textures d'objets visualisés diminuent, le cerveau l'interprète comme un éloignement des objets concernés (Figure 7).



Figure 7 : variation de texture

La perspective est peut-être l'indice le plus connu, parce qu'elle est enseignée dans les écoles de dessin industriel et artistique (Figure 8).

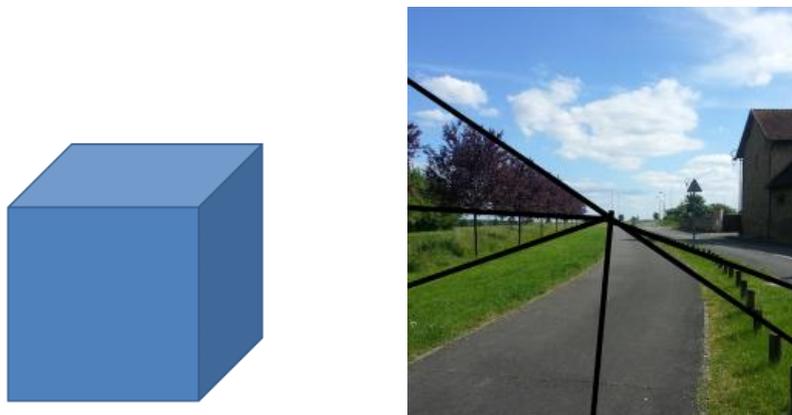


Figure 8 : perspective cavalière (gauche) et artistique (droite)

- *Parallaxes de mouvement*

Les parallaxes de mouvements sont les déplacements des images rétiniennes d'un objet qui se produisent lors du déplacement soit de notre œil, soit de l'objet lui-même. En effet, lors d'un déplacement relatif entre notre œil et un objet, plus celui-ci est éloigné, moins son image rétinienne se déplace. À l'opposé, pour un objet rapproché ce déplacement provoquera une projection se déplaçant très rapidement le long de la rétine, par simple jeu de géométrie projective (Figure 9). Cette différence de vitesse des images rétiniennes est interprétée par le système visuel pour en déduire des éloignements relatifs entre des objets.

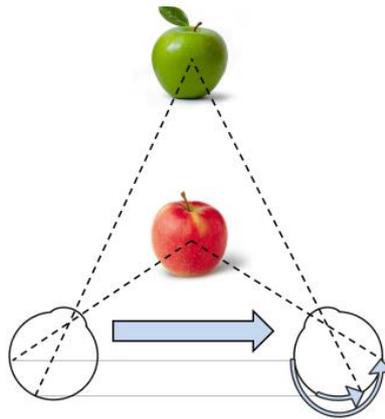


Figure 9 : parallaxe de mouvements

3) Indices proprioceptifs

Les indices proprioceptifs sont des indices liés aux informations que le système visuel envoie aux muscles qui gèrent les mouvements de l'œil. Pour la perception visuelle, les deux principaux sont l'accommodation et la convergence.

L'accommodation est liée à la courbure du cristallin. Celui-ci est une lentille souple maintenue par des muscles qui peuvent la déformer pour déplacer son point focal (Figure 10). Cette transformation permet de changer le point de focalisation de notre regard en fonction de la distance de l'objet regardé. Lorsqu'un autre objet est regardé, il se peut que l'image rétinienne du nouvel objet soit floue avant le réajustement de la courbure du cristallin. Le système visuel va donc envoyer les informations nécessaires aux muscles maintenant le cristallin jusqu'à ce que l'image soit nette.

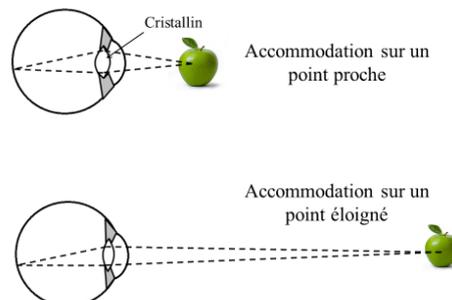


Figure 10 : l'accommodation

La vergence est liée à l'orientation des axes optiques. Les deux yeux pivotent dans leurs orbites sous l'effet des muscles qui les soutiennent. Lorsqu'il existe une différence de positionnement sur la

rétine des images rétiennes gauche et droite de l'objet regardé, les yeux pivotent jusqu'à la disparition de cette différence. Lorsque les axes se rapprochent, on parle de convergence, lorsqu'ils s'éloignent, on parle de divergence (Figure 11).

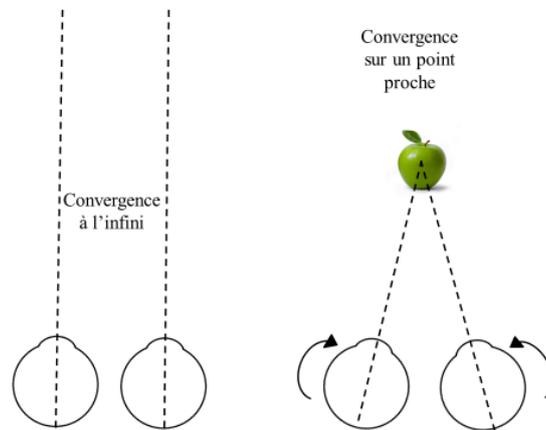


Figure 11 : la vergence

4) Indices stéréoscopiques

Les indices stéréoscopiques sont au centre de nos préoccupations. Ces indices sont liés au fait que nos yeux sont séparés horizontalement (en moyenne 6,4 cm pour les hommes et 6,2 pour les femmes (North 1993), bien que l'ANSES indique une distance moyenne de 65mm (ANSES 2014)). Ils sont fournis par une différence de localisation des images rétiniennes gauche et droite pour les objets qui ne sont pas situés à certains endroits précis en fonction de l'objet de focalisation (Figure 12). Les disparités rétiniennes sont la différence d'angle entre celui formé par les deux yeux et le point de fixation et celui formé par un autre objet et les deux yeux. Notons qu'une partie de la population ne se sert pas des indices stéréoscopiques, qu'ils sont d'origines neurologiques et indépendantes des indices monoscopiques (Howard and Rogers 1995) (Julesz 1971).

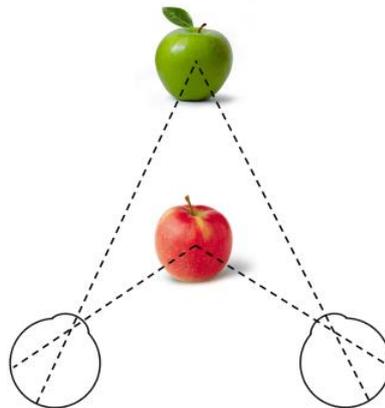


Figure 12 : indices stéréoscopiques : Les positions des images rétiniennes gauches et droites des 2 pommes dépendent de leur distance à l'observateur et de son point de fixation

b) [Reproduction de cette vision en virtuel](#)

5) Stéréoscopie

Pour reproduire les indices stéréoscopiques de façon artificielle, il faut pouvoir projeter deux images qui seront vues séparément par chaque œil. La prise de vue se fait par deux caméras réelles (dans le cas du cinéma) ou virtuelles (dans le cas de la réalité virtuelle) séparées d'une certaine distance. Les

points correspondants des deux images ne seront donc pas placés exactement au même endroit. Les distances entre les images rétiniennes seront interprétées par le cerveau ce qui donnera l'impression du relief.

Lorsque le point de l'image droite se trouve à droite du point correspondant de l'image gauche, on parle de parallaxe positive. La profondeur perçue du point virtuel se trouve alors à la croisée des axes optiques, derrière l'écran (Figure 13).

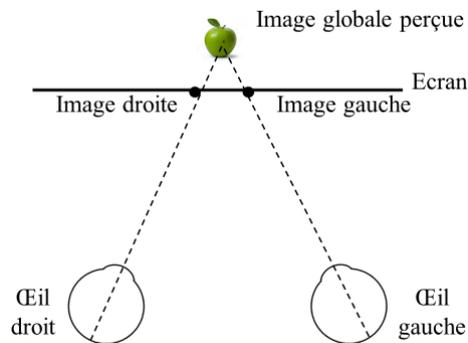


Figure 13 : reproduction artificielle de la vision stéréoscopique d'un objet derrière l'écran

Lorsque le point de l'image droite se trouve à gauche du point correspondant de l'image gauche, on parle de parallaxe négative. La croisée des axes optiques se faisant devant l'écran, la profondeur perçue de l'objet virtuel se fait alors également devant l'écran (Figure 14).

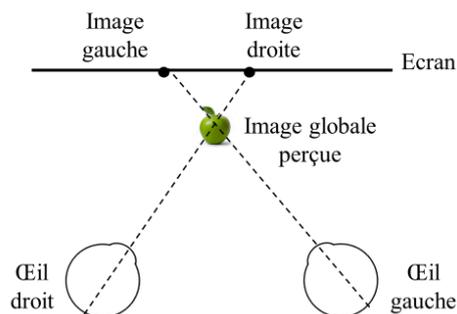


Figure 14 : reproduction artificielle de la vision stéréoscopique d'un objet devant l'écran

6) Parallaxe de mouvement

La reproduction des parallaxes de mouvement nécessite un suivi de tête précis et rapide. Le principe, proposé par Ware (Ware, Arthur, and Booth. 1993), repose sur le maintien de la perception de l'objet dans une position statique. Cela demande de modifier chaque point de l'image à l'écran en fonction de la position de la tête du sujet. Par exemple, pour un objet qui doit être perçu devant l'écran, si la tête du sujet se déplace vers la droite, les points sur l'écran correspondant à l'objet se déplaceront sur la gauche pour maintenir la perception de la position de l'objet au même endroit (Figure 15). Si l'objet perçu doit se trouver derrière l'écran, les points de projection de l'objet suivront, au contraire, le mouvement de la tête du sujet.

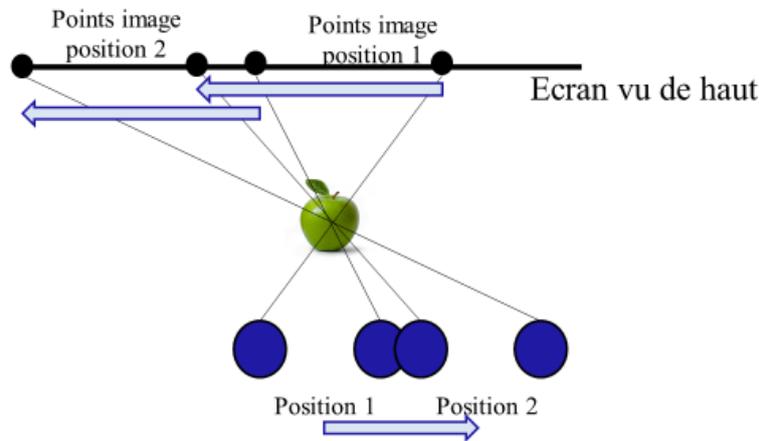


Figure 15 : reproduction artificielle des parallaxes de mouvements

3.2.1.2. Fatigue visuelle liée à la stéréoscopie

La fatigue visuelle liée à la stéréoscopie est décrite dans beaucoup de publications. Elle trouve son origine dans le fait que, malgré le fait que nous essayons de nous rapprocher de la vision et de la perception du relief naturel, notre reproduction artificielle comporte quelques différences avec la vision naturelle, et ces différences sont parfois mal supportées par notre système visuel. Les différentes causes de la fatigue visuelle en stéréoscopie sont explicitées ci-après.

Il existe une légère différence entre le confort visuel qui est subjectif et la fatigue visuelle qui est mesurée directement par une réduction des capacités oculomotrices (Lambooj et al. 2009). Généralement, ces deux paramètres évoluent ensemble, bien qu'il existe certaines études indiquant des différences significatives lors de l'application de pause dans l'immersion, cette différence est peut-être liée à la sortie d'immersion (Guo et al. 2018).

a) Le conflit accommodation vergence

Le conflit accommodation/vergence est souvent cité comme étant la principale cause de fatigue visuelle en stéréoscopie. En vision naturelle, l'accommodation et la vergence donnent les mêmes informations : le point de focalisation est également le point d'intersection des axes optiques (Figure 16).

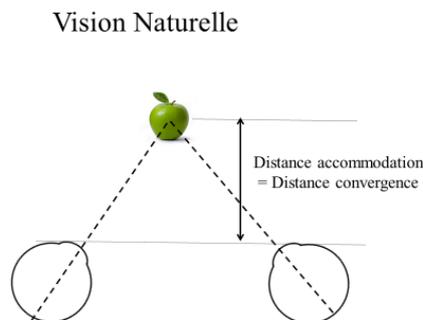


Figure 16 : accommodation et vergence en vision naturelle

Par contre, en vision artificielle, l'accommodation se fait sur l'écran, c'est le seul endroit permettant d'obtenir une image nette sur la rétine. Cependant, la vergence, elle, se fait toujours à l'intersection des axes optiques. Nous avons vu au paragraphe sur la reproduction artificielle de la stéréoscopie en page 24, que les axes optiques se croisent sur l'objet virtuel se trouvant devant ou derrière l'écran. La distance d'accommodation et celle de vergence ne sont plus identiques (Figure 17). Le système visuel doit traiter deux indices de relief qui ne donnent plus la même information.

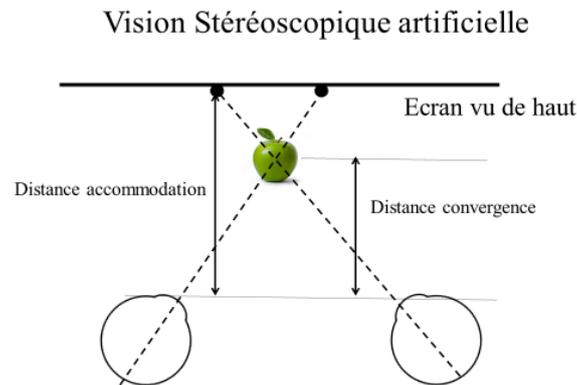


Figure 17 : accommodation et vergence en stéréoscopie artificielle

Or ces deux indices fonctionnant ensemble dans la vie de tous les jours, un lien se crée entre eux pendant l'adolescence (Schor 1986) (Neveu et al. 2010). Le système visuel utilise les informations de vergence pour accélérer l'adaptation de l'accommodation et des informations de l'accommodation pour accélérer celle de la vergence. Il y a une certaine tolérance de différence entre ces deux informations. En effet, si cette différence est comprise dans une zone de confort appelée zone de Percival ou de Shearp (Shibata 2011) autour de la droite de vision naturelle (droite de Donders), la différence est acceptable. Mais lorsque celle-ci est trop importante, elle crée un rejet du stimulus (Neveu 2008) (Hoffman et al. 2008) (Figure 18).

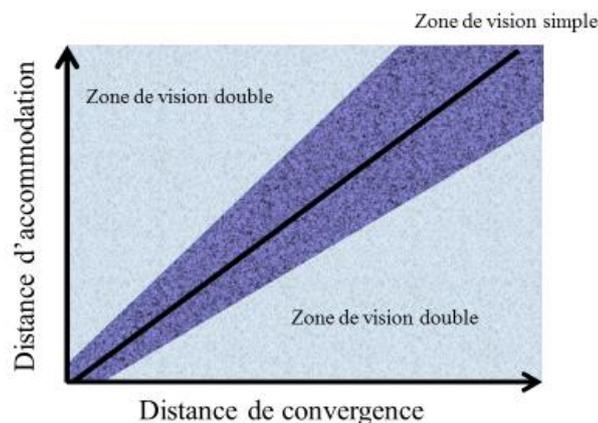


Figure 18 : lien acceptable entre l'accommodation et la vergence

Lors d'une vision stéréoscopique artificielle, l'accommodation étant fixée au niveau de l'écran, la distance de vergence devra être comprise dans une zone de confort autour de celui-ci (Figure 19).

Plus un point en relief s'approche de la frontière de la zone de Percival, plus il est inconfortable et plus le risque qu'il soit vu dédoublé augmente (Yano et al. 2002) (Rushton and Mc Riddell 1999).

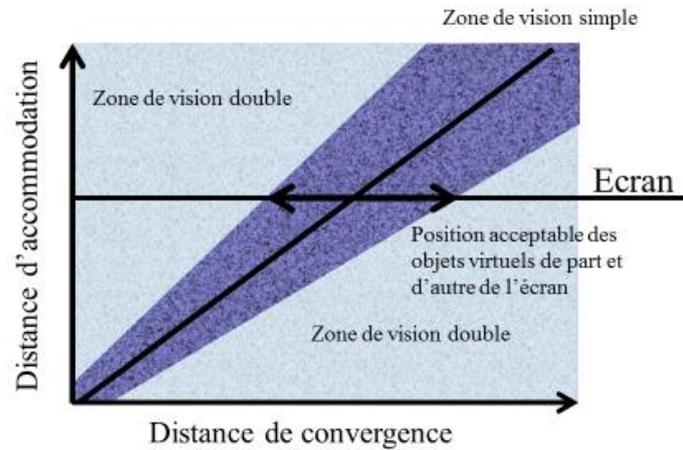


Figure 19 : position acceptable des objets virtuels de part et d'autre de l'écran

b) Un relief trop prononcé

Cette cause de fatigue est bien sûr liée à la précédente, un conflitvergence/accommodation peut être provoqué par un relief trop prononcé. Cependant, même à l'intérieur de la zone de confort, il est important que l'angle formé par les axes optiques lors d'une stéréoscopie artificielle, appelée disparité horizontale (Figure 20), ne soit pas trop important.

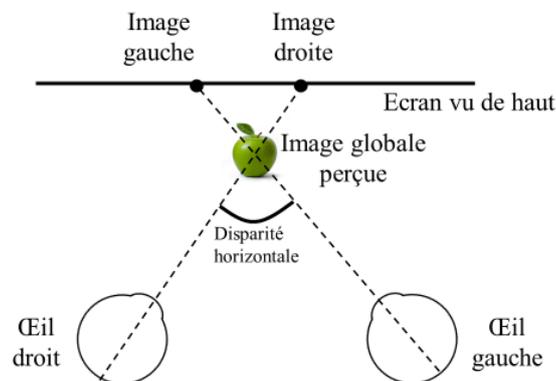


Figure 20 : l'angle de disparité horizontale ne doit pas être trop prononcé

Il est difficile de donner une valeur maximale universelle : certaines personnes fusionneront plus facilement des objets situés devant l'écran, pour d'autres, ce sera l'inverse ; cette donnée n'étant pas symétrique (Richards 1971) (Manan, Jenkins, and Collinge 2002). Cependant, Lamboij estime qu'une disparité de $4,93^\circ$ de disparités croisées et de 1.57° de disparités directes serait une limite. Lorsque la disparité horizontale est trop importante, il envisage trois possibilités : soit la fusion est perdue (on voit double), soit l'accommodation est perdue (on voit flou) soit, une combinaison des deux situations (Lamboij et al. 2009). L'utilisation de cette valeur ne fait pas l'unanimité parmi les chercheurs. Bando prône un maximum de 30 à 40 min d'arc (Bando, Iijima, and Yano 2012) pour limiter la fatigue visuelle, tandis que Wöpking permet 70 min d'arc (Wopking 1995).

Cette valeur dépendrait également d'un facteur temporel. En effet, plus le stimulus est présenté longtemps, plus il serait facilement fusionné. Au contraire, pour un temps très court, Woo affirme que 2 min d'arc serait un maximum. Cette thèse est cependant remise en question par d'autres chercheurs (Mitchell 1966) (Palmer 1999). De même, des disparités augmentant progressivement seraient perçues plus longtemps (Fender and Julesz 1967).

Cette limite de fusion se retrouve également en vision naturelle. En effet, autour de l'objet fixé, il existe une zone de fusion, appelée l'aire de Panum. Elle s'étend de part et d'autre de l'horoptère, ensemble des points de disparité nulle (Figure 21) de façon dissymétrique (Richards 1971) (Manan, Jenkins, and Collinge 2002). Tout objet qui n'est pas dans l'aire de Panum est vu double. L'étendue de l'aire de Panum dépend de plusieurs facteurs : la fatigue générale, la fatigue visuelle, l'objet regardé...

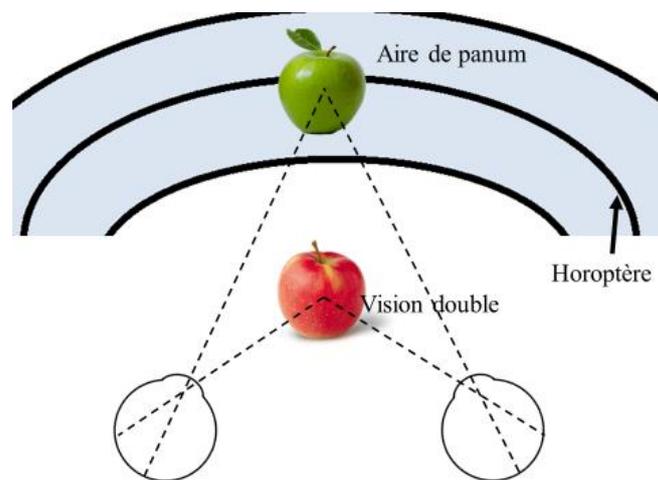


Figure 21 : aire de Panum et horoptère

c) Les hautes fréquences spatiales

Les hautes fréquences spatiales ne sont pas forcément un problème en soi. Cependant, elles ont tendance à amplifier le conflit accommodation-vergence. Les fréquences spatiales se mesurent en cycles de luminance par degré visuel (cpd). Plus un objet présente de fréquences spatiales élevées, plus l'accommodation doit être précise pour percevoir tous les détails.

Les fréquences spatiales ont une influence sur l'étendue de l'aire de Panum. En effet, plus les fréquences sont élevées plus cette aire est étroite, la vision est donc plus facilement dédoublée (Figure 22) (Roumes 1995) (Roumes, Plantier, and Menu 1992).

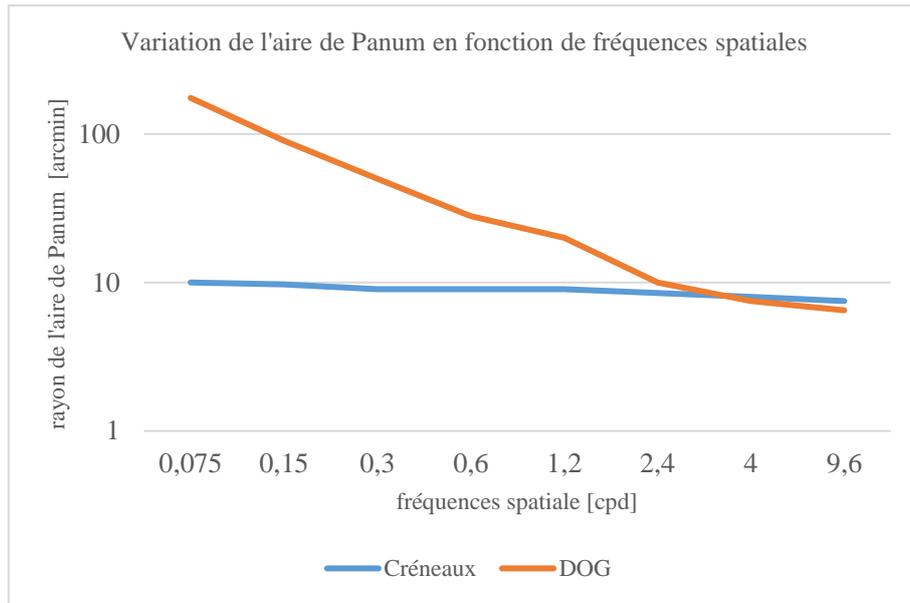


Figure 22 : lien entre l'aire de Panum et les hautes fréquences spatiales, d'après les données de Schor (Schor, Roberston, and Wesson 1986)

D'autre part, Wöpking montre également qu'il y a un lien entre les hautes fréquences et le confort visuel en stéréoscopie. Plus précisément, il explique que les hautes fréquences spatiales aux endroits des grandes disparités sont fatigantes visuellement (Wopking 1995). Perrin interpole les données de ce dernier en une fonction donnant une valeur de confort (" $C(d,f)$ ") comprise entre -2 (très inconfortable) et 2 (très confortable) dépendant des fréquences spatiales (" f ") et des disparités horizontales (" d ") (Perrin 1998).

$$C(d, f) = a(d - d_0 - kf^{k'}) \quad [3-1]$$

Les paramètres d'interpolation sont :

$$a = -0.010$$

$$d_0 = 18.9$$

$$k = 221.1$$

$$k' = -0.74$$

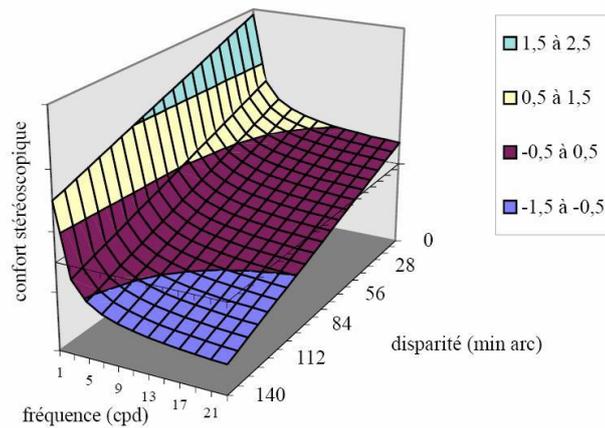


Figure 23 : confort visuel en fonction de la fréquence spatiale et de la disparité (Perrin 1998)

Nous verrons au paragraphe 4.1.1 que nous pouvons jouer sur ce paramètre pour diminuer la fatigue visuelle.

d) Des disparités verticales

Les disparités verticales sont présentes dans la vision naturelle. C'est la différence d'angle vertical entre un objet et l'œil droit plus l'œil gauche par rapport au plan passant par les deux yeux et le point de focalisation (Figure 24).

Si β est la disparité verticale d'un point, β_G et β_D les angles d'élévation de ce point par rapport au plan passant par le point focal et les deux yeux en passant par respectivement l'œil gauche et l'œil droit :

$$\beta = \beta_G - \beta_D$$

(Espinasse-Berrod and Pêchereau 2008)

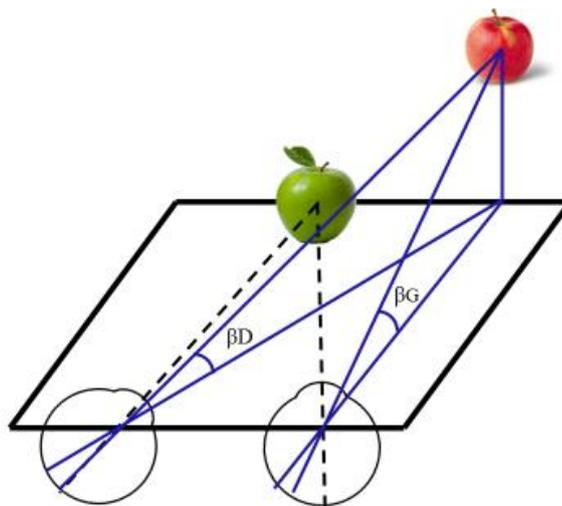


Figure 24 : calcul d'une disparité verticale

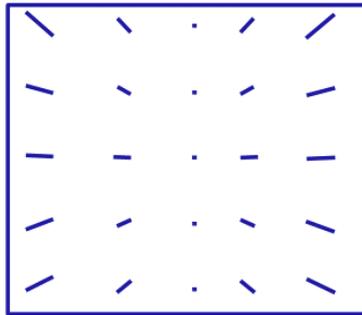


Figure 25 : exagération de disparité d'un plan frontoparallèle

La Figure 25 représente une exagération des disparités présentes lors de la fixation d'un plan frontoparallèle. Nous voyons qu'elles sont significatives surtout en vision périphérique. Si ces disparités aident à la perception des formes lorsqu'elles sont naturelles (Devisme 2008) elles peuvent s'avérer très difficiles à fusionner, lorsqu'elles se trouvent en vision centrale. En effet, si Julesz estime que nous sommes capables de fusionner 20 min d'arc en disparité verticale (Julesz 1971), Nielson, lui, estime que cela n'excède pas 3,5 min d'arc en vision centrale et 6,5 ailleurs (Nielsen and Poggio 1984).

e) Les hautes fréquences temporelles

Les hautes fréquences temporelles (la vitesse de variation des stimulus) influent également sur le confort visuel en stéréoscopie. En effet, lorsque les disparités horizontales changent très rapidement, le système visuel n'a pas le temps de les interpréter et ne les fusionne donc pas. Ces changements rapides seront très fatigants (Norcia and Tyler 1984). De même, le type de ces fréquences temporelles semble important, en effet, Wibirama et al ont montré récemment que la fatigue visuelle serait plus importante lorsque les sujets n'ont pas l'impression que les fréquences temporelles sont liées à leur mouvement (Wibirama et al. 2019).

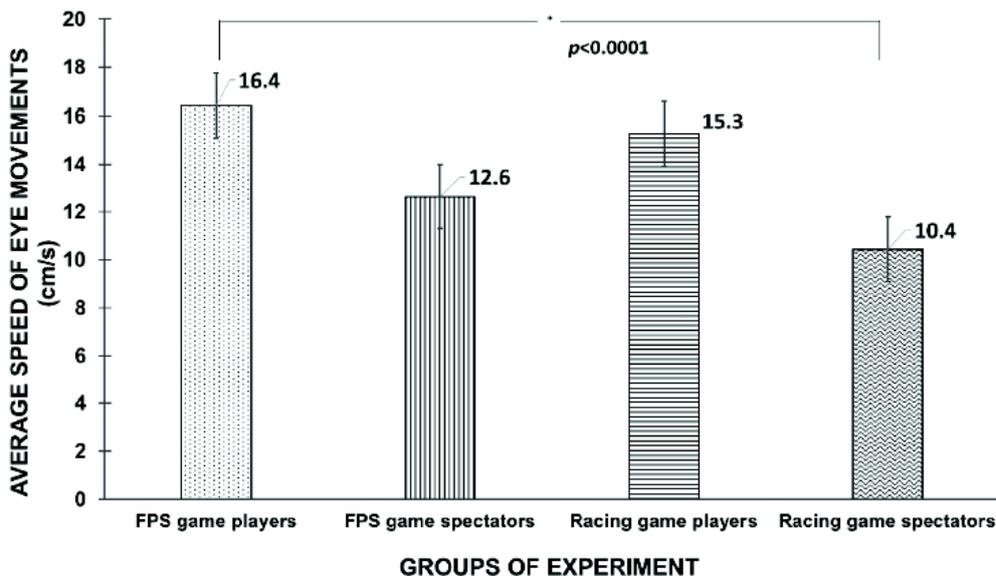


Figure 26: la fatigue visuelle est plus importante lorsque les sujets n'ont pas l'impression que les fréquences temporelles sont liées à leur mouvement (Wibirama et al. 2019).

f) Un conflit avec d'autres indices de relief

Lorsque des indices de relief ne donnent pas la même information, le système visuel a du mal à départager et faire le tri entre ces informations. Nous l'avons vu pour le conflit entre l'accommodation et la vergence, mais ce conflit peut apparaître entre d'autres indices. Par exemple, si les indices monoscopiques indiquent qu'un objet est devant un autre et que les indices stéréoscopiques indiquent l'inverse, le système visuel est mis à rude épreuve.

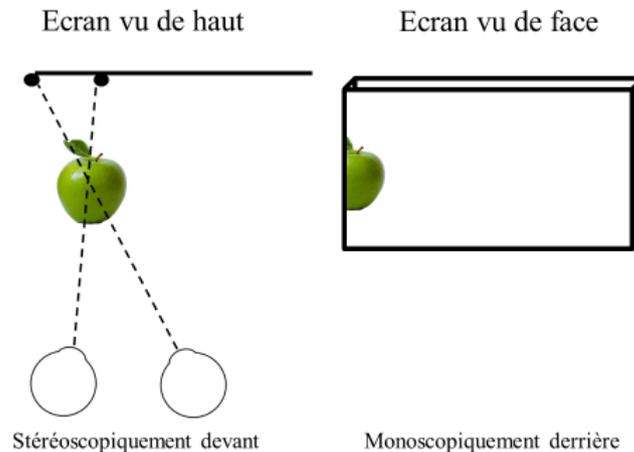


Figure 27 : un objet stéréoscopiquement devant et monoscopiquement derrière l'écran

Cela se produit, par exemple, lorsque les projections d'un objet, virtuellement devant l'écran, sont coupées par le bord de cet écran (Figure 27). L'indice monoscopique d'interposition indique que l'objet se trouve derrière l'écran, alors que les disparités horizontales montrent que l'objet se situe devant. Ce conflit est difficilement gérable par le système visuel, certains chercheurs le nomment une « violation de fenêtre » (Jung et al. 2014).

g) Mouvements pseudoscopiques

Lorsque l'observateur change de position par rapport à l'écran, il produit involontairement un déplacement de l'objet virtuel. On appelle ces déplacements des mouvements pseudoscopiques. Ils s'expliquent grâce à la géométrie projective (Figure 28). Wartell compare plusieurs modifications géométriques de présentation des images stéréoscopiques et leurs effets sur les mouvements pseudoscopiques en étudiant les effets sur la géométrie projective des objets virtuels (Wartell, Hodges, and Ribarsky 2002).

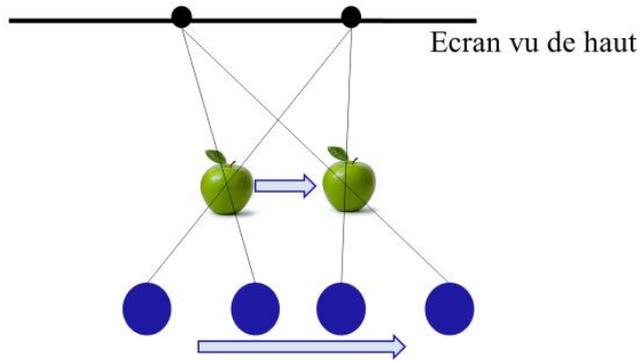


Figure 28 : mouvements pseudoscopiques horizontaux

Tyler propose d'étudier les oscillations d'un stéréogramme de points aléatoires suivant un axe vertical (sur la Figure 29, la courbe en pointillé est en monoscopique, en continu avec cercle plein, en stéréoscopie) et montre que les mouvements pseudoscopiques sont plus facilement détectables lorsque le mouvement est lent (Tyler 1974).

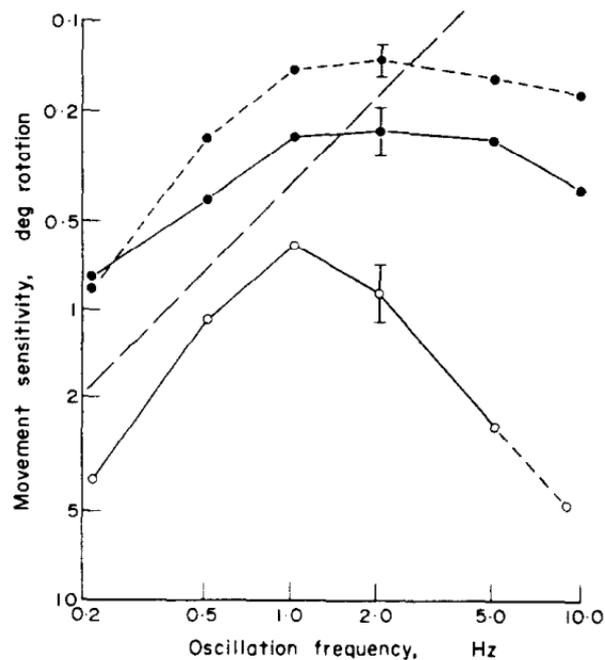


Figure 29 : oscillation d'une image stéréoscopique perceptible en fonction de la fréquence d'oscillation (Tyler 1974)

h) Un problème de réglage du dispositif

Lorsque le dispositif est mal réglé, il peut générer de la fatigue visuelle. Il semblerait cependant que l'influence de l'illumination de la pièce de visualisation ne présente pas une influence significative (Chen et al. 2017).

1) En projection

Si les deux projecteurs ne sont pas bien alignés, des disparités horizontales ou verticales peuvent se rajouter. Une différence de luminosité aura également une incidence sur la fusion binoculaire. En effet, Kooi montre en 2001 qu'une différence involontaire de luminosité entre les deux images gauche et droite provoquait des phénomènes de rivalité binoculaire, obtenus généralement en proposant des images très différentes pour chaque œil (Kooi and Toet 2001). Une telle rivalité peut également apparaître avec des différences de colorimétrie ou de luminosité (Stelmach, Tam, and Meegan 1999) (Stelmach et al. 2000). La rivalité binoculaire est un phénomène se produisant lorsque les deux images droite et gauche sont différentes. Le cerveau et le système visuel ne peuvent fusionner les deux images. Chaque image est perçue alternativement pendant une durée qui dépend notamment de la luminance (Levelt 1965) (Levelt 1966). Il arrive également que seules certaines parties de l'image soient soumises à cette rivalité, il est donc également possible d'avoir une zone de l'image gauche perçue dans l'image droite (Wolfe 1983).

Des défauts de position des images projetées peuvent créer d'autres disparités qui s'ajoutent aux précédentes. Par exemple, si le projecteur droit est

- surélevé par rapport au gauche, il y aura des disparités verticales sur toute l'image,
- décalées horizontalement, toutes les parallaxes horizontales seront modifiées,
- en rotation par rapport à l'autre, des disparités verticales apparaissent sur le pourtour de l'écran

Il arrive également parfois que l'œil gauche et l'œil droit soient inversés, ce qui provoque un conflit avec les autres indices.

2) En casque de réalité virtuelle HMD

- *Distorsion non linéaire*

Les lentilles des casques de réalité virtuelle déforment l'image (Min and Jense 1994) (Figure 30), cette déformation est assez bien connue et généralement corrigée informatiquement (voir 3.2.1.3b) Modification géométrique et optique).

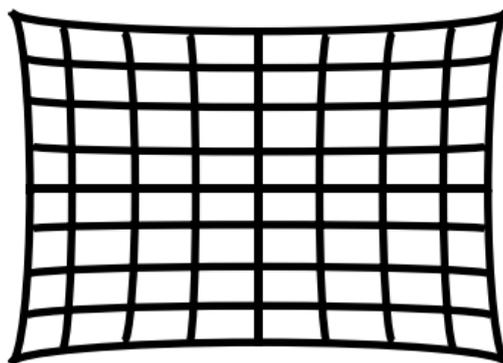


Figure 30 : distorsions géométriques liées dues à la lentille en casque appliquées sur une grille orthogonale (Watson and Hodges 1995)

- *Aberrations chromatiques*

Les aberrations chromatiques sont des déformations de l'image dues au fait que, pour une lentille simple donnée, la distance focale dépend de la longueur d'onde (Figure 31), ce qui provoque une irisation des bords des images, et une déformation des bords des objets (Figure 32).

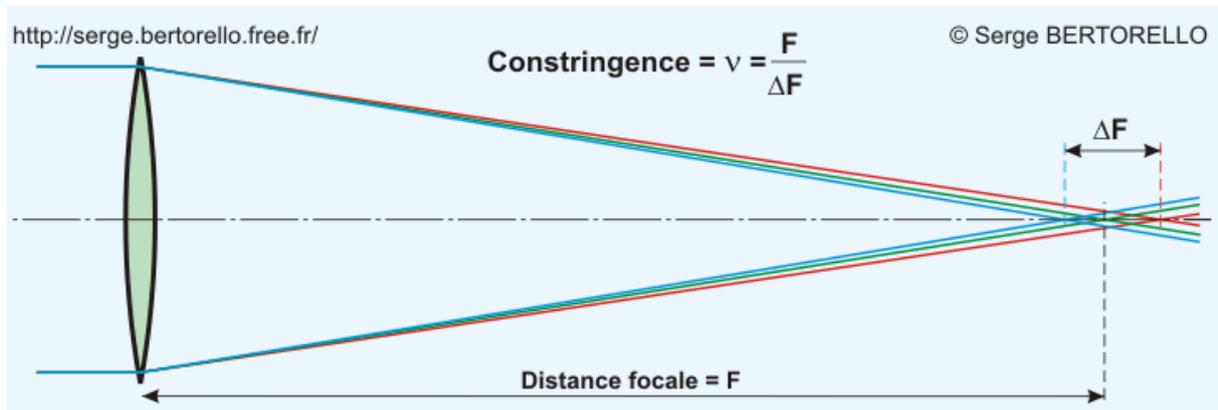


Figure 31: aberration chromatique d'une lentille, séparation des foyers (Bertorello 2017)



Figure 32: Aberration chromatique liée à une lentille, exemple : à gauche, l'image souhaitée, à droite l'image à travers la lentille (Dupontbloch n.d.)

Ces aberrations chromatiques sont spécialement visibles sur la périphérie de la lentille et donc en vision périphérique dans un HMD. Plusieurs chercheurs estiment que cette aberration doit être corrigée (Min and Jense 1994).

- *Problème d'angle entre les axes optiques*

Il arrive que les lentilles ne soient pas tout à fait parallèles, provoquant ainsi des distorsions entre les images (Min and Jense 1994).

3.2.1.3. État de l'art des réductions des contraintes oculomotrices

a) Adaptation de contenu

Il existe plusieurs ouvrages prônant une prise en compte des données psychophysiques connues dans les contenus cinématographiques et de réalité virtuelle. Dans le cinéma, le plus connu est probablement le « livre blanc du relief » rédigé conjointement par la Ficom (fédération des industries du cinéma, de l'audiovisuel et du cinéma), la CST (Commission Supérieure Technique de l'image et du son), UP3D (Union des Professionnels de la 3Ds), HD-Forum et l'AFC (Association Française des directeurs de la photographie Cinématographique) (Bourhis, Amato, and Gérard 2003) traitant des erreurs de tournage à éviter pour optimiser le confort stéréoscopique au cinéma comme les décalages verticaux des rigs occasionnant des disparités verticales, les différences de facteur de « flare » (aberration optique à l'intérieur de la caméra) entre les deux images, le positionnement du sous-titre (pour éviter les conflits entre indices monoscopiques et stéréoscopiques)...

En plus de ces considérations techniques de prises de vue, ils conseillent certains types de relief en fonction du type et de la taille de l'écran (Figure 33). Par exemple, ils déconseillent absolument la divergence entre les deux yeux et donnent des valeurs de jaillissement maximales.

DEMONSTRATION GRAPHIQUE DE LA PROFONDEUR ET DES JAILLISSEMENTS SUR ÉCRAN.
 Les décalages sur l'écran doivent s'évaluer en fraction ou multiple de l'écartement oculaire.

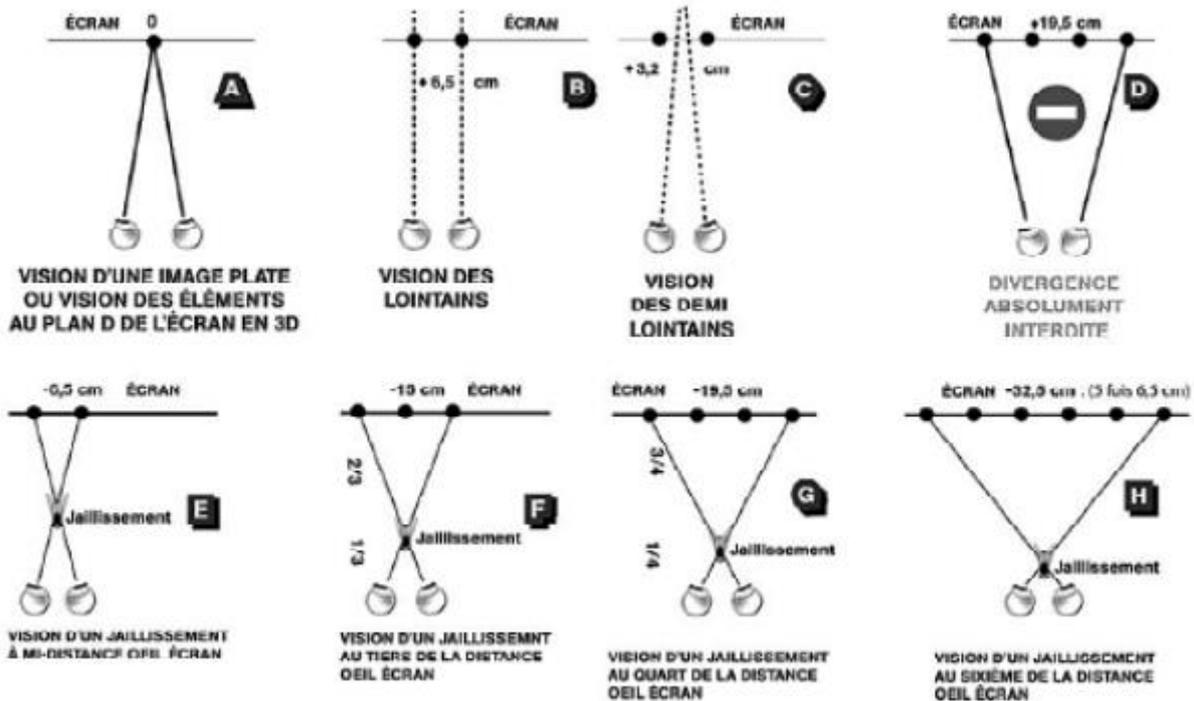


Figure 33 : adaptation du relief en fonction de la taille de l'écran selon le livre blanc du relief (Bourhis, Amato, and Gérard 2003)

L' « agence nationale de sécurité sanitaire alimentation, environnement, travail » livre, quant à elle, un rapport d'expertise collective sur les « effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en 3D stéréoscopique ». Ce rapport rescence les dangers recensés de la stéréoscopie et indique des données chiffrées à ne pas dépasser pour une utilisation de la stéréoscopie dans des applications multimédias. Ils déconseillent également l'utilisation d'images stéréoscopique pour des enfants de moins de 6 ans et avec modération pour des jeunes de moins de 13 ans (ANSES 2014).

Les méthodes d'adaptation des contenus sont, à mon avis, les premières des techniques à appliquer pour avoir une stéréoscopie confortable et moins dommageable pour les yeux. Il arrive cependant que cela ne soit pas suffisant ou impossible. Il convient, dans ce cas, d'appliquer des techniques qui vont modifier la présentation du stimulus. Ces méthodes sont présentées dans le paragraphe suivant.

b) Traitement d'image
 • Différents flous

L'idée principale du flou est de relâcher l'accommodation à certains endroits,

- soit pour que l'accommodation suive la vergence et réduise le conflit accommodation vergence,
- soit pour tenter de reproduire une partie du flou présent dans la vision naturelle.

Flou en périphérie

Hillaire propose un flou en vision périphérique (Hillaire, Lecuyer, and Cozot 2008) (Hillaire et al. 2008) (Hillaire et al. 2007). Il se concentre surtout sur le ressenti de l'utilisateur, mais cette technique a également la particularité de relâcher l'accommodation et de diminuer le conflit accommodation-

vergence. La Figure 34 montre ainsi un exemple d'utilisation en plein jeu, ainsi que les scores de ressenti pour le réalisme, le « fun », la perception de la profondeur et le sentiment d'immersion pour la situation de contrôle, le depth of field centré ainsi que le Depth of field contrôlé par Eye-Tracker.

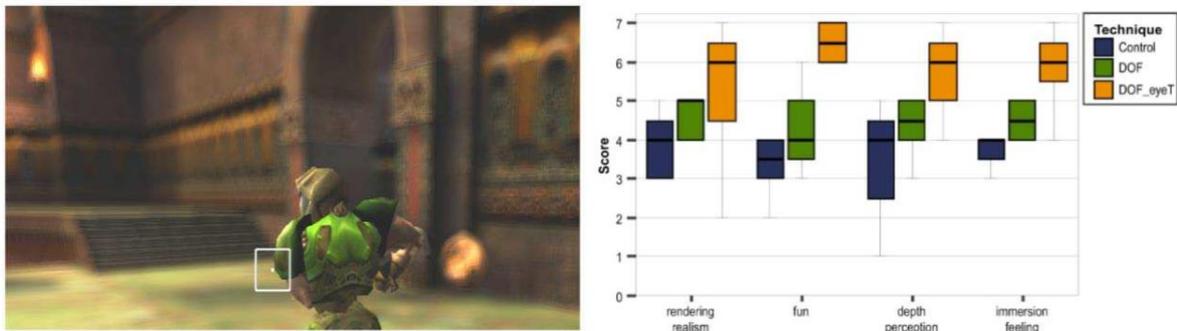


Figure 34 : flou en vision périphérique (Hillaire et al. 2008)

Talmi propose déjà en 1999 d'associer un suivi de regard par caméra à un flou en vision périphérique (Talmi and Liu 1999), mais ne présente pas de retours utilisateurs. Plus récemment, Vinnikov tente à nouveau l'expérience (Vinnikov and Allison 2014) pour étudier la perception des profondeurs et le confort visuel (Figure 35) et montre que les sujets préféraient les images nettes. Ses résultats sur la perception sont totalement opposés ceux issus de l'expérience de Mauderer, la même année (Figure 36) (Mauderer et al. 2014), mais en accord sur la fatigue et l'appréciation avec ceux de Duchowski (Figure 37) (Duchowski et al. 2014)

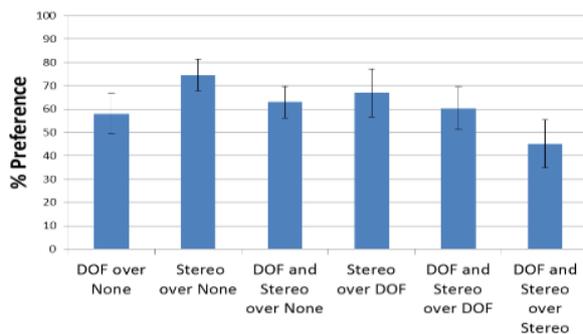


Figure 6 Depth perception

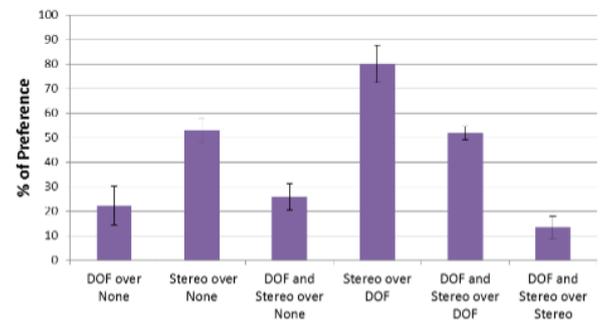


Figure 8 Viewing comfort

Figure 35 : perception de la profondeur et du confort avec ou sans DOF (Vinnikov and Allison 2014)

#	Statement text	Z	p	r
S1	Depth is more defined and clearer in [L/R] condition	-3.39	.007*	-.65
S2	Objects appear more 3-dimensional in [L/R] condition	-3.17	.012*	-.61
S3	It feels more like looking at real objects than a picture of objects in [L/R] condition	-2.94	.013*	-.57
S4	Objects appear to stick out/come out of the screen in [L/R] condition	-3.24	.011*	-.63
S5	There is a more definitive sense of separation in [L/R] condition	-3.73	.002*	-.72
S6	In [L/R] condition it feels though you could reach out and touch things	-3.02	.015*	-.58
S7	There is a greater amount of separation between objects in [L/R] condition	-3.16	.011*	-.61
S8	Objects appear distorted in [L/R] condition	-2.98	.014*	-.57
S9	Objects appear larger in [L/R] condition	-1.43	.308	-.27
S10	Objects appear more transparent and translucent in [L/R] condition compared to [R/L] condition	-0.68	.495	-.13
S11	The shape of objects is different between [L/R] and [R/L] condition	-1.52	.384	-.29

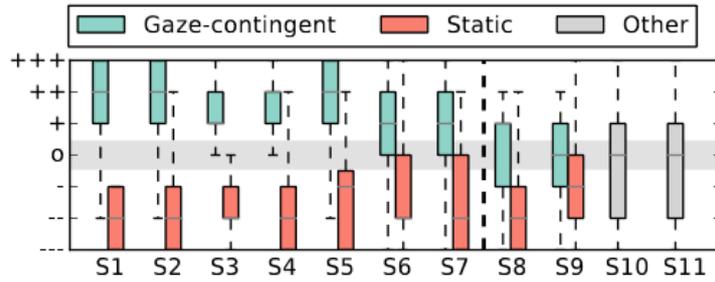


Figure 36 : Perception du relief avec un flou de profondeur de champ (Mauderer et al. 2014)

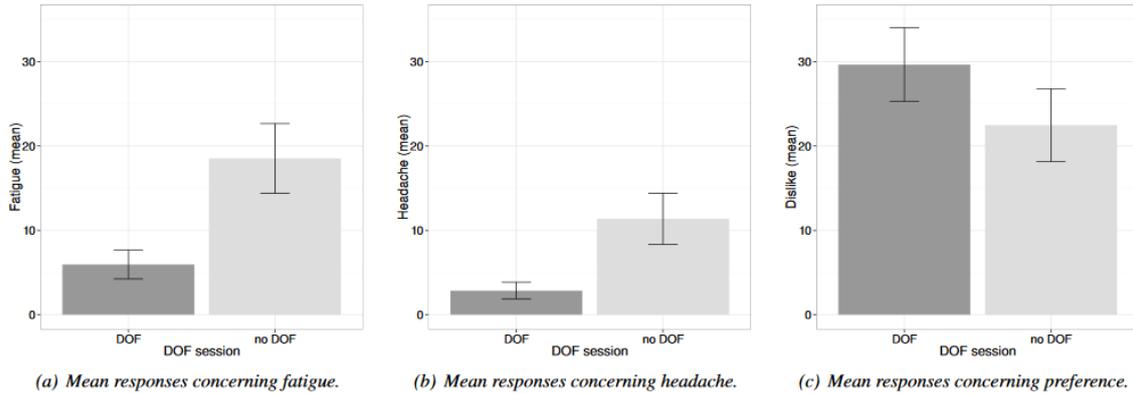


Figure 37 : perception de la fatigue visuelle avec un flou de profondeur de champ selon Duchowski (Duchowski et al. 2014)

Flou de « out of focus »

Blohm propose dès 1997 d'appliquer un flou de profondeur de champs sur des vidéos stéréoscopiques (Blohm et al. 1997). Il vérifie si les sujets préfèrent une zone nette vers l'avant ou vers l'arrière de la scène pour déterminer ce qu'il appelle le DOI (Depth Of Interest), il étudie la « puissance du flou » et montre que plus le flou est fort, plus le confort est élevé (Figure 38).

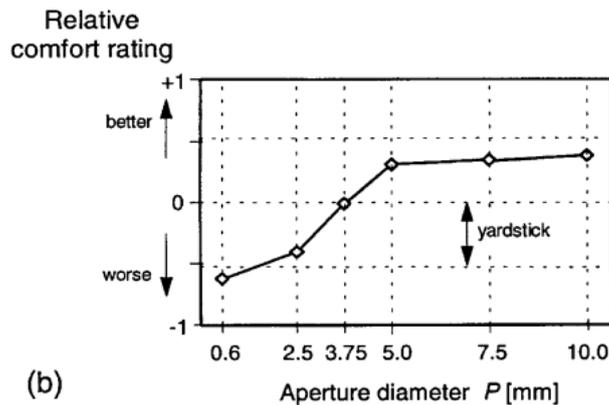


Figure 38: confort subjectif en fonction de la profondeur du flou pour une zone de netteté située en arrière de la scène (Blohm et al. 1997)

Blum, quant à lui propose également un flou basé sur la profondeur de champ (Blum et al. 2010). Il demande à 18 sujets de noter la qualité des images vues traitées avec un flou « out of focus » qui mime le flou obtenu avec une lentille et non traitées. Ces images réelles ou virtuelles sont présentées en HMD ou sur un écran (Figure 39).

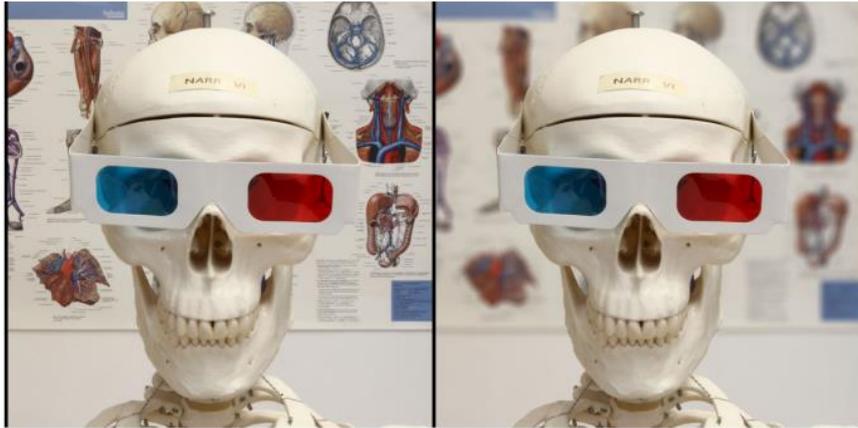


Figure 39 : flou par « out of focus » proposé par Blum (Blum et al. 2010)

Il montre que la qualité perçue des images avec du flou était systématiquement supérieure à celles sans flou (Figure 40).

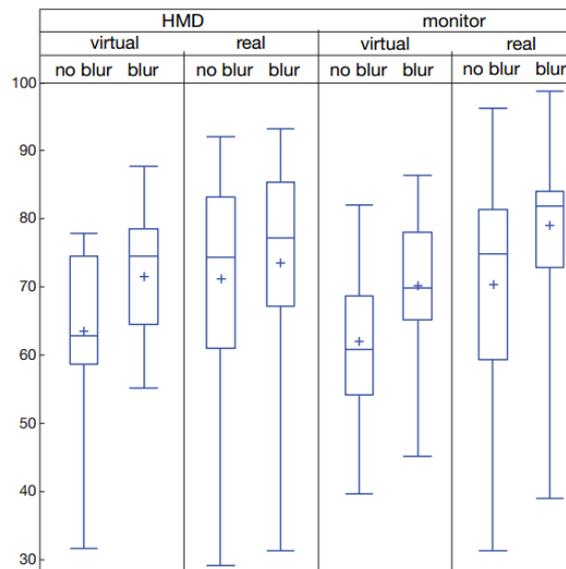


Figure 40 : qualité perçue des images avec et sans flou (Blum et al. 2010)

Le même type de flou est proposé par Rokita (Rokita 1996), mais sans étude de son effet sur la fatigue visuelle. Brooker et Sharkey montrent que ce type de flou pouvait permettre une efficacité accrue dans un jeu de labyrinthe, et notamment un temps d'exécution diminué de 20% (Brooker and Sharkey 2001). Masia combine un flou DOF avec une modification des disparités horizontales en fonction de la taille des écrans (Masia et al. 2013). Carnegie étudie ce type de flou dans un casque de réalité virtuelle surtout en vue de réduire le cybermalaise, mais montre au passage que les sujets déclarent moins de contraintes oculomotrices (Carnegie and Rhee 2015).

Cette technique a été reprise pour la réalité augmentée par Cook, il montre que ses sujets préfèrent l'affichage d'un texte flou en réalité augmentée lorsqu'ils regardent le monde réel (Figure 41) (Cook et al. 2018).



Figure 41: les sujets de Cook préfèrent le texte flou en réalité augmentée (Cook et al. 2018)

Flou de "motion blur"

Certains chercheurs travaillent sur l'ajout de "flou de vitesse" (motion blur) en réalité augmentée pour que les images virtuelles soient plus réalistes et s'intègrent mieux dans des images réelles issues de caméras (Klein and Murray 2008) (Fischer, Bartz, and Strasser 2006) (Okumura, Kanbara, and Yokoya 2006). Nous n'avons cependant pas trouvé d'étude permettant d'affirmer ou infirmer une influence sur la fatigue visuelle.

Flou en fonction des disparités

Au paragraphe 3.2.13.2.1.2c), nous étudions les travaux de Perrin qui avait repris les données de Wöpkings pour avoir une fonction de confort. Dans sa fonction C représente le confort en -2 (inconfortable) à 2 (confortable), d les disparités, f , les fréquences spatiales, pour chaque point de l'image.

$$C(d, f) = a(d - d_0 - kf^{k'}) \quad [3-2]$$

Avec les paramètres d'interpolation a , d_0 , k et k' :

$$\begin{aligned} a &= -0.010 \\ d_0 &= 18.9 \\ k &= 221.1 \\ k' &= -0.74 \end{aligned} \quad [3-3]$$

Il utilise également cette fonction pour réduire les fréquences spatiales aux endroits de grandes disparités. Il propose notamment une application pendant laquelle les sujets doivent passer un anneau autour d'un « tuyau » sans le toucher avec (Figure 43) ou sans (Figure 42) traitement. Le traitement étant assez long, il ne peut pas se faire en temps réel et ne permet donc pas de parallaxe de mouvement artificielle, en tout cas à l'époque.

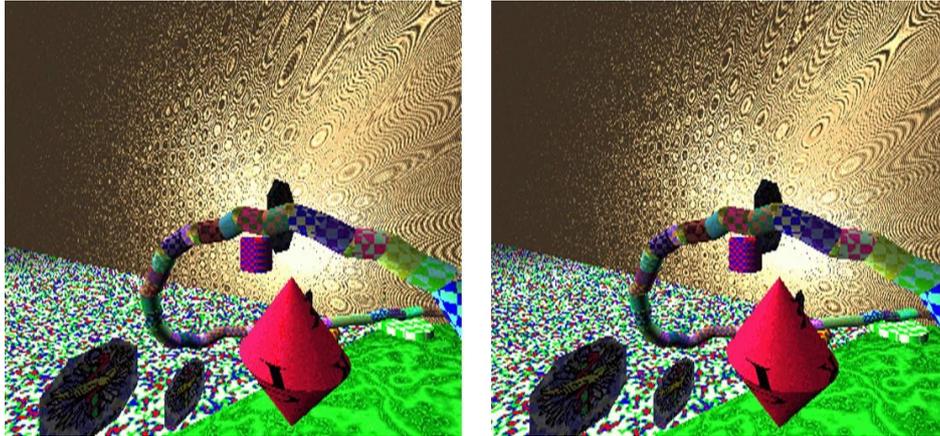


Figure 42 : images stéréoscopiques de base de Perrin (Perrin 1998)

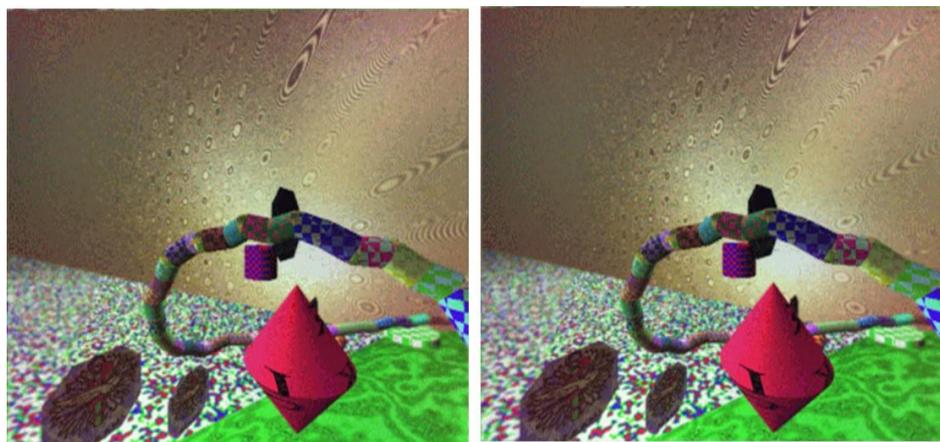


Figure 43 : images stéréoscopiques traitées de Perrin (Perrin 1998)

Si les sujets semblent apprécier ce traitement (Figure 44), Perrin ne note pas de modification d'efficacité dans la tâche (Perrin et al. 1998).

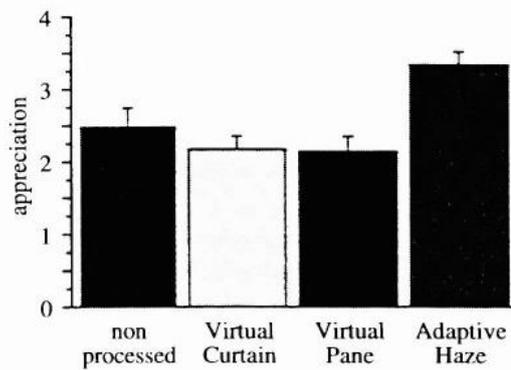


Figure 44 : appréciation du traitement de flou de Perrin par les sujets, le traitement présenté est l'"Adaptive Haze" (Perrin et al. 1998)

Conclusion pour l'utilisation du flou comme technique de réduction des contraintes oculomotrices

L'utilisation du flou pour relâcher l'accommodation est encore assez peu étudiée, et certaines études sont assez anciennes ce qui implique que leur traitement ne pouvait pas se faire en temps réel. Cependant, les études relatant les retours subjectifs des sujets sur le confort visuel sont prometteuses. Il semblerait que les flous en profondeur (DOF ou en fonction des disparités) soient

préférés par les sujets. Cependant, il serait intéressant de vérifier si ces tendances se retrouvent dans des mesures de fatigue visuelle et du système oculomoteur lorsque ce type de traitement est appliqué en temps réel.

- *Modification géométrique et optique*

Correction de distorsion optique

Très tôt, Watson propose de corriger les distorsions géométriques liées à la lentille dans les casques de réalité virtuelle en appliquant un masque informatique inverse de cette déformation (Figure 45) (Watson and Hodges 1995). Cette déformation est encore très employée dans les applications de casque immersif comme on peut le voir sur la Figure 46.

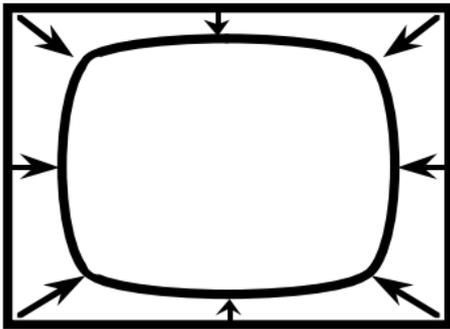


Figure 3: Predistortion contracts the image in proportion to distance from the optical axis.

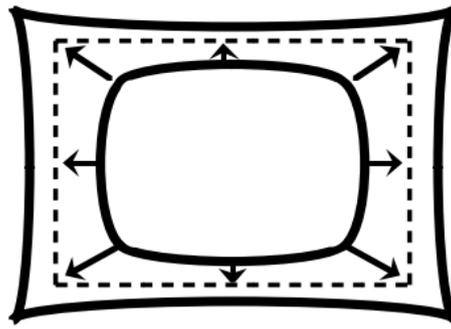


Figure 4: The predistorted image is expanded by the distorting lenses, and fills the undistorted original image's extent.

Figure 45 : distorsion géométrique corrective de Watson (Watson and Hodges 1995)

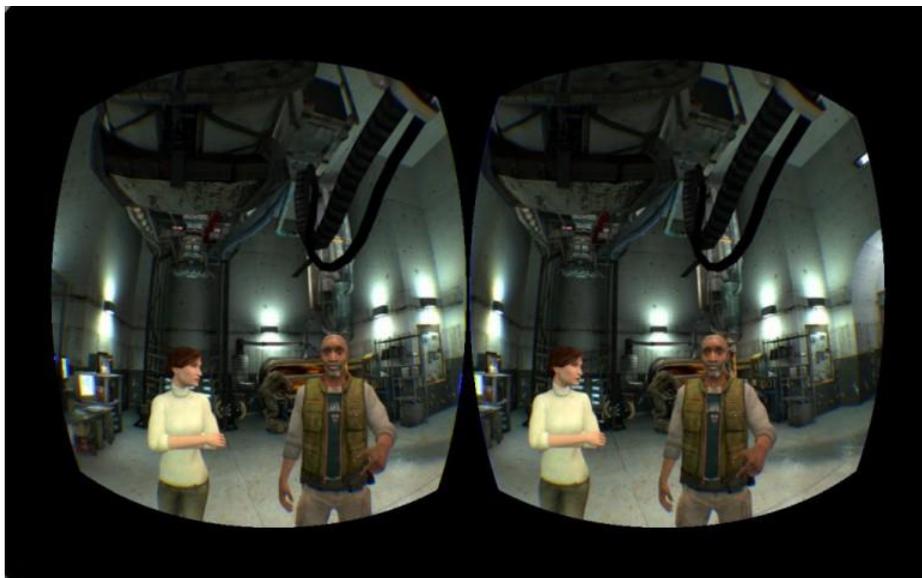


Figure 46 : application pour Oculus rift, on peut y voir l'utilisation de la déformation de Watson (Application VR 2016)

Modification de FOV

Certains auteurs tentent de modifier les frustums des HMD pour avoir des pyramides asymétriques (Williams and Parrish 1990)

- *Modification des disparités horizontales*

Déplacement des caméras en fonction de la profondeur des objets

Certains chercheurs choisissent, pour réduire le conflit accommodation-vergence de s'intéresser plus à la vergence qu'à l'accommodation et, pour ce faire, modifient les disparités horizontales.

Hodges préconise d'utiliser une distance entre les caméras virtuelles plus faible que celle entre les yeux du sujet (Hodges 1992)

Ware propose très tôt de modifier la séparation entre les caméras virtuelles (e) et donc les disparités en fonction de la profondeur de la scène virtuelle (z) (Ware, Gobrecht, and Paton 1995)

$$e(z) = -\frac{8}{70} \tan^{-1}\left(\frac{z}{25}\right) + 14$$

Dont la courbe est visible sur la Figure 47.

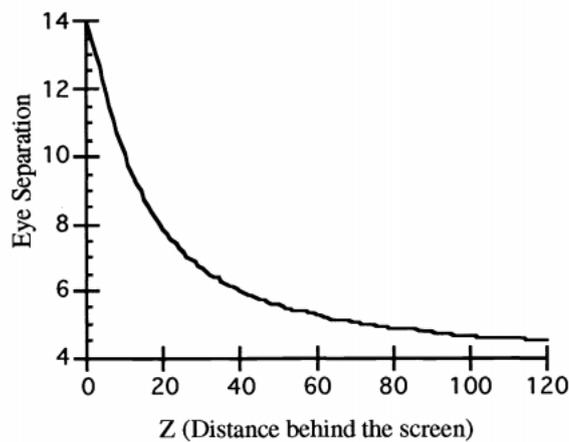


Figure 47 : lien entre la séparation des deux caméras virtuelles et la profondeur affichée (Ware, Gobrecht, and Paton 1995)

Il calcule ensuite la perturbation de la perception de la profondeur d'un objet en fonction de sa profondeur virtuelle pour une distance de l'utilisateur par rapport à l'écran de 50 cm et une distance entre ses yeux de 5 cm (Figure 48).

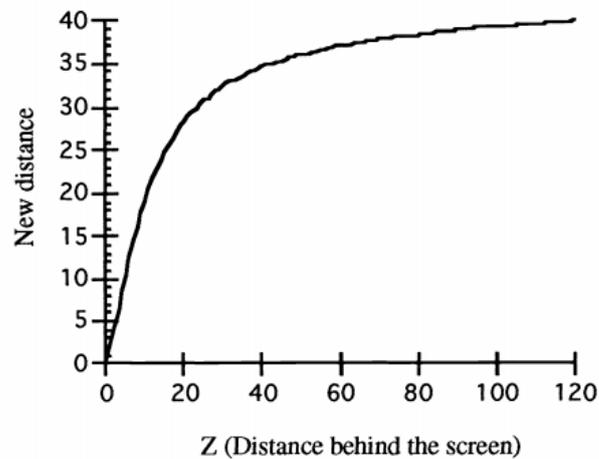


Figure 48 : distance perçue après traitement de Ware en fonction de la distance de l'objet (Ware, Gobrecht, and Paton 1995)

Ware intègre également une réduction de disparité avec une prise en compte de parallaxe de mouvements artificiels (Ware, and Fleet 1997)

Sun et Holliman proposent également de moduler l'écartement des caméras réelles pour le cinéma en fonction de la profondeur des objets dans la scène (Figure 49) couplée à du flou DOF et montrent que la modification de la distance des caméras serait mieux reçue par ses sujets selon une échelle subjective. (Figure 50) (Sun and Holliman 2009)

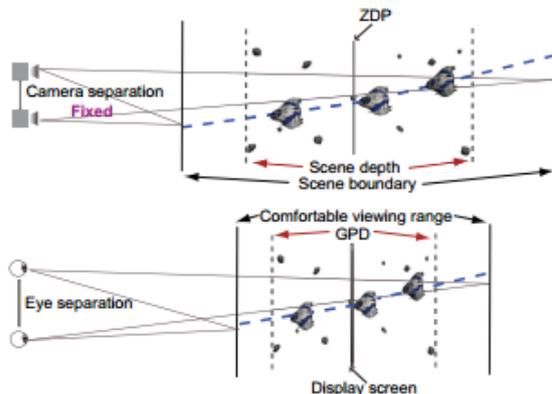


Figure 3. Fixed Mapping Method

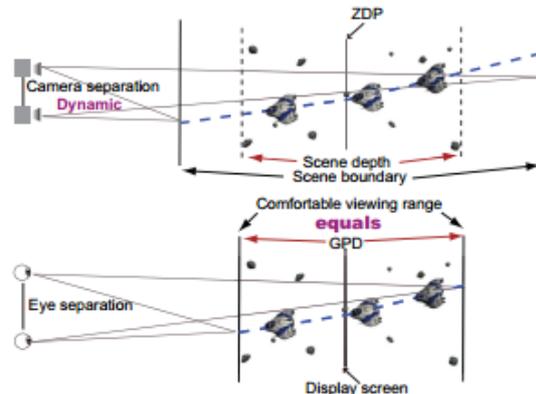


Figure 4. Dynamic Mapping Method

Figure 49 : modification de l'écartement des caméras de cinéma en fonction des objets présents dans la scène (Sun and Holliman 2009)

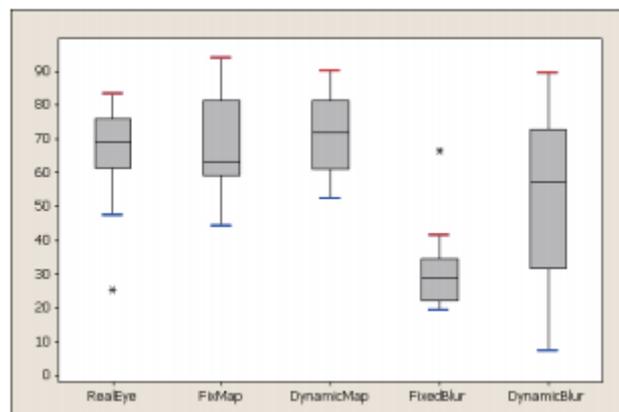


Figure 50 : réception de la modification de la distance des caméras et du flou DOF, l'axe des ordonnées est une échelle de 0 (exécutable) à 100 (excellent) du ressenti des sujets scène (Sun and Holliman 2009)

Déplacement des caméras en fonction du temps

Dans une autre étude que celle du paragraphe précédent, Ware vérifie la fréquence temporelle limite de modification de la disparité pour qu'un sujet s'aperçoive de ces modifications. Il fait varier de façon sinusoïdale la distance entre les caméras virtuelles de plus en plus rapidement jusqu'à ce que les sujets indiquent percevoir une modification (Ware 1995). Il détermine la fréquence d'oscillation perceptible en fonction de l'amplitude de celle-ci (Figure 51).

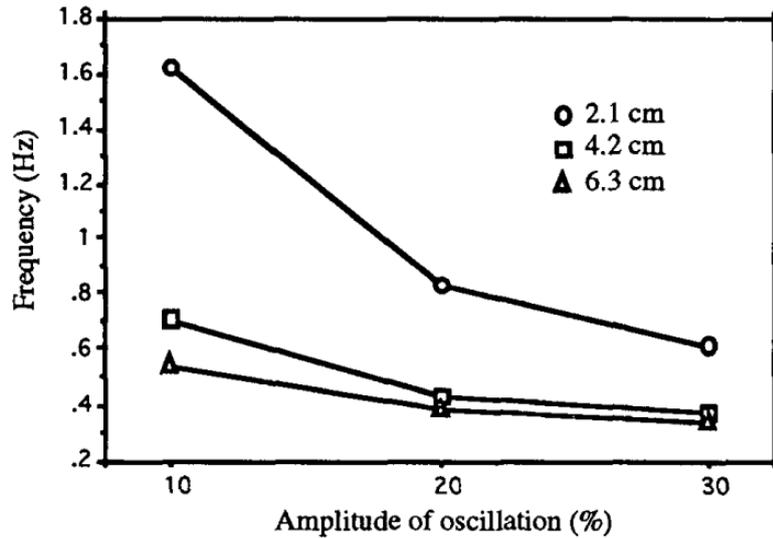


Figure 51 : fréquence d'oscillation perceptible en fonction de l'amplitude des modifications de disparité (Ware 1995)

Si Ware montre qu'une oscillation rapide est détectable, Emoto étudie les oscillations pour sensiblement les mêmes fréquences, mais avec une amplitude d'oscillation beaucoup plus importante pouvant aller du point de fusion au point de rupture (Emoto, Niida, and Okano 2005).

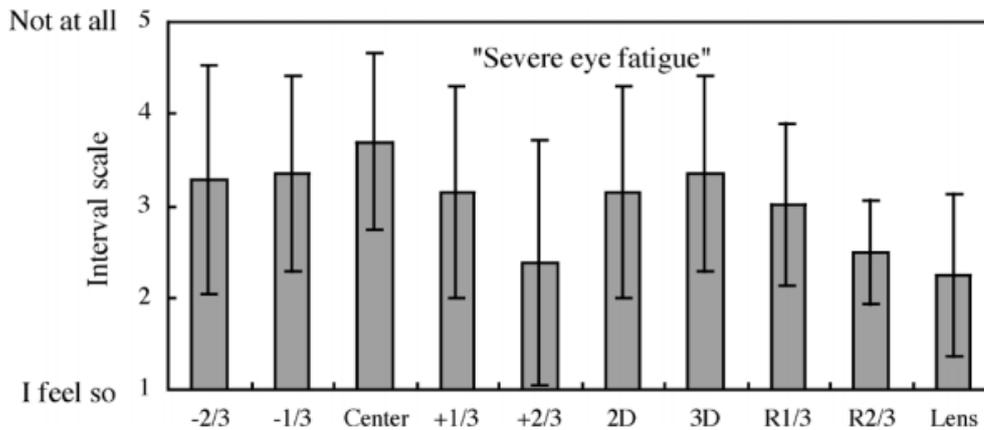


Figure 52 : fatigue visuelle provoquée par des variations cycliques de la disparité (Emoto, Niida, and Okano 2005)

Modification de parties d'images

En fonction des disparités

Kim propose d'étudier la répartition des disparités sur des images stéréoscopiques déjà générées (Figure 53), mais ne propose pas d'évaluation de son système par des sujets (Kim et al. 2008).

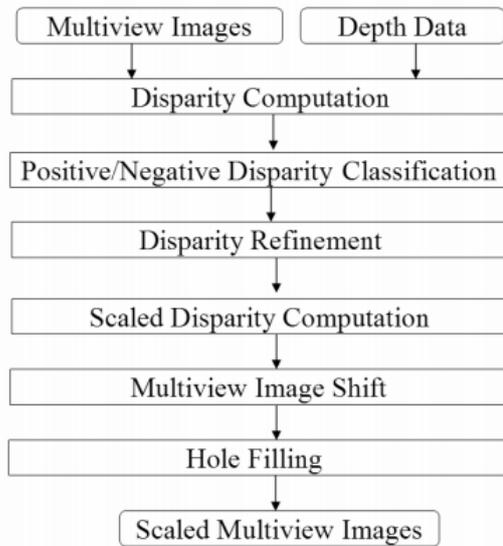


Figure 53 : recalage de parties d'image pour réduire les disparités gênantes (Kim et al. 2008)

Wang et al. modifient également les disparités pixel par pixel en calculant une carte de disparité (Wang and Sawchuk 2008) soit en calculant une loi qui donne la disparité de sortie en fonction de la disparité initiale, soit en modifiant directement la carte des disparités (Wang, Tseng, and Liao 2015).

Sohn quant à lui se base sur la fonction de la stéréoaocuité pour "remapper" des parties d'image et faire en sorte que les images soient agréables à regarder et montre que les sujets préfèrent regarder les images traitées (Sohn, Jung, and Ro 2013).

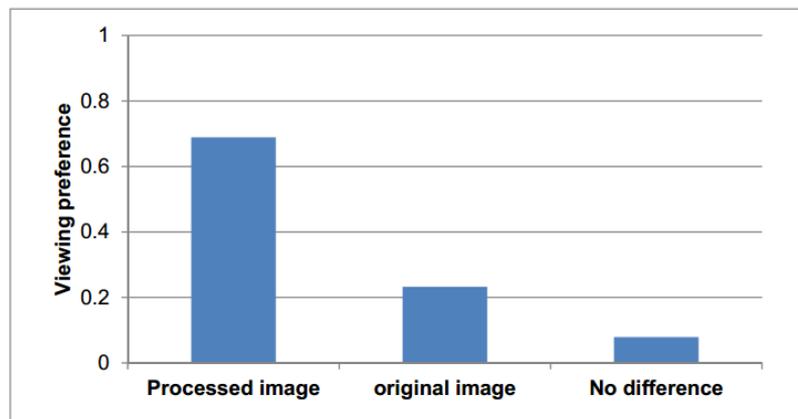


Figure 54 : préférence des sujets de Sohn pour un "remapping" des disparités en fonction de la stéréoaocuité (Sohn, Jung, and Ro 2013)

Wu se base plutôt sur les données de perception humaine pour avoir une courbe entre les disparités originales et les disparités de sortie plus douces (Wu et al. 2011). Ses sujets estiment que ces images sont plus confortables.

Certains auteurs appliquent ces algorithmes adaptés à différents dispositifs : portables comme la Nintendo 3DS (Mangiat and Gibson 2012) ou à d'autres tailles d'écrans (combiné avec un DOF) (Masia et al. 2013). Tandis que d'autres les utilisent avec un oculomètre pour les adapter à chaque utilisateur (Bernhard et al. 2014).

Notons que Jung et Ko font exactement l'inverse : ils augmentent les disparités pour arriver à la plus petite différence perceptible de profondeur, ils obtiennent un relief plus fort et qui semble intéresser les sujets, mais ils ne s'intéressent pas au confort de ces derniers (Jung and Ko 2012).

En fonction de la saillance

Wang et al. proposent d'adapter les disparités en fonction des saillances de l'image avec un calcul d'énergie et donc basé sur les points d'attention probable des sujets (Wang et al. 2013) (Wang, Fang, and Narwaria 2014).

Cho et Kang valident ce type d'approche alliée à un algorithme permettant de réduire les distorsions géométriques liées aux décalages des parties d'image sur un panel de 10 utilisateurs (Cho and Kang 2013). De même, Lin montre que les sujets trouvent que, corrigée (avec en plus une correction de violation de fenêtre), l'image présente plus de relief et est plus confortable, bien qu'ils n'expliquent pas vraiment dans quelles conditions sont effectuées les tests utilisateurs (Lin et al. 2011).

Fang propose également un algorithme permettant de modifier les disparités en fonction de la saillance et de l'énergie de l'image (Figure 55) en commençant par une détection de saillance 2D, puis en profondeur. Il compare ensuite le ressenti de sujet par rapport à la littérature (Figure 56), mais n'étudie pas la fatigue visuelle en elle-même (Fang et al. 2016).

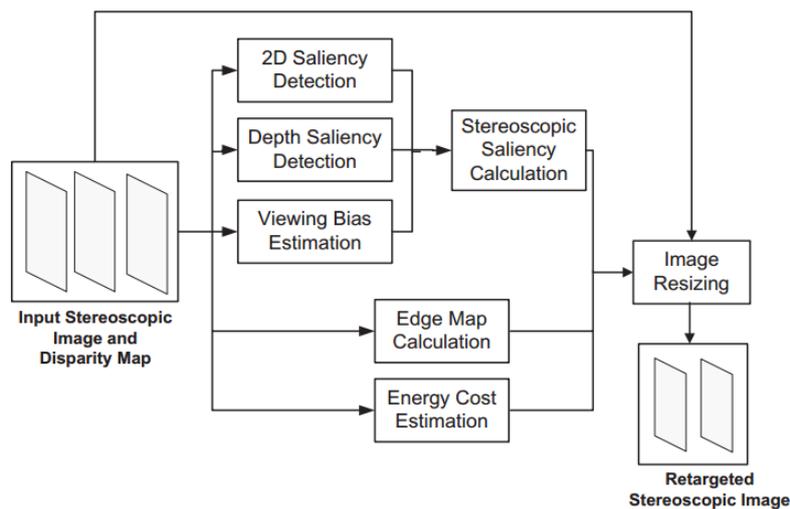


Figure 55 : Framework de Fan et al basé sur la saillance (Fang et al. 2016)

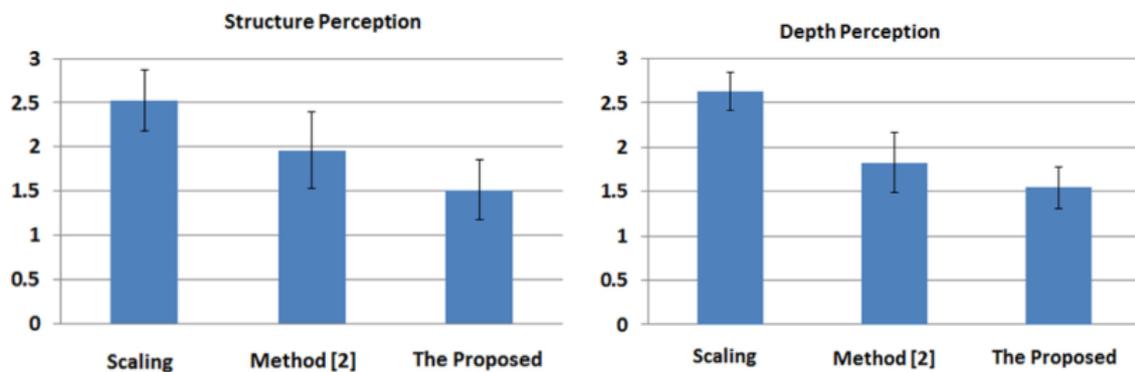


Figure 56 : perception de l'algorithme de Fang, notons que l'échelle de l'ordonnée est une échelle subjective dont 1 est "excellente qualité" et 3, "très mauvaise qualité". La « structure perception » étudie la perception de la déformation géométrique (Fang et al. 2016).

Lang propose également de modifier les disparités de parties d'images en fonction de la saillance des éléments la composant, des disparités maximales acceptables et des fréquences temporelles (Lang et al. 2010).

En fonction des fréquences temporelles

Les algorithmes de Sohn (Sohn et al. 2014), Oh (Oh et al. 2015) et Lang (Lang et al. 2010) intègrent les fréquences spatiales dans leur modification de scène.

Kellnhofer propose de moduler les disparités horizontales en fonction du mouvement de la scène (Kellnhofer et al. 2013). Dans son article, il compare d'une part la méthode « traditionnelle » consistant en une réduction de toutes les disparités, provoquant un ralentissement des mouvements d'un objet en profondeur, et d'autre part, son approche réduisant les disparités partout sauf celle de l'objet en déplacement. Ses sujets indiquent qu'ils préfèrent son approche, cependant les tests de performance des sujets indiquent que leur perception de la profondeur est altérée.

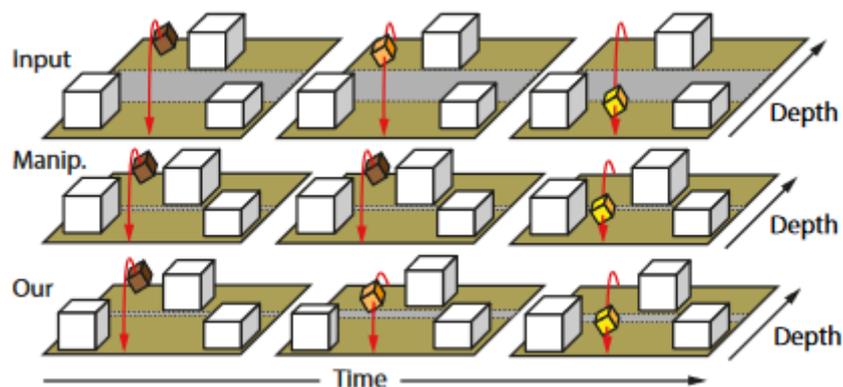


Figure 57 : modification des disparités en fonction des fréquences spatiales (Kellnhofer et al. 2013)

Koppal s'intéresse plus particulièrement aux changements de plans dans des vidéos stéréoscopiques et prône une réduction des disparités jusqu'au changement de plan suivi d'une augmentation après ce changement (Koppal et al. 2011). Ses sujets indiquent préférer les vidéos traitées. Delis propose d'ailleurs de détecter ce saut de disparité de façon automatique (Delis, Nikolaidis, and Pitas 2013).

Décalage horizontal des images pour bouger le plan de disparités nulles

Shao propose également un décalage du plan de disparités nulles et non un « remapping » des disparités suivant des modifications locales (comme c'est le cas dans le précédent paragraphe) (Figure 58) et montre que son traitement permet de garder la perception du relief tout en augmentant le confort visuel (Figure 59) (Shao et al. 2015). Qi et Ho proposent également de déplacer les images pour que le plan de disparités nulles soit optimal (Qi and Ho 2012) cité par (Terzić and Hansard 2016)).

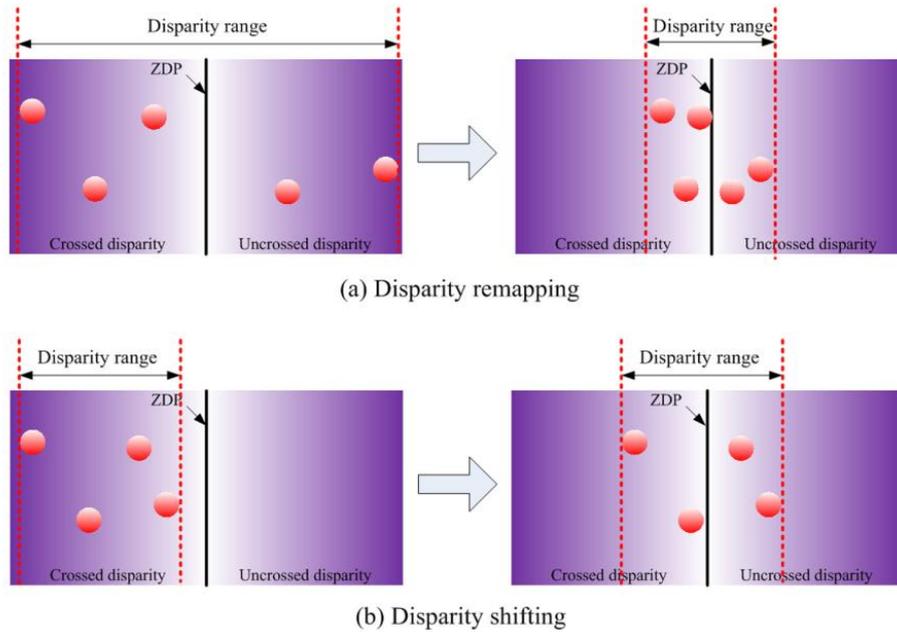


Figure 58 : différence entre « remapping » de disparité et déplacement de disparité (Shao et al. 2015)

Depth sensation and visual comfort assessment with or without processing.

Sequence	Without processing		With processing	
	Depth sensation	Visual comfort	Depth sensation	Visual comfort
Balloon	4.27	2.53	4.20	4.13
Kendo	4.33	2.47	4.07	4.33
Dancer	4.40	2.20	4.33	4.07
Poznanstreet	4.67	2.33	4.60	4.20

Figure 59 : sensation de profondeur et confort visuel avec et sans le traitement de Shao (Shao et al. 2015)

Jung, après avoir proposé une métrique de confort visuel (Figure 60) décale également les deux images en conséquence et montre que ce système est préféré par les sujets (Figure 61) (Jung et al. 2014).

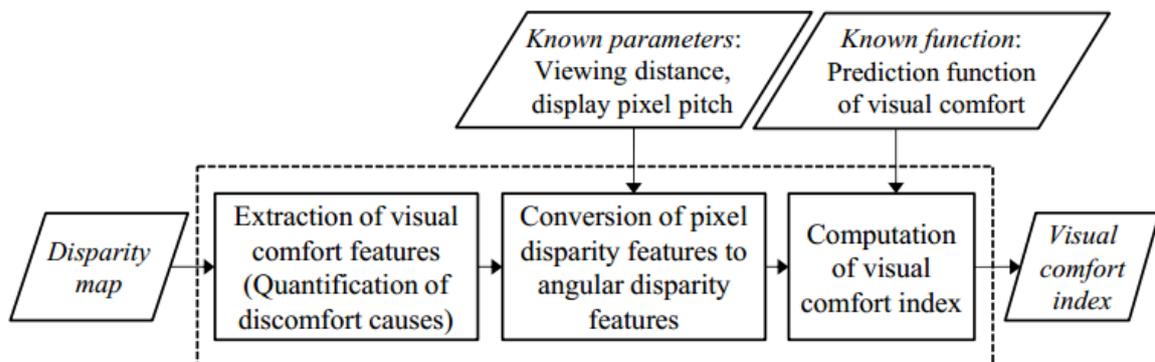


Figure 60 : métrique de confort visuel selon (Jung et al. 2014)

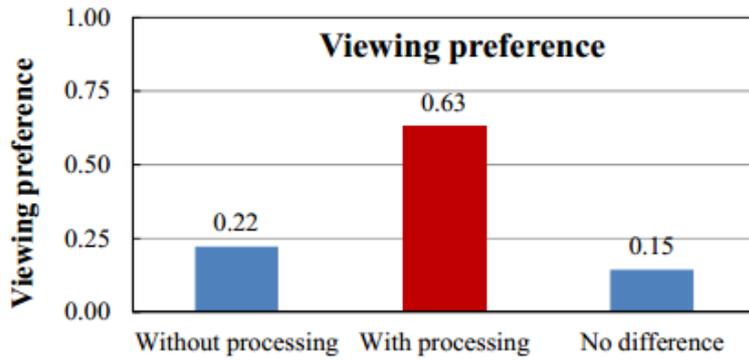


Figure 61 : préférence des sujets de Jung pour ses images traitées (Jung et al. 2014)

Kim, quant à lui, propose un déplacement des images basé d'une part sur le temps de fusion de celle-ci et d'autre part sur la disparité maximale acceptable et montre que dans la plupart des séquences testées, la fatigue visuelle est moindre quand le traitement dépend du temps de fusion pour chaque sujet (Figure 62) (Kim, Choi, and Sohn 2013).

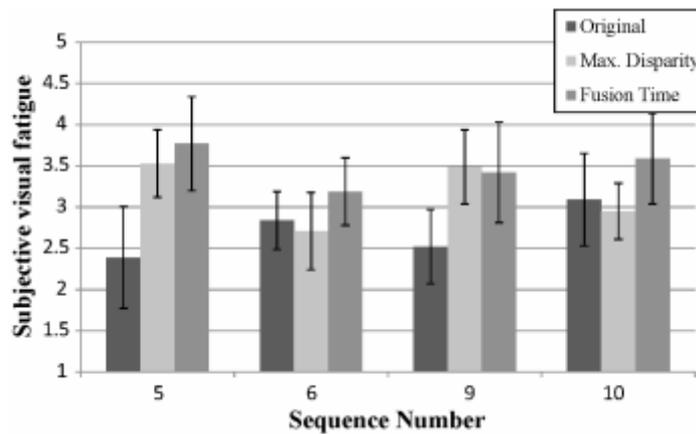


Figure 62 : évaluation subjective de 4 séquences (originales, traitées en fonction des disparités maximales acceptables ou du temps de fusion), notons que l'ordonnée représente le confort visuel, 5 étant très confortable 0 pas confortable du tout (Kim, Choi, and Sohn 2013)

Méthodes combinées

Sohn propose un mélange de décalage d'image et de traitement localisé (Sohn et al. 2014) et montre que les sujets trouvent que ses images traitées sont plus naturelles et de meilleure qualité.

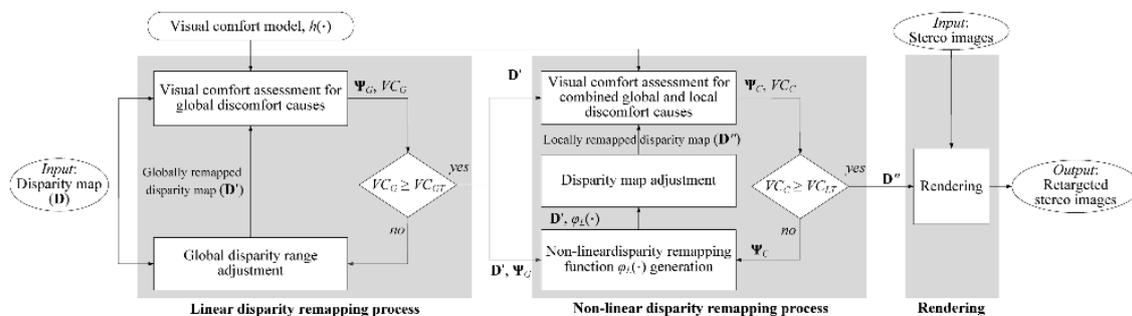


Figure 63 : traitement local et global de Sohn (Sohn et al. 2014)

Il complète son modèle en 2015 avec Oh avec la prise en compte de la fréquence spatiale et de la fréquence temporelle (Oh et al. 2015).

Conclusion de la modification des disparités horizontales

Nous voyons que dans beaucoup de cas étudiés (54% de notre revue de littérature), les auteurs modifient les disparités sur toute l'image ou sur une partie en fonction des propriétés intrinsèques de cette dernière. Ces méthodes semblent donner des résultats très satisfaisants pour les sujets, mais perturbent cependant leur perception du relief de façon durable. En effet, ils ne peuvent apprécier les disparités horizontales pour les mémoriser si cela est possible, ils n'ont accès qu'aux disparités horizontales modifiées.

Ware et Emoto, quant à eux, étudient des variations de disparités horizontales dans le temps. Ils tendent à montrer que des variations peuvent être très dérangeantes, cependant, la fréquence de leur cycle est relativement élevée. Il serait possible de profiter des avantages des deux méthodes : obtenir une réduction de la fatigue liée à la disparité horizontale globale tout en permettant aux sujets de profiter à certains moments d'une perception du relief complet, en s'assurant de ne pas tomber dans la rapidité des cycles étudiés par Emoto et Ware.

- *Convergence des caméras virtuelles*

Southard propose un algorithme pour rendre des caméras convergentes, mais n'en mesure pas l'impact sur le confort visuel (Southard 1992). Stelmach étudie l'influence de la convergence des caméras virtuelles sur le confort visuel (Stelmach et al. 2003). Il en déduit que la convergence des caméras peut réduire la fatigue visuelle pour des convergences faibles (Figure 64), mais qu'elle n'améliore pas la perception du relief.

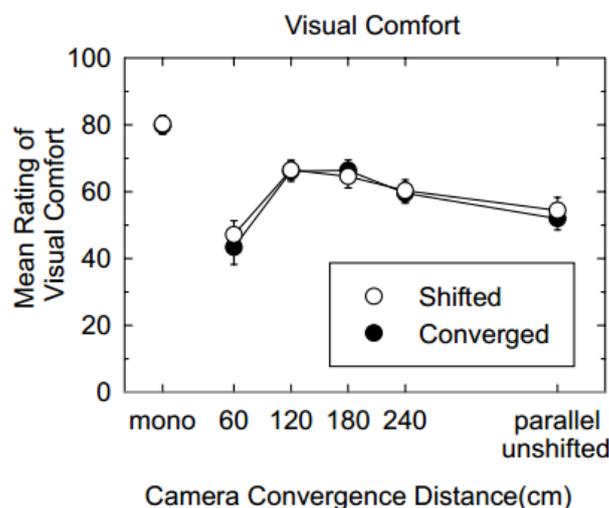


Figure 64 : confort en fonction de la convergence des caméras virtuelles (Stelmach et al. 2003)

- *Correction de violation de fenêtre*

La violation de fenêtre est un phénomène que nous avons évoqué au paragraphe 3.2.13.2.1.2f), c'est lorsqu'un objet est stéréoscopiquement devant le bord de l'écran, mais monoscopiquement derrière parce qu'il est caché par ce dernier. Jung considère que la rivalité binoculaire impliquée dans ce conflit relève également de la violation de fenêtre et prend en compte ce conflit dans sa méthode de calcul de confort utilisé pour décaler les images (voir paragraphe 3.2.1.3b) (Jung and Ko 2012). Lin propose également un rognage des images pour éviter ce phénomène (Lin et al. 2011).

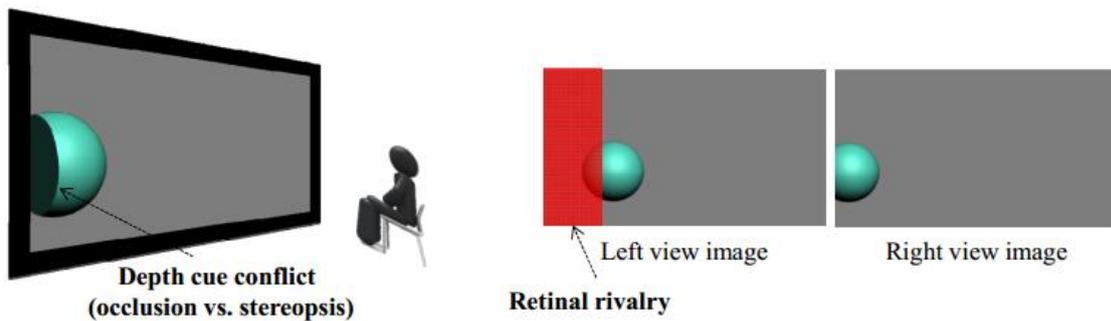


Figure 65 : violation de fenêtre selon Jung (Jung et al. 2014)

c) Modification technique du dispositif

3) Accommodation sur différents écrans

Akeley propose un dispositif pour atténuer le conflit accommodation vergence en proposant une distance d'accommodation adaptée à la profondeur et donc à la distance de convergence du point regardé en multipliant les écrans grâce à un système de miroirs semi-transparentes. Cette technique lui permet d'avoir trois distances d'accommodation différentes (voir Figure 66) (Akeley et al. 2004).

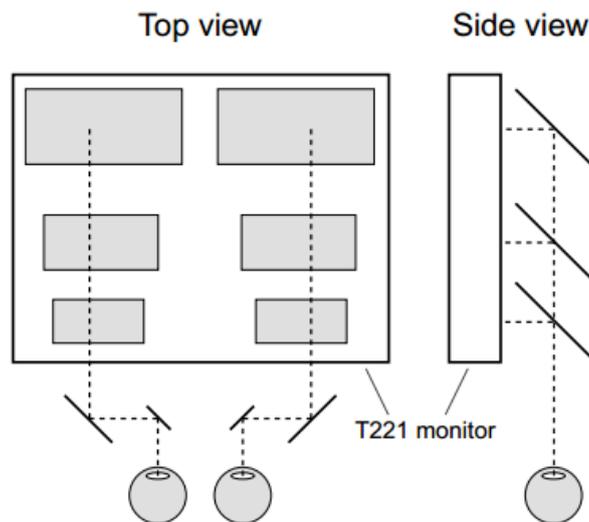


Figure 66 : système multi distance focale d'Akeley (Akeley et al. 2004)

Hoffman montre que ce type de dispositif permet de réduire la fatigue visuelle et permet de se rapprocher de la réponse accommodative naturelle (voir Figure 67) tout en permettant une meilleure perception de la profondeur (voir Figure 68) (Hoffman et al. 2008). Cependant, Matusik, dans un article sur la construction d'une télévision permettant les parallaxes de mouvements artificielles indique que ce genre de système, puisqu'il ne permet pas les mouvements du sujet à cause des problèmes d'occultation, réduit de fait la perception du relief (Matusik and Pfister 2004).

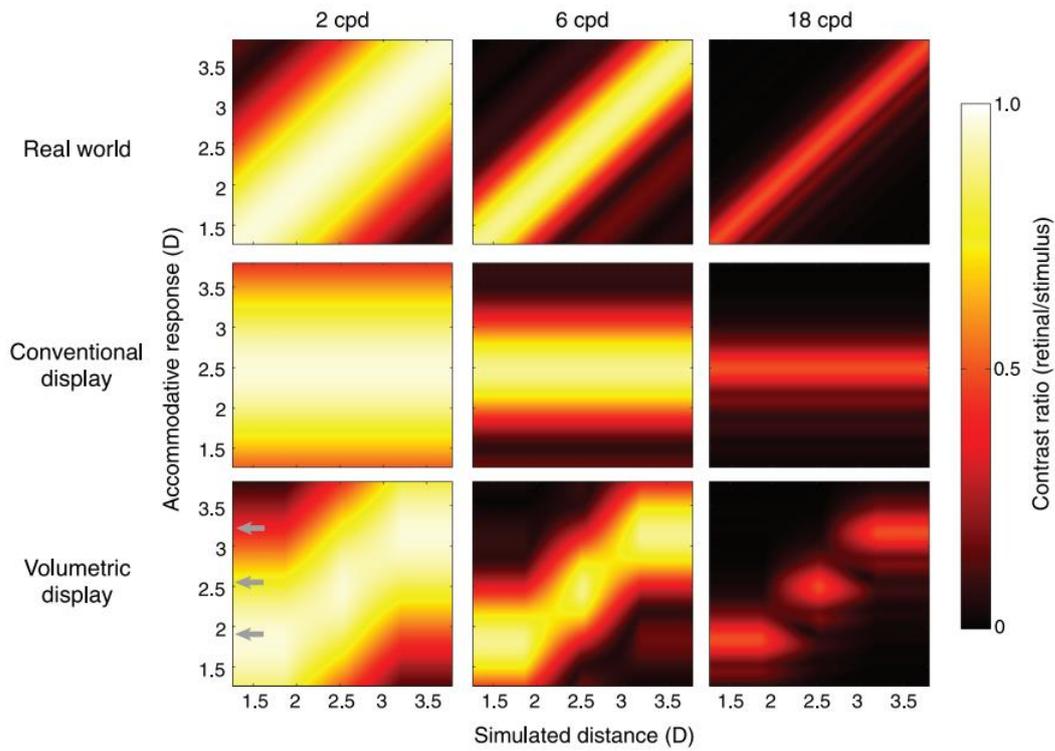


Figure 67 : comparaison des réponses accommodatives naturelles, avec un écran stéréoscopique et le dispositif d'Akeley pour plusieurs fréquences spatiales (Hoffman et al. 2008)

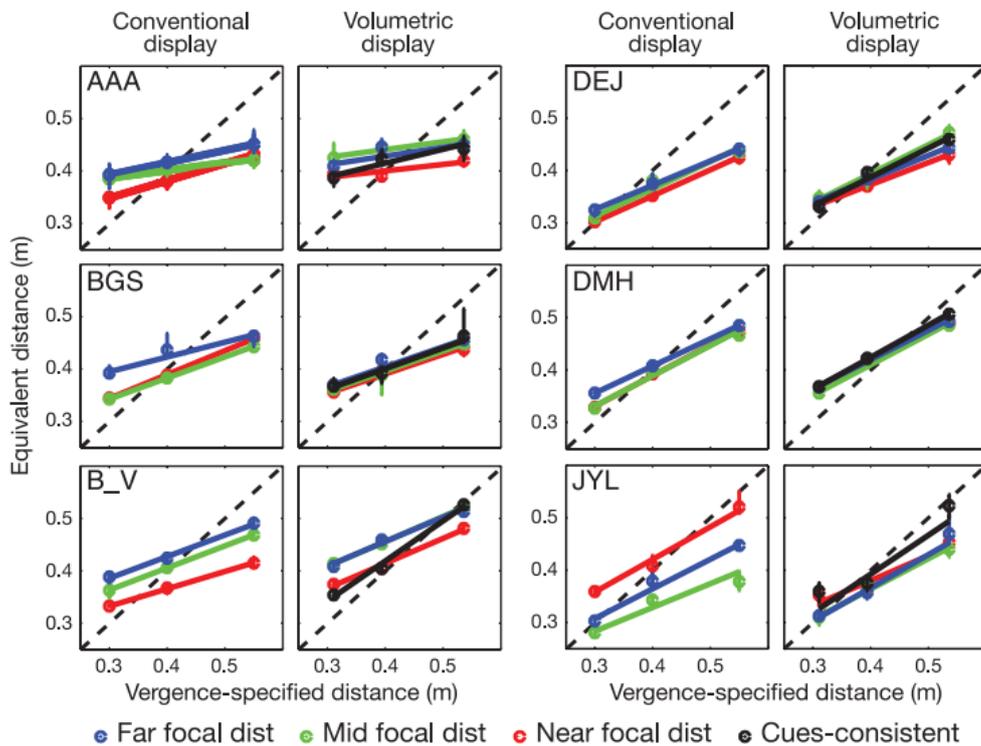


Figure 68 : perception du relief avec un dispositif stéréoscopique classique et le dispositif d'Akeley (Hoffman et al. 2008)

4) Lentille dynamique

Suyama propose lui aussi de modifier la distance d'accommodation en fonction de la profondeur du point regardé, mais en utilisant des lentilles dynamiques (voir Figure 69) dans le but de réduire la

fatigue (Suyama, Dat, and Takada 2000), il n’y a malheureusement pas de test de fatigue pour vérifier si l’effet escompté est atteint.

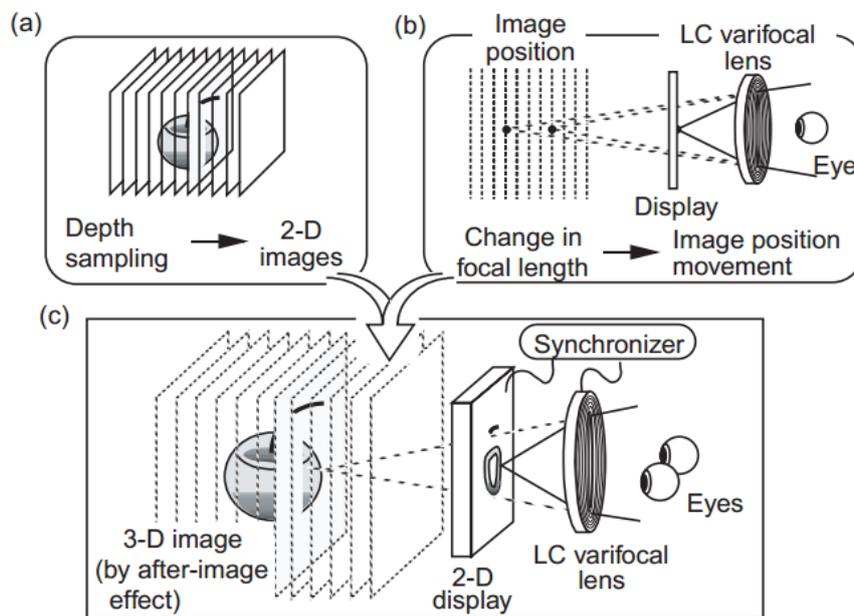


Figure 69 : Variation de la distance d’accommodation par lentille dynamique proposée par Suyama (Suyama, Dat, and Takada 2000)

Certaines études proposent le même type de lentilles, mais adapté à la réalité augmentée (Figure Figure 70) mais ne présentent pas de mesure de la modification oculomotrice associée à leurs dispositifs (Chakravarthula et al. 2018) (Stevens et al. 2018) (Laffont et al. 2019).



Figure 70: lentille adaptative pour réalité augmentée (Chakravarthula et al. 2018)

Nottions que Lanman, directeur d’informatique graphique chez Oculus, aurait déclaré dans une keynote que c’est une direction qu’Oculus s’appête à prendre également (Lanman 2018)

5) Projection sans écran

Downing propose un dispositif permettant une accommodation totalement naturelle avec une projection laser en couleur dans un médium enrichi (Figure 71) (Downing et al. 1996)

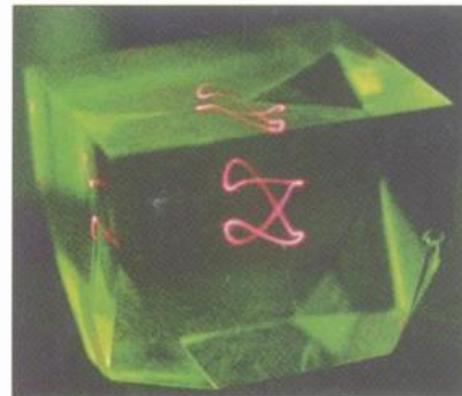
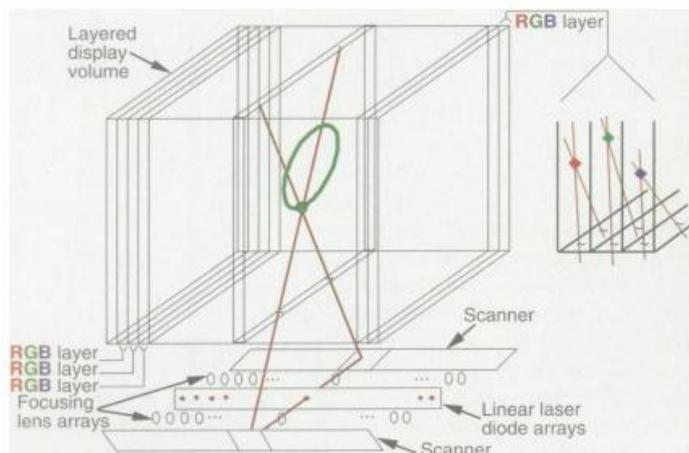


Fig. 7. Photograph of a monochrome, solid-state, 3D display in a 1-cm³ Pr³⁺-doped sample.

Figure 71 : projection 3D dans une matrice (Downing et al. 1996)

Tandis que d'autres chercheurs s'orientent plutôt vers des dispositifs rotatifs permettant également une projection nativement en 3D (voir Figure 72) (Favalora et al. 2002).

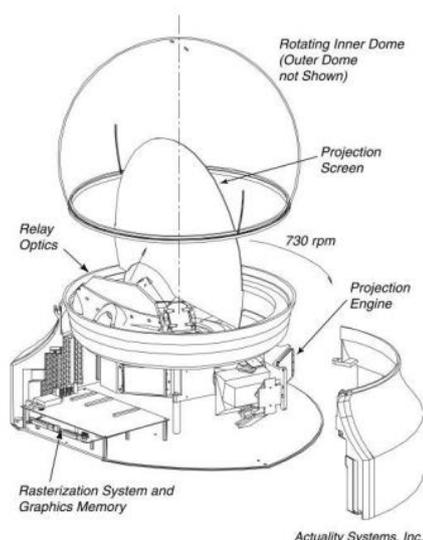


Figure 72 : dispositif de projection volumique rotatif de Favalora (Favalora et al. 2002).

6) Conclusion des modifications techniques

Ces modifications peuvent réduire voire supprimer le conflit accommodation – vergence et permettre la visualisation de stimulus en relief de façon confortable visuellement. Cependant, ces pistes transforment en profondeur la création de ces stimulus et peuvent ne pas être adaptées facilement sur des stimulus existants. De plus, certaines d'entre elles ne permettent pas au sujet de bouger pour bénéficier des parallaxes de mouvements.

1) La technologie LightField

Takaki présente le light-field comme une reconstruction d'un front d'onde lumineuse à partir d'une technologie type écran combiné à un réseau lenticulaire en quadrillage (Takaki 2006). Lanman et Lueke présentent également la technologie Nvidia light-field de cette façon. Ils estiment également que le conflit accommodation vergence serait résolu avec cette technologie, mais sans expliquer exactement pourquoi, ni où se fait l'accommodation (Lanman and Luebke 2013).

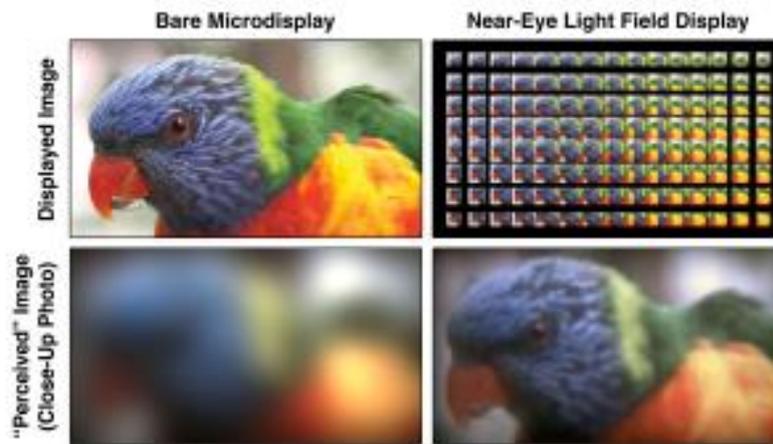


Figure 73: découpage d'une image pour une technologie light field (Lanman and Luebke 2013).

Hong et Hua en expliquent en détail le fonctionnement technique et les modifications que cela pourrait apporter sur l'accommodation, mais ne la mesurent pas physiologiquement (Huang and Hua 2019).

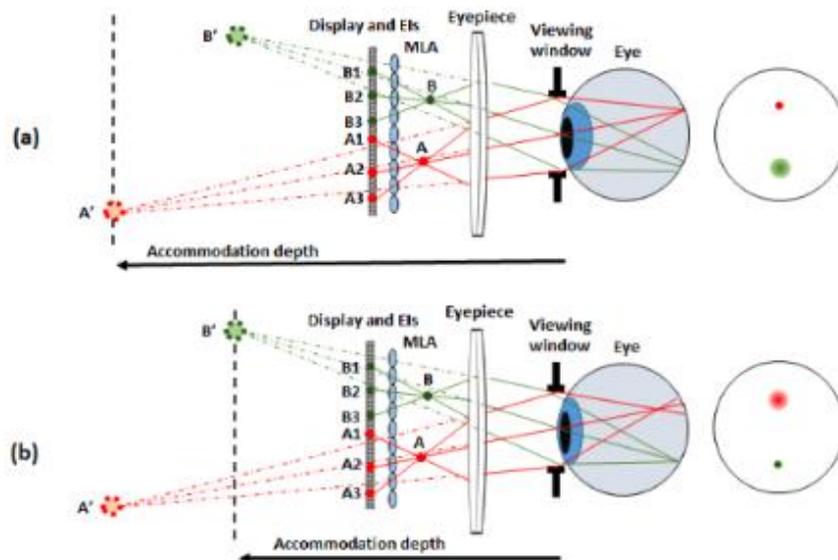


Figure 74: modification de l'accommodation en HDM Light Field (Huang and Hua 2019)

À ma connaissance il n'y a pas encore eu de mesure de l'effet du Light Field sur l'accommodation ou la vergence, malgré le fait que de nombreux auteurs le décrivent comme très prometteur pour la résolution du conflit vergence-accommodation (Huang 2019.), cependant, Huang propose une mesure de l'accommodation en fonction de l'échantillonnage du rayon (Huang and Hua 2019).

d) Conclusion de la réduction du conflit accommodation – vergence

Nous avons pu constater qu'il existe de nombreuses méthodes de réduction de la fatigue visuelle en stéréoscopie. Nous pouvons également voir que, si les recherches sur le flou sont réparties dans le temps plus ou moins uniformément, les recherches sur le flou commencent avant celles sur les disparités (Figure 75). Ces études n'ont, probablement, pu se mettre en place que lorsque les projets informatiques ont permis de réaliser ces traitements d'image en temps réel, mais pas seulement. En effet, des modifications de la distance des caméras ne nécessitent pas de calculs très lourds et n'ont pourtant commencé qu'après 2008 selon notre revue de la littérature.

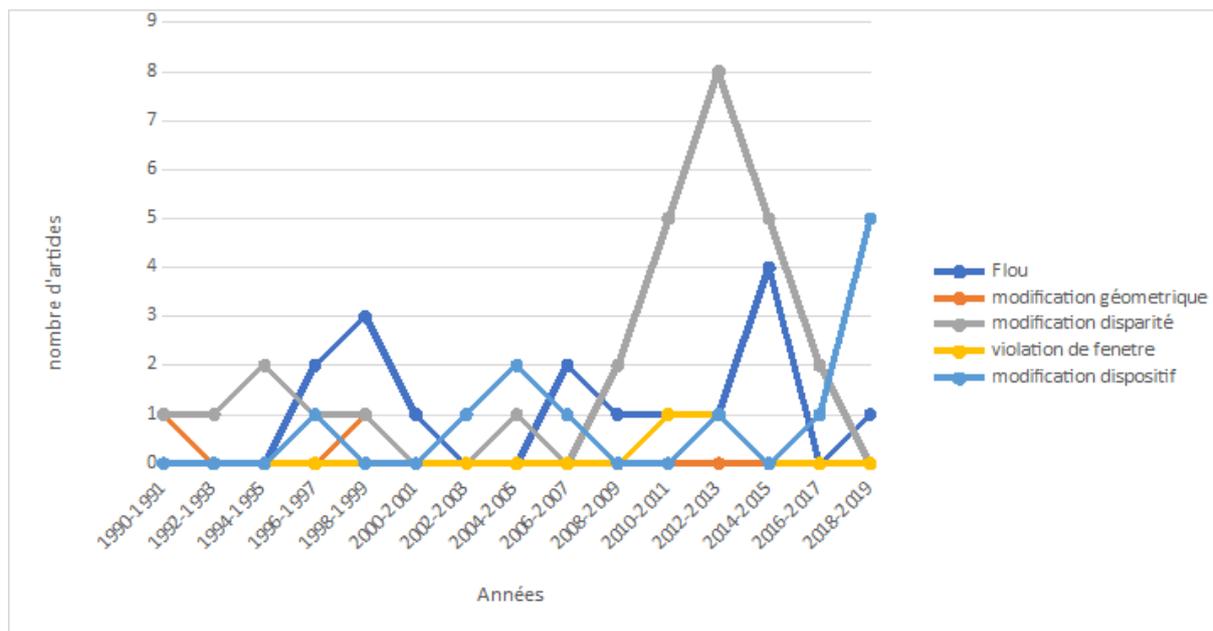


Figure 75 : répartition des articles en fonction des années

Il est également intéressant de remarquer que beaucoup d'études récentes portent sur le confort des sujets. En effet, les anciennes études proposent souvent des modifications, mais ne les soumettent pas à l'épreuve de sujet. Cette évolution paraît naturelle, il faut d'abord que des solutions soient proposées, et lorsque cette démarche s'impose, la question des comparaisons du confort subjectif des sujets avec et sans traitement se pose. Cependant, notons que même dans les études récentes, si beaucoup s'intéressent au confort subjectif des sujets, très peu s'intéressent à la fatigue visuelle mesurable et encore moins aux modifications imposées au système visuel.

De même, peu d'articles s'intéressent à l'impact de leur algorithme sur l'efficacité de tâches qui pourraient être proposées. En effet, il peut être intéressant de savoir ce qui est perdu en gagnant un certain confort. Si ce dernier est toujours souhaitable, il importe à l'utilisateur de savoir quand utiliser telle méthode plutôt que telle autre. Tous ces systèmes semblent être intéressants pour le système visuel, mais qu'en est-il au niveau de la perception ? Les études ne permettent pas de le déterminer ni de savoir s'il vaudrait mieux utiliser une méthode basée sur du flou pour une tâche de précision en positionnement par exemple.

3.2.2. Cybermalaise

3.2.2.1. Explication physiologique

Le cybermalaise est un état désagréable que ressentent certains sujets en immersion. Ces mécanismes sont encore discutés (Bando, Iijima, and Yano 2012) (Money 1970), mais MacCauley et Sharkey font état et discutent de deux hypothèses généralement avancées : la théorie du conflit sensoriel et la théorie dite du poison (MacCauley and Sharkey 1992).

a) Théorie du conflit sensoriel

Selon la première théorie, ce malaise est dû à une latence entre les mouvements de la tête et le rafraîchissement de la vision. Cette incohérence visuovestibulaire est la plus souvent reliée au cybermalaise (Reason and Brand 1975) (Jones et al. 2001) (Young, Adelstein, and Ellis 2006).

Un autre conflit sensorimoteur peut provenir d'un mouvement perçu dans le flux visuel et non perçu par les sens proprioceptifs. Lavection est une sensation de mouvements provoquée par un flux

visuel, l'exemple le plus connu dans la vie quotidienne est lorsque, assis dans un train, nous avons faussement l'impression que celui-ci part parce que le train voisin démarre. Elle aurait un lien avec le cyber malaise (Hettinger et al. 1990) (Keshavarz et al. 2015).

1) Latence de correction de mouvements pseudoscopiques

Une latence peut exister entre le mouvement de la tête et la prise en compte au niveau de l'affichage, à cause du temps de réponse des capteurs, de la prise en charge informatique au niveau de l'Operating System, de la remontée de l'information dans le moteur 3D, du calcul du nouveau point de vue, de l'affichage proprement dit... Si cette latence est supérieure à 75 ms, un cybermalaise peut se produire (MacKenzie and Ware 1993).

2) Autres conflits possibles

Fuchs énumère un certain nombre de conflits sensori-moteurs pouvant amener à un cybermalaise en plus de l'incohérence visuovestibulaire et nous le rejoignons (Fuchs 2016):

- Incohérence visuomotrice temporelle, liée à la latence entre le mouvement de tête et l'actualisation de l'affichage
- Incohérence visuotemporelle, liée à une fréquence d'affichage trop faible et provoquant une impression de mouvement à partir de points fixes (deux points lumineux affichés avec une faible différence angulaire sont perçus comme un seul point se déplaçant)
- Incohérence visuomotrice de localisation, liée à une imprécision de capteurs impliquant une rotation visuelle différente de la rotation mécanique. Sur certains casques de réalité virtuelle, l'absence de capteur de translation peut en être la cause.
- Incohérence visuomotrice spatiale, liée à un découplage volontaire entre le mouvement capté et le retour visuel pour, par exemple, permettre au sujet de voir plus loin derrière lui, ou permettre un déplacement en rotation à partir des mouvements de tête.
- Incohérence visuomotrice passive, liée au fait que l'environnement virtuel bouge sans que l'utilisateur n'ait bougé la tête.
- Incohérence visuovestibulaire temporelle, lorsque les concepteurs tentent de diminuer l'incohérence visuovestibulaire en permettant au corps de se déplacer et de ressentir les accélérations (sur une plateforme ou un siège mobile...) il peut y avoir des décalages temporels entre ces mécanismes et le retour visuel.
- Incohérence visuoposturale, liée au fait que l'utilisateur peut avoir du mal à maintenir une position verticale quand l'affichage se déplace ou en tout cas n'offre pas suffisamment de repères visuels verticaux stables.
- Incohérence visuomanuelle, liée au fait que la main virtuelle peut ne pas être positionnée correctement par rapport à la main réelle de l'utilisateur.

Si certains chercheurs estiment que le cybermalaise est une sous-partie du mal des transports (Voge 1991), Arns fait toutefois une distinction entre le malaise des simulateurs et le mal des transports (motion sickness). Elle estime que dans le mal des transports, le sujet est statique, ce qui n'est pas forcément le cas dans le cybermalaise (Arns and Cerney 2005), elle montre d'ailleurs que la répartition de ces malaises en fonction de l'âge des sujets est différente. Keshavarz rappelle, quant à lui, que les cybermalaises peuvent inclure une catégorie de malaises, imputés uniquement au flux visuel, appelée le VIMPS (Visualy Induced Motion Sickness) qui interviendrait lorsque le sujet ne bouge pas du tout dans le simulateur. Il estime que les simulateurs peuvent donc provoquer un malaise purement induit par la vision et un malaise lié au mouvement sans que ces deux types de malaises ne soient correctement identifiés dans les études et leurs analyses (Keshavarz et al. 2015).

b) Théorie du poison

La théorie du « poison » énoncée par Treisman en 1977 (Treisman 1977) et reprise par Money (Money 1990) cité par (Lackner 2014)) supposerait que les vomissements ne sont pas dus directement aux conflits sensoriels, mais à une neurotoxine ingérée accidentellement et que les mouvements ne sont que des révélateurs du problème toxicologique. En effet, l'inactivité ferait baisser le taux de toxines dans le sang et atténuerait les symptômes de malaise. Cette théorie est également appelée « evolutionary theory » bien que certains chercheurs indiquent que cette susceptibilité aux mouvements est plutôt un désavantage évolutif, mais les défenseurs de cette hypothèse indiquent que l'énergie nécessaire à la digestion et au traitement des toxines est récupérée lors des vomissements et peut être réutilisée pour le traitement des mouvements (Lackner 2014).

3.2.2.2. Symptômes

Kennedy, dans son questionnaire pour les simulateurs d'avions, sépare les cybermalaises en trois catégories (Kennedy et al. 1993) :

- nausée,
- problèmes oculomoteurs,
- désorientation.

<i>MSQ Symptom</i>	<i>Retained for SSQ</i>	<i>Eliminated for SSQ</i>
General discomfort	X	
Fatigue	X	
Boredom		X
Drowsiness		X
Headache	X	
Eyestrain	X	
Difficulty focusing	X	
Increased salivation	X	
Decreased salivation		X
Sweating	X	
Nausea	X	
Difficulty concentrating	X	
Depression		X
Fullness of head	X	
Blurred vision	X	
Dizziness (eyes open)	X	
Dizziness (eyes closed)	X	
Vertigo	X	
Visual flashbacks		X
Faintness		X
Awareness of breathing		X
Stomach awareness	X	
Decreased appetite		X
Increased appetite		X
Desire to move bowels		X
Confusion		X
Burping	X	
Vomiting		X

Figure 76 : symptômes retenus pour le questionnaire sur le cybermalaise par Kennedy (Kennedy et al. 1993)

Par contre, Kuze et Ukai, le séparent plutôt en cinq catégories de symptômes (Kuze and Ukai 2008) :

- fatigue visuelle,

- malaise général
- nausée
- difficultés de concentration
- maux de tête

Item	Factor				
	Eye Strain	General Discomfort	Nausea	Focusing Difficulty	Headache
Blurry "shoboshobo"	0.659	0.266	0.030	0.101	0.001
Dry eyed	0.645	0.113	-0.001	0.162	0.042
Eyestrain	0.619	0.311	0.040	0.053	0.002
Gritty "gorogoro"	0.586	-0.023	0.075	0.115	0.207
Eyeache	0.579	0.244	0.102	0.091	0.127
Sting	0.565	-0.038	0.029	0.276	0.049
Eyes heavy	0.502	0.320	0.114	0.114	0.147
<i>Hazy</i>	0.428	0.185	0.052	0.363	0.151
Warm eyes	0.424	0.051	0.232	0.053	0.208
<i>Flickering "chikachika"</i>	0.406	0.379	-0.016	0.359	0.139
Watery eyes	0.363	0.134	0.045	0.252	-0.093
Feeling heavy in the head	0.217	0.658	0.199	0.062	0.194
Feel heavy	0.141	0.647	0.309	0.105	-0.001
Difficulty concentrating	0.320	0.555	0.210	0.035	0.108
<i>Dizzy</i>	0.112	0.533	0.368	0.239	0.086
Stiff shoulder	0.070	0.505	0.119	-0.045	0.148
Stiff neck	0.152	0.458	0.077	0.130	0.189
<i>Sleepy</i>	0.213	0.285	0.113	0.130	-0.220
Vomiting	0.104	0.204	0.843	0.107	0.197
Vertigo	0.041	0.328	0.715	0.102	-0.044
Nausea	0.138	0.344	0.632	0.002	0.271
Difficulty focusing	0.121	0.131	0.042	0.691	0.122
Double vision	0.063	0.197	0.063	0.565	0.094
Near vision difficulty	0.274	0.036	0.078	0.532	-0.043
Far vision difficulty	0.204	-0.161	0.062	0.419	0.081
Pain in the temple	0.190	0.237	0.143	0.047	0.605
Pain in the middle of the forehead	0.190	0.191	0.122	0.239	0.532
Pain in the back of the head	0.067	0.263	0.273	0.172	0.358
Eigenvalue	3.64	3.05	2.19	1.95	1.27
Percent of variance	13.01	10.87	7.80	6.97	4.52

Figure 77 : élément pris en compte par Kuze et Ukai dans leur questionnaire (Kuze and Ukai 2008)

Laviola souligne également des symptômes tels que (LaViola 2000) :

- Tiraillement des yeux
- Maux de tête
- Pâleur
- Transpiration excessive
- Sécheresse buccale
- Désorientation
- Vertige
- Nausée
- Vomissement
- Ataxie

Les symptômes du cybermalaise peuvent persister pendant plusieurs heures après la simulation (Kellog, Castore, and Coward 1980). Il est même conseillé aux pilotes d'avion ayant travaillé sur simulateur de ne pas conduire pendant 24h (Gower and Fowlkes 1989).

3.2.2.3. *État de l'art de la réduction du cybermalaise*

a) *Adaptation du contenu*

McCauley et Sharkey prodiguent quelques recommandations pour l'élaboration d'une application limitant le cybermalaise (McCauley and Sharkey 1992). Ils recommandent notamment d'éviter les contenus chargés en hautes fréquences spatiales ainsi que les applications impliquant beaucoup de phénomènes de vection, en accord avec les études de Hettinger (Hettinger et al. 1990) et Kennedy (Kennedy et al. 1993). Ils indiquent également que les applications impliquant des objets proches sont souvent moins sujettes à problèmes parce que la vection et l'implication de rotations corporelles y seraient moins importantes. Ils recommandent d'éviter les accélérations et rotations linéaires tant que le sujet n'est pas « adapté » au simulateur.

b) *Traitement d'image*

- *Réduction du champ de vision*

Se basant sur les études de DiZio (DiZio and Lackner 1997) et surtout de Lin et al. étudiant le lien de corrélation entre le champ de vision dans un HMD et la mémorisation, l'amusement, la présence et le cybermalaise (Lin et al. 2002), Fernandes propose de réduire les FOV (Field Of View - champs de vision) pour diminuer le mal des simulateurs (Fernandes and Feiner 2016) et semble arriver à le réduire chez ses sujets.



Figure 78 : modification des FOV pour réduire le cybermalaise en HMD (Fernandes and Feiner 2016)

Bubka propose lui aussi une réduction du champ de vision avec un impact statistiquement significatif sur le cybermalaise mesuré avec le SSQ de Kennedy (voir 3.2.23.2.2.2) : (Bubka, Bonato, and Palmisano 2007)

TABLE I. SSQ SCORES BY CONDITION.

	Expanding	Contracting	p
Total	28.3 ± 8.1	16.6 ± 12.4	0.011
Nausea	18.5 ± 15.4	8.3 ± 9.1	0.008
Oculomotor	27.5 ± 19.7	17.5 ± 13.8	0.006
Disorientation	27.8 ± 28.8	17.4 ± 14.8	n.s.

Values are mean ± SD; n = 16; p = significance 2-tailed; n.s = not significant.

Figure 79 : effet de la modification du champ de vision sur le cybermalaise selon Bubka (Bubka, Bonato, and Palmisano 2007)

- Flou de profondeur de champ

Carnegie applique un flou de profondeur de champ dans un casque de réalité virtuelle et montre que tous les symptômes du cybermalaise sont diminués de façon plus ou moins significative lorsque ce flou est activé (Carnegie and Rhee 2015).

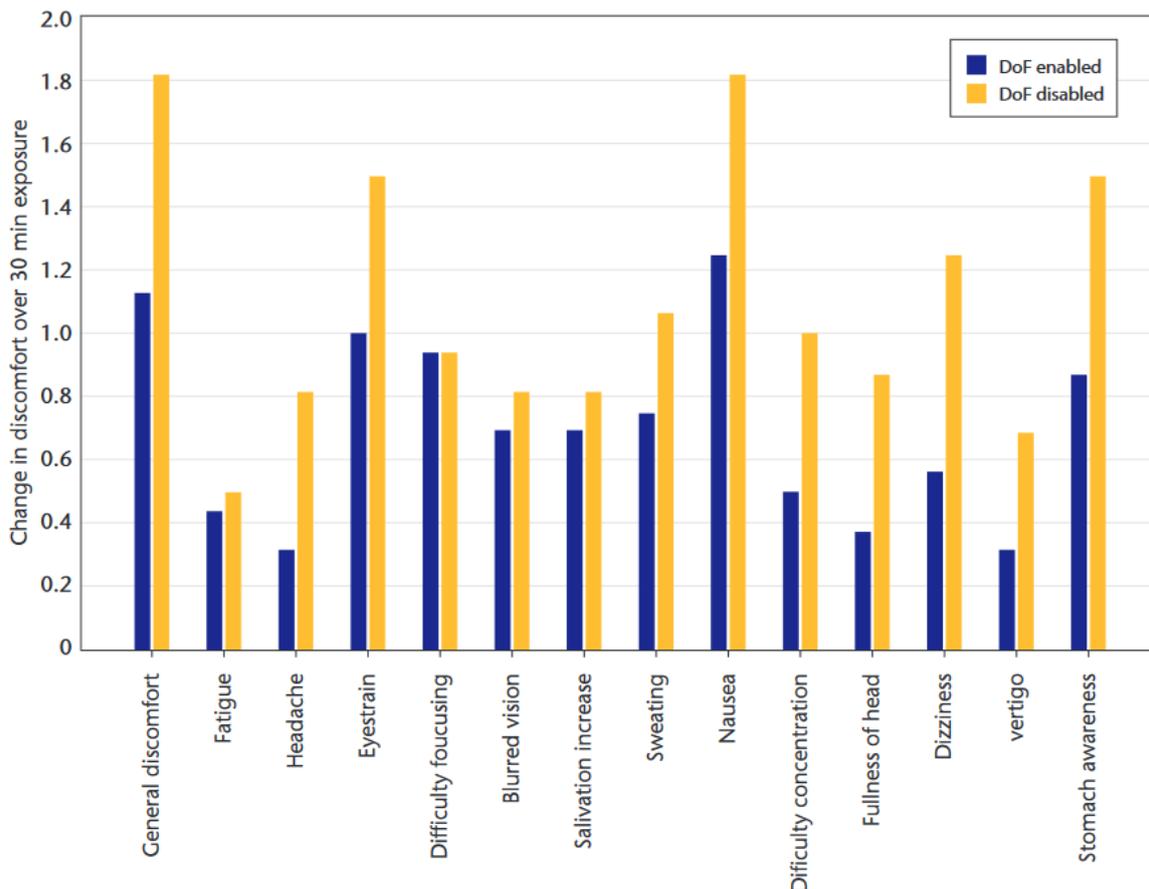


Figure 80 : variation des symptômes de cybermalaise en fonction du flou de profondeur de champ (Carnegie and Rhee 2015)

c) Calibration technique

McCauley et Sharkey recommandent une très bonne calibration du système. En effet, ils indiquent que si une bonne calibration n'empêche pas le cybermalaise, une mauvaise calibration l'implique à coup sûr (McCauley and Sharkey 1992). Parmi les points à vérifier, ils présentent les calibrations :

- Des tailles d'image
- De positionnement de capteur
- De réduction des latences entre le capteur et la visualisation
- De réduction des latences entre un mouvement virtuel et un mouvement tel qu'il aurait lieu dans la réalité (pour un véhicule par exemple)

d) Conclusion de la réduction du cybermalaise

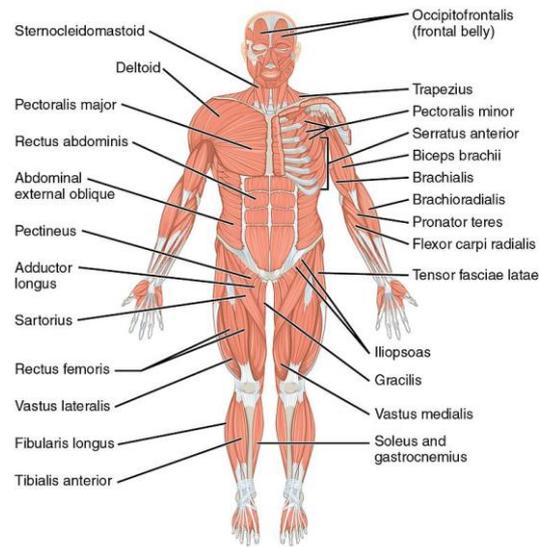
Le cybermalaise étant provoqué par beaucoup de facteurs, il est normal que nous trouvions, dans la littérature, des façons très différentes de tenter de le combattre. Comme pour la fatigue visuelle, certains auteurs estiment qu'une modification du contenu des images est suffisante (37% de notre revue). D'autres estiment qu'il vaut mieux intervenir et modifier complètement les images en les déformant ou en les tronquant (62%). D'autres encore prônent une amélioration et une accélération des dispositifs techniques pour éviter les latences lors de mouvements (12%).

3.2.3. Troubles musculosquelettiques

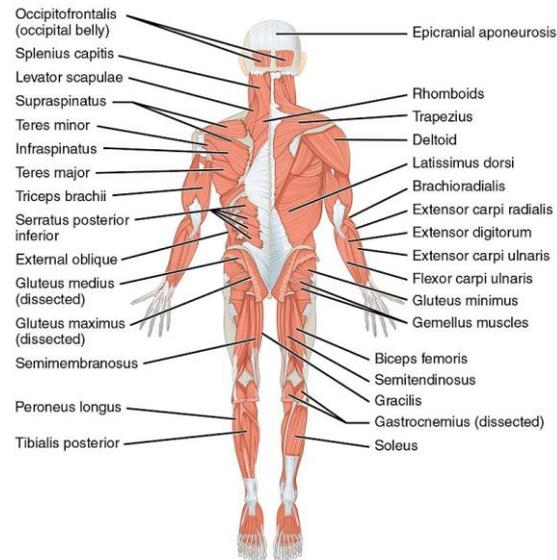
3.2.3.1. *Système musculosquelettique*

Le système musculosquelettique est le système nous permettant de marcher, tenir des objets en mains et ressentir ceux-ci. Il est composé de plusieurs centaines de muscles (voir Figure 81 pour les plus grands), tendons, ligaments...

a) Les muscles



Major muscles of the body.
Right side: superficial; left side:
deep (anterior view)



Major muscles of the body.
Right side: superficial; left side:
deep (posterior view)

Figure 81 : les différents muscles du système musculaire (OpenStax 2013)

Les muscles squelettiques correspondent à un des trois types de muscles corporels, les deux autres étant les muscles lisses (responsables de l'avancement des fluides corporels) et le muscle cardiaque. Nous ne nous attarderons pas sur ces deux dernières catégories, puisqu'elles n'interviennent pas dans les mouvements ni dans la proprioception, la perception de notre propre corps et de la position de chacune de ses partie.

Les muscles squelettiques sont constitués de faisceaux de fibres (myofibres) séparées en myofibrilles puis en filaments de myosine et d'actine: composition macroscopique et microscopique d'un corps musculaire (Figure 82).

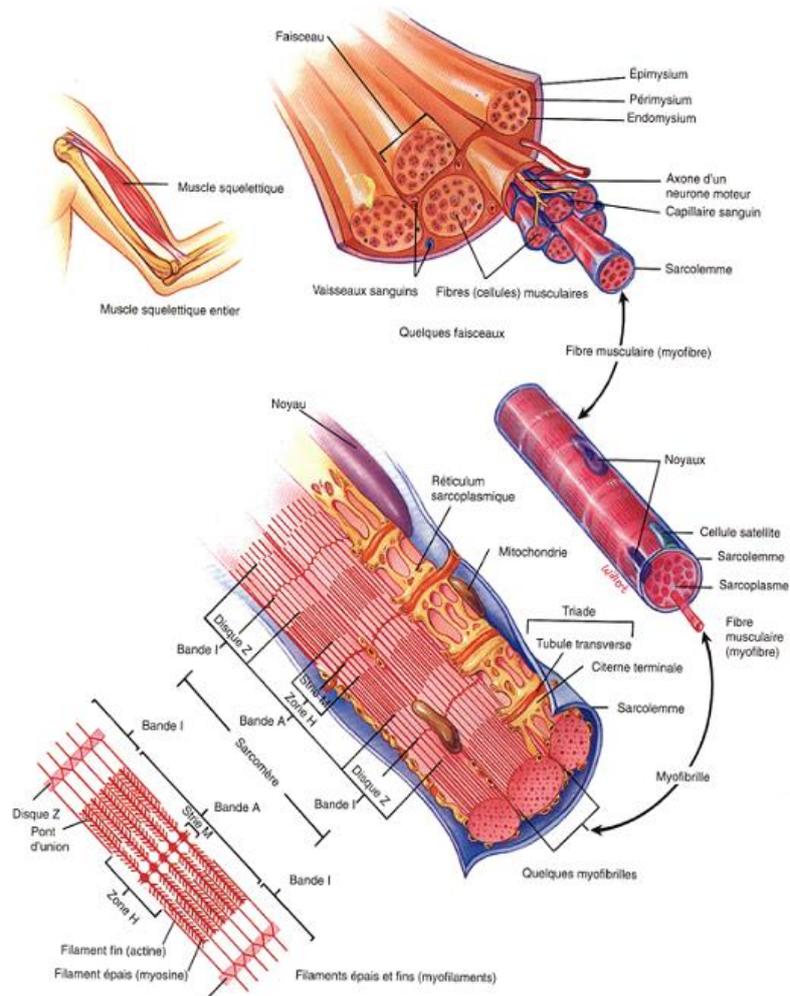


Figure 82 : composition macroscopique et microscopique d'un corps musculaire (Benabdallah 2008)

Les fibres peuvent être de deux types (Tortora and Grabowski 1994) :

- Le type I : appelées aussi fibres rouges, ce sont les fibres de l'endurance, les premières à être mobilisées lors d'un effort de peu d'envergure. Elles sont plus efficaces en métabolisme aérobie.
- Le type II : appelées également fibres blanches ou rapides, sont les fibres liées aux efforts intenses. Elles sont plus sensibles à la fatigue et fourniront donc un effort de courte durée. Elles sont plus efficaces en anaérobie.

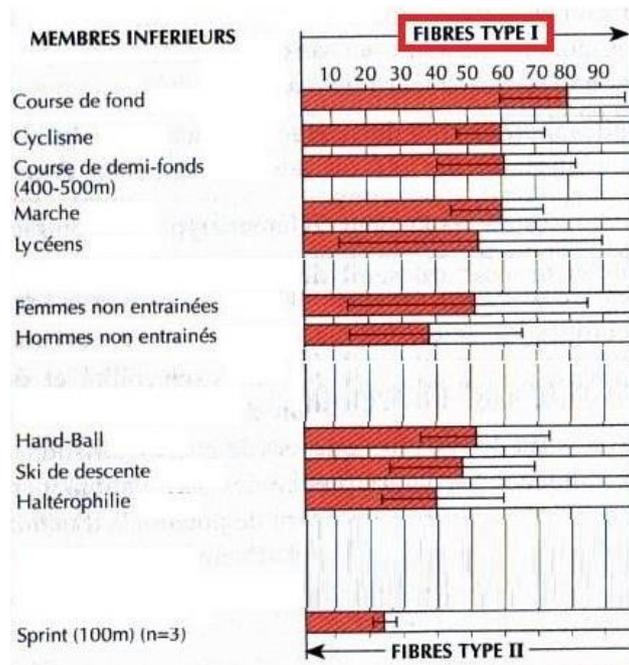


Figure 83 : répartition des fibres I et II chez les sportifs (Erblan and Vercauteren 1999)

Il existe des fibres intermédiaires qui se transformeront avec l'entraînement, avec l'âge et selon le sexe soit en fibre de type I soit en fibre de type II. C'est pour cela que la répartition des fibres musculaires diffère en fonction des sports pratiqués (Figure 83).

Les fuseaux neuromusculaires, capteurs proprioceptifs des muscles, se trouvent dans la partie charnue du muscle, ce sont des fibres spéciales, légèrement plus courtes et parallèles aux autres fibres et possédant des terminaisons nerveuses. Ces fibres captent les tensions des muscles pour transmettre au système nerveux central des informations sur leur état, c'est un système proprioceptif inconscient.

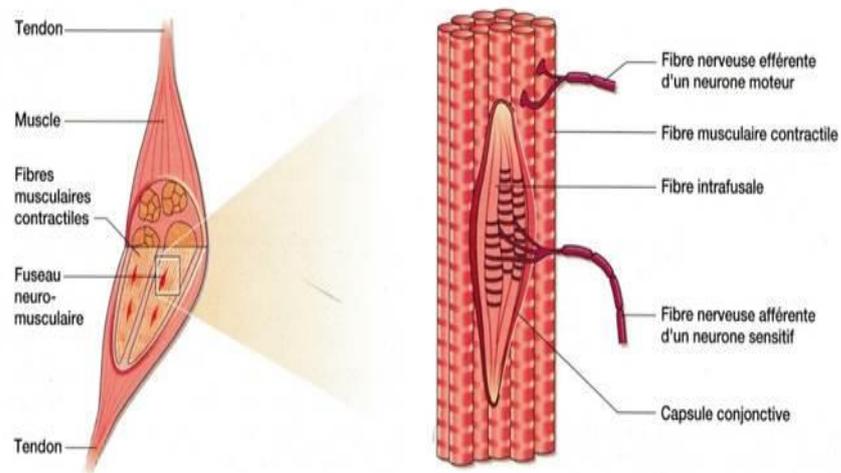


Figure 84 : fuseau neuromusculaire, les capteurs musculaires de la proprioception (Bergeron and Hervé 2001)

Ces fibres intrafusales sont séparées en fibres à sac nucléaire dont les noyaux sont regroupés en sac ou en chaîne nucléaire, plus fine, dont les noyaux sont disposés en ligne. Chaque fibre est soumise à deux types d'afférence :

- Afférence de type Ia, sensible à l'allongement et à la vitesse d'allongement, elle est importante pour le mouvement.
- Afférence de type II, plus présente sur les chaînes nucléaires, elle est sensible à l'allongement, et donc aux positions statiques. (Purves et al. 2015)

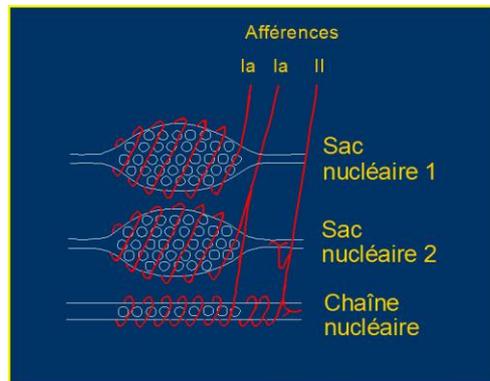


Figure 85: fibres et afférences du système nerveux musculaire (Purves et al. 2015)

b) Les tendons

Les tendons sont la partie du muscle qui le relie à l'os (Figure 86). Elle permet à la contraction des fibres musculaires de se traduire en mouvements squelettiques. Les faisceaux de fibre de collagène qui composent un tendon lui donnent une très forte résistance.

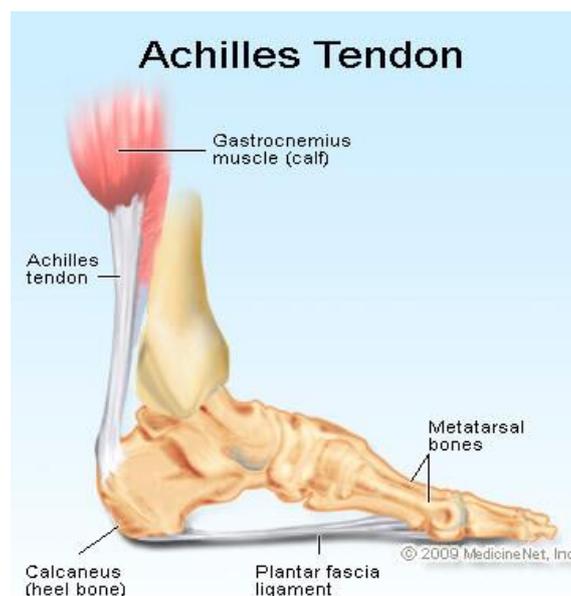


Figure 86 : le tendon d'Achille est la partie du muscle du mollet lié à l'os du talon (Shiel 2009)

À la jonction tendinomusculaire, l'organe tendineux de Golgi, organe neurotendineux ou fuseau neurotendineux, très fortement innervé par des rameaux de fibres afférentes du groupe Ib, permet aux informations de tensions musculaires de parvenir au système nerveux central (Figure 87). Alors que les fuseaux neuromusculaires signalent les changements de longueur des muscles, les organes tendineux de Golgi renseignent plus spécifiquement leurs changements de tension. Chaque organe est disposé en série avec une dizaine de fibres extrafuséales (Purves et al. 2015).

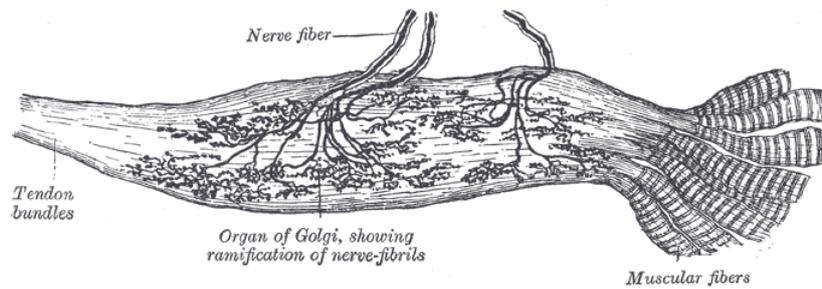


Figure 87 : organe de Golgi (Gray 1918)

c) Les ligaments

Les ligaments sont des tissus conjonctifs fibreux placés en bande entre les os pour les relier entre eux. Bien qu'il existe des ligaments reliant des organes entre eux, dans l'articulation, ils limitent les mouvements possibles tout en les orientant. Les articulations sont également dotées de leurs récepteurs sensori-moteurs : les récepteurs articulaires. Ces derniers ont été découverts récemment en étudiant des personnes ayant des articulations artificielles et ayant perdu une partie du contrôle moteur de leurs doigts (Purves et al. 2015).

3.2.3.2. Troubles musculosquelettiques liés aux interfaces gestuelles

a) TMS dans le monde du travail

La fatigue gestuelle est un domaine étudié depuis des années en médecine du travail, il est connu pour causer des troubles musculosquelettiques intimement liés aux maladies professionnelles :

"Le terme TMS regroupe une quinzaine de maladies reconnues comme pathologies professionnelles. Ces pathologies représentent plus de 70% des maladies professionnelles reconnues" (Aptel 2011).

Plusieurs auteurs considèrent que les mouvements réalisés dans le cadre du travail, leur répétition, l'amplitude et les charges impliquées sont responsables de ces lésions (Nielsen 2003), (Eaton 2008) (Aptel 2011), (Freivalds 2011). Ils déterminent plusieurs types de mouvements (Figure 88 et Figure 89) :

- L'abduction : mouvement éloignant un membre de la ligne centrale du corps
- L'adduction : mouvement inverse
- La pronation : mouvement de rotation d'une partie du corps (main, pied...) vers l'intérieur (pour la main, la pronation ramène le pouce vers le corps)
- La supination : mouvement de rotation inverse
- La flexion : mouvement pliant une articulation pour rapprocher deux parties de membre (genou, coude...)
- L'extension : mouvement inverse

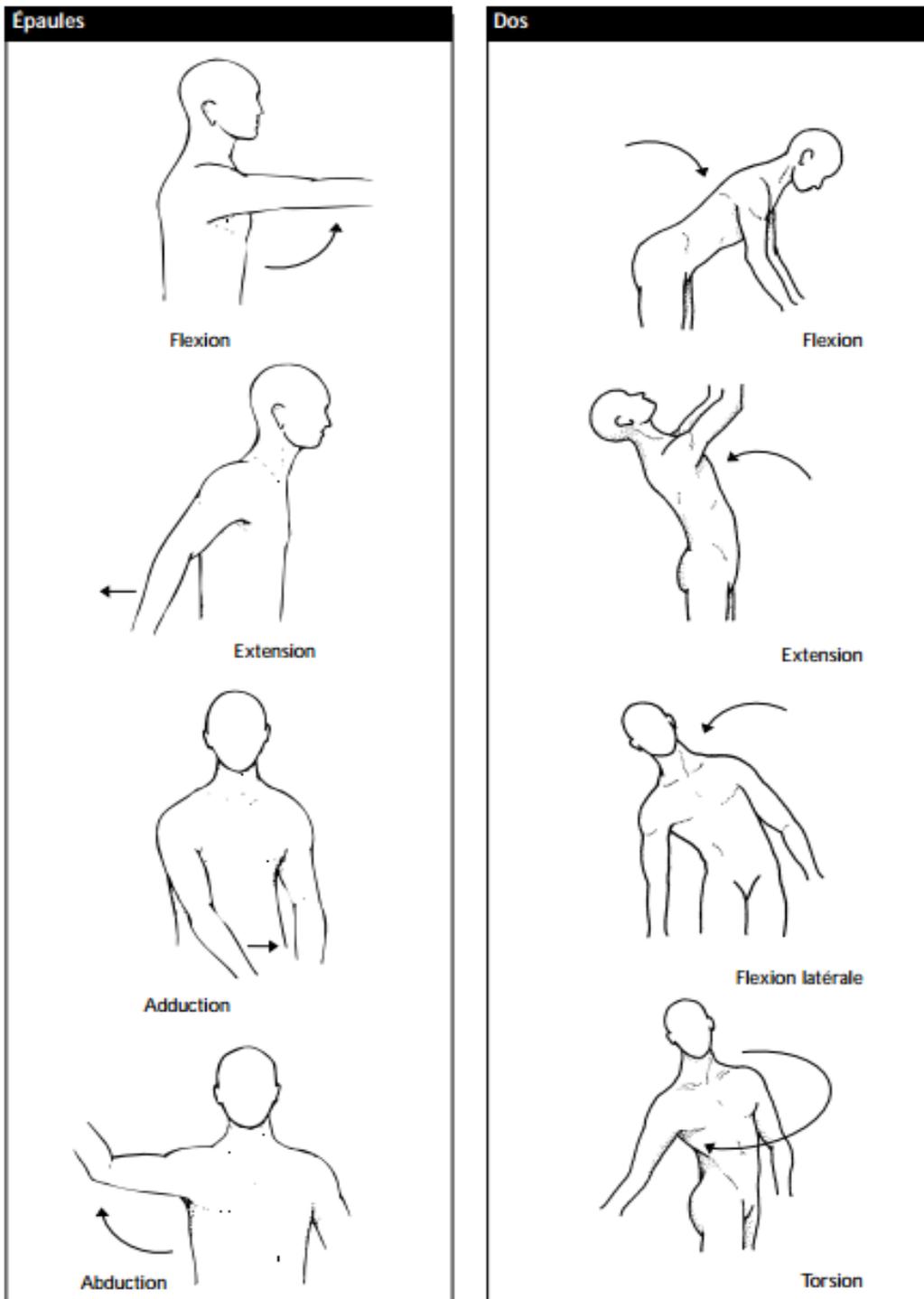


Figure 88: les différents mouvements articulaires (Simoneau 1996).

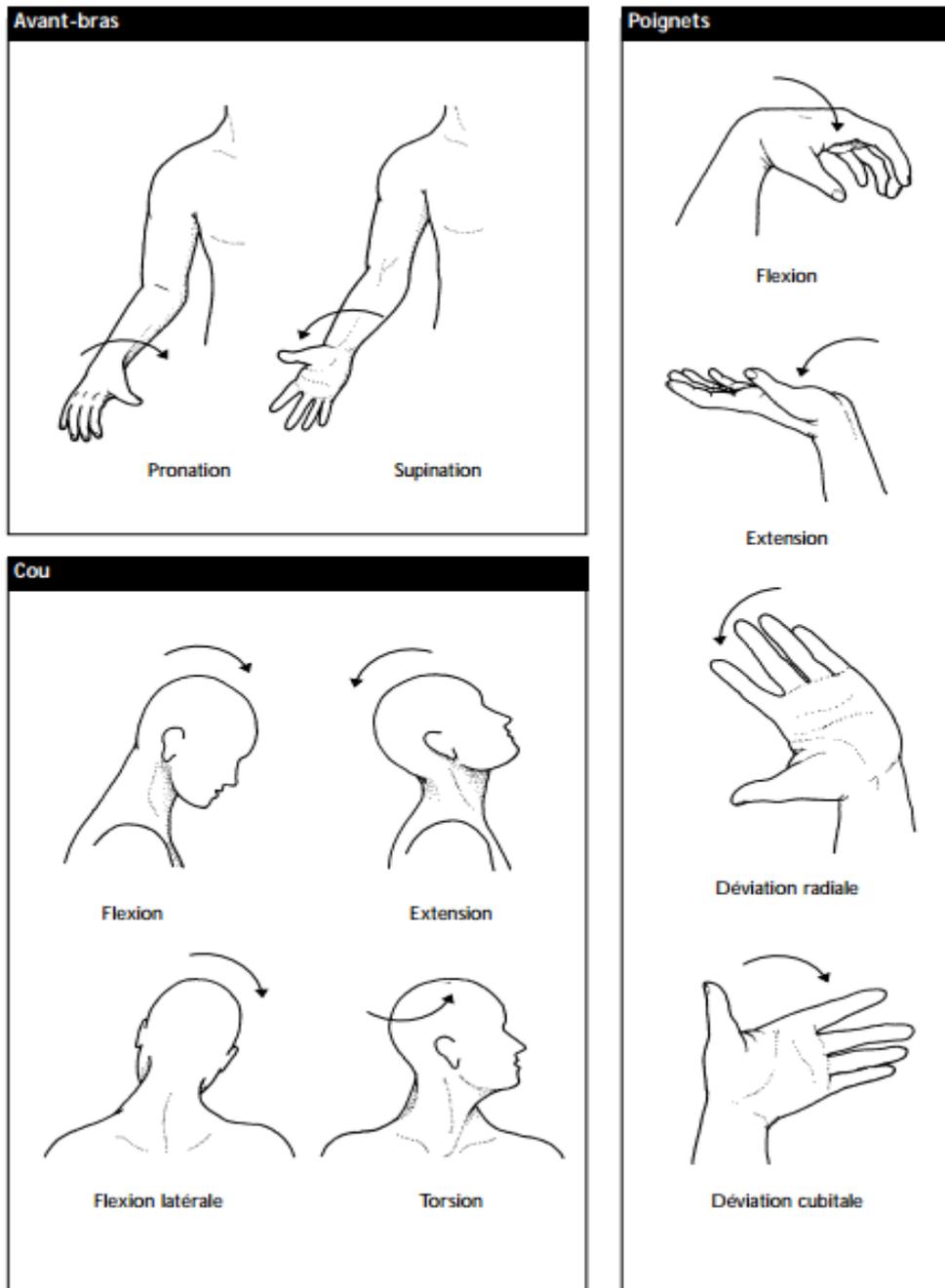


Figure 89: les différents mouvements articulaires, suite (Simoneau 1996).

Simoneau classe six facteurs de blessure (Simoneau 1996). :

- Les positions et postures contraignantes
- Les charges et forces appliquées ou poids portés
- Le travail musculaire statique
- Les agresseurs physiques (froids...)
- Les mouvements répétitifs



Figure 90 : les mouvements et charges provoquant des TMS dans le BTP, secteur dans lequel les TMS sont nombreux (Baranski et al. 2003)

Nous pourrions penser que certains de ces facteurs ne concernent pas la réalité virtuelle. Pourtant, même les poids et charges peuvent avoir une influence. Ainsi, Costello note que les casques de réalité virtuelle sont plus lourds que des lunettes stéréoscopiques classiques, ce qui peut occasionner une gêne au niveau du cou (Costello 1997).

b) TMS avec les interfaces d'interaction

Certains chercheurs déterminent que les gestes d'interactions très simples que nous faisons presque tous dans la vie de tous les jours, comme manipuler une souris peuvent être dommageables pour les muscles et articulations du bras (Lalumière and Collinge 1999) (Foley 2005), (Bhatt, Fernandes, and Dhag 2013). Les téléphones portables sont également connus pour provoquer des tendinites au poignet (Callet 2013) et à la nuque (Bacquaert 2016) chez les personnes écrivant beaucoup avec ce dernier (texto, mail...). Même en téléphonant, il est possible d'enflammer le nerf cubital (Darowish, Lawton, and Evans 2009).

De même, les effets des interfaces gestuelles dans le jeu commencent se faire ressentir sur le système musculosquelettique de certains joueurs. En effet, Spark montre en 2011 que les personnes qui jouent avec la « Wii » (Figure 91) peuvent être atteintes de tendinopathie (une inflammation ou blessure des tendons) de bursite (une inflammation des bourses séreuses), d'enthésites (une inflammation des intersections tendons/ligaments) ainsi que d'épicondylite (inflammation particulière du tendon du coude), ces blessures étant situées aux genoux, aux épaules, aux coudes et aux tendons d'Achille (Sparks , Coughlin, and Chase 2011). Jones et Hamming indiquent même que 67% des troubles musculosquelettiques ont lieu lors de sport virtuel impliquant l'utilisation de la Wii (Jones and Hammig 2009).



Figure 91: les jeux sur Wii occasionneraient des TMS (Sparks , Coughlin, and Chase 2011)

c) Vibrations en retour d'effort

Ces systèmes à retour d'effort peuvent s'avérer très efficaces pour la perception proprioceptive, ils peuvent cependant présenter des instabilités provoquant des vibrations. Celles-ci, non seulement perturbent la perception des objets, mais peuvent également provoquer des blessures à plus ou moins long terme. En effet, selon Gemme, les vibrations sur les mains et les avant-bras, peuvent causer le syndrome de Raynaud (Gemme et al. 1987). Cette maladie provoque une diminution de la vascularisation des extrémités (dans ce cas précis, des doigts). Il semblerait également que ces vibrations puissent induire des problèmes arthritiques, principalement une ostéoarthrose (une usure de l'articulation suite à des charges excessives) des poignets, des coudes (Copeman 1940) ainsi que des épaules (Stenlund et al. 1992). Ces désordres musculosquelettiques peuvent être provoqués par le fait que les sujets doivent fournir plus de force musculaire pour maintenir un objet vibrant afin d'en garder le contrôle (Lundström and Johansson 1986). En plus de ces problèmes vasculaires et musculosquelettiques, les vibrations peuvent avoir un impact sur le système nerveux. Plusieurs études montrent un lien entre les vibrations et le syndrome du canal carpien (Thompson , Myers, and Kriebel 1988) (Silverstein, Fine, and Stetson 1987). Toutes ces études sont menées dans le monde du travail, pour des machines vibrantes et des marteaux piqueurs, mais il n'est pas déraisonnable de penser que leurs conclusions pourraient également s'appliquer aux systèmes à retour d'effort.

3.2.3.3. État de l'art des réductions des contraintes musculosquelettiques

a) Adaptation des gestes imposés

Nielsen estime qu'il conviendrait de respecter ces quelques règles de précaution dans les applications de réalité virtuelle (Nielsen et al., 2003) :

- Ne pas provoquer de positions extrêmes
- Ne pas proposer de gestes trop répétitifs
- Permettre au sujet de reposer ses muscles entre deux interactions
- Ne pas provoquer de station prolongée
- Permettre que des positions neutres soient favorisées
- Ne pas provoquer un arrêt des fluides corporels par des forces internes ou externes.

L'idée est de proposer des gestes qui ont été validés par un panel de sujets, que ce soit pour de l'interaction gestuelle pour la télévision (Vatavu and Zaiti 2014) (Vatavu, Pentiu, and Chaillou 2005) ou avec des gestes très limités d'une seule main (Chan et al. 2016). Par exemple, Muse et Pers font faire les interactions trois fois à leurs sujets avant de les valider (Muse and Peres 2011). Cette technique avait déjà été éprouvée sur tablette et smartphone (Ruiz, Li, and Lank 2011) ou surfaces tactiles (Wobbrock, Morris, and Wilson 2009).

b) Gestes proposés par l'utilisateur

Jégo propose de ne pas imposer de geste à ses sujets et à les laisser en proposer. Les sujets proposent un geste, qu'ils effectuent trois fois, le système l'enregistre comme étant la commande pour une action virtuelle précise (dans son étude, l'ouverture d'une boîte)(Figure 92). Si cette étude avait pour sujet principal la mémorisation (Jégo, Paljic, and P. 2013), elle peut également être utilisée pour permettre à ses sujets de choisir des gestes qui leur semblent moins fatigants, même si l'auteur constate que parfois les gestes proposés sont regrettés par les sujets justement parce qu'ils sont longs ou fatigants (Jégo 2013).

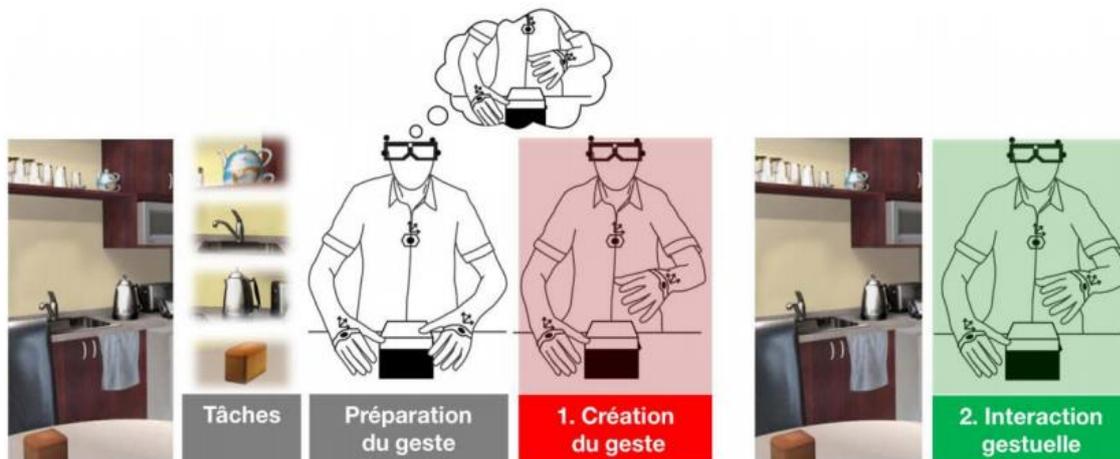


Figure 92 : création des gestes par les sujets de Jégo (Jégo 2013)

c) Vérification des gestes automatisés

Pontonnier étudie la différence entre des gestes effectués en réel et des gestes effectués en virtuel, à l'aide d'un dispositif présentant les mesures suivantes (Pontonnier et al. 2014) :

- RULA
- EMG (Figure 93)

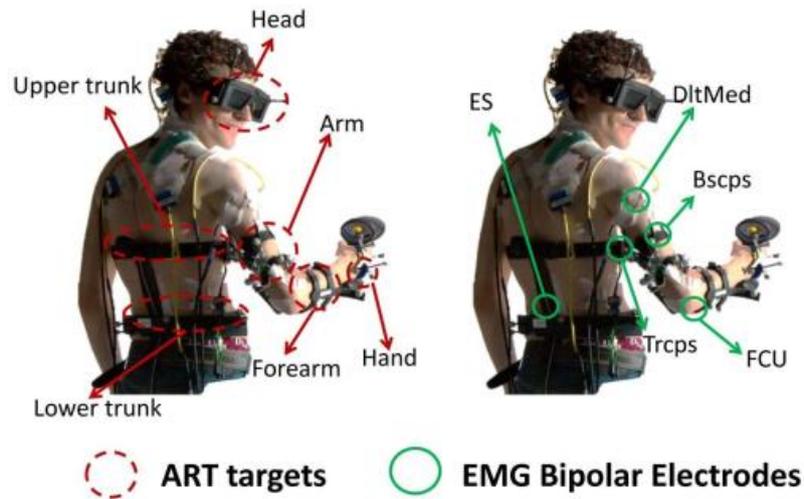


Figure 93 : Dispositif de mesure de Pontonnier (Pontonnier et al. 2014)

Il montre notamment que les gestes virtuels qu'il propose à ses sujets, métaphores très simplifiées du geste réel provoquent moins de fatigue gestuelle (voir Figure 175).

Ergodit (et ergodesign, qui lui est associé), produit par « Haptique et Réalité virtuelle » (voir Figure 94), et ergowide3 (Figure 95), produit par « Clarté » (Clarte n.d.) sont deux dispositifs industriels permettant de simuler des gestes de travail dans un système immersif pour les comparer aux règles de RULA (McAtamney et Corlett, 1993).



Figure 94 : ergodesign et Ergodit, d'HRV (Haptique et Réalité Virtuelle 2014)

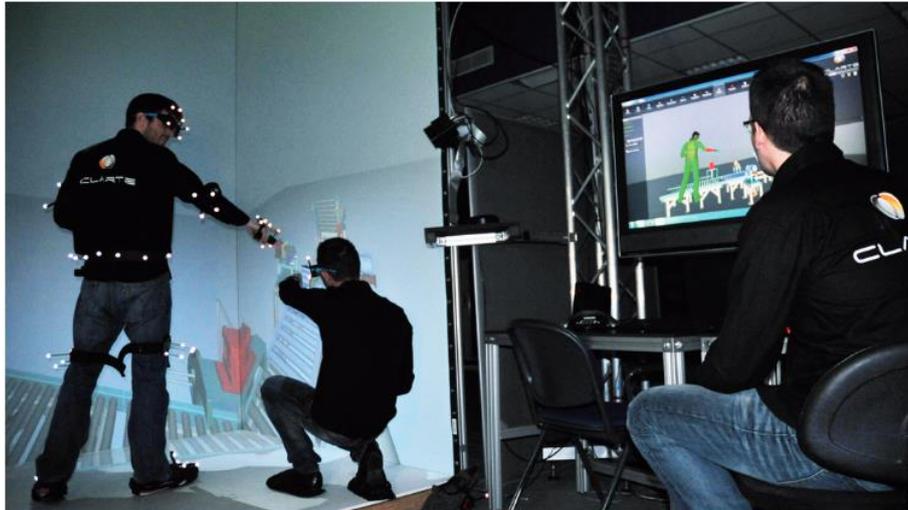


Figure 95 : ergo-wide – Clarté (Clarté 2015)

d) Conclusion des réductions des troubles musculosquelettiques

Contrairement aux techniques de réduction de la fatigue visuelle ou du cybermalaise, les techniques de réduction des troubles musculosquelettiques ne modifient aucunement le stimulus, mais pour l'instant, elles analysent le geste et prévoient les troubles qui pourraient être occasionnés. Nous pensons qu'à l'heure actuelle, les méthodes d'étude et de réduction de ces troubles musculosquelettiques semblent moins avancées que les études sur la fatigue visuelle, domaine étudié depuis plus longtemps.

3.2.4. Autres troubles

3.2.4.1. Crise photosensible

Les crises photosensibles, aussi connues par le grand public comme « Pokémon incident » à cause des nombreuses crises provoquées au Japon par ce dessin animé (CNN 1997), sont des crises d'épilepsie liées aux modifications rapides de la luminosité, généralement associées à la télévision (Harding and Fylan 1999) (Harding and Jeavon 1994). Ce trouble épileptique peut se produire aussi bien pour des images monoscopiques que stéréoscopiques. Bando estime que les lunettes stéréoscopiques à obturation pourraient augmenter le risque de crise (Bando, Iijima, and Yano 2012).

3.2.4.2. Influence sur la psychomotricité

Certains chercheurs estiment que les images stéréoscopiques peuvent influencer l'équilibre, surtout chez les enfants (Read et al. 2015). Ces chercheurs mesurent la coordination et la psychomotricité après un film en relief de 90 minutes sur 433 sujets de 4 à 87 ans à travers 4 tâches :

- Une tâche de suivi de fil avec un anneau
- Une tâche d'équilibre sur une poutre
- Une tâche de passage d'obstacle
- Une tâche de passage de rampe

Des accéléromètres sont placés sur les sujets pour analyser leur posture. Il semblerait qu'aucune différence statistiquement significative n'ait pu être mesurée chez les sujets adultes, mais chez les enfants, particulièrement sur la tâche de la rampe, le groupe exposé aux images stéréoscopiques manifeste des pertes d'équilibre après exposition.

3.2.4.3. Lumière bleue

La lumière bleue est une partie du spectre du soleil qui est partiellement filtrée par la couche atmosphérique (et notamment la couche d'ozone). Ce domaine de longueur d'onde de la lumière naturelle est connue pour provoquer des DMLA (Dégénérescence maculaire liée à l'âge) (Tomany et al. 1960) (Young 1988) (DelCourt et al. 2012). Cependant, si Serge Picaud cosigne un article indiquant que les fréquences comprises entre 415 et 455 nanomètres détériorent effectivement les cellules rétiniennes (Arnault et al. 2013), il indique à propos des émissions lumineuses des écrans de téléphones : *"il faut relativiser, car les intensités lumineuses produites par nos écrans sont quand même relativement faibles par rapport au soleil"* (Sciences et avenir and AFP 2015).

Jusqu'à l'année dernière, il n'existait que des présomptions de chercheurs sur l'influence de cette lumière bleue d'origine électronique sur l'homme. Par exemple, le Dr Thierry Bury, de l'hôpital des Quinze-Vingts à Paris indique en 2016 : *« Il n'existe pas à ce jour de preuve clinique du risque associé aux LED, il n'y a pas de cas avéré chez l'homme [...] Nous ne pouvons qu'extrapoler les études in vitro et animales. Cependant, devant les fortes présomptions, le principe de précaution est envisageable, notamment vis-à-vis des jeunes générations, et plus encore vis-à-vis des écrans que de l'éclairage »* (Observatoire de La Santé Visuelle et Auditive Du Groupe Optic 2000 2016). Dans le même article, Pr Gilles Renard, directeur scientifique de la société française d'ophtalmologie ajoutait *« Les lunettes de réalité virtuelle, qui exposent les yeux à des DEL (diode électroluminescente) d'un écran de téléphone portable à 3 cm de distance, sont à proscrire avant 15 ans et doivent être utilisées pendant 30 minutes maximum par un adulte »*.

En 2003, Lockley présume également qu'un autre effet de la lumière bleue des casques de réalité virtuelle pourrait perturber le rythme circadien, c'est-à-dire notre rythme biologique calé sur le cycle de luminosité quotidienne (Lockley, Brainard, and Czeisler 2003) impliquant des troubles du sommeil. Depuis cette publication, une étude de 2017 semble confirmer en partie ces dernières présomptions, au moins subjectivement. En effet, Heo et al. montrent qu'une exposition aux lumières bleues d'un téléphone portable le soir provoque de façon statistiquement significative une baisse de l'envie de dormir, une plus grande confusion et une perte de concentration. Ils notent également des hausses du taux de mélatonine, de la température du corps, et du cortisol sérique, sans que celles-ci soit statistiquement significatives (Heo et al. 2017).

3.3. Conclusion de l'état de l'art

Nous voyons, qu'en l'état, l'impact des images stéréoscopiques sur le système visuel est beaucoup plus avancé, ou en tout cas, fait l'objet de beaucoup plus de publications que l'impact des interactions gestuelles sur les troubles musculosquelettiques. Cette différence est probablement liée au fait que la stéréoscopie est connue du grand public et des scientifiques depuis beaucoup plus longtemps que l'interaction gestuelle, et que la technologie pour la produire est beaucoup moins complexe que celle de l'interaction gestuelle.

Nous constatons également que les études sur la vision stéréoscopique du dix-neuvième siècle traitent surtout des mécanismes de cette vision artificielle (souvent pour comprendre ceux de notre vision naturelle). À partir des années 1960, paraissent des études faisant état de fatigues visuelles liées à ces images stéréoscopiques ainsi que les premières recommandations sur les stimulus à présenter. À la fin de la décennie 1990, les tentatives pour réduire les fatigues visuelles commencent à se multiplier mais l'efficacité des systèmes proposés n'est pas encore quantifiée. Depuis, ces systèmes se sont perfectionnés, des solutions très différentes et variées ont été trouvées pour réduire ces contraintes physiologiques. Ces dernières années, si beaucoup d'études se concentrent encore sur l'amélioration du ressenti des sujets (une préoccupation apparue au début du siècle), de

plus en plus d'entre elles intègrent des mesures, non plus de confort visuel, mais directement de fatigue visuelle et de modification physiologique du fonctionnement et des capacités du système visuel soumis aux images stéréoscopiques. Cette évolution est positive mais ne permet pas encore des comparaisons entre les systèmes en raison de leur hétérogénéité.

Tous les systèmes proposés atténuent le conflit visuel en modifiant les images proposées. Ces modifications ont des influences sur la perception du relief, des courbures, des détails du monde virtuel... Mais ces variations perceptives ne sont pas toujours évaluées et, bien souvent, les auteurs n'indiquent pas le type de tâches pour lesquelles elles seraient intéressantes ou au contraire à proscrire. Un concepteur d'une application de réalité virtuelle ne peut actuellement pas savoir ce qu'il perd ou gagne en implémentant telle ou telle solution pour limiter la fatigue visuelle générée par son application en fonction de la perception nécessaire pour effectuer au mieux la tâche. Ces comparaisons feront partie probablement de la prochaine étape scientifique.

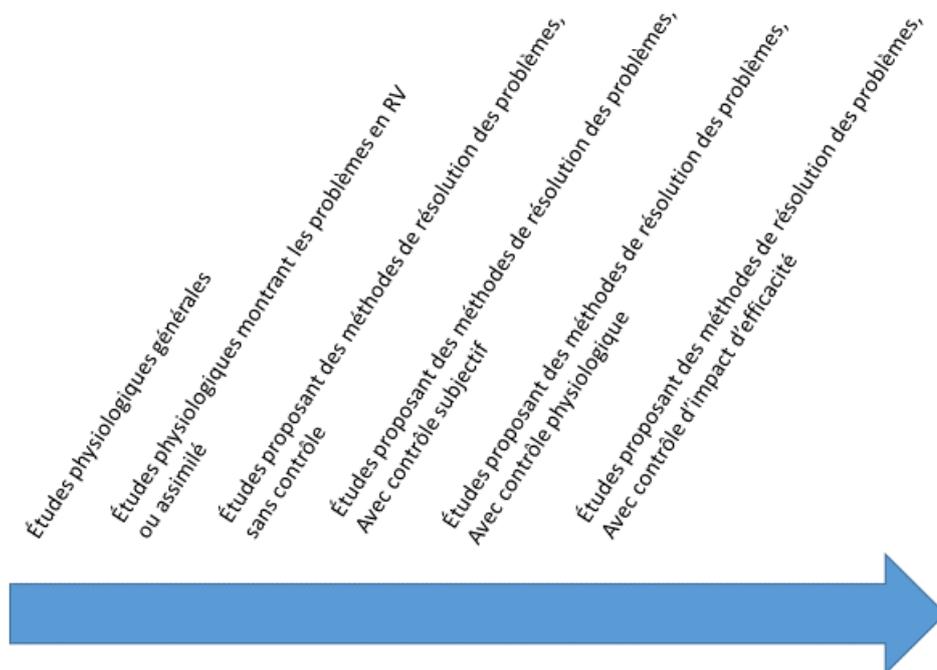


Figure 96 : évolution des études sur la réduction des contraintes physiologique en RV

On peut présumer que les études sur les interactions gestuelles suivront un cheminement semblable à celui de la Figure 96. Si l'étude du fonctionnement physiologique remonte au début de la médecine, nous en sommes pour l'instant à l'étude des contraintes liées au stimulus et et à la mesure de celles-ci. En effet, les études mettant en lumière les contraintes musculosquelettiques commencent à apparaître, elles décrivent les blessures liées aux jeux, les contraintes lors de métaphores en RV, etc. parfois basées sur des études plus anciennes sur les blessures au travail. Cependant leur nombre encore limité ne permet pas d'en tirer des enseignements suffisamment étayés en vue de mener de nouvelles études pour lutter contre les contraintes et disposer de résultats fiables. Par exemple, nous ne connaissons pas encore exactement la différence entre un geste effectué en environnement virtuel et en environnement réel ni ses raisons, ni ses implications.

Des études sur la vision sont encore nécessaires pour pour parfaire les solutions proposées et les évaluer, pour savoir quelles sont celles qui seraient plus utiles et efficaces dans des situations bien définies. Tandis que les études sur la fatigue gestuelle sont encore au niveau de la mesure. Il manque

encore des outils pour étudier de façon très précise la fatigue gestuelle afin de proposer des solutions pour y remédier.

4. Réduction des contraintes physiologiques

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la réalité virtuelle et les nouvelles interfaces peuvent provoquer certains contraintes et conflits physiologiques. Parmi ceux-ci, certains d'entre eux ont été étudiés et des systèmes ont pu être mis au point pour diminuer leurs effets négatifs. Deux contraintes physiologiques sont présentées ci-après : le conflit visuel lié aux interfaces stéréoscopiques et les contraintes musculosquelettiques liées aux interfaces haptiques et aux interfaces gestuelles. Après les avoir présentés, nous expliquons les méthodes, systèmes et algorithmes mis en place pour les réduire.

4.1. Réduction des conflits visuels

4.1.1. Réduction du conflit accommodation vergence par relâchement de l'accommodation

4.1.1.1. Contexte

Si le conflit accommodation-vergence provoque de la fatigue visuelle, une approche pour limiter cette fatigue consiste à relâcher une des deux composantes du conflit. Dans cette section, nous proposons de relâcher l'accommodation pour qu'elle suive la vergence. En effet, si on analyse les travaux de Fujikake (Fujikake et al. 2014), on constate que lorsque l'image est floue, l'accommodation suit la vergence, ce qui réduit le conflit accommodation vergence. L'idée est donc de relâcher l'accommodation dans certaines parties de l'image pour réduire le conflit accommodation vergence global. Les études et logiciels qui suivent sont le fruit de deux thèses de doctorat : la mienne et celles de David Aurat (directeurs de thèse : Philippe Fuchs et moi-même).

Une première idée, consiste à relâcher l'accommodation aux endroits de fortes disparités, donc aux endroits où le conflit accommodation-vergence est le plus fort. La seconde consiste à relâcher l'accommodation là où la personne ne regarde pas, donc aux endroits « inutiles » à un instant T.

a) RAFA 1 : Relâchement de l'accommodation aux endroits où le conflit est le plus fort

Le premier module logiciel consiste à augmenter la cohérence sensori-motrice en réduisant le conflit accommodation-vergence en supprimant certaines hautes fréquences spatiales aux endroits des plus fortes disparités. En effet, dans le paragraphe 3.2.13.2.1.2c), nous avons vu que Jérôme Perrin a interpolé les données de Wöpkins pour en déduire les zones de confort. Cet algorithme part de ces données, mais supprime les hautes fréquences spatiales jusqu'à ce que le point soit dans la zone la plus confortable.

Si nous repartons de la fonction de Perrin avec $C(d,f)$ le confort visuel, f la fréquence spatiale présente et d la disparité :

$$C(d, f) = a(d - d_0 - kf^{k'}) \quad [4-1]$$

Avec les paramètres d'interpolation :

$$\begin{aligned} a &= -0.010 \\ d_0 &= 18.9 \\ k &= 221.1 \\ k' &= -0.74 \end{aligned} \quad [4-2]$$

Nous pouvons en déduire que pour chaque pixel, la fréquence maximale acceptable pour un confort donné est :

$$f = \sqrt[k]{\frac{1}{ka}(ad - ad_0 - C(f, d))} \quad [4-3]$$

La disparité est calculée en temps réel pour chaque point en fonction de la position du sujet et de la profondeur virtuelle du pixel (Figure 97).

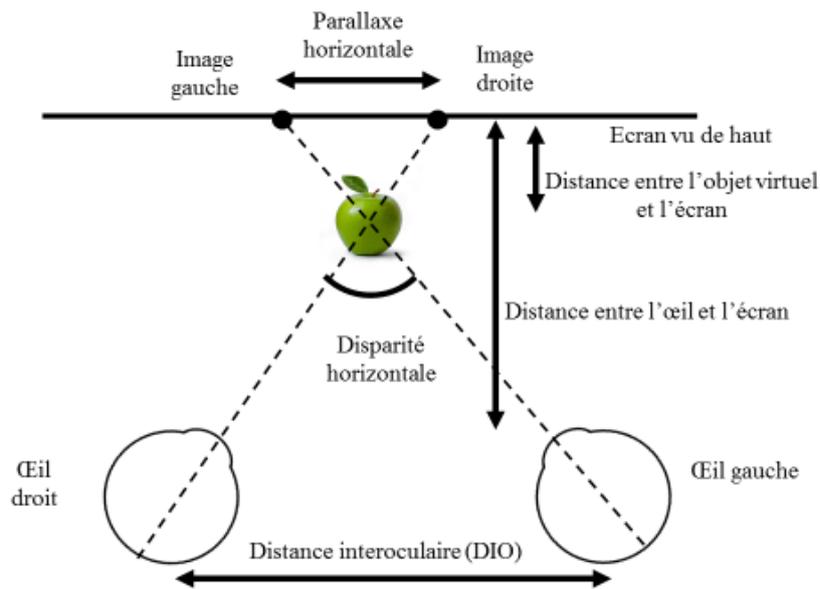


Figure 97 : calcul de la disparité rétinienne en chaque point

Si

- $DistObjet$ est la distance séparant l'objet virtuel de l'écran
- $DistOeil$ est la distance séparant l'œil de l'écran
- DIO est la distance interoculaire
- $ParHor$ est la parallaxe horizontale liée au point virtuel

Nous pouvons donc écrire selon la loi des triangles :

$$ParHor = \frac{DistObjet * DIO}{(distObjet - DistOeil)} \quad [4-4]$$

Pour supprimer les hautes fréquences spatiales, un flou est appliqué sur la zone à traiter. Pour des questions de rapidité de calcul, ce flou était une simple moyenne glissante sur un carré dont la largeur dépend de la plus haute fréquence acceptable. En effet, plus ce carré est grand, plus le flou est prononcé, plus les fréquences spatiales présentes sont basses. Nous pouvons donc établir la relation entre la largeur de la zone de calcul et la plus haute fréquence. Nous avons vu au paragraphe 3.2.13.2.1.2c) que l'unité des fréquences spatiales est le cycle par degré (Cpd). Nous pouvons donc calculer la distance à l'écran (*distEcran*) pour un Cpd (Figure 98).

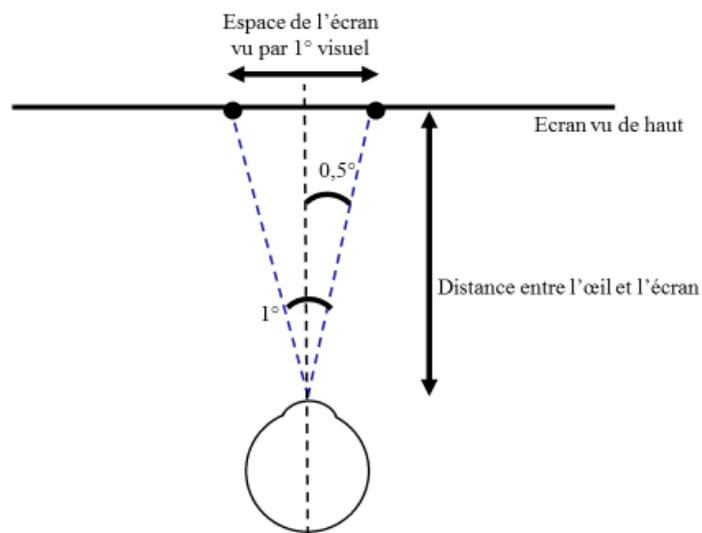


Figure 98 : calcul de la distance vue à l'écran dans 1° visuel

$$\tan\left(\frac{1^\circ}{2}\right) = \frac{distEcran / 2}{distOeil} \quad [4-5]$$

Donc :

$$DistEcran = 0.0087 * distOeil \quad [4-6]$$

Avec *PixParDeg* le nombre de pixels capturés par un degré visuel et *largPix* la largeur d'un pixel, nous pouvons écrire :

$$PixParDeg = \frac{0.0087 * distOeil}{largPix} \quad [4-7]$$

Les moyennes seront donc calculées sur ce nombre de pixels divisé par la fréquence spatiale acceptée pour une disparité donnée.

Publication :

Laure Leroy, Philippe Fuchs, and Guillaume Moreau, 2012, Visual fatigue reduction for immersive stereoscopic displays by disparity, content and focus-point adapted blur, IEEE transaction on industrial electronics Volume: 59, Issue: 10

Laure Leroy, Philippe Fuchs, Guillaume Moreau, Real-time adaptive blur for reducing eye strain in stereoscopic displays, ACM Transactions on Applied Perception (TAP), v.9 n.2, p.1-18, June 2012

Laure Leroy, Alexis Paljic, Philippe Fuchs, Guillaume Moreau, 2010, Real time comfort enhancement in stereoscopic displays by disparity and content-adapted blur. Proceeding ISIE

Laure Leroy. Diminution de la fatigue visuelle en stéréoscopie. ISTE éditions. Informatique. Paris, 2016.

Laure Leroy. Eyestrain Reduction in Stereoscopy. ISTE éditions. Informatique. Paris, 2016.

Projet :

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet IHS10, Projet FUI de 36 mois fini le 01/03/2010

b) RAFA 2 : Relâchement de l'accommodation aux endroits non regardés

La seconde possibilité de relâchement de l'accommodation par flou adaptatif est un flou qui ne s'adapte plus aux disparités, mais à l'endroit où la personne regarde.

Ce module s'utilise avec un eye-Tracker capable de donner en temps réel la position de l'œil. Le principe est de relâcher l'accommodation pour des points qui ne sont pas au centre de l'intérêt de la personne. Ce flou est également une moyenne glissante, mais, elle ne dépend plus de la position de la personne ou des objets virtuels, seulement du point de fixation du regard de la personne utilisant l'interface.

L'algorithme consiste à présenter un cercle non traité autour du point de fixation, une zone floue en vision périphérique et une transition linéaire entre les deux zones. Il serait possible de faire varier la taille de la zone en fonction de la fatigue visuelle de la personne, du temps prévu d'immersion...

Sur la Figure 100, nous pouvons voir une zone nette très étendue, permettant des tâches précises nécessitant beaucoup de mouvements oculaires rapides, tandis que la Figure 101 montre une zone nette réduite à la taille de la vision centrale définie par la répartition des cônes sur la rétine (Anderson 1991).

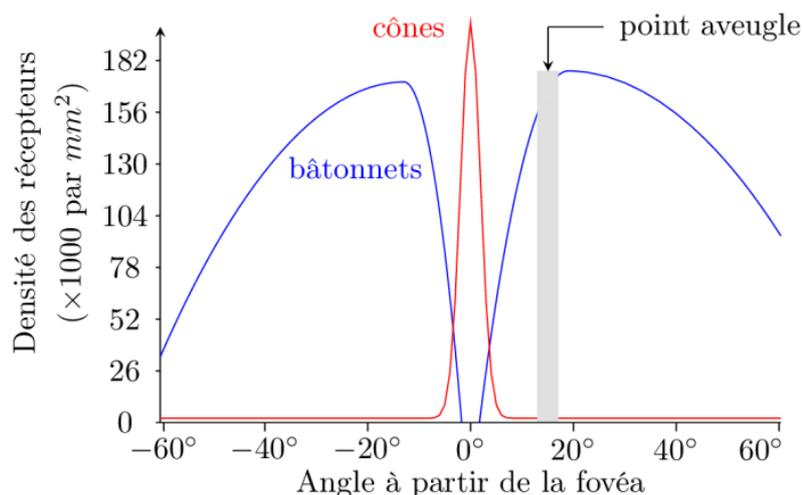


Figure 99 : répartition des cônes et bâtonnets autour de la fovéa (Aurat 30 mai 2016)

Cette dernière version est censée être moins fatigante que la version avec la grande zone nette, simplement parce que l'accommodation est relâchée sur une plus grande zone.



Figure 100 : grande zone nette, vision périphérique floue (Aurat 30 mai 2016)

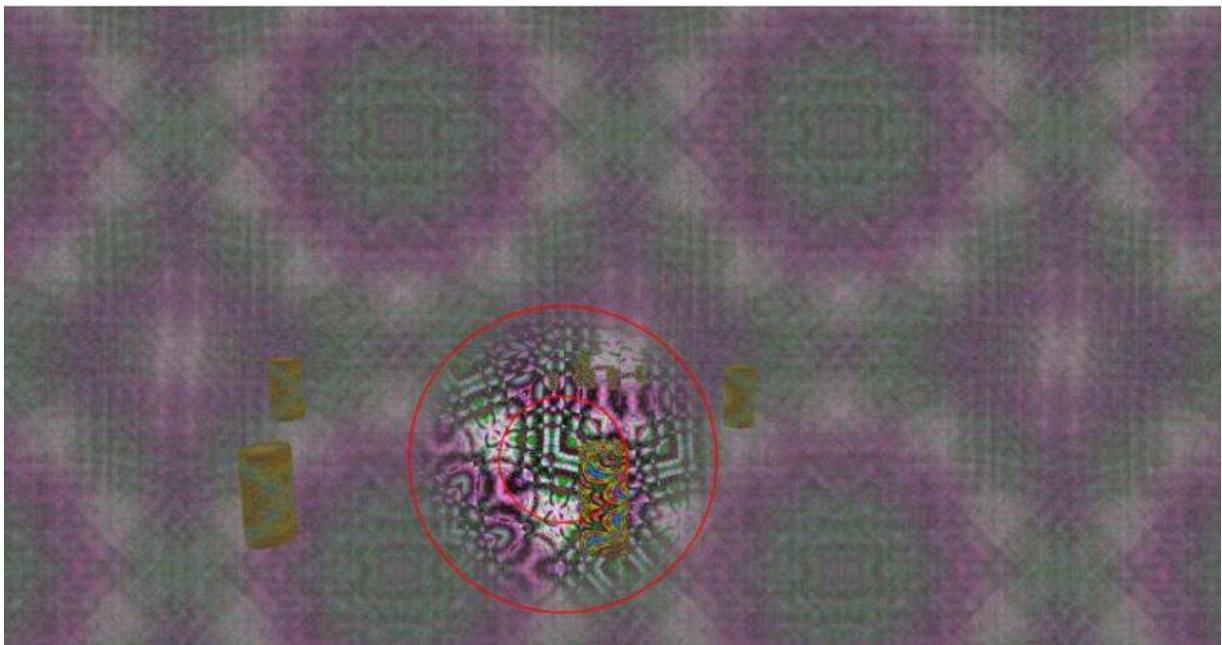


Figure 101 : petite zone nette, vision périphérique floue (Aurat 30 mai 2016)

Thèse :

Aurat, David. 30 mai 2016. Immersion visuelle tridimensionnelle haute performance par suivi du mouvement des yeux. Paris : École nationale supérieure des Mines de Paris.

Publications :

Aurat, David, Laure Leroy, Olivier Hugues, and Philippe Fuchs. "Improving Shape Perception in Virtual Reality Systems Using Toed-in Cameras," 2016. VRIC 2016, Mar 2016, Laval, France. 2016

4.1.1.2. Étude de leurs influences

Ces deux modules algorithmiques peuvent être utilisés ensemble pour une réduction de la fatigue oculaire plus importante, mais ils peuvent également être utilisés séparément. Comme je l'ai rappelé dans la conclusion du chapitre précédent, il est important d'évaluer l'amélioration engendrée par les systèmes proposés. Dans ce but, nous avons mesuré l'impact de ces deux algorithmes sur la réduction de la fatigue visuelle et sur l'efficacité des sujets dans la réalisation de tâches données. Dans les paragraphes suivants nous présentons l'impact sur la physiologie du système visuel. Les impacts sur la perception et la tâche seront présentés dans le chapitre 5 traitant la prise en compte des aspects psychophysiques dans l'élaboration des améliorations.

a) Mesure de fatigue visuelle

Pour pouvoir mesurer l'efficacité de RAFA1 et RAFA2 ainsi que des algorithmes présentés dans la section suivante, nous effectuons des mesures des capacités oculomotrices des sujets avant et après immersion. En effet, pendant une immersion provoquant une fatigue visuelle, les capacités oculomotrices des sujets sont diminuées. Nous en mesurons principalement trois : l'acuité stéréoscopique, le punctum proximum d'accommodation et la facilité d'accommodation. Comme ces trois mesures seront utilisées pour tous les tests à des fins comparatives, nous les présentons plus en détail ci-dessous.

1) L'acuité stéréoscopique

L'acuité stéréoscopique est la plus petite disparité rétinienne qui peut être perçue par un sujet (Figure 102). Elle mesure les capacités de perception de relief binoculaire.

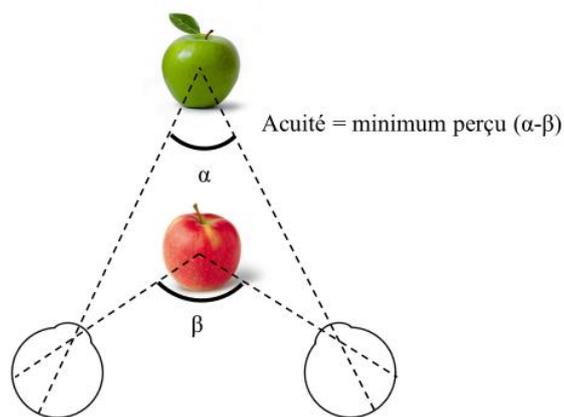


Figure 102 : l'acuité stéréoscopique est le plus petit relief perçu par le sujet

Il existe beaucoup de façons de la mesurer, mais nous la mesurons avec un test de Wirt (Figure 103). Ce test présente une série de neuf groupements de quatre cercles. Dans chaque groupement, un des quatre cercles présente une certaine disparité qui décroît en fonction du numéro de groupement. Le sujet doit indiquer le cercle présentant un relief dans le groupement numéro 1, puis le numéro 2 et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il ne puisse plus discriminer le cercle présentant des disparités.



Figure 103 : test de Wirt

2) Le punctum proximum d'accommodation

Le punctum proximum d'accommodation est la plus petite distance à laquelle un sujet peut accommoder (Figure 104). C'est une des deux données de l'amplitude d'accommodation. Il se mesure en rapprochant progressivement un texte du sujet jusqu'à ce qu'il indique qu'il n'arrive plus à lire, on mesure la distance entre les yeux et le point indiqué.

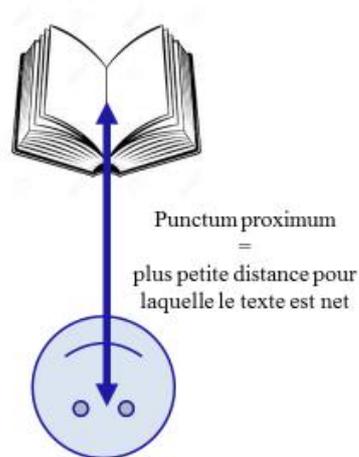


Figure 104 : le punctum proximum d'accommodation

3) La facilité d'accommodation

La facilité d'accommodation est la rapidité avec laquelle un sujet peut faire varier son accommodation entre un stimulus rapproché et éloigné. Il se mesure avec un *flipper Lens test* : des lentilles de -2 et +2 dioptries modifient très rapidement la distance du stimulus (Figure 105). On présente un texte à lire à un sujet et l'on place ces lentilles devant ses yeux. Lorsque le sujet indique qu'il peut accommoder, on permute le "flipper" pour lui présenter les lentilles de dioptries opposées et ainsi de suite. Le nombre de permutations donne la facilité d'accommodation.

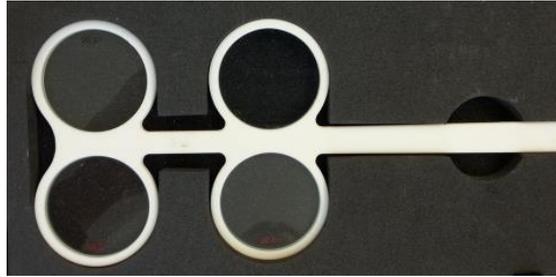


Figure 105 : le flipper Lens test

b) RAFA1

1) L'acuité stéréoscopique

Comme nous pouvons le voir sur la Figure 106, une immersion en stéréoscopie d'une demi-heure avec des stimulus chargés en hautes fréquences spatiales provoque une perte d'acuité stéréoscopique qui peut être diminuée de façon significative par le traitement RAFA1.

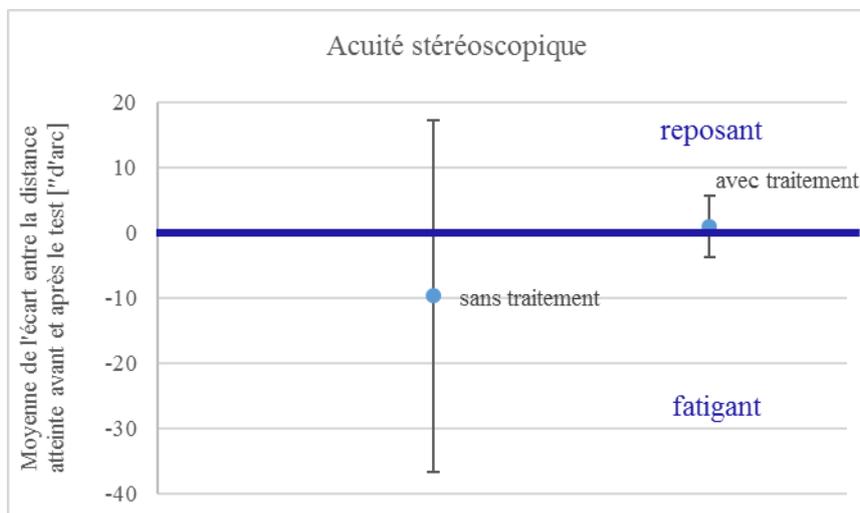


Figure 106 : effet de RAFA1 sur l'acuité stéréoscopique

2) Le punctum proximum d'accommodation

De même, le traitement RAFA1 a des effets bénéfiques et statistiquement significatifs sur la détérioration du punctum proximum d'accommodation (Figure 107).

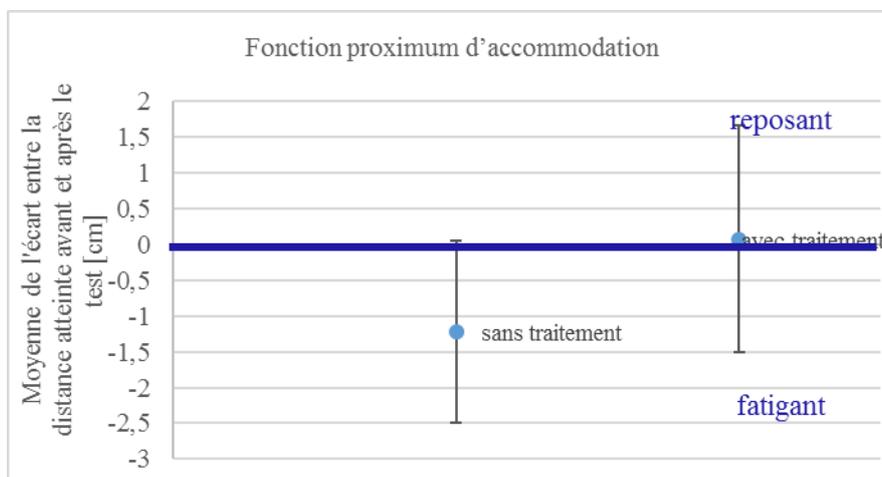


Figure 107 : effet de RAFA1 sur le punctum proximum d'accommodation

3) La facilité d'accommodation

La facilité d'accommodation, elle aussi voit sa détérioration atténuée de façon significative par le traitement RAFA1 (Figure 108).

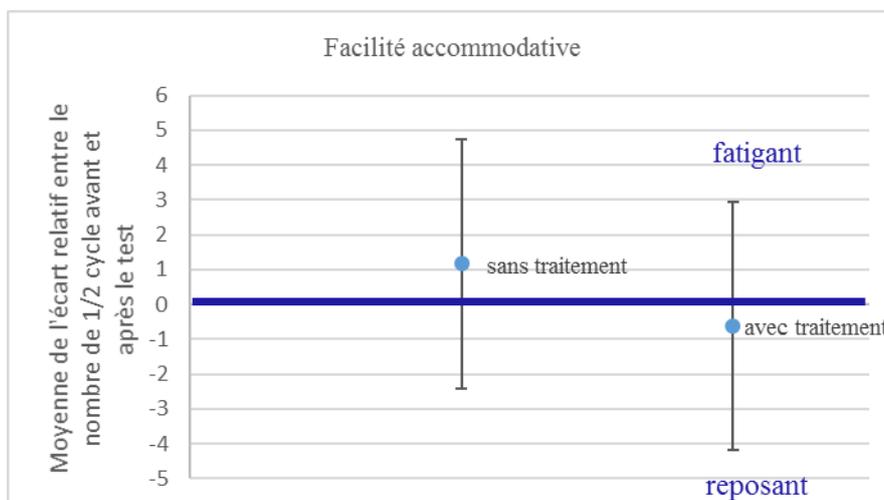


Figure 108 : effet de RAFA1 sur la facilité accommodative

c) RAFA2

Plusieurs configurations ont été testées, mais nous n'en évoquerons que deux ici. Pour plus de détails, on se reportera à la thèse de David Aurat (Aurat 30 mai 2016). Nous nous concentrons sur le cas où la zone nette en vision centrale est très étroite et correspond à la répartition des cônes sur la rétine. Les oculomètres testés ayant un temps de latence trop important pour la rapidité des mouvements oculaires, nous testons également le même algorithme, mais en obligeant les sujets à regarder un point précis pour supprimer le temps de latence du dispositif.

1) L'acuité stéréoscopique

Comme nous pouvons le voir sur la Figure 109, le traitement RAFA2 semble diminuer la dégradation de l'acuité stéréoscopique, cependant, les différences ne sont pas statistiquement significatives. La même tendance apparaît lorsqu'on fait abstraction de la latence du dispositif (Figure 110). Les résultats ne sont pas significatifs, mais avec un p-value de 0.07, ils s'en approchent.

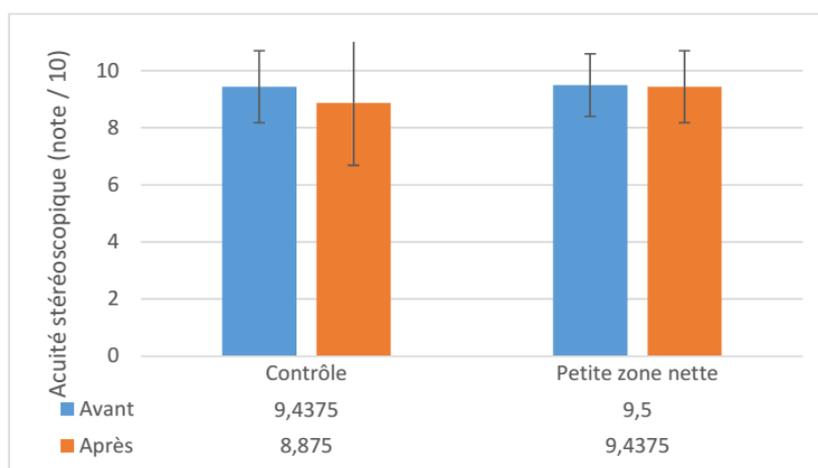


Figure 109 : effet de RAFA2 avec une petite zone nette sur l'acuité stéréoscopique

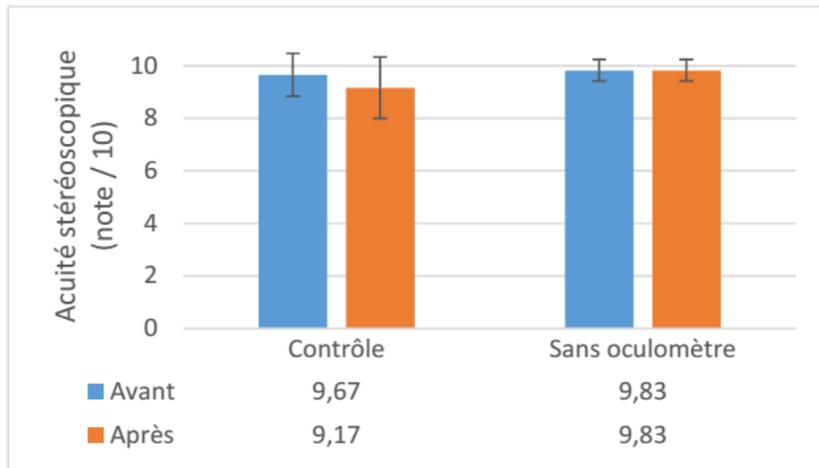


Figure 110 : effet de RAFA2 sans temps de latence sur l'acuité stéréoscopique

2) Le punctum proximum d'accommodation

Le punctum proximum d'accommodation ne semble pas réagir à la suite de l'application du système RAFA2 avec un oculomètre, en effet la différence de dégradation du punctum proximum d'accommodation avec et sans traitement n'est pas statistiquement significative (Figure 111).

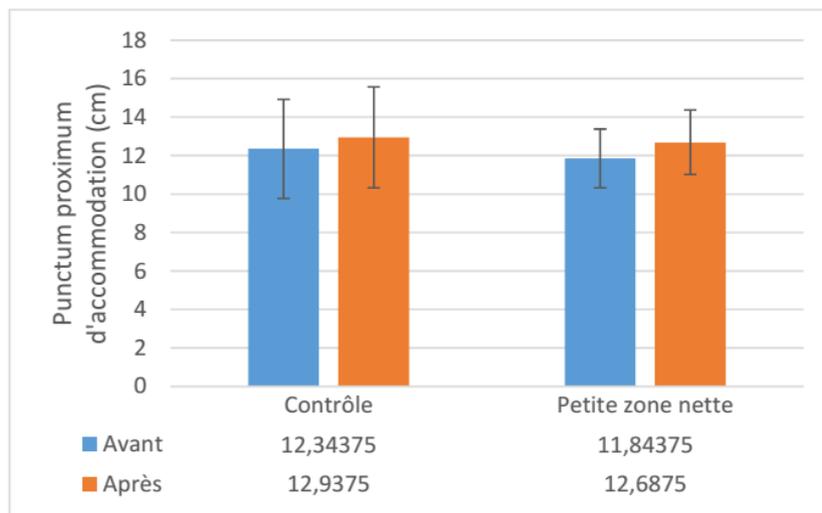


Figure 111 : effet de RAFA2 avec une petite zone nette sur le punctum proximum d'accommodation

Cependant, nous pouvons voir sur la Figure 112, que lorsqu'on supprime le temps de latence, le punctum proximum d'accommodation n'est plus dégradé après immersion. Il est donc possible que le traitement fonctionne aussi pour le punctum proximum, mais que le matériel technique ne soit pas encore suffisamment rapide pour pouvoir être utilisé en temps réel.

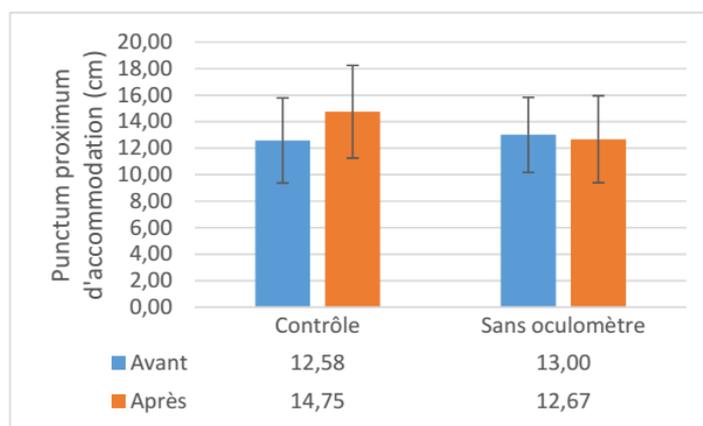


Figure 112 : effet de RAFA2 sans temps de latence sur le punctum proximum d'accommodation

3) La facilité d'accommodation

La facilité d'accommodation semble être moins dégradée avec le traitement RAFA2. Cependant, la différence avec le test de contrôle n'est pas statistiquement significative (Figure 113).

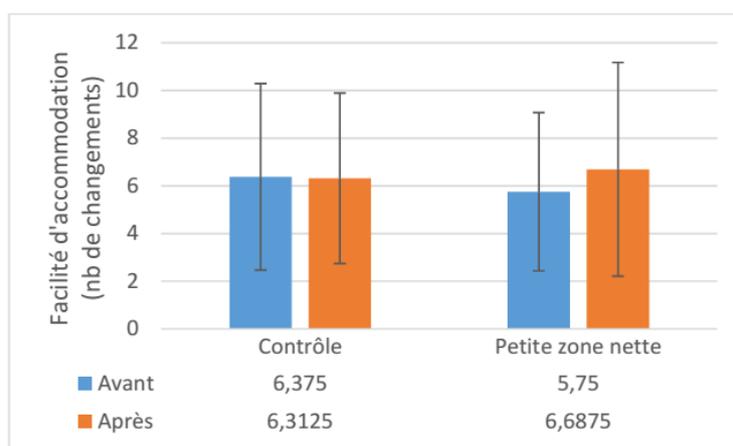


Figure 113 : effet de RAFA2 avec une petite zone nette sur la facilité d'accommodation

Par contre, lorsqu'on fait abstraction de la latence des dispositifs, une fois encore, la différence devient significative. La dégradation de la facilité d'accommodation est bien limitée par l'application du système RAFA2 (Figure 114).

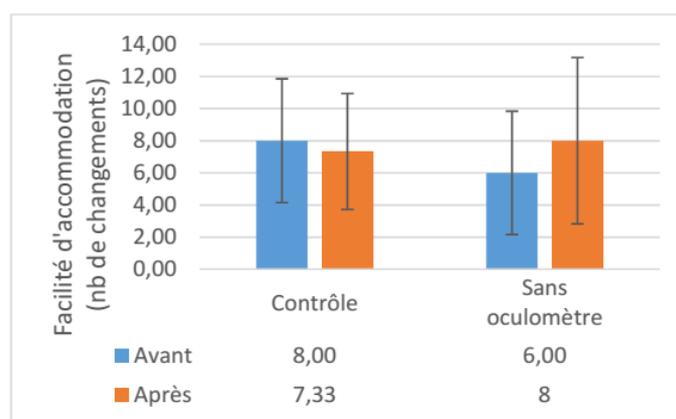


Figure 114: effet de RAFA2 sans temps de latence sur la facilité d'accommodation

4.1.1.3. Préconisations

Nous constatons donc que le flou appliqué aux endroits de fortes disparités permet de réduire plus sensiblement la fatigue oculomotrice que lorsqu'il est appliqué en vision périphérique. Cependant, cette différence peut être due à l'absence d'influence d'un flou périphérique car l'acuité visuelle y est moindre en raison de la répartition des cônes et bâtonnets sur la rétine. Toutefois, lorsque le sujet fixe son regard et que l'eye-tracker n'introduit pas de latence, la fatigue visuelle décroît plus significativement. Des tests supplémentaires seraient nécessaires pour savoir si la baisse de la fatigue est liée à l'absence de cette latence ou au fait de fixer son regard.

Si d'un point de vue purement physiologique, RAFA1 semble plus reposant que RAFA2 ou SIRC, nous verrons au chapitre suivant l'influence de son utilisation sur la perception et l'efficacité du sujet lors de réalisation de tâches.

4.1.2. Réduction du conflit accommodation vergence par relâchement de la vergence

4.1.2.1. Contexte

Dans le point 4.1.1, le conflit entre l'accommodation et la vergence était réduit en jouant sur la composante accommodation. Cependant, comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, il est également possible de faire varier l'autre composante du couple : la vergence. L'idée est de faire varier la vergence pour que le point de vergence soit le plus près possible du point d'accommodation. Pour cela, il convient de faire varier la disparité horizontale présentée au sujet. Cette partie de chapitre montre comment cette variation peut se réaliser d'un point de vue algorithmique, ensuite, nous étudions l'influence de ces réductions de disparités horizontales.

4.1.2.2. Logiciel

a) SIRC : stéréoscopie intermittente pour relâchement de la convergence

Le logiciel SIRC (stéréoscopie intermittente pour relâchement de la convergence) permet de faire varier la disparité horizontale des stimulus en modifiant la distance entre les caméras virtuelles. Lors de démonstrations en salle immersive, il nous arrivait de diminuer la distance entre ces caméras pour montrer la différence de ressenti aux visiteurs. Mais bien souvent, lorsque cette diminution était progressive, les personnes ne percevaient pas cette différence. Pour m'assurer de cette non-perception, j'ai reproduit cette diminution avec mes élèves de façon systématique, mais aucun (sur 200 élèves environ) n'a perçu la disparition de la stéréoscopie, malgré le fait que beaucoup venaient de se moquer gentiment de leurs camarades ne l'ayant pas perçue juste avant eux. Cette constatation m'a conduit à supprimer le conflit accommodation vergence en faisant varier la vergence sans que le sujet ne s'en aperçoive.

Le logiciel conçu lors du stage de master 2 d'Ari Bouaniche a pour but de rapprocher les caméras virtuelles pour passer d'un stimulus stéréoscopique présentant un conflit accommodation vergence à un stimulus monoscopique ne présentant plus ce conflit (Figure 115) et *vice versa* (Figure 116). Cette transition est pour l'instant linéaire, mais pourrait varier selon une fonction plus complexe. Cette transition doit se faire suffisamment lentement pour ne pas être perceptible. En effet, comme nous avons vu au paragraphe 3.2.1.3a), Ware montre qu'une modification de 30% de la distance entre les caméras virtuelles est perceptible si elle se fait à 0,8Hz pour un cycle complet (augmentation et réduction) (Ware 1995). Dans notre expérimentation, la diminution ou augmentation est complète en demi-cycle et, après prétests, nous avons opté pour des progressions sur 5 secondes (paramétrable) ce qui correspondrait à 0,1Hz, donc 8 fois plus lent que dans l'expérience de Ware. Aucun des sujets n'a détecté de modification, mais des tests plus poussés pourraient être menés pour déterminer la limite inférieure de temps.

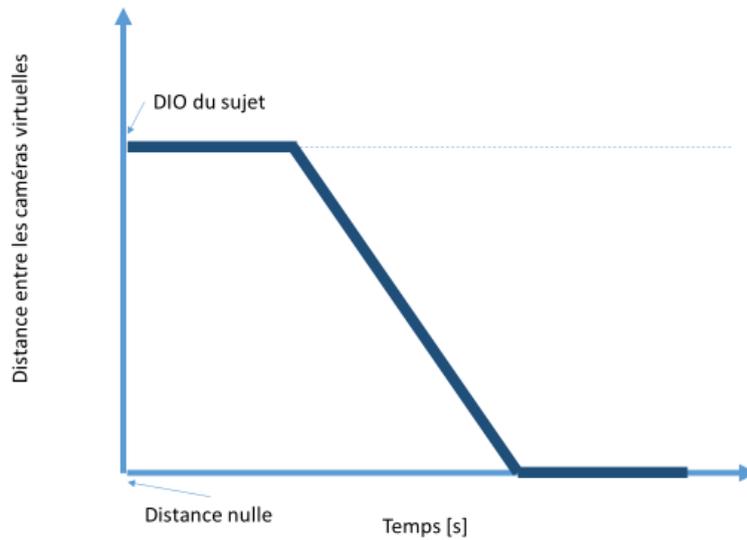


Figure 115 : transition linéaire d'un stimulus stéréoscopique à un stimulus monoscopique

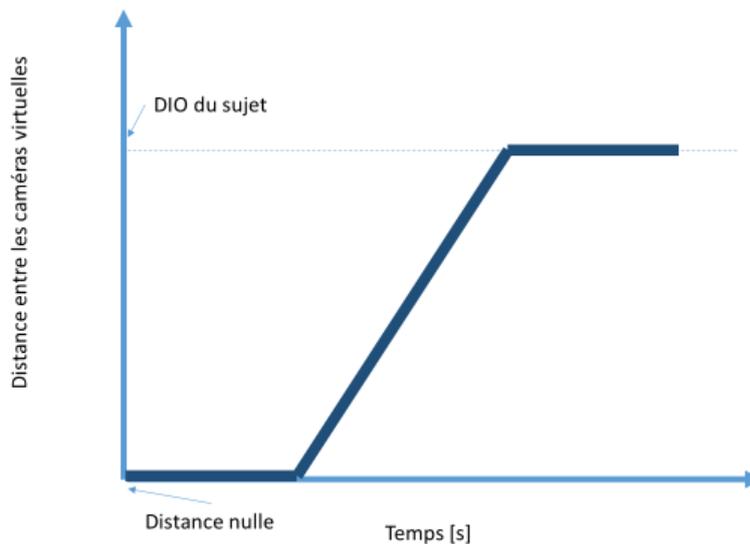


Figure 116 : transition linéaire d'un stimulus monoscopique à un stimulus stéréoscopique

Lien Module – Expérience :

L'origine de ce travail est l'expérience sur l'influence de la parallaxe de mouvement sur la perception des courbures, voir 5.1.2.1.

La conception de ce module a amené à une autre expérience sur son influence pour analyser quels sont les paramètres qui peuvent en être optimisés exposée au paragraphe 5.1.2.2b).

Stage :

Bouaniche, Ari. "Explorer la stéréoscopie intermittente, son influence sur la perception et la fatigue visuelle." Rapport de stage. Saint-Denis : Université Paris 8 - Vincennes Saint-Denis, 2015.

Publication:

Bouaniche, Ari, and Laure Leroy. "Investigating Intermittent Stereoscopy: Its Effects on Perception and Visual Fatigue." *Electronic Imaging 2016* 2016, no. 5 (2016)

Laure Leroy. *Diminution de la fatigue visuelle en stéréoscopie*. ISTE éditions. Informatique. Paris, 2016.

Laure Leroy. *Eyestrain Reduction in Stereoscopy*. ISTE Éditions. Informatique. Paris, 2016.

Ari Bouaniche, Laure Leroy. « Explorer la stéréoscopie intermittente son influence sur la perception et la fatigue visuelle » dans page 23 – 42 chapitre de « Stéréoscopie et illusion, archéologie et pratiques contemporaines : potgraphie, cinéma, arts numériques » sous la direction de Miguel Alimiron, Esther Jacopi, Giusy Pisano. Septentrion press universitaire, 2018

Projet :

Ce module a été mis en place dans les projets

« Permis piéton », projet financé par cap digital en 2014

Ainsi que dans les démonstrations du projet « Terra Dynamica : Modélisation 3D dynamique de la ville », Projet FUI de 36 mois, fini le 01/01/2013

b) PECA : Placement-écran pour convergence adaptée

Il serait intéressant de regarder l'effet d'écrans aussi rapprochés des yeux que ceux des casques de réalité virtuelle sur la relation accommodation-vergence. En effet, nous savons que la rupture de cette relation est souvent incriminée lors de fatigue visuelle en stéréoscopie. En vision naturelle, ou monoscopique sur un écran classique, le système visuel se sert des informations de vergence pour accélérer l'accommodation et vice-versa (Schor 1986) (Neveu et al. 2010). En vision stéréoscopique traditionnelle, ce lien est rompu. Lorsque la différence entre les deux valeurs est trop importante, des difficultés de fusion et de la fatigue visuelle peuvent se produire (Neveu 2008) (Hoffman et al. 2008) et plus elles sont éloignées, plus le stimulus est inconfortable (Yano et al. 2002) (Rushton and Mc Riddell 1999).

Dans ce paragraphe, nous proposons d'étudier les modifications de cette relation dans des conditions théoriques idéales en casque immersif pour des stimulus binoculaires. Les lentilles sont considérées parfaites et sans effets de bords, elles sont dans l'axe de chaque oeil avec un centre optique infinitésimal. Les deux yeux sont disposés symétriquement de part et d'autre de l'axe central du dispositif.

1) Modification du plan d'accommodation

Les écrans des casques sont très proches des yeux, bien plus près que le punctum proximum d'accommodation (la plus petite distance à laquelle il est possible d'accommoder), il est donc nécessaire de « déporter » l'écran perçu à une distance physiologiquement accommodable. C'est le but de la lentille placée entre les yeux et l'écran. Pour savoir à quelle distance se trouve l'écran, il est nécessaire de rappeler les principes optiques :

- Toute droite passant par le centre optique n'est pas déviée ;
- Tous les rayons parallèles à l'axe optique de la lentille sont déviés en passant par le foyer.

Si nous prenons un point particulier, par exemple le bord de l'écran, la droite passant par lui et le centre optique n'est pas déviée. De même, la droite passant par le bord de l'écran et sa projection sur la lentille est déviée sur le foyer image (Figure 112). Le point perçu est donc l'intersection entre :

- La droite passant par le centre optique et le bord de l'écran
- La droite passant par le foyer image et la projection géométrique du bord de l'écran sur la lentille

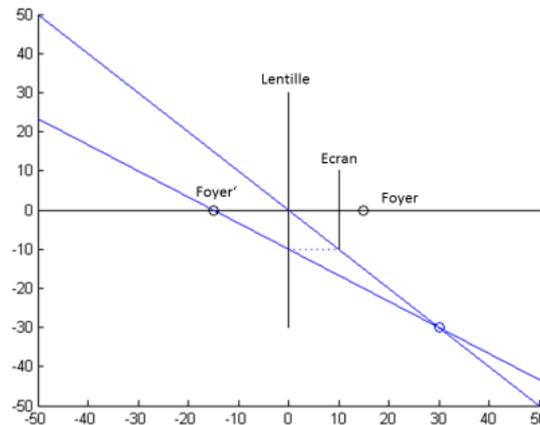


Figure 117 : intersection avec la droite passant par le foyer image

Le bord de l'écran est donc perçu à l'intersection de ces deux droites. Si nous faisons de même avec tous les points de l'écran, nous voyons que les points perçus s'alignent sur un plan, c'est le plan d'accommodation (Figure 118).

L'algorithme pour trouver ce plan d'accommodation est le suivant :

- Définir trois points :
 - Le centre optique (0,0)
 - Le foyer (distance focale, 0)
 - Un pixel (distance entre l'écran et la lentille, position du pixel)
- Calculer la droite passant par le centre optique et le pixel
- Calculer la droite passant par le foyer et la projection du pixel (0, position du pixel)
- Calculer l'intersection entre les deux droites, la distance d'accommodation est la composante X de ce point.

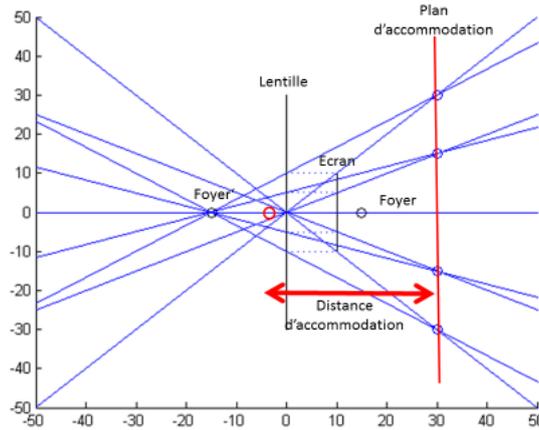


Figure 118 : déport du plan d'accommodation

2) Modification de la vergence

Si nous faisons le même calcul, mais pour chaque œil en prenant le pixel correspondant sur chaque image, nous nous apercevons que les axes optiques sont également légèrement modifiés. Prenons comme cas, une projection d'une même image sur l'œil droit et gauche avec des écrans séparés précisément de la distance interoculaire du sujet et totalement axée par rapport à la lentille, comme Min et Jense le préconisent (Min and Jense 1994). Prenons un pixel situé un peu à gauche du centre de l'écran. Si nous traçons le point projeté pour chaque œil, nous pouvons tracer l'axe optique : la droite passant par l'œil et le point projeté (Figure 119). Dans ce cas, nous voyons que les deux axes optiques sont parallèles, ce qui implique que la vergence se fait à l'infini.

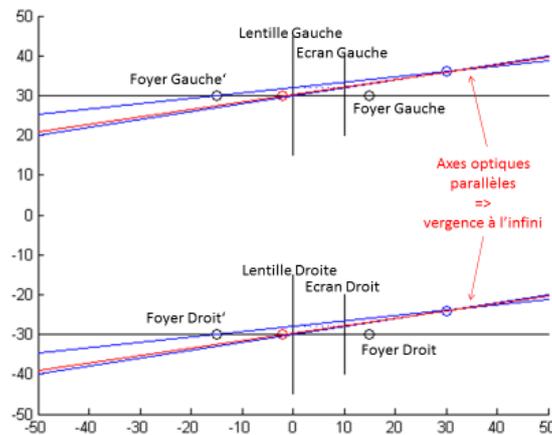


Figure 119 : convergence pour un point de parallaxe nulle pour des écrans face aux yeux

Des écrans plus écartés amplifient le problème, provoquant des axes divergents, des écrans plus rapprochés que la distance interoculaire du sujet assure des axes optiques convergents (Figure 120), beaucoup plus confortables. Dans ces cas, il existe un conflit entre l'accommodation (sur l'écran virtuel) et la vergence (l'intersection des axes optiques, ou l'infini dans le cas présenté sur la Figure 119 sans avoir de sensation de relief).

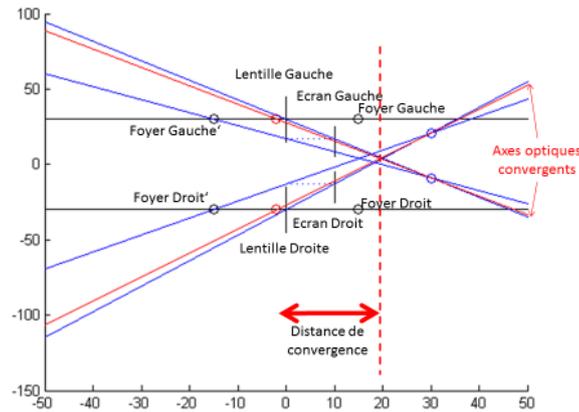


Figure 120 : convergence pour un point de parallaxe nulle pour des écrans moins écarté que la DIO

3) Ajustement par rapport à l'accommodation

Il est possible de calculer l'écartement des écrans pour que le point de convergence soit le même que le point d'accommodation (Figure 121).

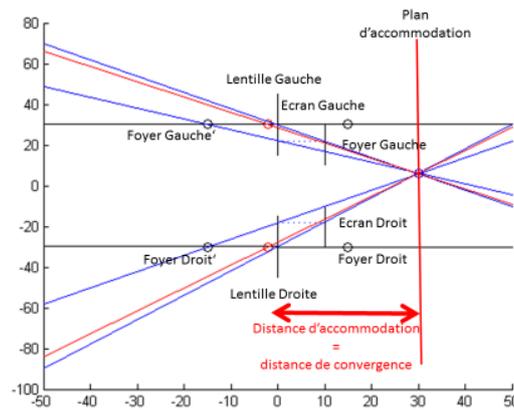


Figure 121 : ajustement de la position des écrans pour conserver le lien accommodation - vergence en vision monoscopique

Le principe de l'algorithme est de

- repartir de la distance d'accommodation calculée au paragraphe 1)
- Considérer que le point de vergence pour le pixel central de l'écran se trouve sur le plan d'accommodation entre les deux yeux => point de vergence = (composante X du plan d'accommodation, composante Y du centre des deux yeux)

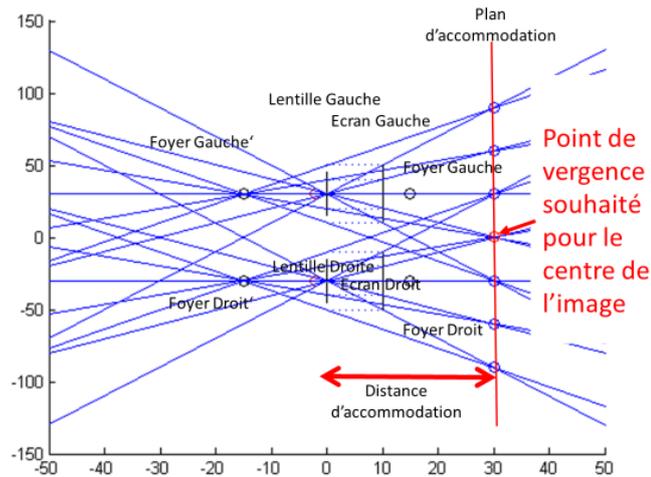


Figure 122 : le point de vergence souhaité pour le centre de l'image se trouve sur le plan d'accommodation et entre les deux yeux.

- Déterminer les droites passant par le centre optique et le point de vergence souhaité pour le centre de l'image
- Le centre de chaque écran se situe à l'intersection de cette droite et du plan d'écran (Figure 123)

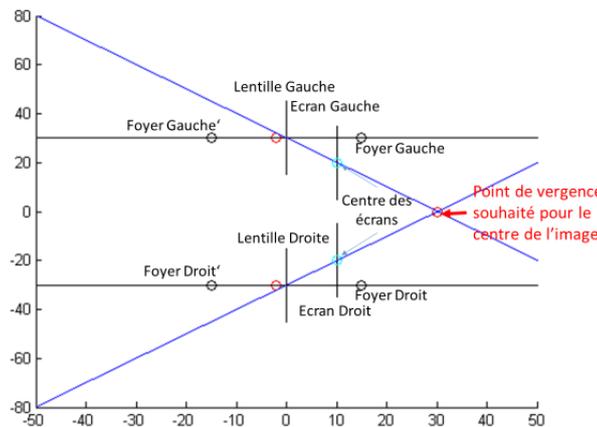


Figure 123 : détermination des centres d'écran pour une vergence ajustée au plan d'accommodation

Lorsque les images projetées sont stéréoscopiques, la modification du lien entre la vergence et l'accommodation est la même que pour les paragraphes précédents, mais s'ajoutent au conflit accommodation-vergence habituel pour des stimulus stéréoscopiques. Pour minimiser le conflit, il convient donc de placer les écrans stéréoscopiques de façon à minimiser les conflits accommodation-vergence

Publication :

Laure Leroy, Modification du lien accommodation vergence dans les casques immersifs, Journée de l'AFRV 2016

4.1.2.3. Étude de leurs influences

a) SIRC

Une expérimentation menée lors du stage d'Ari Bouaniche sur la fatigue visuelle en fonction de la stéréoscopie intermittente présente à des sujets des stimulus projetés :

- En monoscopie
- En stéréoscopie
- En stéréoscopie au début puis en monoscopie
- En monoscopie en début puis en stéréoscopie.

Pendant l'exposition les sujets doivent effectuer des tâches permettant d'évaluer l'influence de la modification de la disparité et de la vergence sur leur perception du stimulus. Les résultats de ces mesures sont présentés au paragraphe 5.1.2.21) et des mesures de point de fusion et de rupture de fusion ont été ajoutées aux mesures d'acuité stéréoscopique, de punctum proximum d'accommodation et de facilité d'accommodation déjà décrite au paragraphe 4.1.1.2a).

1) Rupture de fusion

Comme nous pouvons le voir sur la Figure 124, n'avoir la stéréoscopie qu'à la fin permettrait de préserver un peu les capacités de fusion. Cependant, ces résultats montrent une tendance, mais ne sont malheureusement pas statistiquement significatifs.

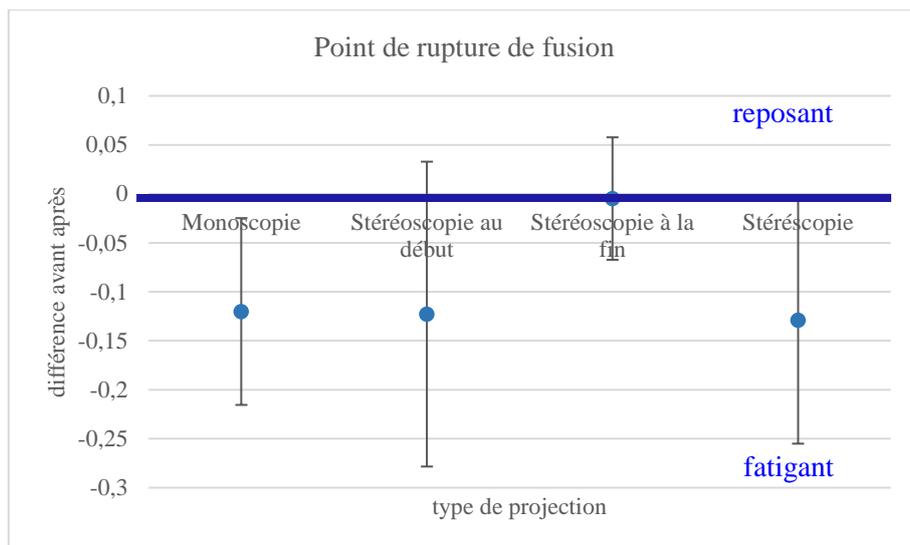


Figure 124 : influence de SIRC sur les capacités de fusion

2) Acuité stéréoscopique

Nous pouvons voir sur la Figure 125 que la stéréoscopie intermittente semble préserver également l'acuité stéréoscopique, mais cette fois encore, les résultats ne sont pas statistiquement significatifs.

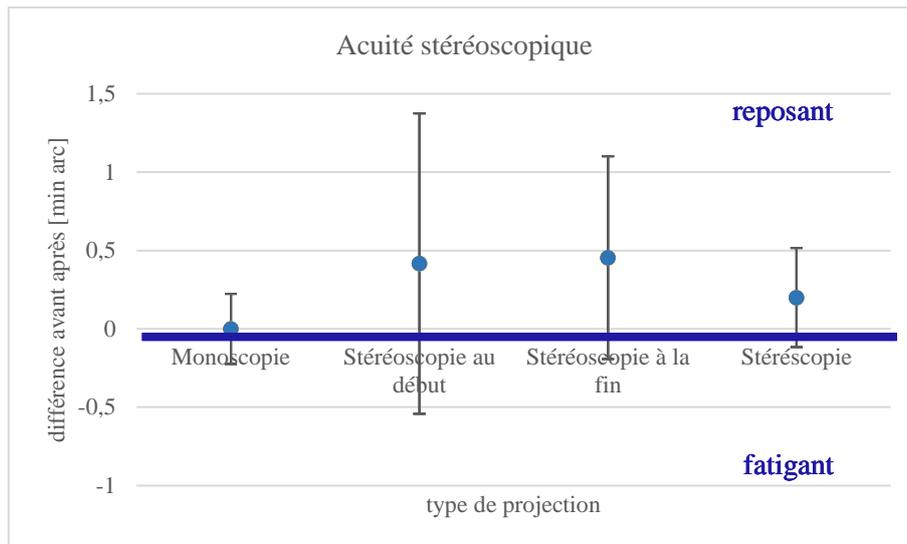


Figure 125: influence de SIRC sur l'acuité stéréoscopique

3) Punctum proximum d'accommodation

Les résultats pour le punctum proximum d'accommodation semblent plus partagés sur la Figure 126. Ils ne sont pas non plus significatifs, mais semblent montrer que la réduction progressive de la stéréoscopie serait une bonne chose pour le punctum proximum d'accommodation.

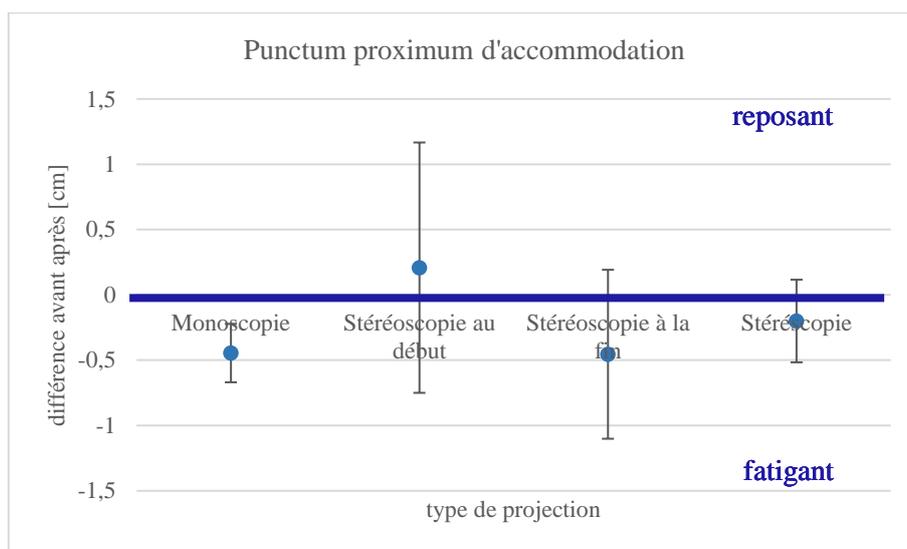


Figure 126: influence de SIRC sur le punctum proximum d'accommodation

4) Facilité d'accommodation

La mesure de la facilité d'accommodation semble présenter quelques anomalies de données, en effet, la stéréoscopie apparaît plus reposante que les stimulus monoscopiques sur la Figure 127 bien que ces résultats ne soient pas significatifs.

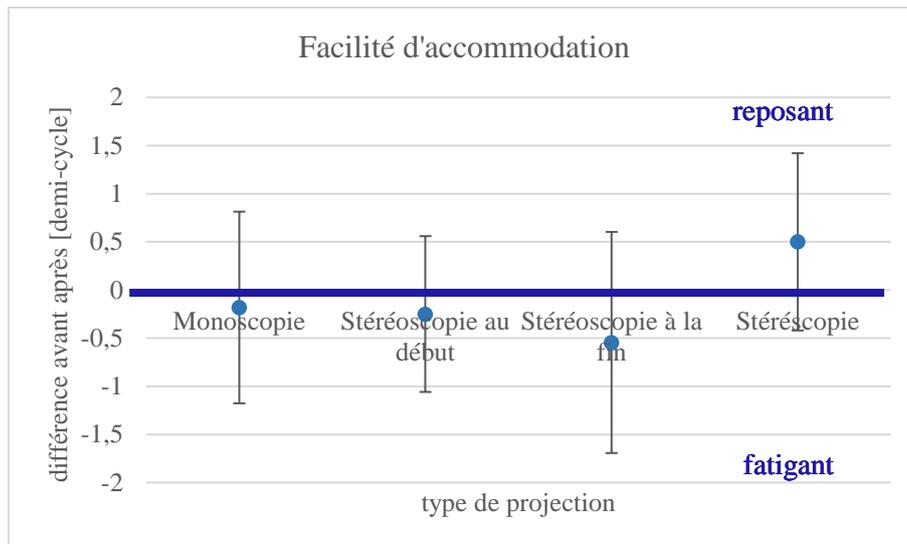


Figure 127: influence de SIRC sur la facilité d'accommodation

b) PECA

L'évaluation de PECA n'a pas encore été faite, elle est prévue dans le cadre de la thèse d'Alexis Souchet. Cependant, nous savons déjà que la solution proposée pour réduire le conflit accommodation-vergence additionnel en casque ne peut être mise en place que pour des casques dont l'écartement des deux écrans peut être réglé en plus de l'écartement des lentilles. Certains casques ne le permettent pas. De plus, un tel dispositif est difficile à mettre en oeuvre avec des casques dont les écrans ne se règlent pas informatiquement, mais manuellement par le sujet. Un casque utilisant un écran de téléphone offre par contre des possibilités d'adaptation. En effet, le centre des deux images peut être réglé informatiquement en prenant en compte dès le départ la distance interoculaire du sujet, la distance focale des lentilles, la distance entre les lentilles et les yeux ainsi que la distance entre les lentilles et l'écran. Ces calculs sont réalisés en négligeant les aberrations des lentilles et les imperfections de positionnement du casque immersif. Il serait intéressant de voir l'influence de ces imperfections.

Dans nos calculs, nous avons utilisé une lentille idéale. Il conviendrait d'étudier l'influence des effets de bord de la lentille sur les disparités visibles à l'écran et donc sur le conflit accommodation-vergence supplémentaire qui pourrait apparaître. De plus, des disparités verticales pourraient résulter de ces déformations, or, celles-ci peuvent être fatigantes si elles ne sont pas maîtrisées (Julesz 1971) (Nielsen and Poggio 1984).

Il serait également intéressant de calculer les déformations de l'image liées aux parallaxes supplémentaires dues à un mauvais écartement des écrans pour voir si les modifications des formes sont les mêmes que pour une DIO artificielle trop grande sur un grand écran.

4.1.2.4. Préconisation

Les études sur SIRC se révèlent prometteuses. Il s'agit à présent de mener plusieurs études empiriques : i.e. des mesures sur des stimulus plus longs pour démontrer réellement leur efficacité sur la fatigue visuelle. Toutefois, nous préconisons de réduire la distance entre les caméras virtuelles lorsque la stéréoscopie n'est présente que pour apporter un aspect sensationnel au public visé. Si, dans ce but, on débute par une stéréoscopie; la réduire ensuite est préférable pour diminuer les contraintes sur le système visuel. Il faut souligner qu'Emoto a constaté que des variations rapides de la disparité pouvaient causer de la fatigue visuelle. Mais dans son expérience les variations sont brutales (Emoto, Niida, and Okano 2005) Il faut donc étudier l'effet de la vitesse de ces modifications.

Nous avons mis en pratique cet algorithme lors d'une application appelée « permis piéton ». Ce projet présenté à « futur en Seine » avec un financement de Cap Digital vise à immerger des enfants dans la reconstitution de la place de la république et à les confronter aux dangers de la circulation. Ceux-ci doivent protéger trois compagnons virtuels des risques d'accident, en les rappelant vocalement lorsque ceux-ci ne se comportent pas bien. Cette simulation est présentée en stéréoscopique jusqu'à ce qu'ils débutent le parcours (la diminution de la distance entre les caméras est déclenchée par l'arrivée de l'avatar de l'enfant devant le premier feu rouge), ensuite, le parcours se fait en monoscopie (30 minutes en moyenne). Lors de la présentation, les enfants étaient ravis de l'impression de relief au départ et ne remarquaient pas qu'il disparaissait rapidement (généralement moins d'une minute). Leur système visuel était alors confronté aux mêmes contraintes qu'avec un écran classique, comme le recommande l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire, alimentation, environnement, travail) dans son rapport (ANSES 2014).

Lors de la conception de PECA, Nous avons étudié la modification de la relation entre la vergence et l'accommodation pour un dispositif idéal. Nous avons montré que même avec des lentilles parfaites et bien positionnées, une fatigue visuelle se produit lorsque les écrans ne sont pas correctement placés. Certains casques peuvent être réglés manuellement par le sujet qui va disposer les écrans et les lentilles aux endroits les plus confortables pour eux en fonction du stimulus présenté. Il serait intéressant d'étudier le placement des sujets pour savoir dans quelle mesure il se rapproche du placement optimal théorique que nous proposons.

4.2. Réduction des contraintes musculosquelettiques

Comme nous l'avons vu au chapitre 3, en réalité virtuelle, les contraintes musculosquelettiques sont moins étudiées que les contraintes visuelles. Dans ce paragraphe, nous proposons deux types de systèmes : un système limitant les vibrations d'un système haptique et un système mesurant les contraintes musculosquelettiques imposées par des postures d'interaction gestuelle.

Même s'il n'existe pas d'étude sur l'impact de ces vibrations sur des troubles musculosquelettiques, nous pouvons nous baser sur les études présentées au chapitre 3.2.3.2c) sur les vibrations dans le monde du travail pour essayer de les réduire au maximum, même s'il sera difficile de mesurer l'impact d'une telle amélioration.

Les autres systèmes présentés dans ce chapitre sont liés aux interactions gestuelles et au fait qu'il convient de créer des systèmes permettant un tracking transportable et capables de mesurer rapidement les fatigues musculaires. Nous avons vu au paragraphe 3.3 qu'un approfondissement était nécessaire pour bien comprendre les gestes en environnement virtuel et la fatigue qui en découle, les systèmes présentés ci-après vont dans ce sens

4.2.1. Amélioration du retour haptique

Les systèmes haptiques permettent un retour d'effort à l'utilisateur. Ces systèmes immersifs et interactifs s'adressent au sens de la proprioception et permettent de simuler le toucher de différentes matières et objets. Un tel système peut servir à reproduire, entre autres, un mur virtuel, c'est à dire la surface d'un objet virtuel que le doigt (ou la main) de l'utilisateur ne peut traverser. Des murs virtuels sont généralement simulés par un ressort avec un coefficient de rigidité (K) théoriquement infini (mais dans la pratique, le plus grand possible). Cependant, une telle rigidité peut provoquer des instabilités et des vibrations dans le système. Pour ne pas surcharger notre propos, nous proposons de retrouver les causes d'une instabilité lors d'un contact avec un mur virtuel dans l'Annexe A : Causes des vibrations d'un système à retour d'effort.

J'ai travaillé sur un système de retour d'effort à câble, dans le cadre de la thèse de Rasul Fesharakifard (Fesharakifard 2008) qui a réalisé un dispositif à retour d'effort à 7 dimensions (3 en translation, 3 en rotation et 1 en préhension). Ma recherche dans ce cadre porte sur la diminution de ces vibrations et son impact sur la perception d'un mur virtuel.

4.2.1.1. RéViSPID : Réduction des Vibration sur SPIDAR

a) Modélisation du système

Dans le but d'améliorer le système à câble, sa modélisation est effectuée de manière précise. La simulation comprend une mesure de vitesse et de position du doigt vis à vis du mur ainsi qu'un calcul de la force à appliquer par les moteurs (Figure 128).

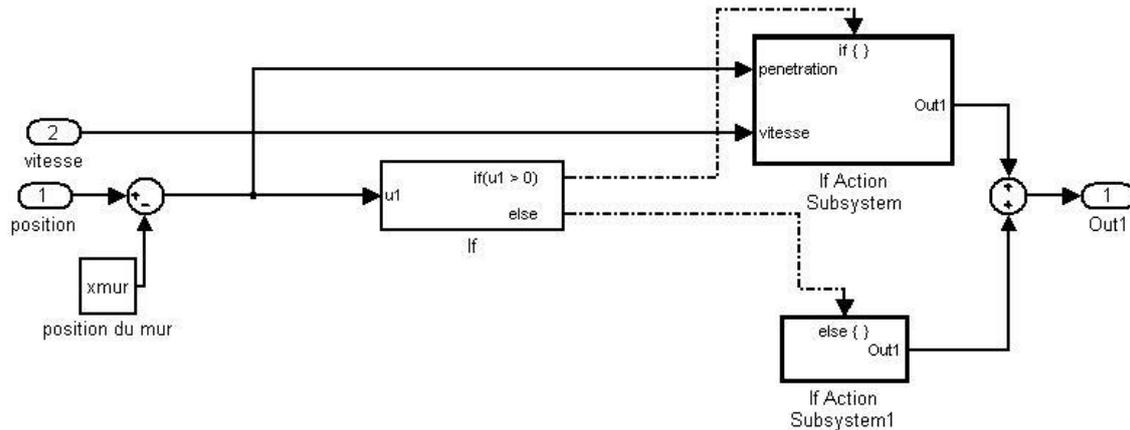


Figure 128 : simulation du système de base

À cette simulation, nous avons progressivement ajouté les imperfections suivantes :

- Les frottements et l'inertie du système : les frottements sont proportionnels à la vitesse et au carré de la vitesse des poulies et moteur, l'inertie dépend de la masse des moteurs.
- La quantification et l'échantillonnage : l'échantillonnage et la quantification (échelonnage du signal) influencent la précision et la latence du signal de mesure de la position.
- La saturation du moteur : le moteur ne peut pas appliquer une force infinie, il faut donc modéliser la force maximale possible.
- Le fait que les câbles se détendent lorsqu'on se rapproche rapidement du moteur : le moteur n'arrive pas toujours à rembobiner le câble assez vite, ce qui occasionne une perte de précision de la position

b) Amélioration du système

Il n'y avait encore aucun système haptique à câbles dotés de capteurs de force pour s'assurer que les forces appliquées sont bien celles attendues. Le fait de disposer de cette information nous permet d'insérer dans le système un régulateur automatique de type « proportionnel » ou de type PID de la force pour pouvoir pallier ses imperfections (Figure 129). Ce régulateur permet également de contrôler la tension des câbles et d'enclencher si nécessaire un "rembobinage" rapide.

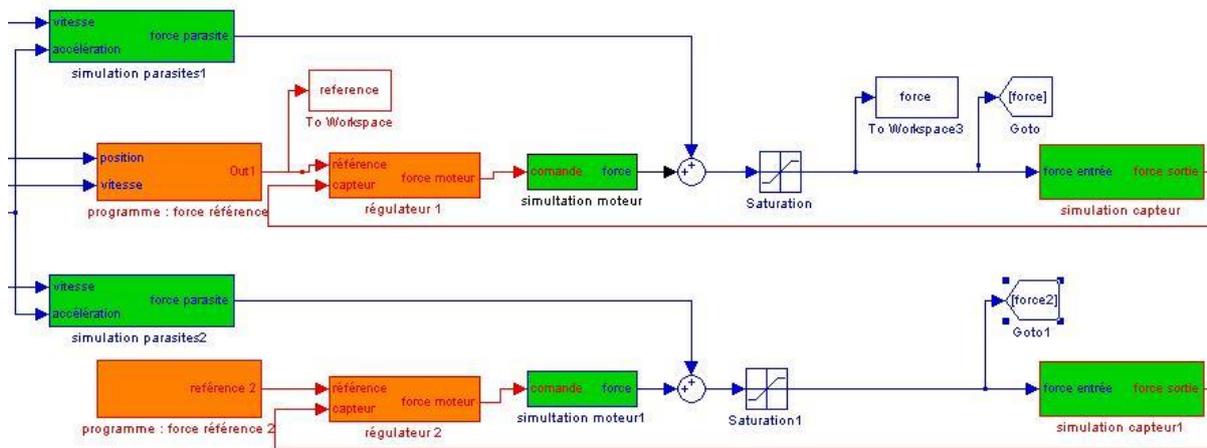


Figure 129 : schéma de la modélisation globale

Le régulateur n'étant pas suffisant pour rembobiner les câbles assez vite, nous ajoutons une force proportionnelle à la différence des distances données par les deux capteurs de position. En effet, s'il existe une telle différence, c'est qu'un des câbles est détendu, nous pouvons donc augmenter la force sur le moteur du câble dont le capteur de force indique une force nulle.

4.2.1.1. Étude de son influence

Le capteur de force et le régulateur sont ensuite implémentés sur le système de retour d'effort. Pour l'évaluation, l'évaluation s'effectue à une dimension. Le monde virtuel est constitué d'une balle virtuelle dépendant de la position de la main et d'un mur virtuel (Figure 130).



Figure 130 : balle et mur virtuel

Lorsque le système n'est pas encore amélioré, constatons que (Figure 131) :

- Les câbles se détendent : la différence des positions données par les capteurs de position (encodeur) bas et haut signifie qu'un des câbles est détendu et que l'encodeur ne peut pas mesurer correctement la position. Lorsque le doigt monte, l'encodeur du bas se déplace plus rapidement que celui du haut qui est détendu, et inversement, lorsque le doigt descend,

l'encodeur du haut indique ce mouvement plus rapidement que celui du bas dont le câble se détend à son tour.

- Des vibrations sont ressenties par le sujet lorsqu'il atteint le mur virtuel situé 10cm sous le centre du système. Ces vibrations sont clairement visibles sur les tensions de câble, mais elles sont également identifiables sur la position du doigt lorsqu'il arrive à -0,1 m du centre.

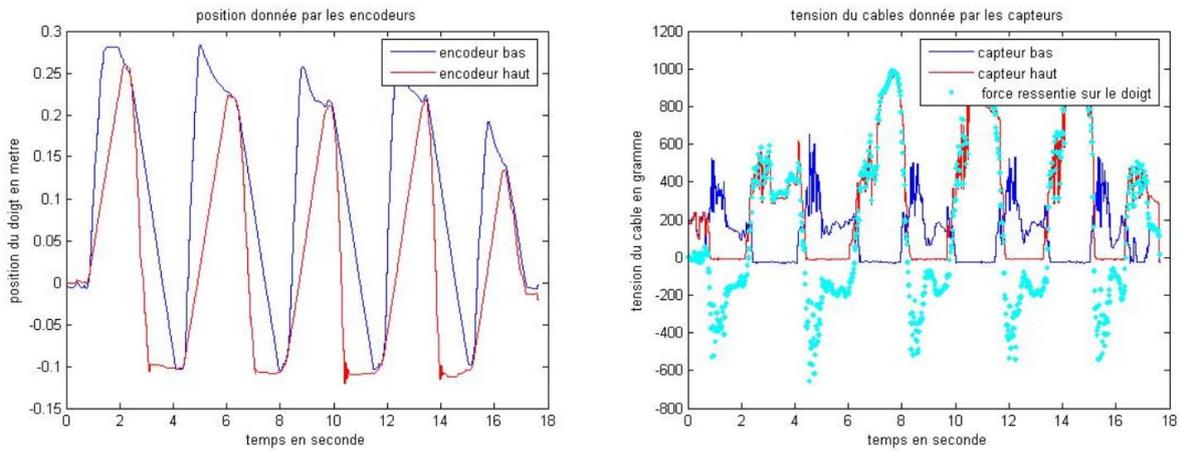


Figure 131 : mesure en position et en force pour le système sans amélioration

Lorsque le système est amélioré avec le régulateur ainsi que le système de maintien de la tension du câble, nous observons que (Figure 132) :

- Les deux encodeurs donnent les mêmes informations de position, ce qui signifie que les câbles sont tendus
- Les forces impliquées sont moins importantes sauf pour le dernier contact (seconde 12) pour lequel l'expérimentateur a forcé en vain pour rentrer en vibration
- La position du doigt n'est plus instable, de même, les forces présentent également moins de vibrations
- Lorsque le doigt ne bouge pas (à partir de la seconde 14), la force qui lui est appliquée est stable et nulle

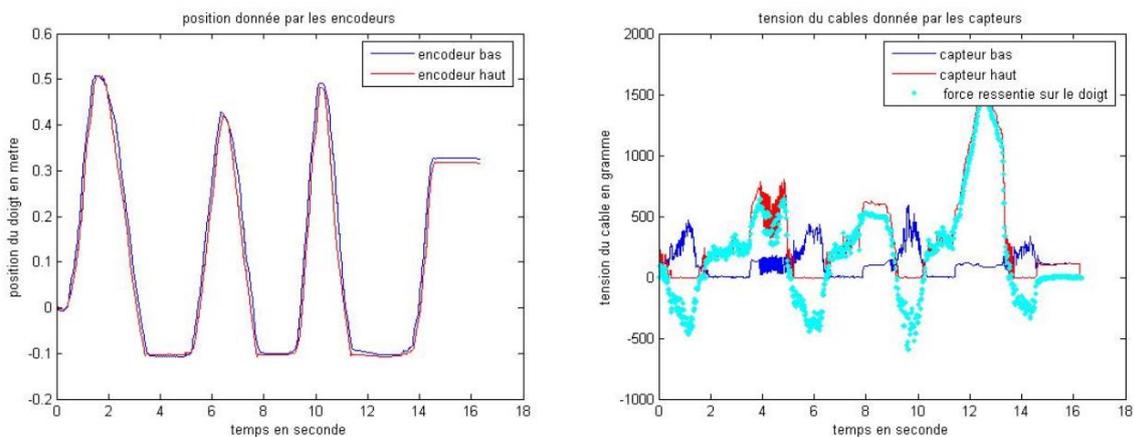


Figure 132 : position du doigt et tension des câbles pour le système amélioré

4.2.1.2. Conclusion

Nous avons donc mis en œuvre un dispositif permettant d'améliorer les performances du système de retour d'effort, les forces sont plus stables et la mesure de la position est plus précise, les câbles ne se détendent plus, ce qui évite également que les sujets puissent se blesser avec des câbles qui traînent.

Les vibrations sont nettement diminuées, ce qui signifie que le système est plus sûr pour la physiologie du sujet. Il serait intéressant de mesurer cet effet sur les contractions musculaires des sujets avec un EMG, cependant, nous pouvons déjà dire que la force exercée par les sujets est moindre qu'avec le système d'origine, ce qui permettrait de respecter les préconisations des études relatées au paragraphe 3.2.3.2a).

Publications :

Rasul Fesharakifard, Laure Leroy, Philippe Fuchs. 2007. Development of a String-based Haptic Interface by Using a Hybrid Control Approach World Haptic Conference 2007, Proceedings of the Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems p 488-493

Rasul Fesharakifard, Maryam Khalili, Laure Leroy, Alexis Paljic, and Philippe Fuchs 2008. Integrating a grasp exoskeleton into a string-based interface for human-scale interactions ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering, Volume 8, Issue 4

Laure Leroy. "Évaluation de l'intégration de capteurs de force au sein d'une interface haptique de type SPIDAR." Rapport de stage. Paris : École des Mines de Paris, Université Libre de Bruxelles (école polytechnique), juin 2006.

4.2.2. Réduction des contraintes musculosquelettiques lors d'interactions gestuelles

Lors de l'étude du projet de rééducation cognitive par la simulation AGATHE, nous avons constaté que quelques patients avaient des difficultés à faire les gestes. Les thérapeutes nous avaient demandé de faire des interactions basées sur des gestes qui reproduisaient fidèlement ceux que nous faisons dans la vie de tous les jours, mais il s'est vite avéré que ceux-ci étaient plus compliqués à appréhender et à effectuer, même pour des personnes non atteintes de troubles cognitifs. De plus, maintenir la main à hauteur d'épaule sans support pendant des temps relativement longs pouvait être physiquement très contraignant physiquement.

Les gestes effectués en RV pouvant s'avérer fatiguants, des recherches sont menées, lors de la thèse Subhi Ahmed dans le but de quantifier cette fatigue et de mieux identifier les gestes à proscrire lors d'interactions gestuelles. L'objectif est de mesurer les angles des articulations et de vérifier s'ils sont adéquats.

Projet :

AGATHE, Projet ANR- tecsant de 36 mois, fini en 2012, dirigé par Evelyne Klinger, Ecole nationale supérieure des Arts et Métiers.

Publications :

E. Klinger, A. Kadri, E. Sorita, J.-L. Le Guiet, P. Coignard, P. Fuchs, L. Leroy, N. du Lac, F. Servant, P.-A. Joseph. AGATHE: a tool for personalized rehabilitation of cognitive functions based on simulated

activities of daily living. BioMedical Engineering and Research, IRBM 34 (2013) 113–118, 16 mars 2013

E. Klinger, A. Kadri, E. Sorita, J.-L. Le Guiet, P. Coignard, P. Fuchs, L. Leroy, N. du Lac, F. Servant, P.-A. Joseph. AGATHE: a tool for personalized rehabilitation of cognitive functions, ICVR, International Conference on Virtual Rehabilitation, Philadelphia, USA, 26 -29/08/2013

4.2.2.1. Logiciels

a) FuMus : Fusion multisquelette

Le tout premier module du système est issu de la thèse de Saleh Salous (Salous 2015). son but est d'améliorer le suivi de squelette obtenu avec des capteurs bon marché en utilisant plusieurs. Pour ce faire, quatre Kinects sont disposées dans les coins d'un cube pour pour améliorer le suivi des articulations d'une personne en mouvement de façon plus pertinente en évitant de perdre le suivi de certaines articulations. La multiplication des Kinects garantirait le suivi de toutes les parties du corps (Figure 133).

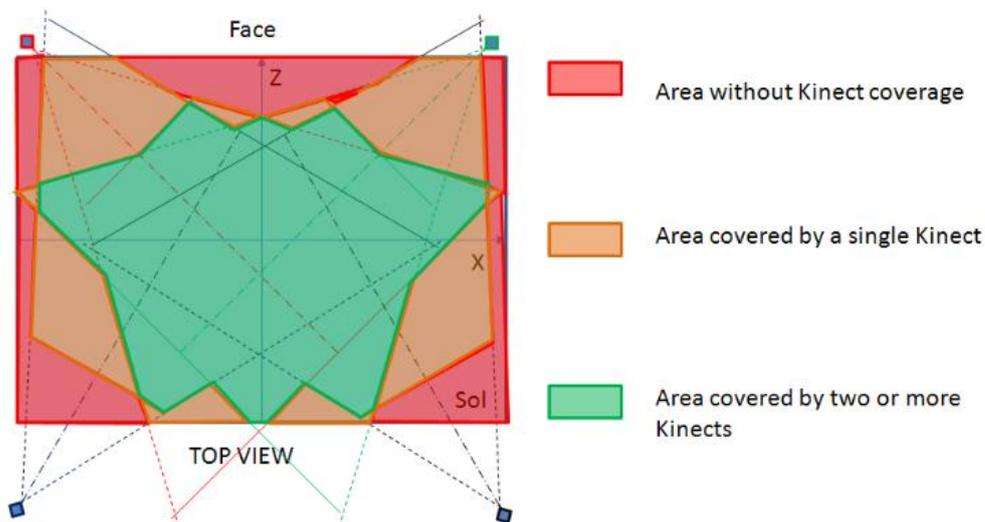


Figure 133 : chevauchement des champs de vision des quatre Kinects

Les règles de fusion nécessitent en premier une localisation du sujet afin de savoir quelles sont les Kinects à prendre en compte (Figure 134). En fonction de la position, nous déterminons si le sujet peut être perçu

- Correctement par trois Kinects (High-coverage)
- Correctement par deux Kinects (médium-coverage)
- Correctement par une Kinect

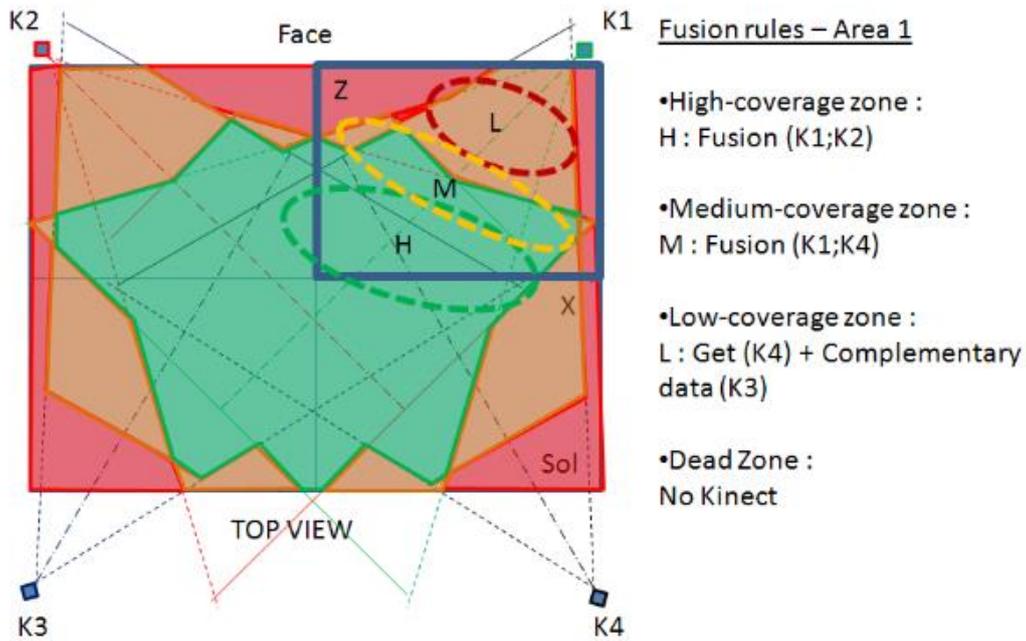


Figure 134 : localisation du sujet par rapport aux Kinects

Puis les indices de fiabilité des Kinects sont analysés (donné par le SDK de Microsoft) afin d'effectuer la fusion. Pour chaque articulation, les données de la Kinect présentant le plus grand taux de fiabilité sont retenues. Le squelette est ensuite reconstruit avec ces articulations corrigées.

Thèse :

Salous, Saleh. 2015. "Fusion de Données Multi-Kinect Visant À améliorer L'interaction gestuelle au sein D'une Installation de réalité virtuelle." Thèse de doctorat, Paris 8, Saint-Denis.

Publications :

S. Salous, L. Leroy, S. Chendeb, 2014, Dynamic Sensor Selection Based on Joint Data Quality in the Context of a multi-Kinect Module inside the CAVE

S. Salous, L. Leroy, S. Chendeb, 2015, Gestural Recognition by a Four-Kinect Module in a CAVE "Le SAS" Romanian Human-Computer Interaction Conference

b) DALATR : Détection Automatique de LATR

Le dispositif DALATR automatise les règles et normes prévalant dans le monde du travail et les gestes proposés en interaction gestuelles dans le but d'éviter des gestes dommageables pour l'utilisateur. Pour ce faire, mettons en œuvre :

- Un tracking précis, à bas coût mais transportable facilement pour pouvoir tester les interactions gestuelles dans leur environnement de conception
- Un dispositif permettant de mesurer les angles d'articulation et la répétitivité des mouvements afin de s'assurer qu'ils sont sans danger.

Le système de Détection Automatique de LATR permet de détecter si le geste effectué est fatigant ou non selon trois normes utilisées dans le milieu du travail :

- ISO 11226 (ISO International Organization for Standardization, 2000)
- RULA (McAtamney et Corlett, 1993)
- AFNOR NF EN 1005-4 (Sécurité des machines-performance physique humaine) (CEN (Comité européen de Normalisation), 1998)

Le système est constitué d'une Kinect et de son SDK permettant d'obtenir le squelette du sujet. Pour chaque articulation, l'angle est calculé et comparé aux différentes normes (Figure 135).

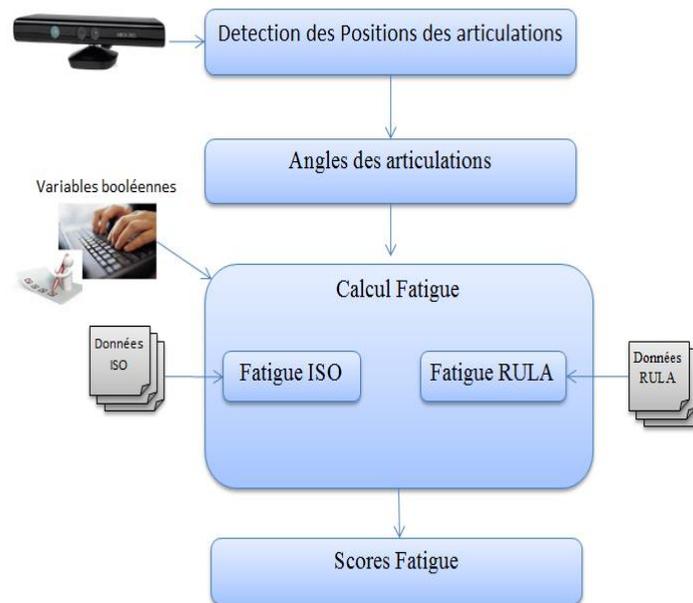


Figure 135 : algorithme DALATR (Ahmed 2016)

Chaque articulation est traitée selon les normes. En effet, chacune d'elle (notons qu'ISO reprend les mêmes données qu'AFNOR et les complète, nous fusionnons les deux) présente les angles acceptables pour que le mouvement soit sans danger pour le système musculosquelettique. La Figure 136 présente le cas de l'épaule. mais des tableaux similaires sont réalisés pour chaque articulation.

Épaule					
Mouvement	Source	Limite acceptable (1)	Acceptable sous condition - pas recommandé (2)		Limite non acceptable (3)
Antépuulsions (Flexion- avant)	AFNOR 1005-4	0° -20°	- 20° - 60° si : - statique : (bras soutenu) ou (pas longue durée de maintien et de récupération). Ou - fréquent. Ou si : - fréquence <10 par min - pas longue durée - > 60° si : - pas longue durée. - pas fréquent		> 60° si - statique Ou - fréquent
	INRS	0° -20°	20°-60°		> 60°
	RULA	20° (1 pt)	20° - 45° (2 pts)	45°-90° (3pts)	> 90° (4 pts)
Rétropulsions (Extension- arrière)	AFNOR 1005-4	0°	> 0° si : - pas fréquent - pas longue durée		> 0° si : - statique Ou

				- fréquent
	ISO 11226	0°		> 0°
	INRS	0°		> 0°
	RULA	0° -20° (1 pt)	> 20° (2 pts)	
Adduction	AFNOR 1005-4	0°	> 0° si : - pas fréquent - pas longue durée	> 0° si : - statique Ou - fréquent
	INRS	0°		> 0°
Abduction	AFNOR 1005-4	0° - 20°	- 20°-60° si statique : (bras soutenu) ou (pas longue durée et une durée de récupération) Ou Pas fréquent. Ou si : - fréquence <10 par min - pas longue durée - > 60° si - pas longue durée. - pas fréquent	- > 60° si - statique Ou - fréquent
	ISO 11226	20°	20°-60° (avec support) ou (vérifier temps max)	> 60°
	INRS	20°	60°	> 60°
	RULA	Pénible (1 pt)		
Épaule levée	AFNOR 1005-4	Si pas statique et pas fréquent		Pénible si fréquent Ou si statique
	ISO 11226			Pénible
	RULA	Pénible (1 pt)		
Hyper adduction de bras (avec antépulsion de l'épaule)	ISO 11226			Pénible
Rotation externe extrême				
Bras soutenu				
Tronc penché vers l'avant	RULA	- 1 pt		

Figure 136 : tableau de normes pour l'épaule (Ahmed 2016)

En plus des angles d'articulation, la fréquence du geste est prise en compte

Mesures de temps	
Sources	Méthodes
SO 11226 (ISO International Organization for Standardization, 2000)	Tronc: <ul style="list-style-type: none"> Pour le mouvement d'inclinaison 20°-60°, l'acceptabilité liée au temps est calculée à partir de l'équation suivante $Y = -\frac{3}{40}X + \frac{11}{2}$
	Tête: <ul style="list-style-type: none"> Pour le mouvement d'inclinaison 25°-85° (soutenu), l'acceptabilité liée au temps est calculée à partir de l'équation suivante $Y = -\frac{7}{60}X + \frac{131}{12}$

	<p>Épaule:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour l'abduction (élévation) 20°-60° (soutenu), l'acceptabilité liée au temps est calculée à partir de l'équation suivante $Y = -\frac{1}{20} X + 4$
RULA (McAtamney et Corlett, 1993)	<ul style="list-style-type: none"> • Le temps est intégré dans la charge statique (calculer la charge en dépendant de temps d'une manière séparée). • Le score (A ou B) est augmenté par 1 si position statique (maintenue pour une durée supérieure ou égale à une minute). • Le score (A ou B) est augmenté de 1 s'il y a une répétition (4 fois par minute).
EN 1005-4 (CEN (Comité européen de Normalisation), 1998)	<ul style="list-style-type: none"> • La répétition des mouvements (si la fréquence > = 2 fois par minute) • la durée (selon ISO 11226).

Figure 137 : contraintes temporelles acceptables pour chaque articulation (Ahmed 2016)

Thèse :

Sobhi Ahmed. 2016. "Diminution de la fatigue physique lors de l'Interaction Gestuelle : Approche méthodologique et Comparaison Virtuel et Réel." Thèse de Doctorat, Université Paris 8, Saint-Denis

Publications :

Sobhi Ahmed, Laure Leroy, Ari Bouaniche, 2015, Towards an Approach for the Reduction of the Negative Impacts of Gestural Interactions on the Human Body, euroVR 2015, 15 octobre 2015, Milan, Italy

Sobhi Ahmed, Laure Leroy, Ari Bouaniche, "Reducing Gestural Interaction Physical Stress in Virtual Environments: an Experiment", the International Conference on Human-Computer Interaction, Lasi, Romania, 8-9 Sept. 2016,

Sobhi Ahmed, Laure Leroy, Ari Bouaniche, "Study of Stressful Gestural Interactions: An Approach for Assessing their Negative Physical Impacts", Proc. 11th Intl Conf. Disability, Virtual Reality & Associated Technologies 1 Los Angeles, California, USA, 20-22 Sept. 2016

Sobhi Ahmed, Laure Leroy, Ari Bouaniche. 2014. Approches de Réduction des Impacts négatifs des Interactions gestuelles sur le Corps humain, Reims Image 2014, p113-121

4.2.2.2. Études de leurs influences

a) FuMus : Fusion multisquelette

Nous demandons à 23 sujets d'effectuer trois gestes

- Lever la main gauche (la main gauche doit être au-dessus de l'épaule gauche)
- Lever la main droite (la main droite doit être au-dessus de l'épaule droite)
- Effectuer un saut (les deux pieds doivent quitter le sol)

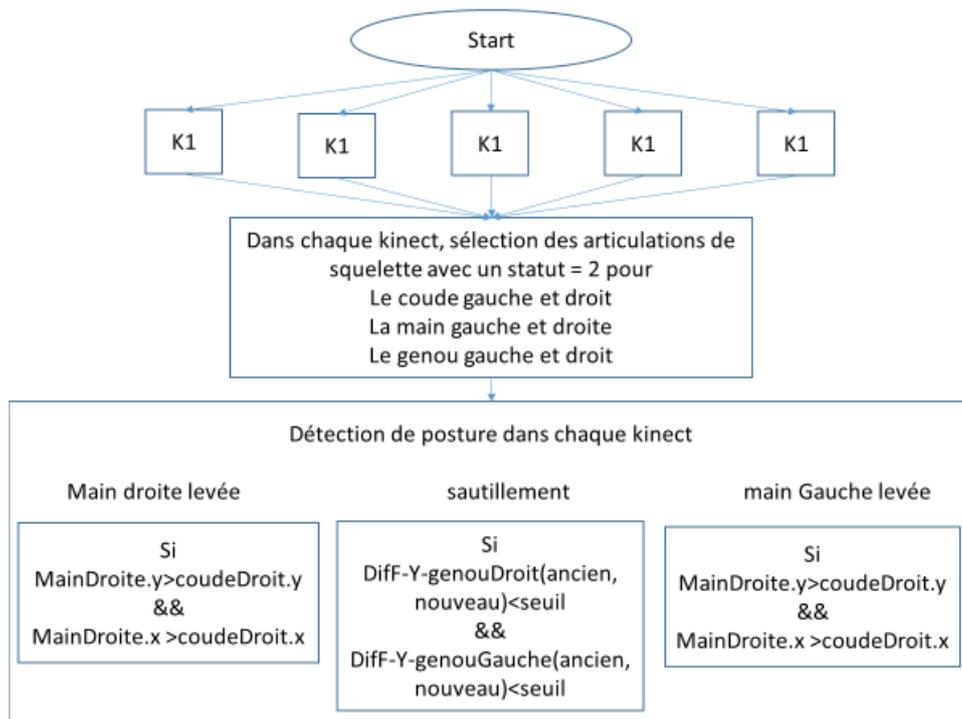


Figure 138 : algorithme de détection de posture

Nous mesurons le taux de détections correctes et de fausses détections avec une seule Kinect et avec le système de fusion.

Nous voyons sur la Figure 139 que le pourcentage de bonne détection est significativement plus grand avec le système FuMus que pour une seule Kinect.

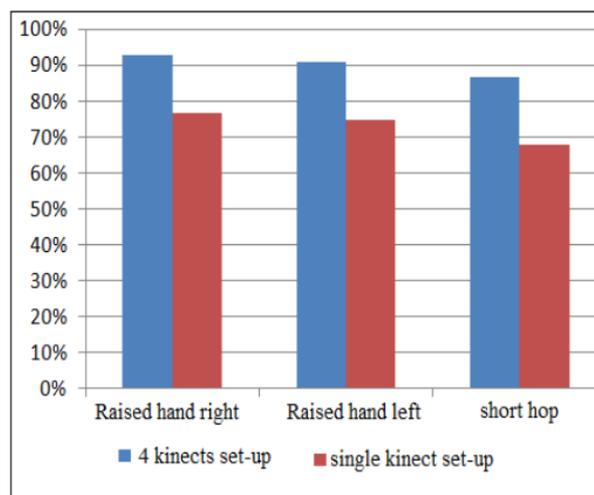


Figure 139 : pourcentage de bonne détection de chaque geste pour le système à 4 Kinect ou une seule Kinect

De même, la Figure 140 montre que le taux de fausses détections est plus élevé lorsque le système FuMus n'est pas utilisé et qu'une seule Kinect est utilisée.

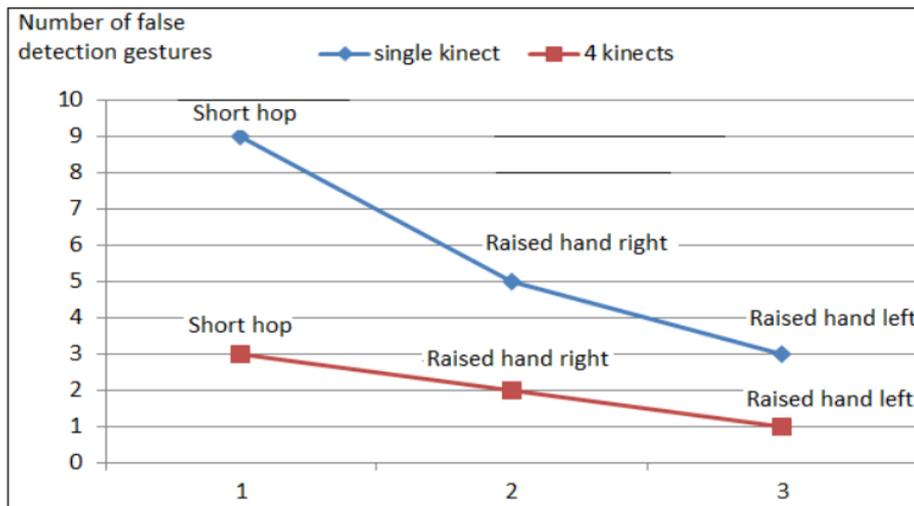


Figure 140 : nombres de fausses détections pour chaque geste pour le système à 4 Kinect ou une seule Kinect

a) DALATR : Détection Automatique de LATR

Nous demandons à 26 sujets d'effectuer deux gestes en virtuel. Ces deux gestes consistent à prendre des objets virtuels d'une boîte et les poser avec précision dans une autre. Dans le geste dit « difficile », les boîtes sont placées à plus de 170cm du sol et la précision demandée est élevée. À l'opposé, dans le geste dit « facile », les boîtes sont placées entre 80 et 90cm du sol et la précision demandée est plus faible (Figure 141).

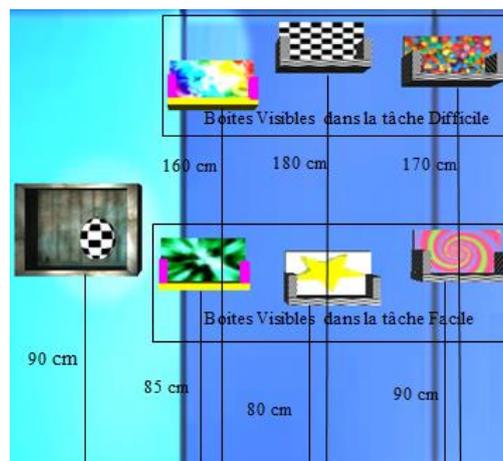


Figure 141 : positionnement des boîtes et décors de l'évaluation de DALATR

Nous comparons ensuite les résultats de la norme ISO et de la norme AFNOR à un questionnaire subjectif basé sur des échelles de Likert permettant de savoir si le sujet ressent de la fatigue ou une douleur dans l'épaule. Nous étudions la corrélation entre ce questionnaire subjectif ramené sur 1 aux données de l'algorithme également ramené sur 1 pour une comparaison plus aisée.

La Figure 142 montre le résultat pour l'épaule. La différence entre la tâche difficile et la tâche facile pour les trois données est statistiquement significative, ce qui tendrait à montrer que notre algorithme détecte bien la fatigue ressentie par les sujets.

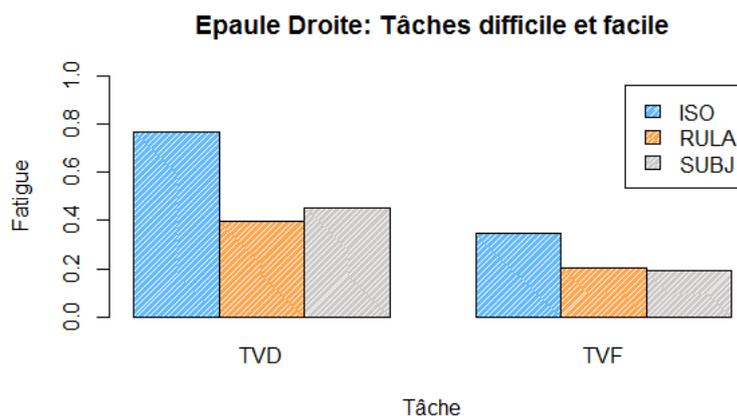


Figure 142 : comparaison selon le questionnaire subjectif, ISO et RULA, tous ramenés sur 1 pour homogénéiser les données, de l'épaule lors de la tâche facile et la tâche difficile (Ahmed 2016)

Notre système anticipe la fatigue des sujets due à certains gestes en les détectant avant eux. La raison est que les normes sur lesquelles se base le système sont faites pour prévenir les blessures et détectent donc le potentiel de douleur avant que cette dernière ne soit présente. Notre système peut bien servir de système de détection préventive pour des concepteurs d'algorithme.

4.2.2.3. Préconisation

Nous avons vu dans cette section qu'il est possible de mesurer la fatigue musculosquelettique lors d'une interaction gestuelle. Cette technique permet aux concepteurs de logiciel de vérifier que leur application ne présente aucun danger avant de la proposer aux utilisateurs. En effet, certains utilisateurs, comme les travailleurs ou les joueurs sont susceptibles de passer un temps relativement long immergés dans ces applications, il est important que celles-ci respectent, *a minima*, les recommandations appliquées dans le monde du travail pour éviter des problèmes musculosquelettiques. Le système FuMus n'est pas encore connecté au système DALATR, mais il permettrait de mesurer les angles des articulations avec plus de précision.

Cette mesure précise des angles permet déjà de tester la fatigue musculaire, mais elle nous permet également de pouvoir proposer une avancée dans l'étude de la fatigue musculaire en réalité virtuelle au paragraphe 5.2.

4.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les systèmes mis en place pour réduire les contraintes oculomotrices et musculosquelettiques en réalité virtuelle. Les différents systèmes mis au point sont portés sur l'axe des Figure 143 (contraintes oculomotrices) et Figure 144 (contraintes musculosquelettiques) qui reprennent les catégories d'études présentées sur la Figure 96, sauf pour PECA pour lequel l'évaluation n'a pas encore été faite.

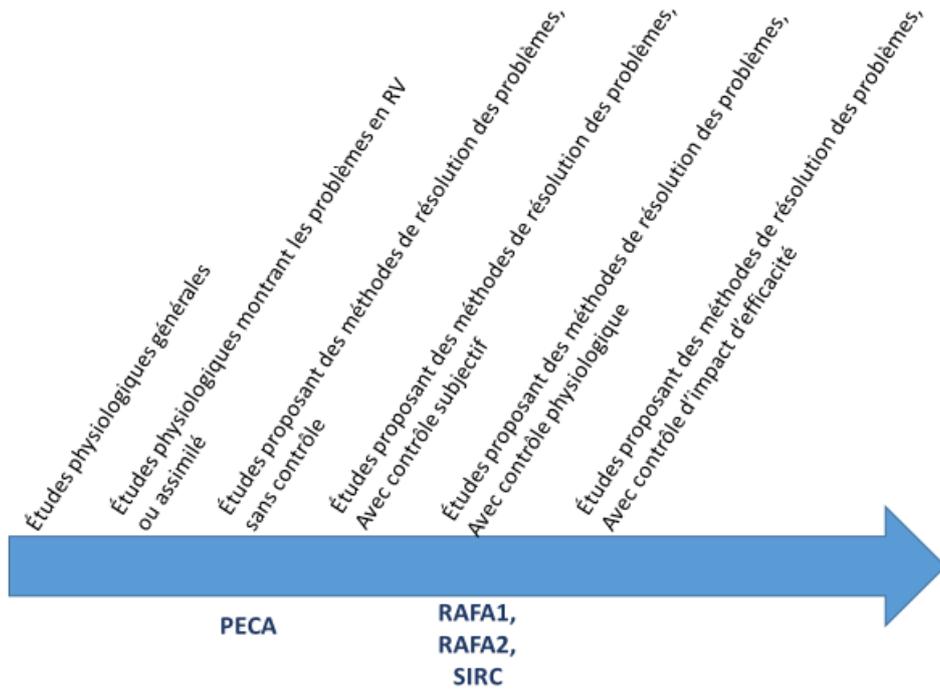


Figure 143 : situation des études pour réduire les contraintes oculomotrices présentées dans ce chapitre sur l'axe du temps présenté en Figure 96

Cependant, dans le paragraphe 3.3, nous expliquons que les études montrant également les impacts de tel système sur la perception visuelle et donc sur l'efficacité des sujets pour les tâches proposées se font encore rares, nous en proposons donc quelques-unes dans le chapitre suivant.

Dans ce même paragraphe, nous avons vu que les études sur les contraintes musculosquelettiques ont du retard par rapport aux études sur les contraintes visuelles. Il est donc logique que nos études se placent elles-mêmes plus en amont sur l'axe proposé en Figure 96, comme nous pouvons le voir à la Figure 144. Elles sont surtout constituées de propositions non testées sur le confort des sujets. En effet, les contrôles des améliorations sont pour l'instant encore systémiques. Par contre, des systèmes comme DALATR vont nous permettre, au chapitre prochain, d'avancer sur les études physiologiques pour mieux comprendre les tenants et aboutissants des gestes en environnement virtuel, savoir si l'on peut les étudier avec les mêmes outils que les fatigues gestuelles en environnement réel, et nous permettre ainsi d'effectuer les contrôles manquants.



Figure 144 : situation des études pour réduire les contraintes musculosquelettiques présentées dans ce chapitre sur l'axe du temps présenté en Figure 96

5. Etudes psychophysiques liées aux systèmes de réduction des contraintes physiologiques

Ce chapitre traite de la prise en compte des données psychophysiques dans l'élaboration des modules de réduction des contraintes physiques ainsi que de l'étude de l'impact des modules déjà existants.

Dans le chapitre précédent, des modules de limitation de la fatigue visuelle et de compréhension de la fatigue gestuelle ont été présentés. Nous avons vu que les systèmes adressant la vision et ceux adressant les gestes ne sont pas au même niveau de développement : les recherches liées au système visuel étant plus anciennes, elles sont plus avancées. Les études physiologiques proposées dans ce chapitre suivent naturellement la même ligne du temps. Certaines études sur le système visuel portent sur l'influence des modules sur l'efficacité des sujets pour des tâches données. D'autres étudient des cas très particuliers de la perception pour obtenir des informations nécessaires en vue d'améliorer des modules existants ou en créer de futurs. Ces dernières sont composées d'études sur la vision (comme pour les parallaxes verticales) mais également d'étude sur les gestes en environnement virtuel. En effet, la recherche sur la fatigue gestuelle impose de mieux en comprendre les mécanismes avant de proposer des systèmes actifs de réductions de contraintes musculosquelettiques.

5.1. Perception du relief en fonction des interfaces

5.1.1. Introduction

Dans la conclusion de notre état de l'art (3.3) nous avons souligné qu'il est important de connaître également l'impact des traitements pour limiter les contraintes sur la perception des mondes virtuels présentés et donc sur l'efficacité des sujets. D'autre part, il est important de bien connaître l'influence de chaque paramètre et indice de relief sur la perception et cette efficacité pour savoir quels sont ceux qui sont nécessaires pour une tâche donnée, quels sont ceux qui sont fatigants et qu'on peut supprimer sans réduire l'efficacité de la perception bas niveau. Cette partie de chapitre traite de ces questions, elle étudie l'impact des indices de relief ainsi que celui des systèmes présentés au chapitre précédent sur la perception et l'efficacité de certaines tâches. Deux objectifs sont visés :

- Quelles sont les améliorations à apporter aux modules de réduction de la fatigue visuelle déjà mis en place et quels sont les futurs systèmes à réaliser.

- Une grille de lecture permettant de savoir quels sont les systèmes de réduction de fatigue qu'il est possible de mettre en place en fonction de la tâche virtuelle demandée aux utilisateurs.

5.1.2. Études de l'influence des différents paramètres visuels

5.1.2.1. Parallaxe de mouvement

Les parallaxes de mouvement sont, comme indiqué au paragraphe 3.2.13.2.1.1a), des indices de relief très puissants. Cette expérience démontre que la version artificielle des parallaxes de mouvement décrite au paragraphe 3.2.13.2.1.1b) l'est également et participe pour beaucoup à la perception du relief.

a) Protocole

Lors de cette expérience, nous avons présenté à 18 sujets une sphère ou une forme non symétrique réelle. Sa reproduction exacte (taille, lumière, couleur...) virtuelle est présentée en même temps. La forme virtuelle (Figure 145) et la forme réelle (voir Figure 146) sont toutes les deux visibles au même moment et séparée d'1m20 du sujet lorsque celui-ci ne peut se déplacer.

La forme virtuelle est ensuite présentée déformée dans le sens de la largeur, de la hauteur puis de la profondeur. Pour chaque déformation, les sujets doivent dire si la forme virtuelle présentée selon la méthode des stimulus constants (Bonnet 1986) (Tiberghien 1984) (Goldstein 2003) est « plus large », « plus grande en hauteur » ou « plus grande en profondeur » que la forme réelle.

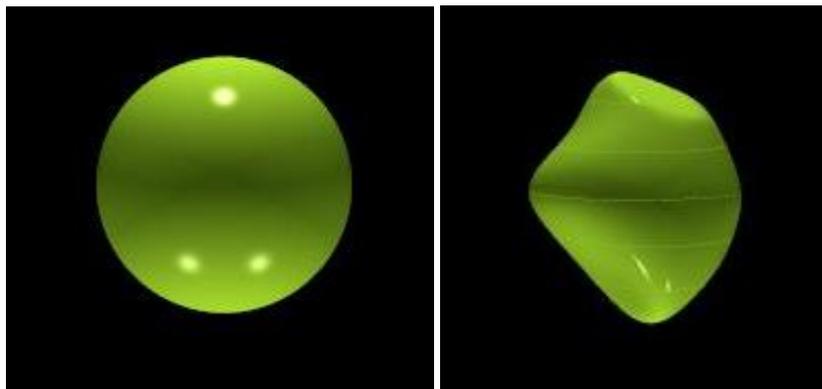


Figure 145 : capture d'écran des sphères et forme sans symétrie virtuelle

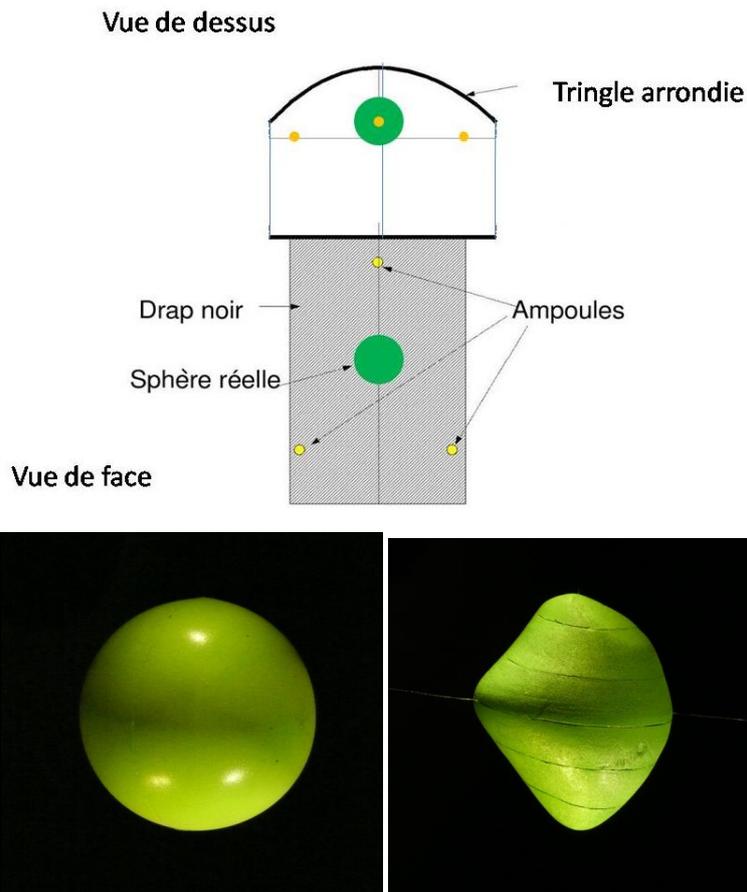


Figure 146 : schéma du dispositif réel et photos de la sphère et la forme non symétrique réelles

Nous testons différentes positions de la forme par rapport à l'écran pour permettre de tester les parallaxes positives, nulles ou négatives (Figure 147).

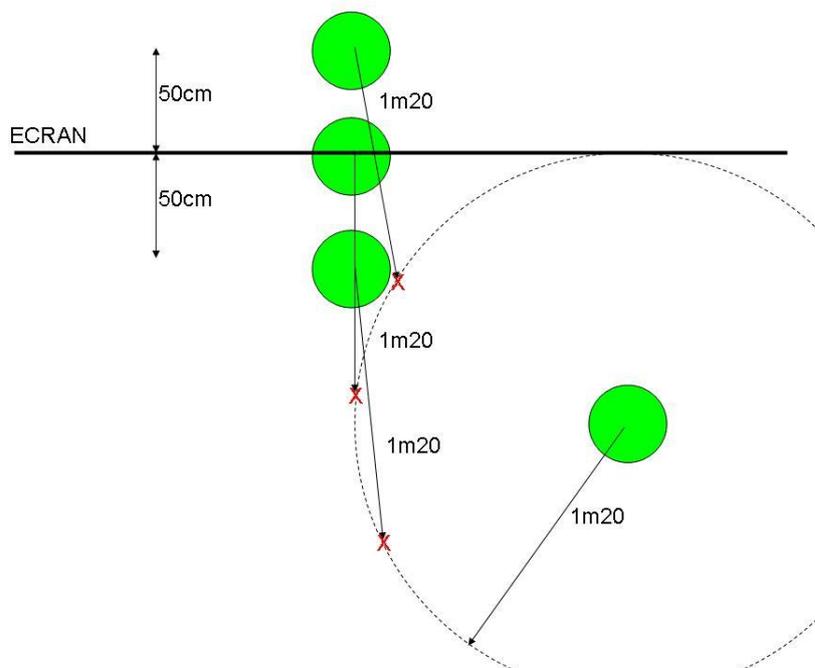


Figure 147 : position des différentes formes lorsque le sujet ne peut se déplacer

Nous analysons les réponses lorsque :

- Le sujet a une position fixe, le suivi de tête étant coupé
- Le suivi de tête et les parallaxes de mouvement artificielles enclenchés, le sujet ayant le droit de se déplacer comme il le souhaite.

b) Résultats

Nous présentons la concaténation des résultats relatifs aux deux formes et des différentes positions de la forme virtuelle. Seule la variation en profondeur a été traitée, les autres résultats n'étant pas statistiquement significatifs.

La Figure 148 présente le point d'égalisation subjective ainsi que la plus petite différence discernable lorsque la vision orthostéréoscopique (vision stéréoscopique adaptée à la DIO du sujet) est à disposition tandis que la Figure 149 présente les mêmes données, mais pour une vision monoscopique.

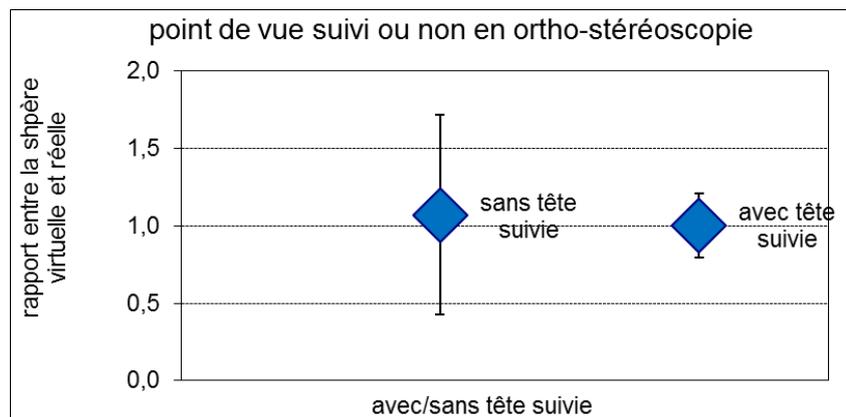


Figure 148 : influence des parallaxes de mouvement artificielles sur la perception des courbures en vision orthostéréoscopique

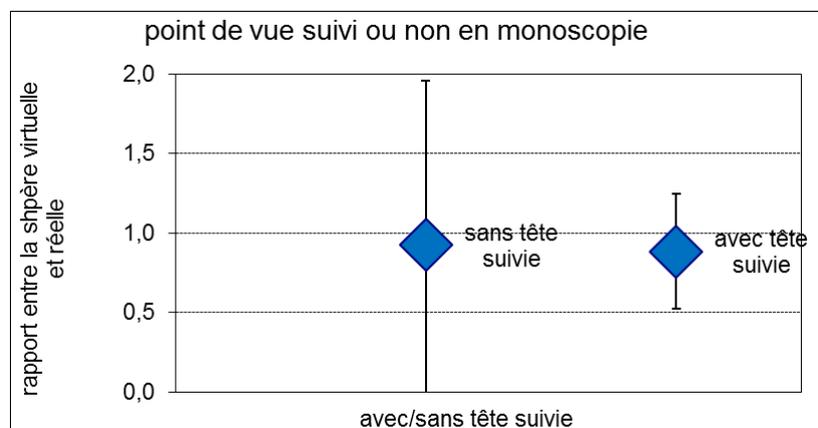


Figure 149 : influence des parallaxes de mouvement artificielles sur la perception des courbures en monoscopie

Que ce soit en vision stéréoscopique ou en vision monoscopique, nous observons que les parallaxes de mouvement artificielles sont un facteur majeur pour la plus petite différence discernable. Ces différences entre « avec » et « sans » sont statistiquement très significatives.

Devant l'importance de cette différence, on peut se demander quel indice artificiel est le plus important : la stéréoscopie ou les parallaxes de mouvement ? Nous comparons donc une vision monoscopique, mais avec les parallaxes de mouvement, à une vision stéréoscopique, mais sans les parallaxes de mouvement.

La Figure 150 montre que la perception des courbures est plus efficace et permet de discerner plus rapidement des petites différences lorsque les parallaxes de mouvement artificielles sont présentes, malgré le fait que la vision soit monoscopique. Ces différences étant statistiquement significatives, nous pouvons en déduire que les parallaxes de mouvement sont très importantes dans la perception des courbures.

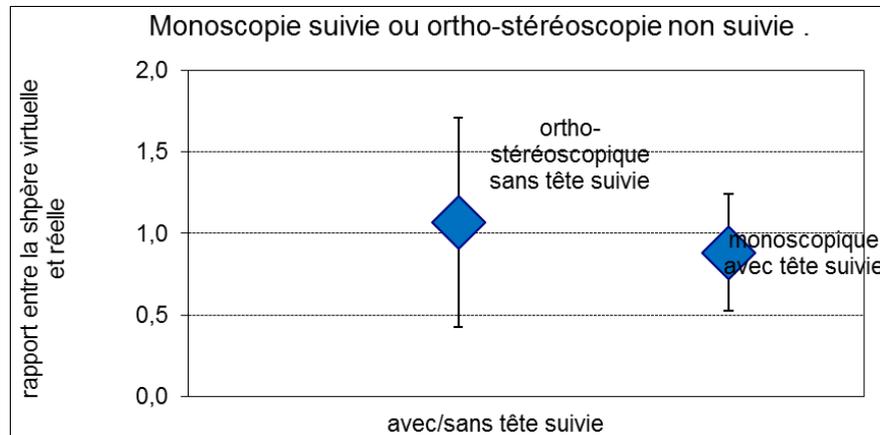


Figure 150 : perception des courbures entre orthostéréoscopie sans parallaxe de mouvements et monoscopie avec parallaxes de mouvement

Publications :

Laure Leroy, Philippe Fuchs, Alexis Paljic, Guillaume Moreau 2008. Study of stereoscopic shape perception for virtual design, International Conference on Artificial Reality and Telexistence, p144-152

Laure Leroy, Alexis Paljic, Philippe Fuchs, Guillaume Moreau 2008. Some experiments about shape perception in stereoscopic, SPIE stereoscopic display in application Vol. 7237

Laure Leroy. Diminution de la fatigue visuelle en stéréoscopie. ISTE éditions. Informatique. Paris, 2016.

Laure Leroy. Eyestrain Reduction in Stereoscopia. ISTE Éditions. Informatique. Paris, 2016.

Projet :

Cette expérience a été menée lors du projet IHS10, Projet FUI de 36 mois fini le 01/03/2010

c) Influence des résultats sur la constitution des modules

Les résultats de cette expérience sont à la base de l'idée du module SIRC sur la stéréoscopie intermittente (voir 4.1.2.2a)). En effet, le fait que l'indice de parallaxe de mouvement soit aussi important par rapport à la stéréoscopie expliquait pourquoi les sujets ne s'aperçoivent pas de la disparition du relief.

Lien avec le module SIRC :

Cette expérience explique le fait que la perception du relief soit maintenue même lors de la disparition temporaire de la stéréoscopie

Par contre, il est possible que lorsque le sujet ne bouge pas suffisamment, les parallaxes de mouvement apportent moins d'information de relief. Il serait intéressant de se servir de cette

information pour diminuer la distance entre les caméras virtuelles de façon à ce que le point de vergence s'accorde sur le point d'accommodation seulement lorsque les informations de parallaxes de mouvement sont suffisantes. Cela reviendrait à enclencher SIRC seulement lorsque les mouvements du sujet sont suffisants.

Futur du module SIRC :

SIRC Permettrait de supprimer la stéréoscopie lorsque le sujet se déplace le plus pour favoriser le maintien de la perception du relief

d) Déduction sur le lien entre les modules et l'efficacité

Cette étude nous permet de déduire que lorsqu'une perception des courbures est nécessaire, les parallaxes artificielles de mouvement permettent de suppléer à la perte d'indices stéréoscopiques de relief. Elle valide donc l'utilisation du module SIRC lorsque les parallaxes de mouvements sont activées quand une perception des courbures est nécessaire.

5.1.2.2. Stéréoscopie

a) Hyperstéréoscopie et orthostéréoscopie

1) Protocole

Le protocole de recherche est sensiblement le même qu'au paragraphe 5.1.2.1a), mais cette fois-ci, les deux conditions testées sont :

- Une stéréoscopie présentée avec des caméras virtuelles espacées d'une distance égale à la distance interpupillaire du sujet.
- Une stéréoscopie présentée avec des caméras virtuelles espacées d'une distance égale au double de la distance interpupillaire du sujet, donc une hyperstéréoscopie.
- Une vision monoscopique

2) Résultats

La Figure 151 montre que lorsque les parallaxes de mouvements ne sont pas présentes, le fait d'augmenter la distance entre les caméras ne modifie pas de façon statistiquement significative la plus petite différence discernable. Par contre, lorsque le point de vue est suivi, la plus petite différence discernable est modifiée (diminuée) par une hyperstéréoscopie, comme nous pouvons le voir sur la Figure 152.

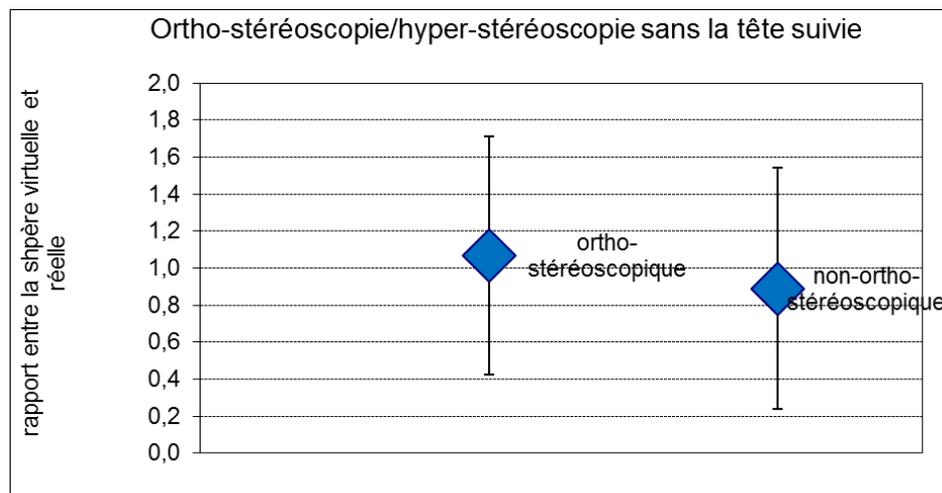


Figure 151 : influence de l'orthostéréoscopie et de l'hyperstéréoscopie sur la perception de courbure sans parallaxes de mouvement

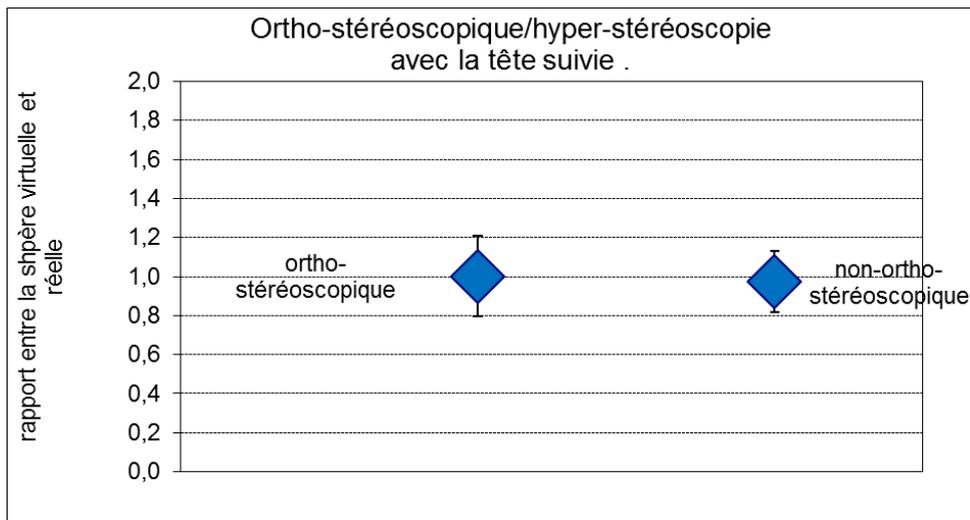


Figure 152: influence de l'orthostéréoscopie et de l'hyperstéréoscopie sur la perception de courbure avec parallaxes de mouvement

3) Influence des résultats sur la constitution des modules

Lien expérience – modules :

Nous pourrions permettre à SIRC d'augmenter la stéréoscopie momentanément lors d'une tâche de perception de courbure, mais il faudrait étudier qu'un bref passage en hyperstéréoscopie n'entraînerait pas une fatigue visuelle supplémentaire.

b) Stéréoscopie intermittente

Avec le module « SIRC : Stéréoscopie intermittente pour relâchement de la convergence » (voir 4.1.2.2a)). Nous procédons à des réductions de distance entre les caméras virtuelles pour que la vergence corresponde à l'accommodation et diminuer ainsi le conflit accommodation - vergence. Cependant, il peut s'avérer utile de vérifier l'impact de ce module sur l'efficacité des sujets dans leurs tâches ainsi que sur leur perception du relief.

1) Protocole

Nous imposons à 60 sujets quatre conditions expérimentales pour effectuer quatre tâches de perception en intersujets.

- Les quatre conditions expérimentales sont :

- Vision monoscopique (condition témoin)
- Vision stéréoscopique avec une distance intercaméra égale à la DIO du sujet (condition témoin)
- Vision monoscopique pendant quatre secondes, puis augmentation de la distance intercaméra jusqu'à la DIO du sujet. Cette augmentation se fait en trois secondes
- Vision stéréoscopique puis réduction de la distance intercaméra jusqu'à une distance nulle en trois secondes.

- Les quatre tâches sont :

- Une tâche de positionnement : une arche est présentée à une profondeur aléatoire ainsi qu'une balle dans l'axe de l'arche également à une profondeur aléatoire. La balle se rapproche de l'arche de façon à passer en dessous. Le sujet doit indiquer le moment où la balle est en dessous de celle-ci

- Une tâche de perception de profondeur relative : plusieurs objets virtuels sont disposés face au sujet à la même hauteur. Parmi eux, des sphères à des profondeurs différentes. Le sujet doit indiquer la sphère la plus proche
- Une tâche de perception des courbures : un cylindre virtuel est présenté face au sujet. Ce dernier doit indiquer si sa base est circulaire. Cette tâche ressemble beaucoup à celle présentée au point 5.1.2.1a), mais cette fois, la forme de référence n'est pas visible, le sujet se sert de son référentiel interne (Johnston 1991)
- Une tâche de détection de collision : deux cubes sont positionnés de façon aléatoire sur deux murs latéraux d'une pièce. Ils se dirigent vers le mur opposé à leur mur de départ dans une direction aléatoire. Avant d'être au même niveau, les cubes disparaissent, le sujet doit indiquer s'ils seraient entrés en contact.

2) Résultats

• Tâche de positionnement

Dans cette tâche, le sujet doit nous indiquer le moment où la balle passe sous l'arche. Nous mesurons donc la distance entre la position de la balle au moment indiqué et la position du centre de l'arche. Nous présentons cette erreur en cm sur la Figure 153. Nous pouvons voir que la condition « stéréoscopie au début » donne des résultats très comparables à ceux avec une vision stéréoscopique totale, tandis que la « stéréoscopie à la fin » donnerait plutôt des résultats proches de la condition monoscopique. Ces différences sont statistiquement significatives. Cela semblerait indiquer que pour une tâche de positionnement, la représentation mentale du relief du sujet se fait très rapidement.

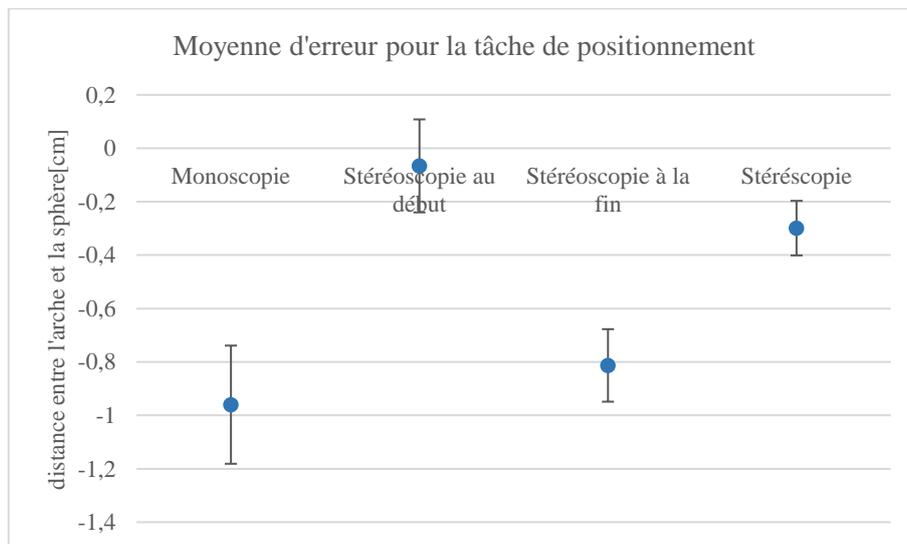


Figure 153 : impact du module SIRC sur une tâche de positionnement

• Tâche de perception de la profondeur relative

Dans cette tâche, le sujet doit indiquer la sphère la plus proche de lui, nous mesurons donc la distance entre la sphère la plus proche et celle indiquée par le sujet. Nous présentons cette erreur sur la Figure 154. Nous pouvons voir qu'encore une fois, la « stéréoscopie au début » est très comparable à la condition stéréoscopique tandis que la « stéréoscopie à la fin » est très proche de la condition monoscopique. Ces différences sont statistiquement significatives. Donc nous pouvons en déduire que pour ce type de tâche, la représentation carte mentale du relief se crée rapidement. Dans la mesure où les deux tâches présentées jusqu'ici sont des comparaisons de distance entre le

sujet et des objets (dans la première, les deux objets sont alignés et en mouvement, ce qui n'est pas le cas dans la seconde), ces résultats semblent cohérents entre eux.

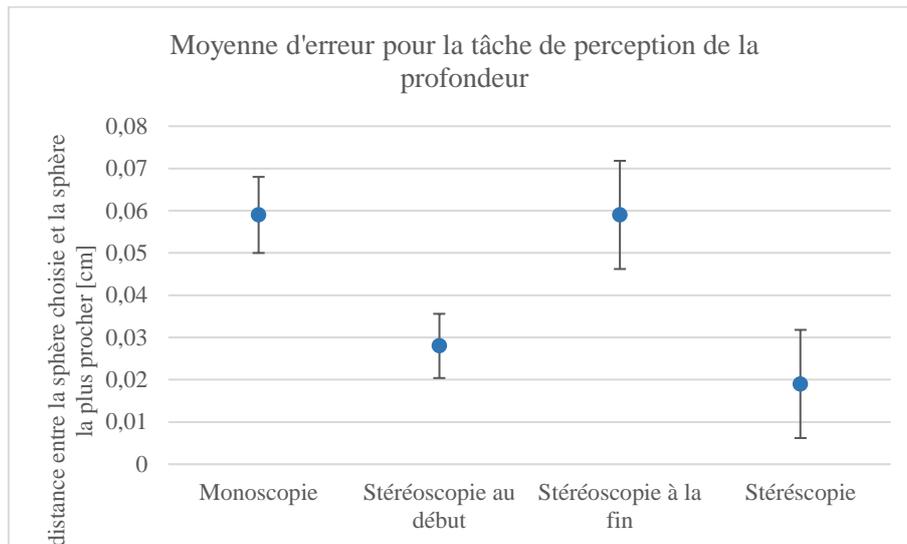


Figure 154 : impact du module SIRC sur une tâche de perception de la profondeur relative

Cette tâche nous permet également d'étudier l'impact de SIRC sur le temps de réponse des sujets. Nous présentons ces temps de réponse sur la Figure 155. Nous constatons, comme prévu, que la « stéréoscopie au début » donne les mêmes temps de réponse que la stéréoscopie. Notons tout de même que comme les sujets répondent en moyenne après 5 secondes, ils n'ont plus de vision stéréoscopique depuis 2 secondes puisque la distance entre les caméras est nulle à partir de trois secondes. Les sujets ayant la stéréoscopie à la fin répondent toutefois un peu plus rapidement que lors de la condition monoscopique.

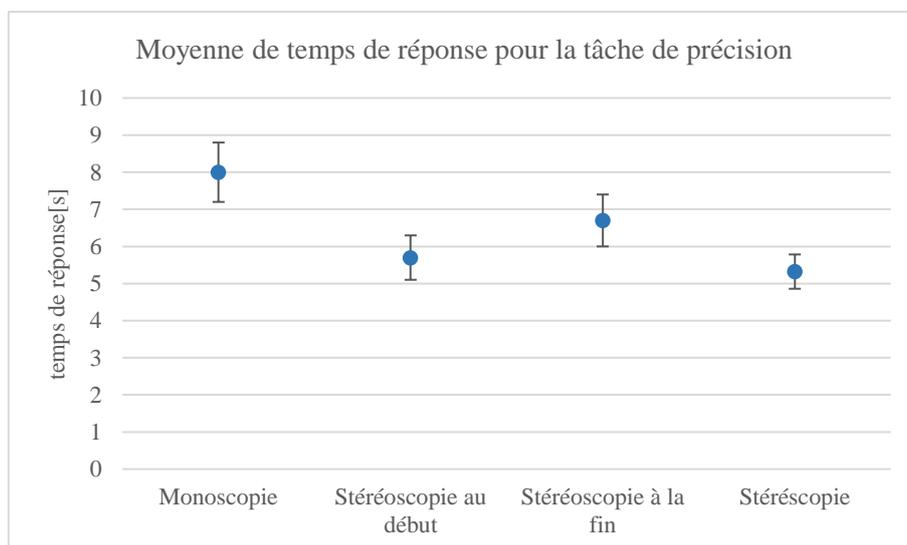


Figure 155 : impact de SIRC sur le temps de réponse des sujets dans une tâche de perception de profondeur relative

- *Tâche de la perception des courbures*

Dans cette tâche les sujets doivent indiquer si le cylindre présenté est de base circulaire, nous mesurons donc le PSE (Point of Subjective Equality) et le JND (Just Noticeable Difference). Nous présentons sur la Figure 156 les résultats de ces PSE et JND pour les différentes conditions. Nous pouvons voir que cette fois-ci, la « stéréoscopie à la fin » est plus proche de la condition

stéréoscopique, alors que la « stéréoscopie au début » est plus proche de la condition monoscopique.

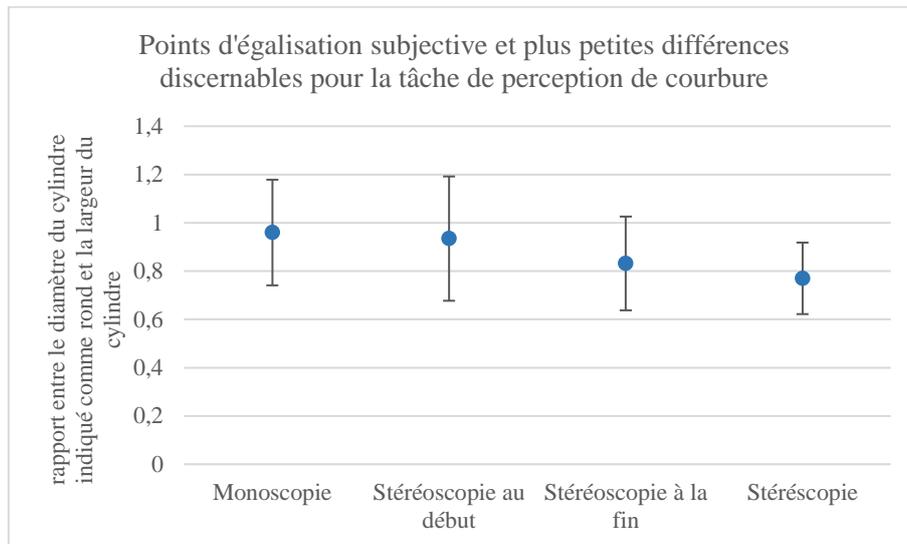


Figure 156 : impact de SIRC sur la perception des courbures

La Figure 157 montre que le temps de réponse suit la même tendance. Il est probable que la principale différence entre cette tâche et les précédentes est le fait que les courbures utilisent les dérivées secondes des disparités alors que les deux premières tâches utilisent simplement les disparités horizontales.

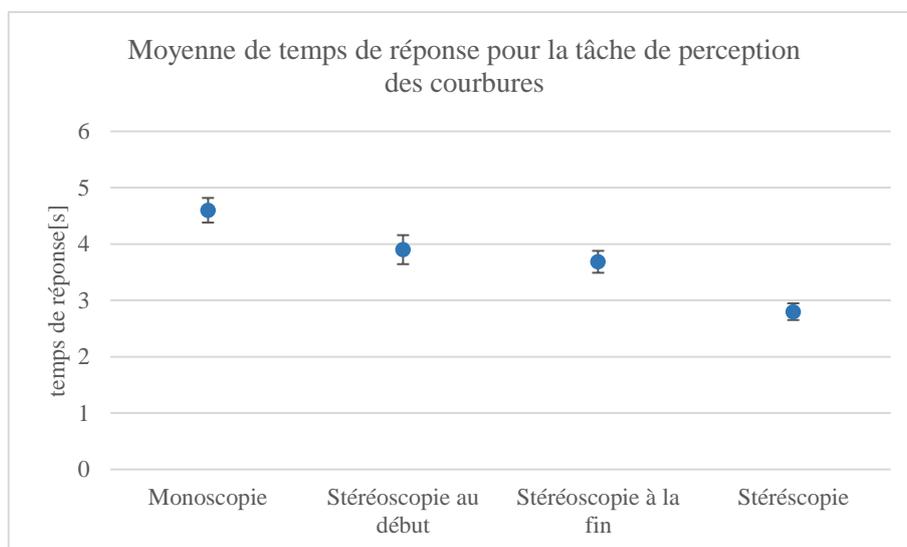


Figure 157 : impact de SIRC sur le temps de réponse lors d'une tâche de perception des courbures

Il serait intéressant de reproduire cette expérience avec :

- Des courbures de fréquences différentes pour différentes excentricités par rapport à la vision centrale : en effet, il existe une fréquence de variation optimale pour chaque excentricité (Prince and Rogers 1998). Est-ce que cette fréquence optimale aurait une influence sur l'impact de SIRC ? Est-ce que nous pourrions optimiser la variation de la distance entre les caméras en fonction des dérivées secondes des disparités horizontales ?
- Des courbures verticales : en effet, les courbures verticales étant moins bien perçues que les courbures horizontales (Devisme 2008) (Bradshaw and Rogers 1999), est-ce que nous

pourrions faire varier les paramètres de SIRC en fonction des dérivées secondes des disparités horizontales ?

- Des plans inclinés et obliques : en effet, ces plans sont moins bien perçus que les courbures (Rogers and Cagenello 1989), serait-il possible de faire varier la vitesse de diminution de la stéréoscopie en fonction des dérivées premières des disparités horizontales (Devisme 2008) ?

- *Tâche de détection de collision*

Lors de cette tâche, les sujets doivent indiquer si les cubes ayant disparu seraient rentrés en collision. Selon la Figure 158 sur l'impact des différentes conditions sur cette perception, cette fois encore la condition « stéréoscopie au début » se rapproche beaucoup de la condition stéréoscopique tandis que la condition « stéréoscopie à la fin » est très analogue à la condition monoscopique. Ces différences étant statistiquement significatives, nous pouvons en déduire que pour ce genre de tâche également, la stéréoscopie au début serait plus intéressante que l'inverse.

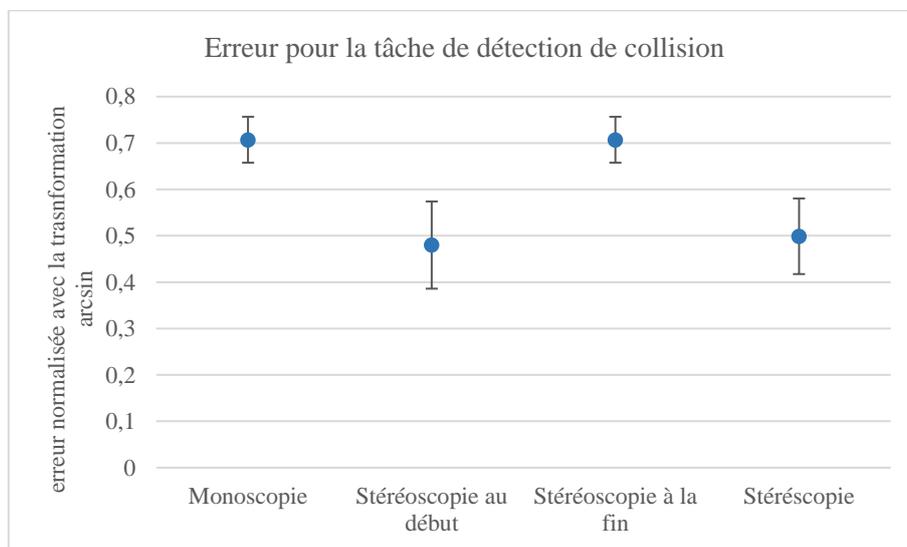


Figure 158 : Impact de SIRC sur les tâches de perception de collision

Nous voyons sur la Figure 159 que les temps de réponse suivent la même tendance : « stéréoscopie au début » est similaire à la condition stéréoscopique tandis que la « stéréoscopie à la fin » se rapproche de la condition monoscopique.

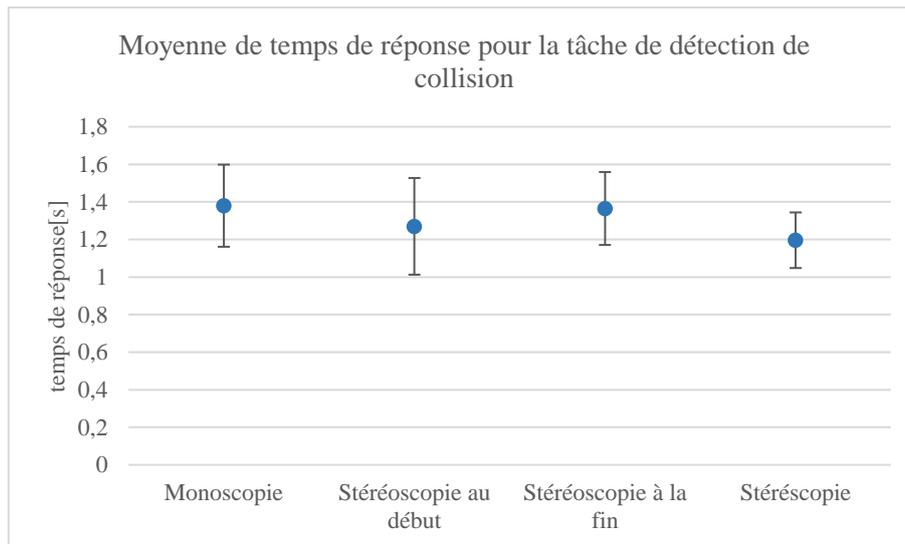


Figure 159 : Impact de SIRC sur les temps de réponse lors d'une tâche de perception de collision

3) Influence des résultats sur la constitution des modules

En l'état, SIRC permet d'augmenter et de diminuer la stéréoscopie au début de chaque tâche. Ces résultats nous permettent d'envisager plusieurs nouveautés à incorporer à SIRC en fonction des tâches à réaliser par le sujet :

Amélioration de SIRC :

Le concepteur d'une application pourrait indiquer si son application comporte plus de tâches de perception de relief que de courbures. Si cette dernière comporte plus de détection de relief, il serait préférable de commencer par la stéréoscopie puis diminuer vers la monoscopie, tandis que si la tâche comporte plus de perception de courbure (donc de dérivée seconde des disparités horizontales), il vaudrait mieux commencer par une vision monoscopique et terminer par une vision stéréoscopique.

Cette amélioration constituerait un premier pas. Il faudrait ensuite faire des expériences supplémentaires pour savoir comment faire évoluer la vitesse de variation entre une vision monoscopique et une vision stéréoscopique. En effet, il est possible que cette vitesse de variation soit dépendante de :

- L'orientation des courbures,
- Des inclinaisons et obliquités des plans
- La vitesse des objets en mouvement (est-ce que la vitesse des cubes lors de la tâche de détection de collision a une influence ?)

Publication :

Bouaniche, Ari, and Laure Leroy. "Investigating Intermittent Stereoscopia: Its Effects on Perception and Visual Fatigue." *Electronic Imaging* 2016, no. 5 (2016). doi :10.2352.

Laure Leroy. *Diminution de la fatigue visuelle en stéréoscopie*. ISTE éditions. Informatique. Paris, 2016.

Laure Leroy. *Eyestrain Reduction in Stereoscopia*. ISTE Éditions. Informatique. Paris, 2016.

Stage suivi :

Février 2015 – juillet 2015 : Bouaniche, Ari. "Explorer la stéréoscopie intermittente, son influence sur la perception et la fatigue visuelle." Thèse de master Saint-Denis : Université Paris 8 - Vincennes Saint-Denis, 2015.

4) Dédution sur le lien entre les modules et l'efficacité

Cette étude nous permet de déduire que le module SIRC pourrait être utilisé pour des tâches de positionnement, de perception des courbures et de détection de collision, sans trop de perte d'efficacité. Elle nous permet, de plus, de penser qu'une apparition de la stéréoscopie progressive serait plus indiquée pour des tâches de perception de courbure tandis que des tâches de positionnement et de détection de collision bénéficieraient plus d'une stéréoscopie au début suivie de la disparition de celle-ci.

c) Parallaxes verticales

Lors d'immersion stéréoscopique, les caméras sont généralement parallèles pour éviter les parallaxes verticales. En effet, lorsque les deux caméras sont convergentes, des disparités verticales se forment. De telles disparités existent dans la vision naturelle. Elles se définissent comme la différence entre les angles formés entre le plan de fixation, l'œil gauche et droit et un point. Par exemple, sur la Figure 160, la disparité verticale de la pomme rouge est égale à :

$$|\beta_D - \beta_G| \text{ (Espinasse-Berrod and Pêchereau 2008)}$$

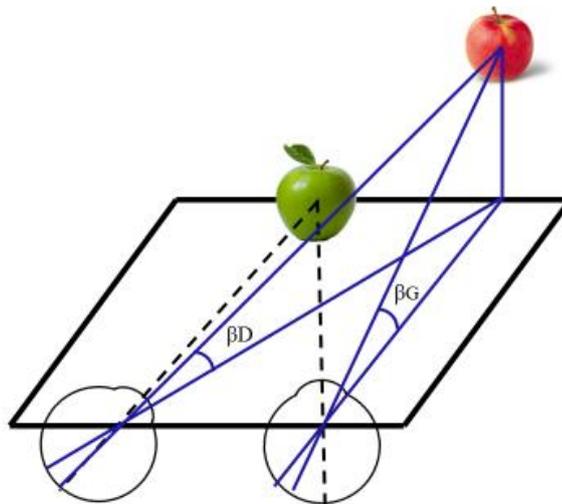


Figure 160 : Calcul d'une disparité verticale

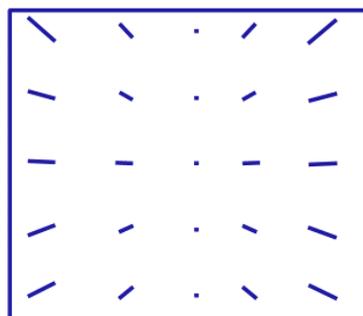


Figure 161 : représentation vectorielle des disparités d'un plan frontoparallèle

Ainsi, si nous regardons le point central d'un plan frontoparallèle, les disparités visibles sur la Figure 161 se forment. Lorsque deux caméras sont convergentes, les mêmes disparités se créent, ce qui *a priori* pourrait être positif. Cependant, dans la vision naturelle, les disparités verticales sont toujours en vision périphérique, elles nous aident à mieux percevoir les formes (Devisme 2008). Mais en vision artificielle, nous ne savons pas forcément où regarde le sujet et si ce dernier ne regarde pas exactement au point de convergence des deux caméras, il peut avoir des disparités verticales en vision centrale qui s'avèrent très difficiles à fusionner (Julesz 1971) (Nielsen and Poggio 1984).

Cependant, il serait intéressant de savoir s'il est possible de reproduire ces disparités verticales en vision périphérique. Pour ce faire, il faudrait connaître le point de fixation à chaque moment du sujet pour ensuite faire converger les caméras sur ce point. Le point d'intérêt du sujet à chaque moment est disponible avec un oculomètre. Dans cette expérience, nous essayons de savoir si les disparités verticales sont bénéfiques pour la perception des formes avant de se préoccuper de la réduction de la fatigue visuelle.

1) Protocole

Dans cette expérience, nous présentons aux sujets un cuboïde en fil de fer (voir Figure 162) sur fond noir (pour que les sujets puissent mieux se concentrer sur l'objet (Luo et al. 2007)). La face avant de ce cuboïde est un carré, mais la profondeur varie. Les sujets doivent indiquer si le cuboïde est un cube ou non.

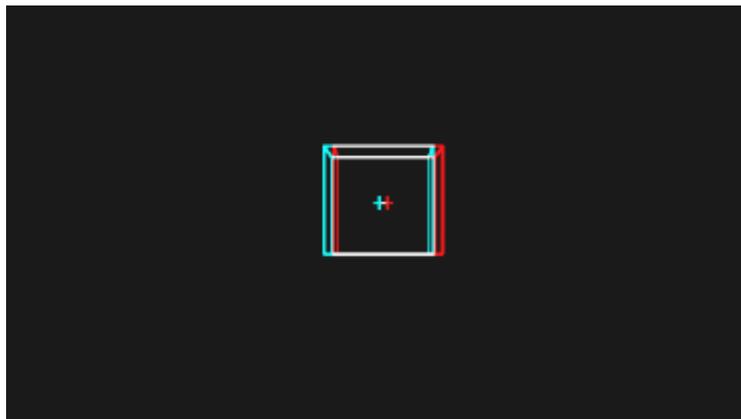


Figure 162 : cube présenté au sujet pour l'étude de l'influence des parallaxes verticales (Aurat 30 mai 2016)

Le sujet est assis à 1,2m de l'écran, mais le cube est présenté soit devant l'écran, soit au niveau de l'écran (voir Figure 163). Nous présentons également deux tailles du cuboïde pour étudier deux excentricités différentes. En effet, comme les disparités verticales se trouvent dans la vision périphérique, il nous importe d'étudier différentes excentricités. Pour être sûr que les arêtes du cube soient en vision périphérique, le sujet est invité à ne regarder que la croix située au centre du cube (visible sur la Figure 162).

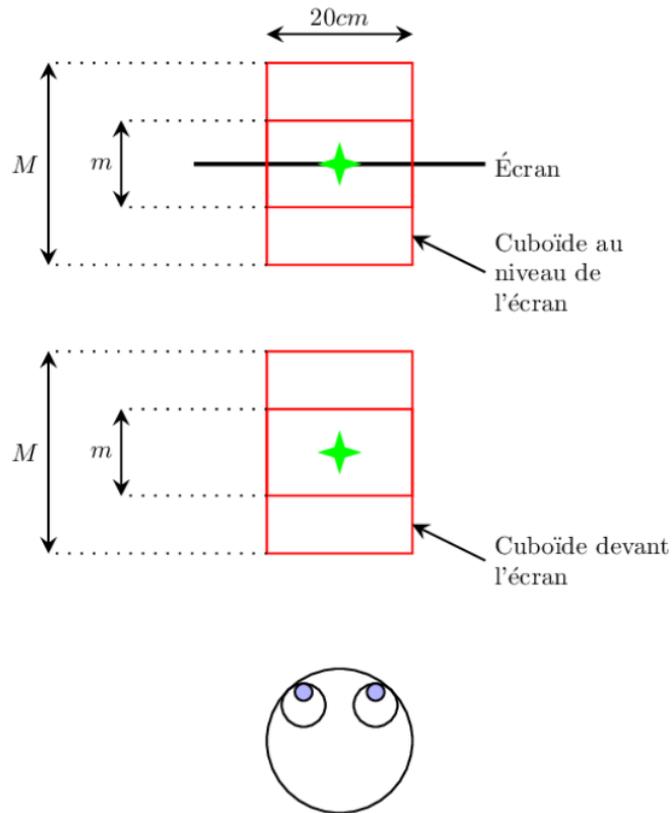


Figure 163 : disposition des cuboïdes et du sujet dans l'étude des parallaxes verticales

2) Résultats

Sur la Figure 164, nous pouvons voir l'influence de la convergence des caméras sur la perception du cuboïde. Nous pouvons y voir que la plus petite différence discernable (JND) est plus petite avec des caméras convergentes (statistiquement significatif) lorsque le petit cuboïde, présentant peu d'excentricité, est proche. Par contre, la convergence des caméras ne semble pas avoir d'impact sur la perception des formes lors ce cuboïde est éloigné.

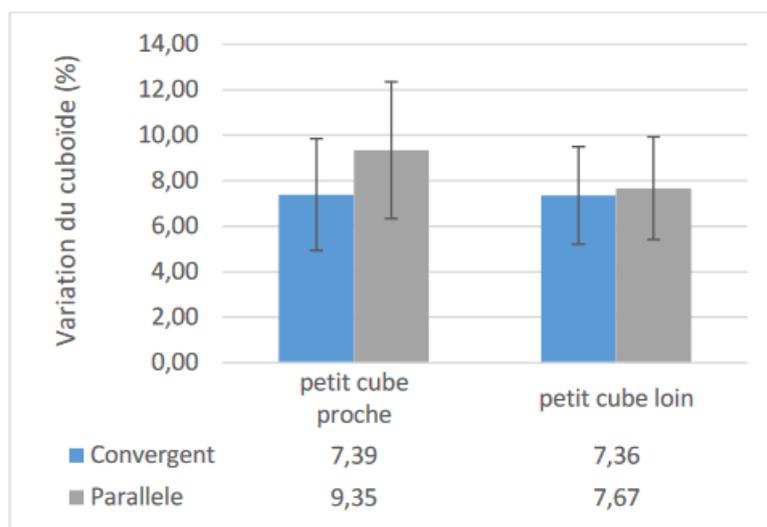


Figure 164 : influence des parallaxes verticales sur la perception de la forme avec de faibles excentricités (Aurat 30 mai 2016)

Nous exposons sur la Figure 165 les plus petites différences discernables pour les différentes positions du cuboïde présentant de grandes excentricités. Nous pouvons voir que dans aucun des cas, la convergence des caméras ne semble améliorer la perception des formes lorsque ce sont des grandes excentricités (la différence est statistiquement significative pour le cuboïde proche).

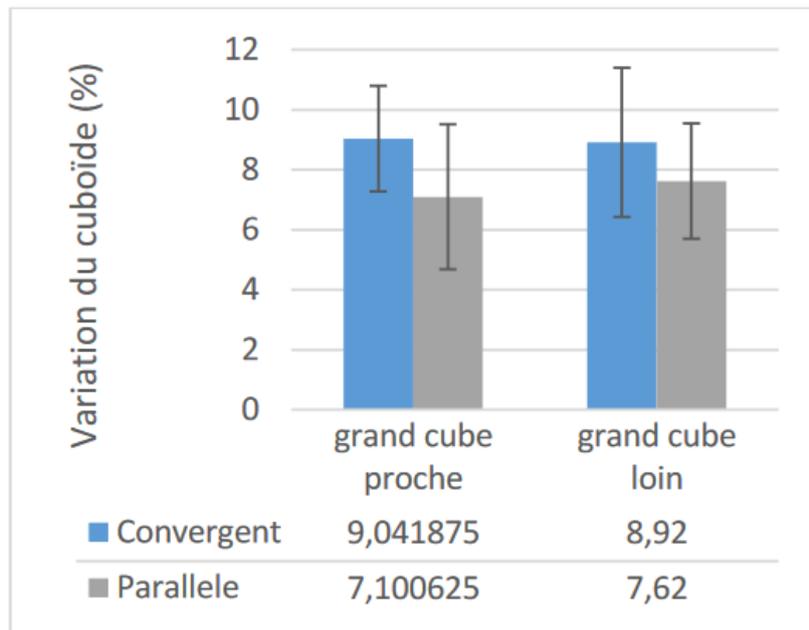


Figure 165 : influence des parallaxes verticales sur la perception d'une forme (Aurat 30 mai 2016)

Nous pouvons résumer l'amélioration de la perception des formes obtenue par convergence des caméras virtuelles sur la Figure 166. Elle montre que lorsque le cuboïde est proche et présenté avec des excentricités faibles (donc le « petit cube » (1)), la convergence améliore la perception (statistiquement significatif). Cependant, ce n'est le cas dans aucune autre configuration. Lorsque le cuboïde est proche avec de grandes excentricités (4), la convergence des caméras a même tendance à détériorer de façon significative la perception des formes.

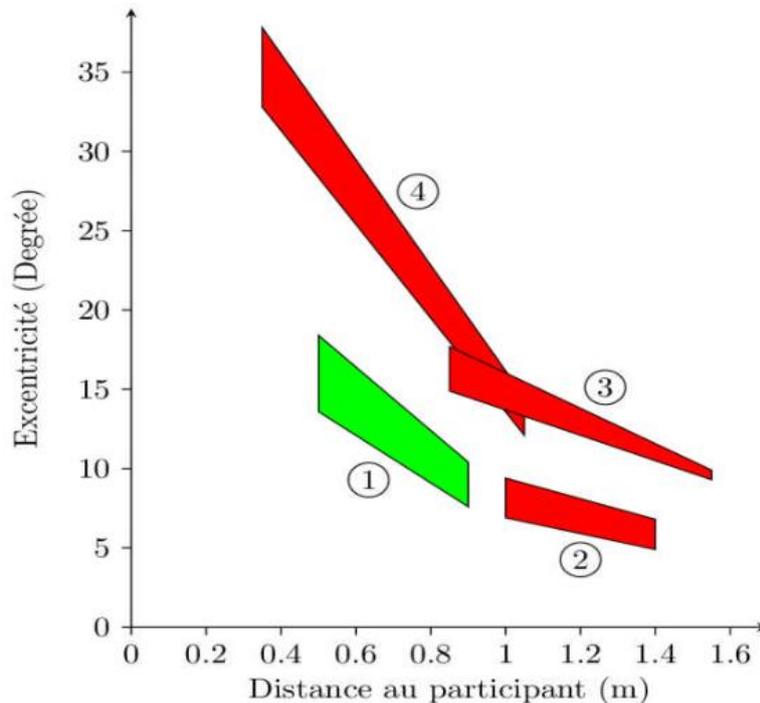


Figure 166 : impact de la disparité verticale en fonction de l'excentricité et de la distance du participant (Aurat 30 mai 2016)

3) Influence des résultats sur la constitution des modules

Nous avons donc un module permettant une convergence des caméras virtuelles. Cependant, des études sont encore nécessaires pour mieux comprendre quand la convergence des caméras sur le point de fixation peut être utile, ou en tout cas, ne dégrade pas la perception.

Le module complet n'est pas encore constitué, en effet, il manque le lien avec l'eye-trackeur. Comme nous l'avons vu au paragraphe 4.1.1.2c) si celui-ci n'est pas suffisamment rapide, il détériore les stimulus et donc influence de façon négative la fatigue visuelle (ou en tout cas réduit à néant les améliorations que nous souhaitons apporter).

Lien avec les modules :

Le programme d'un futur module existe, mais il manque encore le lien avec un suivi du regard suffisamment rapide pour ne pas engendrer lui-même de la fatigue visuelle, comme nous l'avons vu au paragraphe 4.1.1.2c).

Thèse :

Aurat, David. 30 mai 2016. Immersion visuelle tridimensionnelle haute performance par suivi du mouvement des yeux. Paris : École nationale supérieure des Mines de Paris.

Publication :

Aurat, David, Laure Leroy, Olivier Hugues, and Philippe Fuchs. "Improving Shape Perception in Virtual Reality Systems Using Toed-in Cameras," 2016. VRIC 2016, Mar 2016, Laval, France. 2016

4) Dédution sur le lien entre les modules et l'efficacité

Nous pensons que lorsque le module de caméra convergente sera créé, nous préconiserons son utilisation seulement pour des tâches impliquant des objets proches de la vision centrale et proche de l'utilisateur. Dans les autres tâches, l'utilisation de ce type de module pourrait dégrader la perception des objets. Plus d'études sont nécessaires pour établir quand il serait intéressant, ou en tout cas non dommageable de l'activer. Lorsque ces compléments d'études seront effectués et lorsqu'une boucle eye-tracking - rendu suffisamment rapide sera disponible, nous pourrons tester son impact sur la fatigue visuelle pour l'intégrer en tant que module

5.1.2.3. Fréquences spatiales

Dans les modules RAFA1 et RAFA2, nous supprimons les hautes fréquences spatiales pour réduire la fatigue visuelle. Cependant, nous souhaitons connaître l'impact sur la perception et l'efficacité de certaines tâches. Si Mather indique en 1996 que le flou est un indice de relief (Mather 1996), dans une autre étude, il montre quatre ans plus tard, avec Smith, que l'ajout de flou, même s'il est en contradiction avec les indices stéréoscopiques n'influence que très peu la perception de la profondeur (Mather and Smith 2000). Sur des stéréogrammes de points aléatoires, lorsque le flou est en contradiction avec la stéréoscopie, la convergence se rapproche de l'indice de flou, mais reste majoritairement influencée par la stéréoscopie (Figure 167). Cependant, il nous paraît important de savoir si la disparition des hautes fréquences ne gêne pas d'autres tâches que cette dernière.

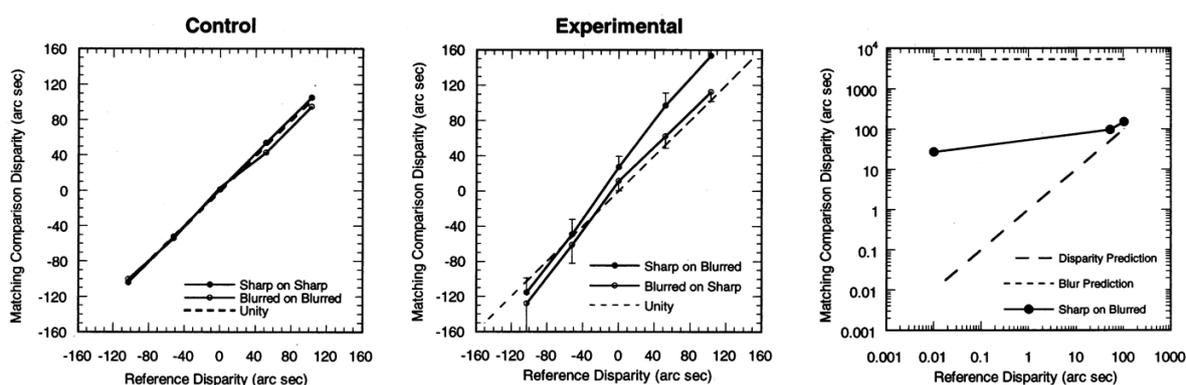


Figure 167 : disparités avec flou (Mather and Smith 2000)

a) Tâche de positionnement

La première expérience sur l'impact de la disparition des hautes fréquences consiste à étudier l'influence de celles-ci sur une tâche de positionnement et de perception de profondeur.

1) Protocole

Nous demandons à 18 sujets de positionner une boule virtuelle sur un carré rouge placé aléatoirement sur 5 cylindres. La position des cylindres en profondeur est :

Numéro du cylindre	Profondeur par rapport à l'écran [cm]
1	-30
2	-60
3	0
4	30
5	60

Dès que le sujet a pointé la boule sur le carré, ce dernier disparaît et se place sur un autre cylindre. Le cylindre se déplace légèrement de manière aléatoire et parallèlement au sujet pour garder la même hauteur et profondeur. Cette manipulation se fait 50 fois.

Deux conditions sont présentées dans un ordre aléatoire avec 24 heures d'écart :

- Avec RAFA 1 (donc une suppression des hautes fréquences aux endroits de grandes disparités)
- Sans traitement

2) Résultats

Nous présentons sur la Figure 168 les résultats de la précision des sujets lors de la tâche pour chaque cylindre. Il n'y a aucune différence significative de justesse, par contre, nous voyons que la précision (écart-type des erreurs) est impactée par la réduction des fréquences spatiales lorsque les cylindres sont éloignés de l'écran. En effet, le cylindre 3, situé sur l'écran ne voit pas sa précision altérée, par contre, les cylindres 2 et 5 ont une précision significativement réduite alors que ce sont ces cylindres qui voient la plus grande suppression de leurs fréquences spatiales puisqu'ils présentent le plus de disparités horizontales.

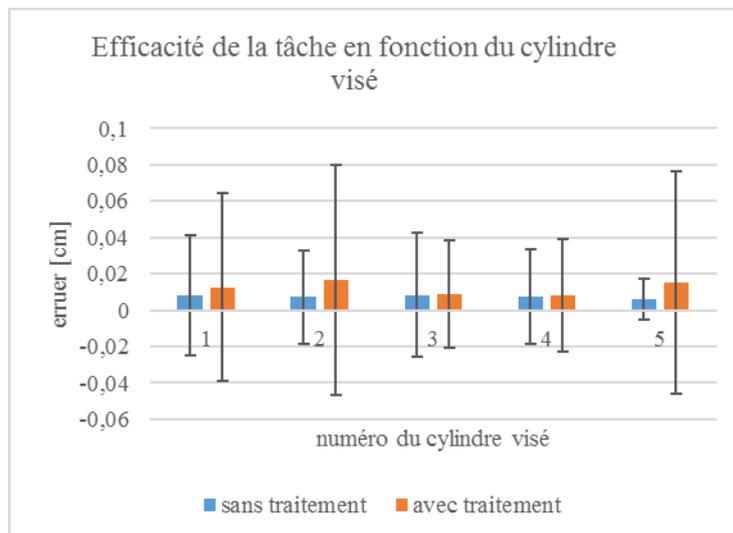


Figure 168 : impact de RAFA1 sur une tâche de positionnement

3) Influence des résultats sur la constitution des modules

Lien avec les modules :

Cette expérience nous permet de préconiser une utilisation de RAFA1 lorsque la tâche à réaliser se situe au niveau de l'écran.

b) Perception des courbures

Nous savons que les fréquences spatiales sont impliquées dans la perception des courbures. En effet, Sakai a montré que la répartition de celles-ci permettait de percevoir les courbures (Sakai and Finkel 1995) (voir Figure 169). Il est alors légitime de s'interroger sur l'impact d'une suppression des hautes fréquences sur la perception des courbures.

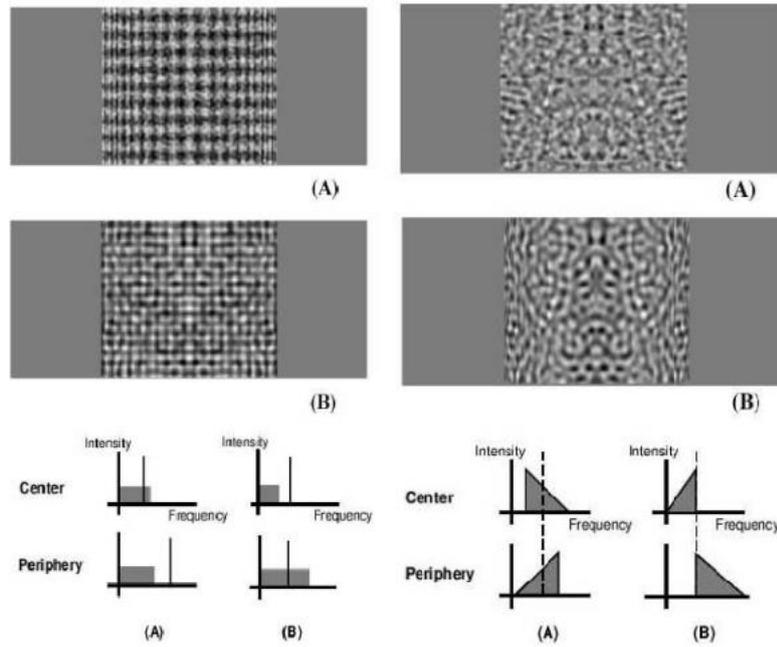


Figure 169: la répartition des fréquences spatiales permet une perception des courbures (Sakai and Finkel 1995)

Nous souhaitons étudier tant l'influence de la suppression des hautes fréquences de l'objet étudié que celles du fond, car Luo a montré que le contenu fréquentiel du fond avait une influence sur la perception des distances (Luo et al. 2007).

1) Protocole

Nous présentons une sphère virtuelle déformée en profondeur à 15 sujets. Cette sphère est couverte d'une texture présentant des fréquences spatiales plus ou moins hautes (voir Figure 170).

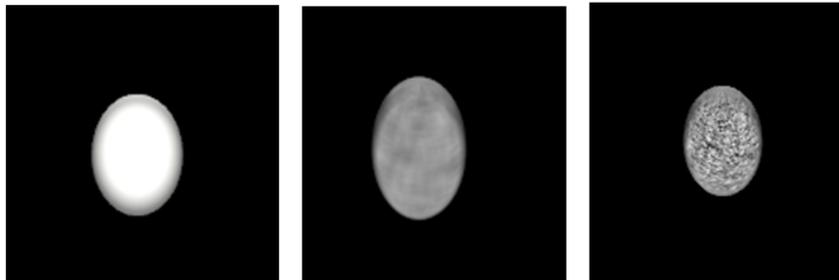


Figure 170 : différence texture de la sphère

De même, le fond est couvert d'une texture contenant plus ou moins de hautes fréquences spatiales (voir Figure 171).

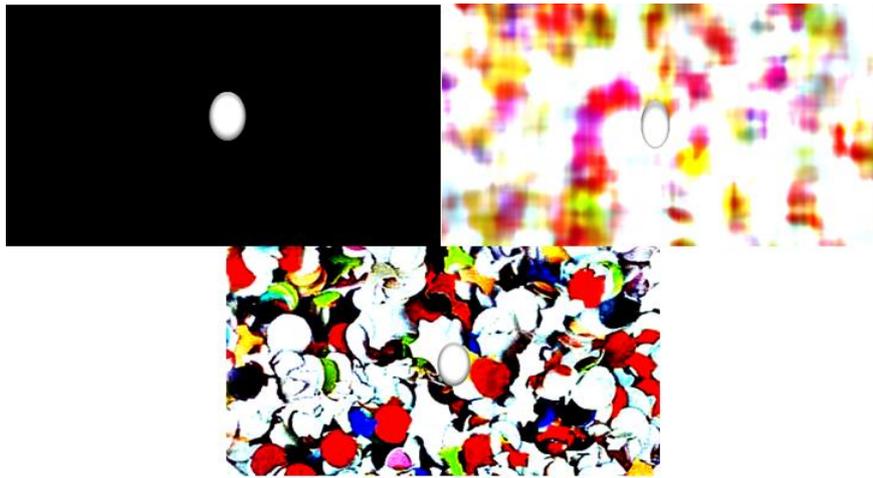


Figure 171 : fréquence spatiale du fond

2) Résultats

Nous étudions la plus petite différence discernable ainsi que le point d'égalisation subjective. Nous pouvons voir sur la Figure 172 que les fréquences spatiales de la texture de la sphère n'ont pas d'influence statistiquement significative sur la perception de sa courbure. De même, nous ne trouvons pas non plus de différence statistiquement significative pour les fréquences spatiales de la texture du fond (voir Figure 173).

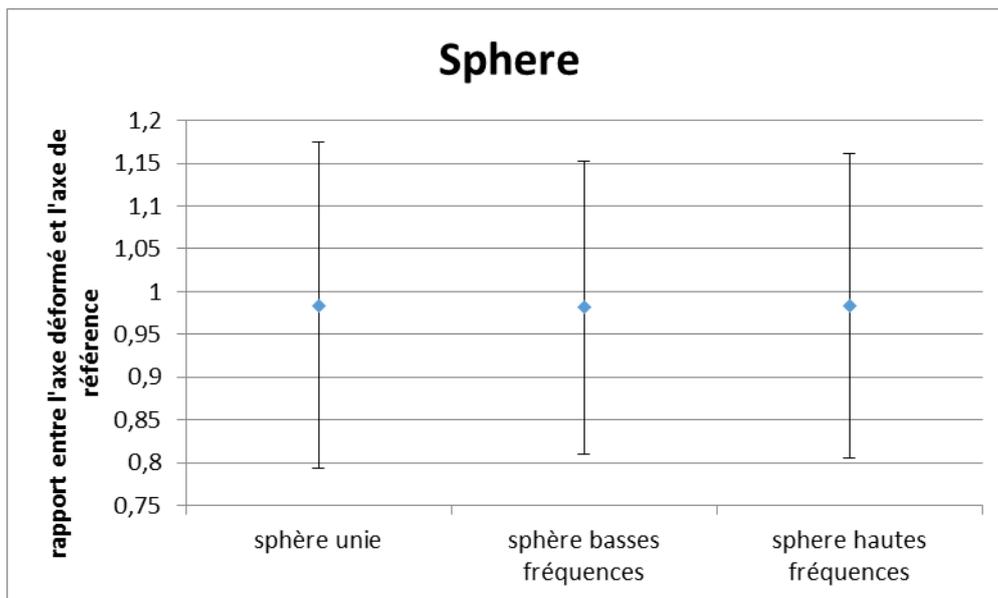


Figure 172 : influence des fréquences spatiales de l'objet principal sur la perception des courbures

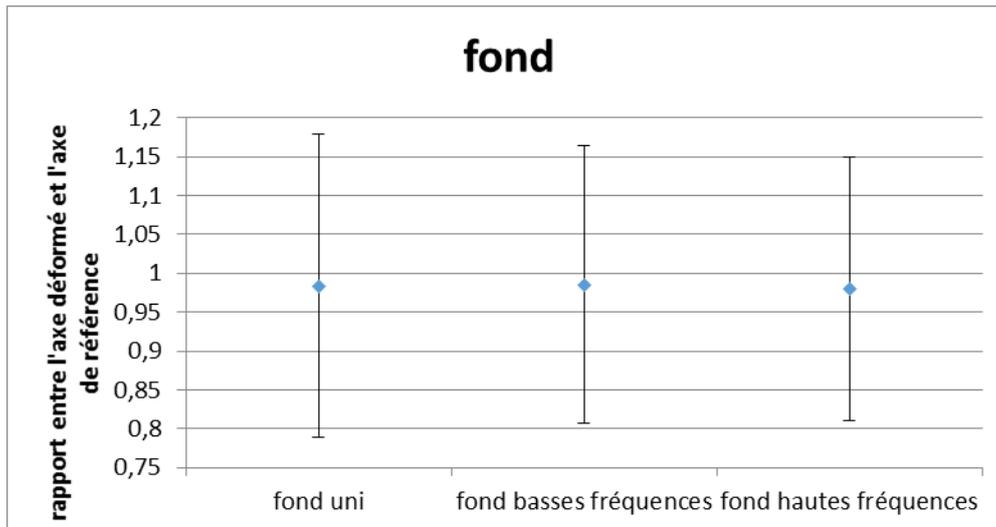


Figure 173 : influence des fréquences spatiales du fond sur la perception des courbures

3) Influence des résultats sur la constitution des modules

Nous ne pouvons pas montrer l'influence d'une coupure de hautes fréquences (en tout cas au niveau de suppression des modules RAFA1 et RAFA2). Bien sûr, le fait que les différences trouvées en perception de courbure ne soient pas statistiquement significatives ne signifie pas qu'elles n'existent pas, mais nous pouvons en déduire que les suppressions des hautes fréquences ne sont probablement pas dommageables de façon drastique pour ce type de tâche.

Lien expérience - modules :

Cette expérience n'a pas montré de détérioration de la perception des courbures à la suite de la suppression des hautes fréquences spatiales ni sur l'objet principal ni sur le fond. Nous pouvons donc en déduire qu'une tâche de perception de courbure n'est pas une contre-indication à l'utilisation de RAFA1 ou RAFA2.

c) Tâche d'appréciation esthétique

Lors de l'expérience sur la précision du positionnement, nous avons également demandé aux sujets quel monde ils trouvent le plus esthétique. Nous voyons sur la Figure 174 que 75% des sujets trouvent que le monde sans RAFA1 est plus « esthétique » et 25% d'entre eux ne remarquent pas de différence.

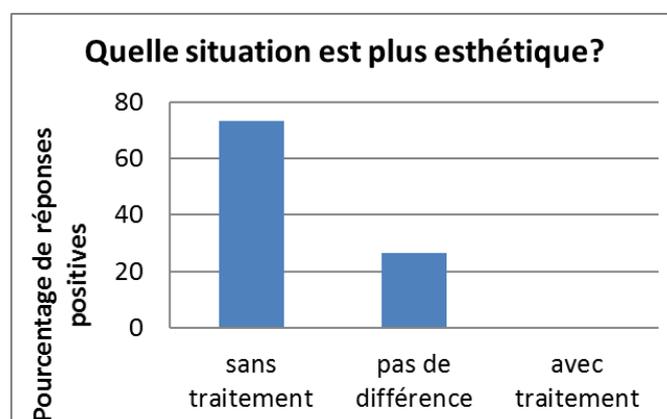


Figure 174 : influence de RAFA1 sur l'appréciation esthétique du monde virtuel

d) Déduction sur le lien entre les modules et l'efficacité

Si nous étudions les résultats de l'étude de l'influence des fréquences spatiales sur les tâches de positionnement et de perception de courbure, nous pouvons avancer que le module RAFA1 pourrait être utilisé pour réduire la fatigue visuelle pour une tâche de perception de courbure ou pour une tâche de positionnement près de l'écran, mais qu'il conviendrait de l'éviter pour une tâche de positionnement éloigné de l'écran et présentant plus de disparité horizontale. Des études supplémentaires seraient nécessaires pour des tâches plus complexes. Il semblerait également que pour une tâche nécessitant un jugement esthétique, l'utilisation de RAFA1 ne soit pas indiquée non plus.

5.1.3. Préconisation pour l'utilisation des modules

Comme nous le voyons, ces expériences nous permettent de faire quelques préconisations sur l'utilisation des modules présentés dans le paragraphe 4.1. Nous nous proposons de structurer ces préconisations en fonction du type de tâche à réaliser dans l'environnement virtuel.

5.1.3.1. Une tâche de positionnement

a) La précision est nécessaire au niveau de l'écran

Si la précision en positionnement est nécessaire pour un objet situé près de l'écran (donc avec des disparités faibles) il est possible d'utiliser les modules suivants :

- RAFA1. En effet, nous avons vu que la suppression des hautes fréquences aux endroits de grandes disparités n'est pas gênante pour une tâche de positionnement près de l'écran
- RAFA2 seulement si les mouvements des yeux sont faibles ou lents. Si l'environnement contient des mouvements d'objets susceptibles d'attirer le regard vers eux, il est fort possible que l'oculomètre et le système ne soient pas suffisamment rapides
- SIRC avec une stéréoscopie au début et monoscopie après. En effet, les tâches de perception du relief montrent bien qu'une stéréoscopie très courte suivie d'une diminution de la distance entre les caméras virtuelles pour arriver à un stimulus monoculaire donne les mêmes performances qu'une vision stéréoscopique.

Cependant, un futur module sur les parallaxes verticales pourrait donner une performance amoindrie dans ce cas précis.

b) La précision est nécessaire pour un objet qui n'est pas sur l'écran

Dans ce cas, nous pouvons utiliser les modules suivants :

- RAFA2 seulement si les mouvements des yeux sont faibles ou lents. Si l'environnement contient des mouvements d'objets susceptibles d'attirer le regard vers eux, il est fort possible que l'oculomètre et le système ne soient pas suffisamment rapides
- SIRC avec une stéréoscopie au début et monoscopie après. En effet, les tâches de perception du relief montrent bien qu'une stéréoscopie très courte suivie d'une diminution de la distance entre les caméras virtuelles pour arriver à un stimulus monoculaire donne les mêmes performances qu'une vision stéréoscopique
- Le futur module sur les parallaxes verticales pourrait donner de bons résultats perceptifs, mais il reste à démontrer qu'il réduit effectivement la fatigue visuelle.

RAFA1 ne semble pas indiqué dans ce cas précis. En effet si les objets sur lesquels l'attention des sujets doit se porter sont loin de l'écran, ils présenteront de grandes disparités horizontales, les hautes fréquences seront très réduites et nous avons montré que la précision de positionnement dans ce cas est également réduite, même si la justesse est préservée.

5.1.3.2. Une tâche de perception des courbures

Lorsque la perception des courbures est importante pour la réalisation de la tâche, nous pouvons utiliser les modules suivants :

- RAFA1, en effet, nous avons montré qu'une réduction des hautes fréquences ne semble pas avoir d'impact statistiquement significatif sur la perception des courbures
- RAFA2 seulement si les mouvements des yeux sont faibles ou lents. Si l'environnement contient des mouvements d'objets susceptibles d'attirer le regard vers eux, nos résultats empiriques indiquent que l'oculomètre et le système ne serait pas suffisamment rapides
- SIRC avec une stéréoscopie à la fin. En effet, nous avons montré que la perception des courbures est favorisée par l'apparition de la stéréoscopie à la fin par rapport à une stéréoscopie au début.

Nous ne connaissons pas l'impact possible du module des parallaxes verticales sur la perception des courbures.

5.1.3.3. Tâche d'appréciation esthétique

Lorsque l'appréciation esthétique du monde virtuel est importante, nous pouvons utiliser les modules suivants :

- SIRC en effet, celle-ci ne modifie pas l'aspect esthétique du monde. Si le relief doit participer à cette appréciation, nous recommandons d'avoir une stéréoscopie au début plutôt qu'à la fin

RAFA1 ne peut être utilisée comme nous avons pu le montrer. RAFA2 pourrait peut-être être utilisée plus facilement que RAFA1 puisqu'il n'y a pas de flou en vision centrale, mais nous n'avons pas de résultat d'expérience pour valider ou invalider cette hypothèse.

5.1.3.4. Tâche de détection de collision

Pour une tâche de détection de collision, nous savons que nous pouvons utiliser SIRC avec une stéréoscopie au début, mais nous n'avons pas d'information pour RAFA1 et RAFA2.

5.2. Perception de la fatigue gestuelle

5.2.1. Contexte

Il serait intéressant de vérifier s'il existe une différence lors d'un geste supposé identique en environnement réel ou virtuel. Whitman étudie la différence de positionnement du torse lors d'un soulevé de poids virtuel ou réel. Il ne mesure pas de différence entre les deux et en déduit que la réalité virtuelle est valide pour faire des mesures ergonomiques (Whitman et al. 2004). Cette hypothèse est probablement à la base de la conception des systèmes comme ErgoWide et Ergodit (voir 3.2.3.3c). S'il ne mesure pas de différence en positionnement, il note cependant une différence de temps d'exécution. Cependant, en 2011, Hu obtient des résultats quelque peu différents. En effet, il montre que dans une tâche de forage, la fatigue est plus présente en environnement virtuel pour les cinq paramètres mesurés (Hu et al. 2011) :

- L'angle du coude
- La force maximale
- La durée de la tâche
- La méthode de « Body Part Discomfort » (BPD)
- Le taux de l'effort perçu (Rates Perceived Exertion, RPE).

Par contre, Pontonnier montre en 2014 que lorsque le geste en environnement virtuel est une métaphore du geste en environnement réel, il peut être beaucoup moins fatigant (Figure 175) (Pontonnier et al. 2014).

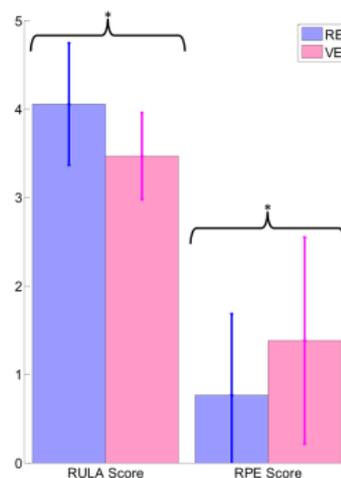


Figure 175 : score pour RULA et l'activation musculaire dans l'étude de Pontonnier (Pontonnier et al. 2014)

Nous essayons donc de savoir si pour une tâche ne nécessitant pas de force extérieure, les gestes effectués en environnement réel et virtuel sont identiques et si la fatigue qu'ils occasionnent se vaut sur toutes les parties du corps.

5.2.2. Protocole

Lors de cette expérience comparant le même geste effectué en environnement réel et virtuel, nous proposons aux sujets de faire la même tâche que dans le paragraphe 4.2.2.2a), mais cette fois-ci, nous le leur proposons en environnement réel et en virtuel. Les deux environnements sont créés pour que les gestes, que ce soit pour la tâche facile (à hauteur de hanche) ou difficile (au-dessus de la tête), soient les plus semblables possible dans les deux environnements.

Tous les sujets font les 4 tâches dans un ordre aléatoire :

- La tâche difficile en environnement réel
- La tâche facile en environnement réel
- La tâche difficile en environnement virtuel
- La tâche facile en environnement virtuel.

Pour plus détails sur le protocole, voir (Ahmed 2016).

5.2.3. Résultats

La première différence notable est une différence de temps représentée sur la Figure 176. Cette différence est statistiquement significative et peut s'expliquer de plusieurs façons :

- Le temps mis par les sujets pour viser les « boîtes » cibles. En environnement réel, ils les localisent probablement mieux qu'en environnement virtuel à cause du biais de projection en virtuel. La concordance entre la proprioception et la vision facilite probablement cette localisation en environnement réel et accélère la tâche
- Le retour proprioceptif en environnement réel lorsque le sujet effleure la « boîte » facilite également la tâche ; en environnement virtuel, ce manque de concordance entre les sens tactile et visuel ralentit probablement la tâche

- Il est possible que les sujets ralentissent leurs gestes en environnement virtuel pour que la Kinect puisse les suivre de façon optimale. En effet, les sujets ont tendance à adapter leurs gestes aux interfaces plus lentes
- Une certaine appréhension de la technologie peut également freiner certains sujets et ralentir leurs gestes

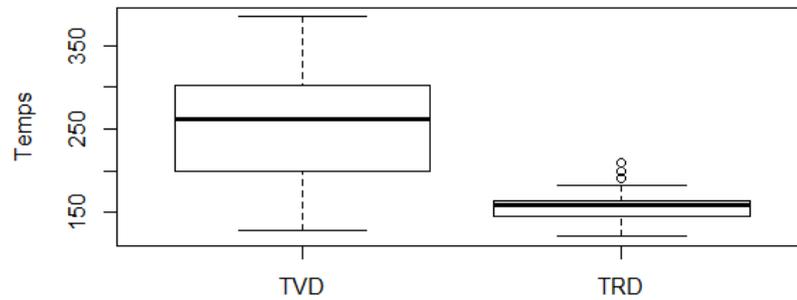


Figure 176 : différence de temps de réalisation de la tâche difficile en environnement réel et virtuel (Ahmed 2016)

La fatigue de l'épaule est également différente en environnement réel et virtuel (Figure 177) de façon statistiquement significative. Toutes les méthodes de mesures présentées montrent que l'épaule est plus mise en contrainte en environnement virtuel qu'en réel.

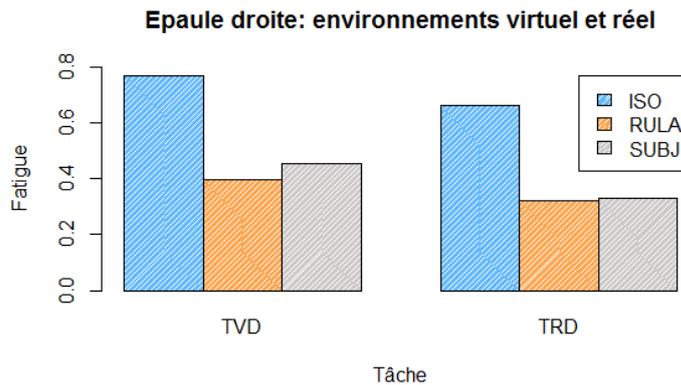


Figure 177 : mesure de fatigue de l'épaule en environnement virtuel et réel (Ahmed 2016)

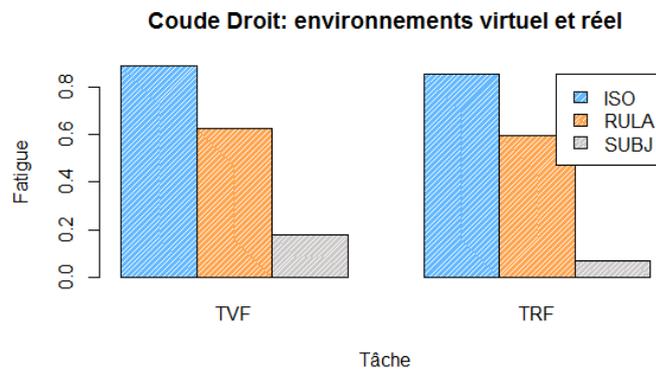


Figure 178 : mesure de fatigue pour l'environnement virtuel et réel pour le coude droit et la tâche facile (Ahmed 2016)

Le coude montre la même répartition de fatigue entre l'environnement réel et virtuel pour la tâche difficile, mais le plus surprenant est une différence statistiquement significative pour l'évaluation

subjective des sujets dans la tâche facile (Figure 178). Nous avons remarqué que les sujets ne se positionnent pas de la même façon en environnement réel et virtuel. En virtuel, l'épaule travaille plus, les sujets limitent leur déplacement et donc le coude travaille plus.

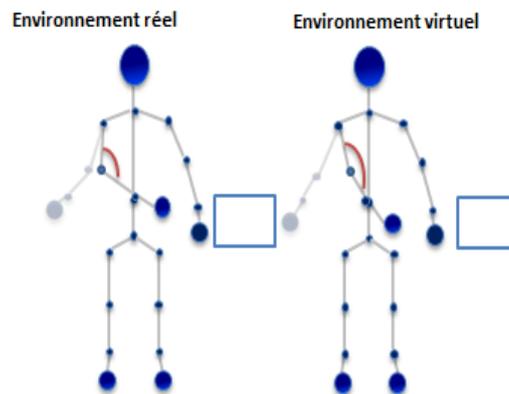


Figure 179 : sollicitation du coude droit dans la tâche facile dans les deux environnements (Ahmed 2016)

Nous pensons que le cou fatiguerait plus en environnement virtuel qu'en environnement réel parce que le débattement en environnement virtuel est beaucoup moins important à cause de la projection (Figure 180).

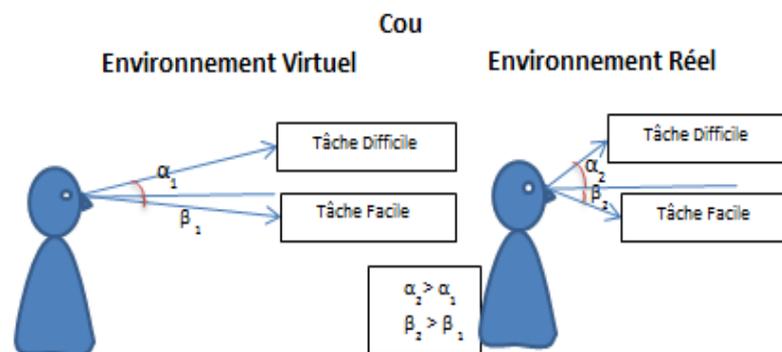


Figure 180 : différence de positionnement de cou théorique entre environnement réel et virtuel (Ahmed 2016)

Cependant, nous constatons que la fatigue musculaire du cou est toujours plus grande en environnement virtuel qu'en environnement réel, et ce de façon très marquée (Figure 181). En effet, en environnement réel, très rapidement, les sujets ne regardent plus les « boîtes » et se fient essentiellement à leur mémoire proprioceptive et vision périphérique. Or, ce n'est pas possible en virtuel à cause de l'incohérence entre la vision et la proprioception.

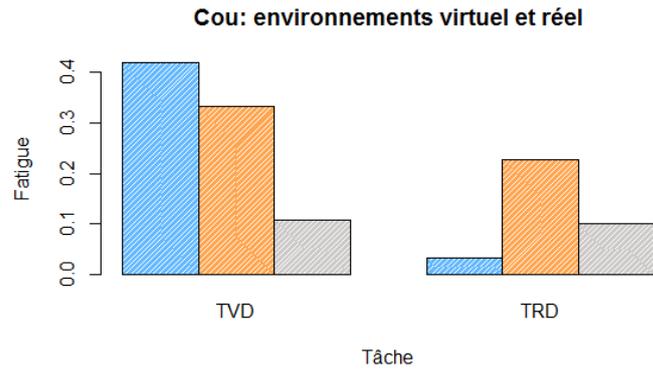


Figure 181 : différence de contraintes dans le cou entre environnement réel et virtuel pour la tâche difficile (Ahmed 2016)

Le tronc est particulier car c'est la seule partie de corps qui présente plus de fatigue en environnement réel qu'en environnement virtuel, c'est particulièrement clair dans la tâche facile (Figure 182).

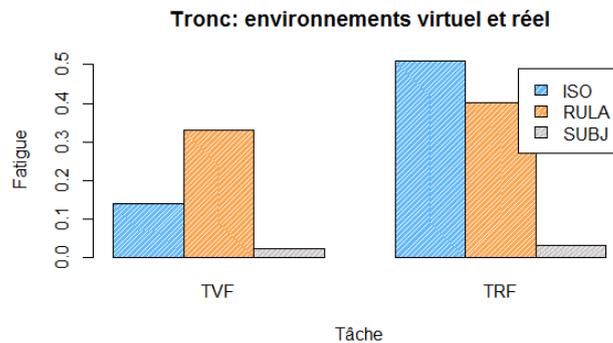


Figure 182 : différence de contraintes du tronc entre l'environnement virtuel et réel pour la tâche facile (Ahmed 2016)

Cela s'explique parce que les sujets minimisent leur déplacement et ont tendance à éviter les boîtes réelles en se cambrant pour les atteindre. En environnement virtuel, les boîtes n'ont pas besoin d'être évitées puisqu'elles ne présentent pas de retour haptique. Les sujets ne cambrent donc pas le dos, cet environnement serait donc moins fatigant pour le tronc (Figure 183).

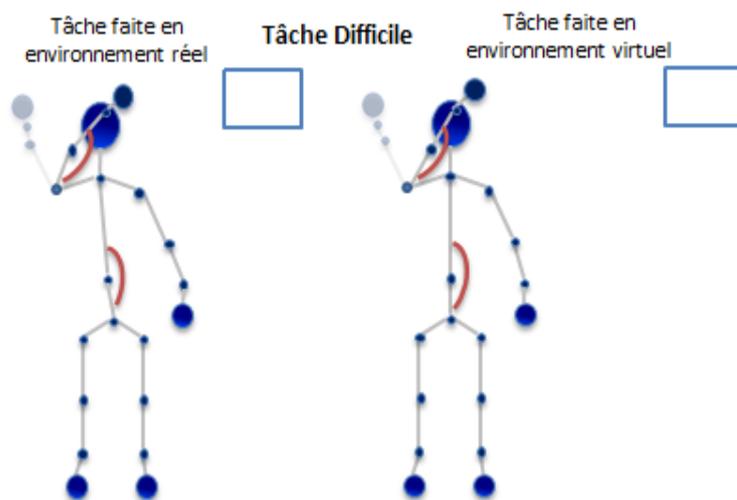


Figure 183 : différence de positionnement du tronc entre environnement virtuel et réel pour la tâche difficile (Ahmed 2016)

5.2.4. Préconisation

Au paragraphe 4.2.2, j'avais indiqué que lors du projet AGATHE, nous avons été confrontés au fait que ce type de geste de précision pouvait poser problème, mais sans pouvoir le valider. Par cette étude, nous espérons faire avancer l'étude des mouvements en réalité virtuelle. En effet, Pontonnier a montré que les mouvements métaphoriques en réalité virtuelle sont moins fatigants qu'en environnement réel pour accomplir la même tâche (Pontonnier et al. 2014). Cependant, nous montrons que cet allègement de la fatigue est lié au fait que les gestes ne sont pas identiques dans ces deux environnements. Lorsqu'une application propose une interaction basée sur la reproduction du geste réel, nous voyons que : d'une part, les gestes ne sont pas exécutés de la même façon en réel et en virtuel, d'autre part, dans nos expérimentations, ils sont souvent plus fatigants en environnement virtuel. Il serait donc intéressant d'étudier d'autres gestes et de quantifier les différences entre gestes en environnement réel et virtuel pour chacun. Ceci afin, par exemple, de ne pas proposer des applications d'apprentissage de gestes basés sur des gestes réels reproduits en virtuel, puisque ceux-ci ne seraient pas effectués de la même façon.

6. Synthèse et Perspectives

6.1. Synthèse et perspectives pour le système visuel

6.1.1. Synthèse

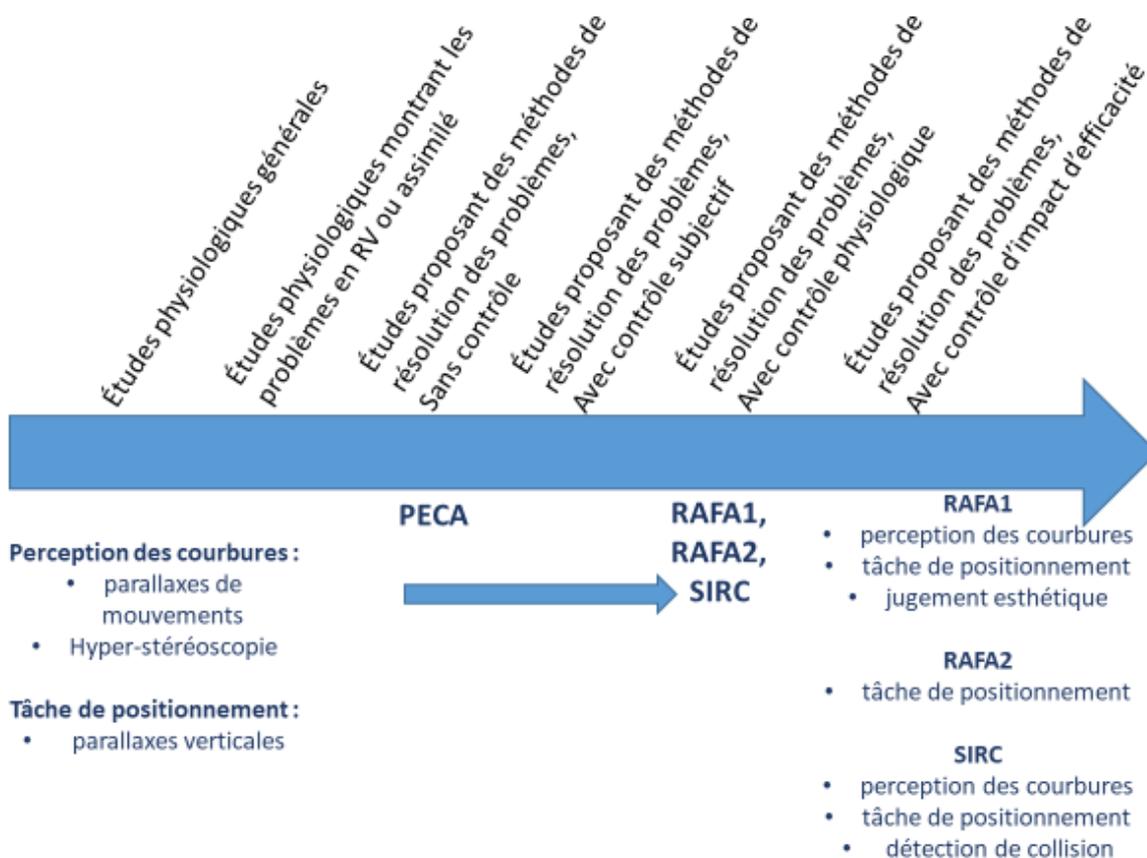


Figure 184 : positionnement des études entourant les modules de réduction de la fatigue visuelle sur l'échelle de temps.

Les travaux sur le système visuel présentés dans le chapitre précédent peuvent être ajoutés sur l'échelle de temps présentée dans chapitre 3.3, sur la Figure 96, complétée sur la Figure 143 aux systèmes de réduction des contraintes visuelles proposés. Nous disposons également sur la Figure 184 les études du chapitre précédent. Nous voyons que, lorsque ces dernières sont représentées sur l'échelle de temps, nous retrouvons la répartition en deux sous-groupes : les études préparant l'élaboration des futurs modules qui se retrouvent toutes très en amont de l'échelle de temps et les études montrant l'impact des modules proposés sur certaines tâches basiques possibles qui se

retrouvent sous « études proposant des méthodes de résolution des problèmes, avec contrôle d'impact d'efficacité ».

Certaines des expérimentations sur l'impact de nos modules sur la résolution de tâches simples nous permettent d'aller un peu plus loin que les préconisations qui ont été les nôtres dans le paragraphe 5.1.3 concernant l'utilisation de nos modules en fonction du type d'application souhaité. En effet, cela nous permet d'essayer d'imaginer des préconisations englobant également certains travaux de la littérature présentés au paragraphe 3.2.1.3. Nous voyons sur la Figure 185 et la Figure 186 les préconisations que nous pourrions faire pour la tâche de positionnement et la tâche de perception des courbures, qui sont les deux que nous avons le plus étudiées.

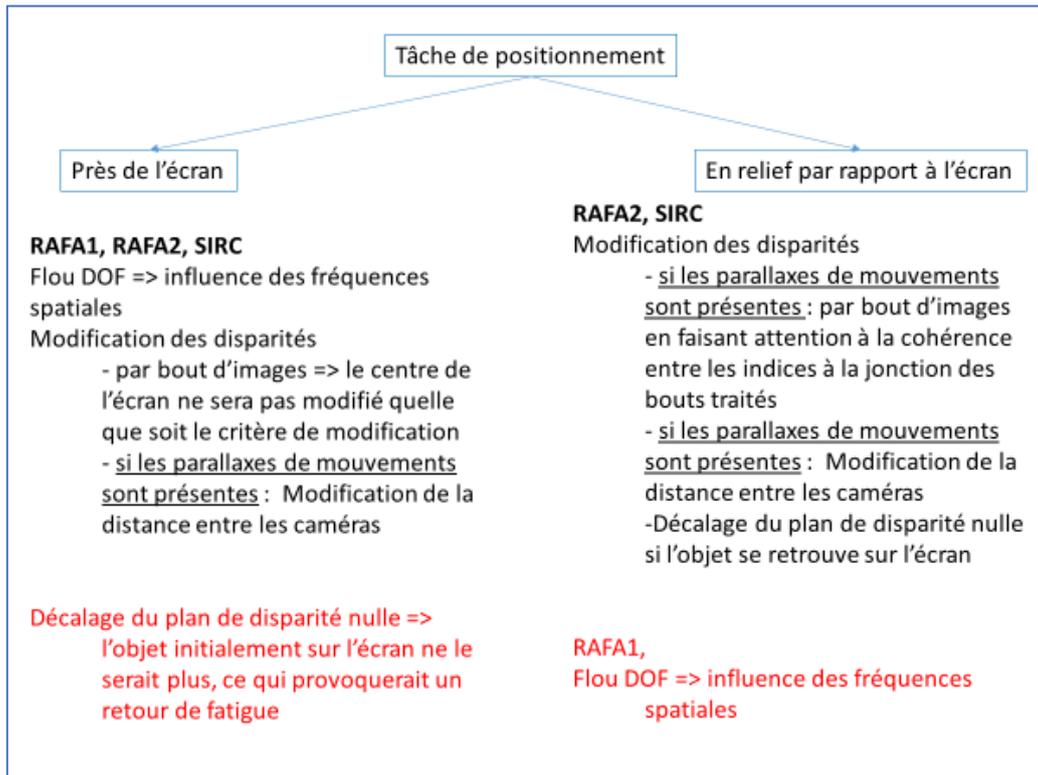


Figure 185 : préconisation globale pour une tâche de positionnement

Nous n'avons pas inclus les modules qui n'existent pas encore comme celui sur les parallaxes verticales ni les systèmes des autres chercheurs pour lesquels nos études de perception ne sont pas suffisantes pour faire des hypothèses justifiées.

La Figure 187 représente les préconisations que nous pourrions faire pour une tâche d'appréciation esthétique, cependant, il nous manque encore beaucoup de données pour être plus précis. Nous préférons ne pas émettre plus de préconisations pour les tâches de détections de collision qu'au paragraphe 3.2.1.3. En effet les données manquent sur l'influence des disparités et des fréquences spatiales vis à vis des performances des sujets pour cette tâche.

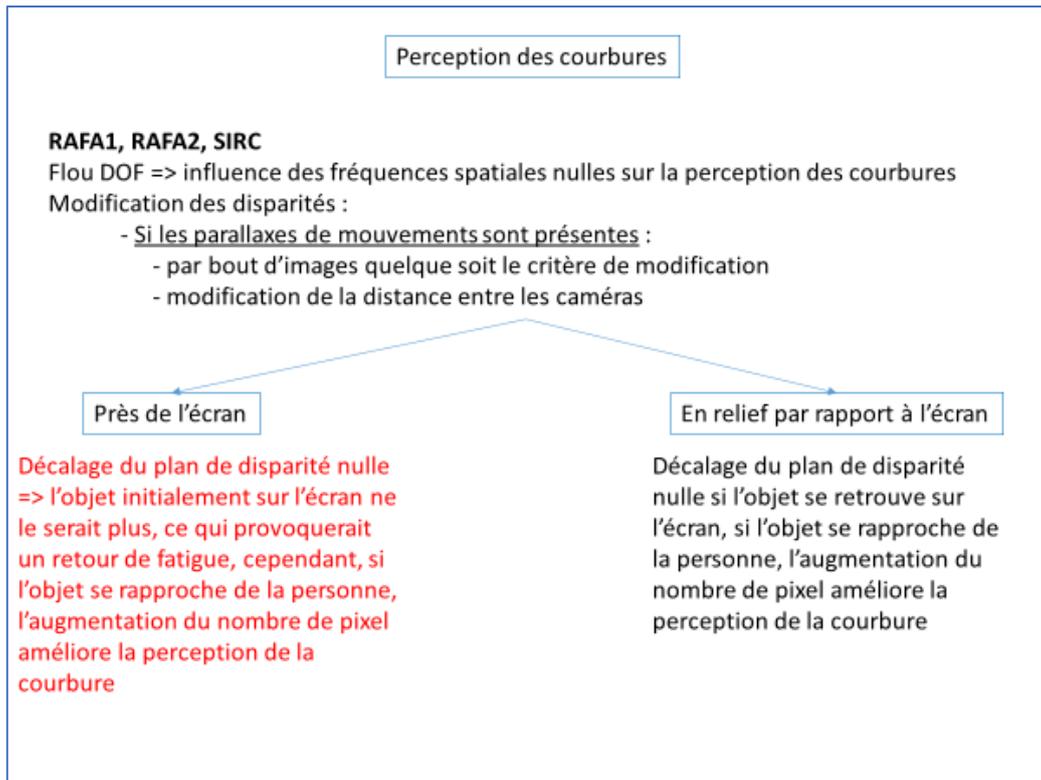


Figure 186 : préconisation globale pour une tâche de perception de courbure

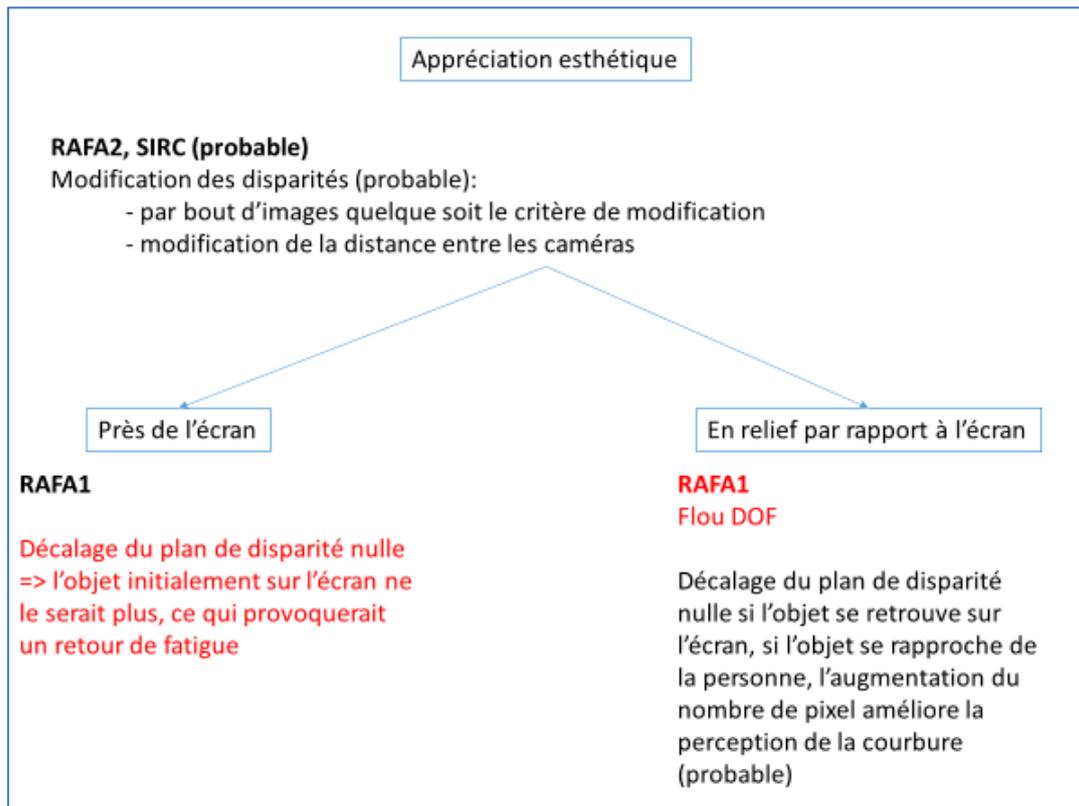


Figure 187 : préconisation globale pour une tâche d'estimation esthétique

Il est difficile de comparer nos systèmes à ceux des autres chercheurs du point de vue de l'amélioration physiologique. La raison est que nous n'utilisons pas les mêmes métriques pour valider

nos avancées, nous pouvons tout de même constater que chaque module participe à combler tous les types de tâches simples.

6.1.2. Perspectives

6.1.2.1. Augmenter les connaissances sur la fatigue visuelle

Toutes les évaluations de la fatigue visuelle que nous avons réalisées sont pour l'instant des mesures des capacités oculomotrices avant et après exposition, mais nous ne savons rien de la progression de cette détérioration. Est-elle linéaire ? Est-elle exponentielle ? Est-ce qu'au contraire elle stagne au bout d'un moment autour de valeurs permettant de s'adapter au système artificiel, comme sembleraient l'indiquer les travaux de Pascaline Neveu (Neveu et al. 2010) (Figure 188) ou ceux de Paulus et al (Paulus, Straube, and Eggert 2017) ?

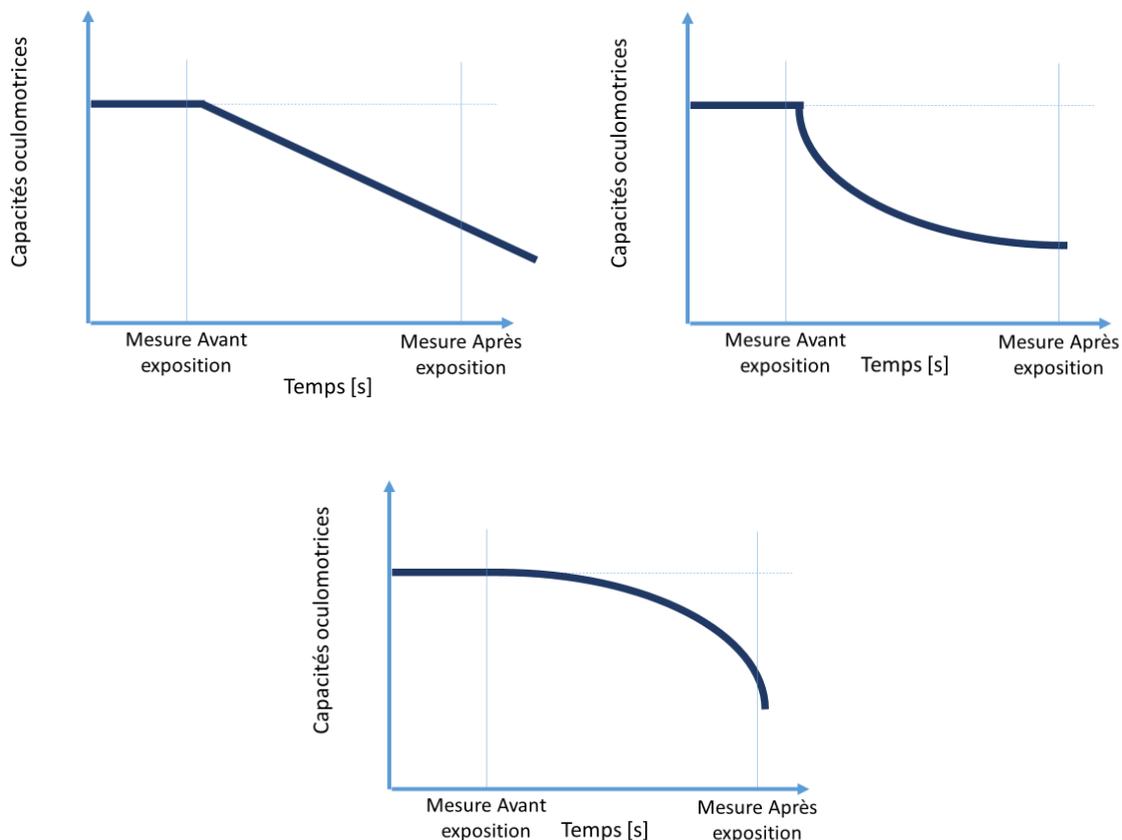


Figure 188 : différentes possibilités d'évolution des capacités oculomotrices entre la mesure avant et après exposition

Il serait possible de mener des expériences permettant de relever cette courbe de fatigue, et vérifier si la tendance de cette dernière est la même pour une majorité de sujets. Deux possibilités seraient envisageables :

- Sortir d'immersion à intervalle régulier et mesurer les capacités oculomotrices pendant toute l'immersion. Cependant, certaines mesures peuvent s'avérer elles-mêmes fatigantes, comme le "flipper lens test". Il est donc possible que ce type de mesure provoque un biais dans la courbe
- Mesurer d'autres capacités oculomotrices à l'aide d'un Eye-Tracker binoculaire durant l'immersion, comme le décalage entre le point de vergence et l'objet regardé, la rapidité des mouvements oculaires... Cependant, nous ne connaissons pas le lien entre ces données

oculomotrices objectives et celles que nous avons déjà mesurées indiquant une fatigue visuelle de façon un peu plus subjective.

L'intérêt de cette courbe serait de pouvoir moduler les algorithmes de fatigue par rapport à celle-ci. En effet, lorsque le lien entre les données du suivi de regard binoculaire et des capacités oculomotrices utilisées dans les autres tests aura été établi (dans un sens ou dans l'autre), il sera possible de moduler la suppression du relief ou du flou de RAFA1, RAFA2 et SIRC en fonction de cette courbe.

6.1.2.2. Prolongation de l'échelle de temps vers des tâches complexes

Nous relevons également que nos préconisations concernent seulement des tâches virtuelles très basiques, mais que nous ne savons pas grand chose des tâches de plus haut niveau cognitif. Il se pourrait donc que l'échelle de temps de la Figure 96 doive être légèrement modifiée pour intégrer la prochaine génération d'études : « Études proposant des méthodes de résolution des problèmes, avec contrôle d'impact d'efficacité pour des tâches cognitives de plus haut niveau » (Figure 189). Il est donc nécessaire de mener des études supplémentaires sur le lien entre la fatigue visuelle et des tâches de plus haut niveau cognitif.



Figure 189 : intégration de la prochaine génération d'études dans l'échelle de temps

Certaines études sont en cours pour connaître l'impact de la stéréoscopie sur l'apprentissage, certaines indiquant que cette dernière est très intéressante, notamment pour l'apprentissage de la chirurgie laparoscopique (Votanopoulos et al. 2008), d'autres sont plus nuancées (Mukai et al. 2011) (Carrier et al. 2012) et certaines sont catégoriquement négatives (Aaron and Lee 2010). Il serait donc intéressant d'identifier si il s'agit de la technologie elle-même, la perception du relief ou la fatigue visuelle qui influe sur l'apprentissage. S'il s'agit de cette dernière, il pourrait être intéressant d'étudier si l'application de module pour limiter la fatigue permet d'augmenter l'efficacité de certains types d'apprentissages (mémorisation pure, application de procédure, savoir-être...). C'est

précisément l'objet de la thèse de doctorat d'Alexis Souchet en CIFRE actuellement en cours chez « Manzalab ».

Les premiers travaux d'Alexis Souchet ont montré qu'une fatigue visuelle était bien présente lors d'un apprentissage en casque, impliquant des modifications oculomotrices (notamment le *ponctum proximum d'accommodation*) (Souchet, Philippe, and Leroy Oct 2018) et que cette évolution était corrélée avec des temps de réponse plus importants à court terme (Figure 191), et à une justesse de réponses détériorées. Ces résultats sont en concordance avec des études récentes montrant un lien entre fatigue visuelle (Huckauf and Eberhardt 2019) ou malaise du simulateur (Mittelstaedt, Wacker, and Stelling 2019) et charge cognitive

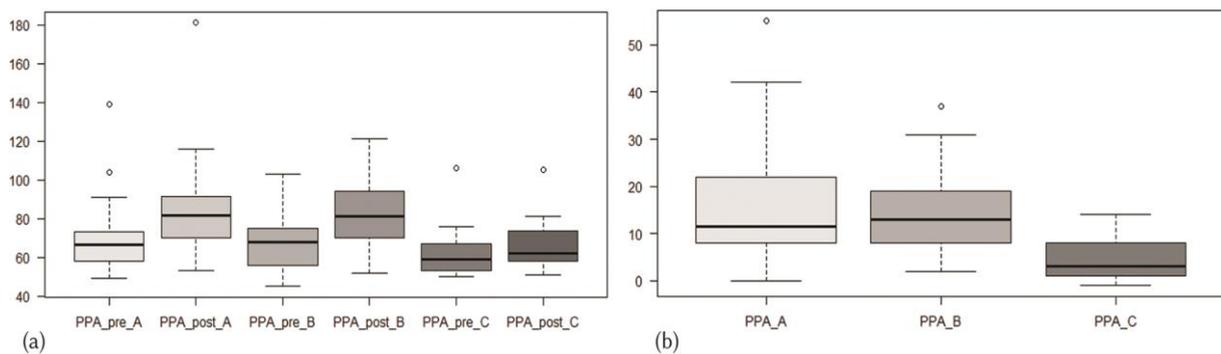


Figure 190 : mesures du *Punctum proximum of accommodation* (PPAs) (a) PPA pre- et post-exposition par groupe (b) différence de PPA entre les groupes. Groupe A : casque bioculaire, groupe B : casque stéréoscopique, groupe C : PC (Souchet, Philippe, and Leroy Oct 2018)

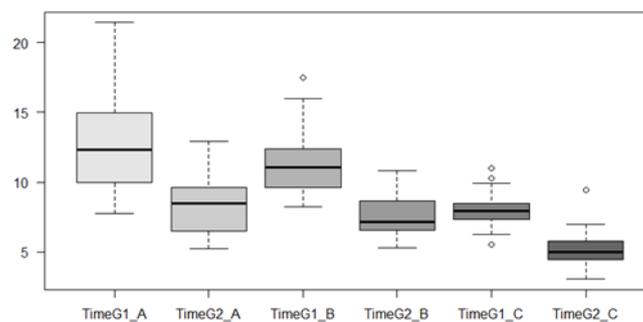


Figure 191: temps de réponse pour un apprentissage en casque (groupe A bioculaire, groupe B stéréoscopique) et PC (groupe C)

Souchet, Alexis En cours, « Impact de la fatigue visuelle en casque immersif sur l'apprentissage via le serious game »

A. Souchet, S. Philippe, L. Leroy, "Eyestrain Impacts on Learning Job Interview with a Serious Game in Virtual Reality", *Proceeding, VRST '18 Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, No. 15, Oct 2018

A. Souchet, S. Philippe, L. Leroy, "Investigating Intermittent Stereoscopy Effects over Visual Discomfort and Fatigue in Virtual Reality while Learning", *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, **Accepté**

Alexis D. Souchet, Stéphanie Philippe, Floriane Ober, Aurélien Lévêque, and Laure Leroy. 2019. Short and Long-Term Learning for Job Interview with a Serious Game in Virtual Reality: Influence of Eyestrain, Imaging and Apparatus. International Journal of Virtual Reality - Special Issue Innovations in XR and Immersive Technologies for Learning. Springer **Soumis**

6.1.2.3. *Extension à d'autres interfaces permettant la stéréoscopie*

Il est possible d'étendre ces résultats à de nouvelles interfaces. En effet, nous voyons apparaître de plus en plus d'interfaces de réalité augmentée avec des écrans semi-transparents. Des lunettes comme les "Hololens", "Laster technologie", "Optinvent", ou même les "Google Glass" dont la production a été abandonnée ou semble avoir été réorientée vers un marché industriel (Stein 18/07/2017), posent des questions supplémentaires par rapport à la fatigue visuelle. Les conflits que nous avons évoqués au paragraphe 3.2.1.2 liés à la stéréoscopie peuvent intervenir dans les dispositifs présentant les stimulus sur les deux yeux (type Hololens), mais d'autres conflits supplémentaires peuvent apparaître avec ce genre de dispositif. Aussi, nous ambitionnons d'étendre nos investigations à ces appareils afin d'étudier ces conflits séparément pour savoir si ces derniers peuvent être réduits.

1) Rivalité binoculaire

Une rivalité binoculaire peut apparaître pour des dispositifs ne présentant les informations que sur un seul œil (type Laster Technologie, Optinvent). Une rivalité binoculaire apparaît lorsque les deux yeux ne reçoivent pas le même stimulus, nous en avons déjà parlé au paragraphe 3.2.1.2h1). Ce type de conflit n'est donc pas spécifique à ce type d'interface et il a déjà été étudié en laboratoire comme réponse du système visuel à un stimulus totalement artificiel qui n'arrive jamais dans la vie de tous les jours. Ce qui est nouveau, c'est qu'il constitue la base de fonctionnement d'une interface visuelle que certains industriels aimeraient voir adoptée par le grand public. Il serait donc intéressant de savoir comment le système visuel pourrait réagir visuellement à une rivalité binoculaire et si certains stimulus pourraient être plus acceptables que d'autres. Sur la ligne du temps de la Figure 96, ces études seraient donc très en amont, mais nécessaires pour savoir si ce conflit est réductible par des moyens informatiques ou systémiques. Les premières études pourraient consister en deux images présentées à chaque œil, mais ne présentant aucune disparité horizontale pour limiter des conflits supplémentaires liés à la stéréoscopie. Les deux images pourraient être identiques sauf dans une certaine zone pour reproduire le fonctionnement de ces lunettes de réalité augmentée.

Cette étude fait l'objet de la thèse d'Elodie Bayle, à l'institut de recherche biomédicale des armées.

Bayle Elodie En cours « impact de la rivalité binoculaire dans les visuels de casque »

E. Bayle, E. Guilbaud, S. Hourlier, S. Lelandais, L. Leroy, J. Plantier, P. Neveu "Binocular rivalry in monocular augmented reality devices: a review" SPIE Defense + commercial sensing, avril 2019

E. Bayle, E. Guilbaud, S. Hourlier, S. Lelandais, L. Leroy, J. Plantier, P. Neveu , "Which ocular dominance should be considered for monocular augmented reality devices ?" 20th International Symposium on Aviation Psychology Mai 2019

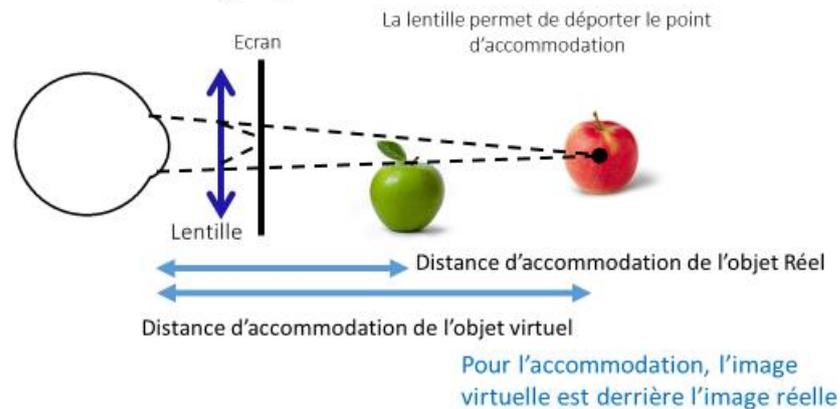
2) Conflit entre l'accommodation et l'interposition

Il pourrait également arriver un conflit entre l'accommodation et l'indice d'interposition. En effet, l'écran étant déporté par des systèmes optiques, il peut apparaître à une certaine distance du sujet.

L'accommodation se fait donc à cette distance. Par contre, les informations virtuelles sont vues devant toutes celles réelles puisque l'œil les perçoit en premier, d'un point de vue de l'indice d'interposition, les images virtuelles sont placées devant toutes les autres. Ceci ne pose pas de problème lorsque les objets réels sont placés derrière la déportation optique de l'écran. Par contre, pour un objet réel qui serait devant cet écran virtuel, cela pourrait générer un conflit (Figure 192).

Ce dernier pourrait être étudié sur un écran semi-transparent distant pour ne pas ajouter les contraintes liées à la stéréoscopie ou à la rivalité binoculaire.

Stimulus reçu par l'accommodation :



Stimulus reçu par la rétine:



Figure 192 : conflit entre l'accommodation et l'interposition pour un objet placé devant le déport de l'écran dans un interface de réalité augmentée avec écran semi-transparent

6.2. Synthèse et perspectives pour le système musculosquelettique

6.2.1. Synthèse

Comme nous l'avons prévu suite à l'étude de l'état de l'art, le domaine d'étude portant sur les troubles musculosquelettiques en interaction gestuelle étant encore très récent, il reste beaucoup de zones d'ombres qu'il convient de combler avant de pouvoir proposer des solutions aussi complètes que possible pour le système visuel. Cependant, nos travaux, présentés plus avant, représentent des apports que nous pensons utiles à l'avancée de ces problématiques. Si nous reprenons la Figure 96 augmentée des propositions de systèmes dédiés aux TMS (Figure 144) pour ajouter les études psychophysiques, nous obtenons le graphique proposé en Figure 193.



Figure 193 : positionnement des études entourant les modules de réduction de la fatigue musculosquelettique sur l'échelle de temps

Nous ne pouvons pas faire de préconisation en vue de l'utilisation d'un système de réduction ou d'un autre, ni même les comparer à ceux des autres chercheurs comme nous l'avons fait pour la vision, puisque ces systèmes ne sont pas encore suffisamment aboutis ni testés et sont encore moins testés de façon fiable. Par contre, nous pouvons d'ores et déjà faire des préconisations d'usage. En effet, en comparant notre étude à celle de Pontonnier (Pontonnier et al. 2014), nous sommes capables d'indiquer que l'utilisation de schème complet n'est pas forcément une bonne solution, en tout cas dans une tâche de positionnement d'objet. Notre étude montre que lorsque le geste doit être reproduit du réel au virtuel, il existe des distorsions lors de la réalisation entre le geste effectué dans un environnement réel et celui effectué dans le même environnement calqué en virtuel.

Nous avons montré que le geste n'est pas reproduit fidèlement et qu'il était globalement plus fatigant en virtuel qu'en réel. Pontonnier, lui, montre que lors d'une utilisation de métaphore, une tâche sensiblement identique était nettement moins fatigante. Nous pourrions donc être tentés d'en déduire qu'il vaut mieux systématiquement proposer des gestes métaphoriques pour ce type de tâche. Cependant, nous ne savons pas l'impact de ce choix sur l'efficacité des sujets dans la réalisation de la tâche ni sur la rapidité de prise en mains de l'interface par ces derniers.

6.2.2. Perspectives

6.2.2.1. Avancer dans l'échelle de temps

Nous ne considérons pas réellement DALATR comme un système de réduction de fatigue musculosquelettique actif à proprement parler. Il s'agit plus d'un système de mesure de cette fatigue musculaire, à savoir un système nous permettant de la quantifier pour pouvoir la diminuer et mesurer le progrès fait grâce à un futur système. Il nous permettrait également de choisir un geste d'interaction plutôt qu'un autre sur l'unique base de la fatigue musculaire provoquée par ceux-ci. C'est pourquoi nous ne situons pas DALATR dans « Études proposant des méthodes de résolution des problèmes, avec contrôle subjectif », mais bien dans Études physiologiques montrant les problèmes

en RV ou assimilé » sur l'échelle de temps. L'étape suivante serait de proposer un système utilisant cette métrique pour réduire la fatigue musculaire.

Une proposition serait d'appliquer un algorithme pour modifier le positionnement des objets d'interaction en fonction de la fatigue gestuelle. Plus DALATR indiquerait une fatigue musculaire importante, plus l'objet se déplacerait dans une zone confortable. Cette réalisation serait assez simple dans le cadre de la tâche utilisée jusqu'ici parce que son contexte est, lui-même, relativement simple. Mais il serait nécessaire d'étudier si cela ne perturbe pas le sujet, si la prise en compte de cette fatigue n'arrive pas trop tard, lorsqu'elle est mesurée. Autant de paramètres à analyser et déterminer pour vérifier qu'un tel système pourrait réduire la fatigue musculaire pour une tâche simple sans perturber cette dernière.

6.2.2.2. Etude de l'impact de différence de geste en réel et virtuel

Il serait également intéressant d'étudier l'impact de cette différence de geste en environnement virtuel et réel. En effet, certaines applications sont dédiées à l'apprentissage de geste en virtuel avant leur reproduction en réel (apprentissage de chirurgie laparoscopique, apprentissage d'application d'enduit mural...). Est-ce que la différence entre les gestes virtuels et réels invalide ces apprentissages ? Les apprenants et enseignants semblent indiquer que ces méthodes sont très utiles dans le cursus pédagogique. Il serait donc utile de connaître l'impact de ces gestes appris en virtuel sur ceux reproduits en réel ensuite.

6.3. Lien entre fatigue visuelle et musculosquelettique

Dans les expérimentations décrites dans ce document, fatigue visuelle et fatigue musculosquelettique sont abordées séparément. Le lien entre les deux n'a pas été étudié mais il a néanmoins été pris en compte. En effet, nous avons pris soin de ne pas utiliser d'images stéréoscopiques pour étudier la fatigue musculaire. Lors d'entretiens avec des professionnels de la santé, tels des ostéopathes, ceux-ci ont affirmé que des tensions dans le système oculaire provoquaient une modification des tensions dorsales. À date, nous n'avons pas trouvé dans les publications scientifiques de preuve de cette affirmation. Une tentative très intéressante de questionnaire liant l'utilisation de dispositif de réalité virtuelle en enseignement, fatigue visuelle et TMS existe depuis peu, mais celui-ci ne lie pas spécifiquement la fatigue visuelle à des troubles musculosquelettique (Hsin-Hui et al. 2018). Par principe de précaution, nous avons préféré utiliser des stimulus ne provoquant pas de tensions oculaires supplémentaires. Cependant, dans les systèmes de réalité virtuelle classique, les interactions gestuelles sont très souvent couplées à une vision stéréoscopique. Il serait donc important de collaborer avec des médecins et ostéopathes pour déterminer précisément l'influence de la vision stéréoscopique sur la réalisation du geste. Est-ce que refaire les mêmes tâches proposées en stéréoscopie aboutirait à des différences gestuelles en environnement réel et virtuel plus ou moins marquées qu'en monoscopie ? Est-ce que la perte d'information visuelle liée au stimulus monoscopique peut influencer la réalisation des gestes ? Est-ce qu'au contraire, la tension musculaire dorsale étant moins importante, les sujets sont plus à l'aise pour se déplacer ? Est-ce que la contrainte des lunettes de stéréoscopie influe également ? Autant de problématiques qu'il serait nécessaire d'élucider. Autant de réponses éventuelles pour en apprendre un peu plus sur notre fonctionnement en environnement virtuel.

6.4. Positionnement des Perspectives

Toutes les perspectives présentées sont à la frontière entre l'informatique et les facteurs humains. Plus exactement, j'envisage la suite de mes recherches toujours dans l'étude des systèmes

physiologiques humains, en particulier visuels et musculosquelettiques pour pouvoir proposer des systèmes informatiques de plus en plus performants et adaptés à l'humain.

Les perspectives s'articuleront donc autour de trois grands pôles : l'informatique, la psychophysique qui ont déjà été abordées dans ce manuscrit, mais l'aspect cognitif s'y ajouterait.

Les questions informatiques resteront, bien entendu, centrales dans mes futures recherches. Je souhaite, avant tout, participer à l'amélioration des systèmes de réalité virtuelle afin que ceux-ci ne soient pas rejetés par les professionnels qui en ont besoin. Il y a plusieurs pistes d'amélioration possibles et beaucoup de collègues y travaillent par ailleurs, celle sur laquelle je me concentrerai est toujours celle de la sécurité physiologique des interfaces. La recherche informatique permettra, je l'espère de trouver de nouveaux algorithmes et de nouveaux systèmes permettant de proposer des interfaces de plus en plus performantes et respectueuses du fonctionnement humain.

Les aspects physiologique et psychophysique sont également très importants pour mes recherches futures, nous sommes encore bien loin de tout connaître sur le fonctionnement physiologique et perceptif humain, il me semble donc important pour moi de ne jamais m'éloigner de ce domaine de recherche pour y appuyer mes recherches en informatique et pour leur donner une direction. Cette connaissance me permettra également d'apporter des explications souvent demandées et attendues par le grand public qui se pose des questions sur sa sécurité. Elle permet également de s'appuyer sur des données solides pour sensibiliser les concepteurs d'applications de réalité virtuelle à ces problématiques.

Comme on peut le voir dans les projets que je propose, j'aimerais ouvrir une nouvelle piste de recherche pour moi : l'impact de mes modifications systémiques sur les aspects cognitifs. En effet, il est possible qu'en modifiant le stimulus, on améliore le confort et peut-être même la perception, mais qu'il se produise une dégradation de l'engagement, de la présence, de l'apprentissage, de l'acceptation de la tâche... Il est important de pouvoir évaluer ces aspects également. Cela permettra également d'affiner les préconisations d'usage pour les systèmes d'amélioration proposés.

Une vision d'ensemble sur ces trois pôles me semble indispensable dans l'avenir. Si mes recherches se positionnent en informatique, les deux autres pôles me seront vitaux pour pouvoir aborder un ensemble cohérent et pouvoir engager une discussion entre ces trois grands domaines de recherche, base d'une multidisciplinarité indispensable.

Les expériences présentées jusque là n'ont pas toutes fait l'objet d'un comité d'éthique ou d'un protocole d'essai clinique, à l'époque, cela ne se faisait pas encore pour des études en informatique, cependant, toujours dans le but de ne pas léser des personnes qui n'auraient pas été confrontées à la réalité virtuelle autrement, les expériences ont été réalisées avec la participation de personnes travaillant dans ce domaine et donc déjà exposées. La diffusion de ces technologies auprès d'enfants à des fins ludiques ou éducatives me pose beaucoup de problèmes éthiques, c'est pourquoi je ne souhaite pas étudier ou concevoir de dispositifs permettant de réduire la fatigue visuelle des enfants en réalité virtuelle, même si c'est une question souvent abordée par les journalistes.

7. Conclusion

Tout au long de ce manuscrit, j'ai montré que la réalité virtuelle peut provoquer des conflits sensori-moteurs. Leur connaissance doit permettre de les minimiser afin de bénéficier pleinement de cette technologie innovante qui peut favoriser l'apprentissage, de design, de conception, d'exploration, de manutention à distance, de divertissement...

Dans l'état de l'art, nous avons montré que beaucoup de ces conflits sont déjà étudiés et une partie de la communauté scientifique s'est emparée des conflits oculomoteurs tout en proposant des solutions pour les réduire le plus possible. Des avancées notables ont déjà eu lieu en particulier pour réduire les conflits oculomoteurs mais beaucoup reste encore à faire. Certains de ces systèmes voient leurs améliorations validées par un mieux-être des sujets, ces derniers les expriment à travers des questionnaires subjectifs, montrant une meilleure acceptation physiologique et probablement psychologique des sujets grâce à l'amélioration des interfaces. Certains chercheurs préfèrent s'assurer que le perfectionnement n'était pas seulement mesurable dans les retours subjectifs, mais qu'il se traduit également par un maintien des capacités oculomotrices des sujets.

C'est dans cette mouvance que s'inscrivent les travaux présentés dans le chapitre 4. En effet, nous proposons des systèmes tendant vers une amélioration non seulement du ressenti des sujets, mais également sur leur système visuel. Quatre systèmes ont été testés : deux diminuant l'effort accommodatif en réduisant les fréquences spatiales pour que l'accommodation puisse suivre la convergence limitant ainsi le conflit entre ces deux indices de relief proprioceptifs ; les deux autres modifiant les stimulus de vergence pour que la croisée des axes optiques se fasse au plus près du point d'accommodation.

Par ailleurs, les études sur la fatigue musculaire et les troubles musculosquelettiques dans les interfaces gestuelles sont beaucoup moins avancés que leurs consœurs sur la fatigue visuelle en stéréoscopie, puisque ce domaine technologique est beaucoup plus récent. Si deux des systèmes proposés précédemment ont pour but de réduire la fatigue gestuelle, le dernier a pour but de faire avancer les techniques de mesure de fatigue afin de permettre de valider les futurs systèmes tentant de réduire effectivement cette fatigue.

Le chapitre 5 permet d'une part d'étudier l'effet de ces systèmes de réduction de la fatigue visuelle sur des tâches très simples, mais également d'améliorer des modèles psychophysiques pour concevoir les prochains systèmes de réduction de fatigue visuelle en connaissant d'avance leurs effets sur les tâches, ainsi que les critères sur lesquels nous pourrions jouer pour concevoir des systèmes modulant des paramètres non encore investis par la communauté scientifique. Dans ce chapitre, nous proposons des améliorations des modèles sur la différence entre les gestes effectués en environnement réel et en environnement virtuel. Nous montrons que si le système visuel ne répond pas exactement de la même façon en réalité et stéréoscopie artificielle, le système

musculosquelettique ne répond pas non plus de façon identique en environnement réel ou artificiel, c'est pourquoi, il faut comprendre d'où viennent les différences, d'où peuvent-elles provenir, et quels sont les impacts sur les transferts réel-virtuel et virtuel-réel.

Achevant ce manuscrit, je repense à la personne mentionnée dans le chapitre de contexte qui m'avait affirmé : « Nous pensons que le système visuel s'adaptera, il s'adapte à tout ! » J'aimerais recroiser, un jour, cette personne et pouvoir lui dire que si le « système humain » s'adapte à tout, il est également possible de limiter les adaptations auxquelles nous le soumettons. Comme l'a préconisé Stone dans son article « Getting VR Right Then and Now . . . The Indispensable Role of Human Factors and Human-Centered Design » : « Humans first, technology second (Stone 2016), j'espère qu'à travers les études présentées dans ce manuscrit avoir fait un pas vers une technologie qui s'adapte à l'humain et non plus que ce soit toujours à l'humain de s'adapter à la technologie.

Il serait peut-être même envisageable de maîtriser, un jour, suffisamment les contraintes que la technologie impose à notre corps pour le soigner. En effet, la société Orthoptica⁷ propose déjà de se servir des contraintes imposées par des stimulus stéréoscopiques sur le système oculomoteur pour faciliter une revalidation orthoptique en milieu médical. Peut-être que cette voie sera prometteuse et ouvrira un autre pan de recherche, et pourquoi ne pas travailler avec des ostéopathes et kinésithérapeutes pour permettre de soulager des douleurs musculosquelettiques mon souhait est qu'un jour, nous maîtriserons suffisamment nos outils pour nous servir des contraintes physiologiques liées à la technologie. Non pour soumettre notre corps à des contraintes auxquelles il doit s'adapter, mais pour aider les médecins à le soigner.

⁷ Orthoptica, <http://orthoptica.com/>, consulté le 24/10/2017

8. Bibliographie

Aaron, Price and Hee-Sun Lee. 2010. "The Effect of Two-Dimensional and Stereoscopic Presentation on Middle School Students' Performance of Spatial Cognition Tasks." *Journal of Science Education and Technology* 19(1):90–103.

Agence nationale de sécurité sanitaire, alimentation, environnement, travail. 2013. "Radiofréquences et santé." Rapport scientifique, ANSES, Maisons-Alfort.

Ahmed, Sobhi. 2016. "Diminution de la Fatigue Physique lors de l'Interaction Gestuelle : Approche Méthodologique et Comparaison Virtuel et Réel." Thèse de Doctorat, Université Paris 8, Saint-Denis.

Akeley, Kurt, Simon J. Watt, Ahna Reza Girshick, and Martin S. Banks. 2004. "A Stereo Display Prototype with Multiple Focal Distances." *ACM SIGGRAPH* 804–813.

Anderson, S.J., M. K. T. & H. R. F. 1991. "Human peripheral spatial resolution for achromatic and chromatic stimuli: limits imposed by optical and retinal factors." *The Journal of physiology* 442(Oct):47-64.

ANSES. 2014. "Effets Sanitaires Potentiels Des Technologies Audiovisuelles En 3D Stéréoscopique." ANSES, Maisons-Alfort.

Application VR. 2016. "Les meilleurs jeux pour Oculus Rift." Application VR. Retrieved February 22, 2017 (<http://application-vr.com/meilleurs-jeux-oculus-rift/>).

Aptel, M., C. F. . A.-C. A. . 2011. *Les troubles musculosquelettiques du membre supérieur (TMS-MS), Guide pour les préventeurs.*

Arnault, Emilie, Coralie Barrau , Céline Nanteau, Pauline Gondouin, Karine Bigot, Françoise Viénot, Emmanuel Gutman, Valérie Fontaine, Thierry Vilette, Denis Cohen-Tannoudji, José-Alain Sahel, and Serge Picaud. 2013. "Phototoxic Action Spectrum on a Retinal Pigment Epithelium Model of Age-Related Macular Degeneration Exposed to Sunlight Normalized Condition." *PLOS ONE* 8(8):e71398.

Arns, L. L. and M.M. Cerney. 2005. "The Relationship between Age and Incidence of Cybersickness among Immersive Environment Users." *Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2005* 267–68.

Aurat, David. 30 mai 2016. *Immersion visuelle tridimensionnelle haute performance par suivi du mouvement des yeux.* Paris: Ecole nationale supérieur des Mines de Paris.

Bacquaert, Patrick. 2016. "Les cervicalgies des textos ou « text neck »." IRBMS (institut de recherche en bien-être, médecine et sport santé). Retrieved February 28, 2017 (<http://www.irbms.com/cervicalgie-texto-text-neck>).

- Bando, T., A. Iijima, and S. Yano. 2012. "Visual fatigue caused by stereoscopic images and the search for the requirement to prevent them: A review." *Displays, Assessing comfortable 3D visual environment based on human factors* 33:76–83.
- Baranski, Rose-Marie, Philippe Jandrot, Myriam Chauvet, Remi Gigoux, Michel Granier, Jacques Brun, Jean-Louis Patry, Patrick Bourchenin, Pascal Perrin, Jean-Louis Vuillermoz-Biron, Jacques Beuchot, Jean-Louis Labourayre, Etienne Lacombe, André Samuel, Michel Duwelz, and Jean-Pierre Meyer. 2003. "Méthode d'analyse des manutentions dans les activités de chantier et du BTP." rapport scientifique, INRS: Santé et sécurité au travail, Paris.
- Bécuwe, Nicolas. 03/11/2015. "TV OLED LG : performances actuelles et améliorations prévues pour 2016." HDfever. Retrieved March 14, 2017 (<http://www.hdfever.fr/2015/11/03/petit-tout-de-letat-actuelle-des-oled-lg-et-ameliorations-prevues-en-2016/>).
- Benabdallah, BF. 2008. "le blocage du signal de la myostatine chez la souris." thèse de doctorat, université de Laval, Laval.
- Benasayag, Miguel. 2016. *Cerveau augmenté, homme diminué*. Paris: La découverte.
- Benjamin, W. J. 2007. *Borish's Clinical refraction 2nd edition*. Birmingham: Elsevier.
- Bergeron, Jacques and Jean-Claude Hervé. 2001. *SVT 1re S - Prépabac Cours & entraînement*. Paris: Hatier.
- Bernhard, Matthias, Camillo Dell'mour, Michael Hecher, Efstathios Stavrakis, and Michael Wimmer. 2014. "The Effects of Fast Disparity Adjustment in Gaze-Controlled Stereoscopic Applications." *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Application* 111–118.
- Berros, Jesús Bermejo. 2008. *Mon Enfant et La Télévision*. 1st ed. paris: De Boek.
- Bertorello, Serge. 2017. "L'objectif de la lunette astronomique." notions d'optique pour astronome amateur. Retrieved March 21, 2017 (<http://serge.bertorello.free.fr/optique/instrum/objectif.html>).
- Bhatt, Radhika, Nikita Fernandes, and Archana Dhag. 2013. "Vision Based Hand Gesture Recognition for Human Computer Interaction." *University Of Mumbai (IJESIT)* 2(3).
- Blohm, W., I. P. Beldie, K. Schenke, K. Fazel, and S. Pastoor. 1997. "Stereoscopic Image Representation with Synthetic Depth of Field." *Journal of the Society for Information Display* 5(3):307-13.
- Blum, T., M. Wiczorek, A. Aichert, R. Tibrewal, and N. Navab. 2010. "The Effect of out-of-Focus Blur on Visual Discomfort When Using Stereo Displays." *9th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* 13-17.
- Bonnet, Claude. 1986. *Manuel pratique de psychophysique*. Paris: Armand Collin.
- Bourhis, Marc, Olivier Amato, and Philippe Gérard. 2003. *Le Livre blanc Du relief (3ds) Au Cinema et a La Television*. France.
- Bradshaw, M. F. and B. J. Rogers. 1999. "Sensitivity to horizontal and vertical corrugations defined by binocular disparity." *Vision research* 39:3049-3056.
- Brooker, Julian P. and Paul M. Sharkey. 2001. "Operator Performance Evaluation of Controlled Depth of Field in a Stereographically Displayed Virtual Environment." *SPIE Conference on Human Vision and Electronic Imaging* 4297:408–17.

- Bubka, Andrea, Frederick Bonato, and Stephen Palmisano. 2007. "Expanding and Contracting Optical Flow Patterns and Simulator Sickness." *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 78(4):383-86.
- Cairn. 2013. "L'écriture sur la touche." *Spirale* 67(3):9:12.
- Callet, Patrick. 2013. "La Textonite Ou Tendinite Du Texto Au Pouce." IRBMS (Institut de Recherche Du Bien-Être de La Médecine et Du Sport Santé). Retrieved February 28, 2017 (<http://www.irbms.com/tendinite-texto>).
- Canceil, O, J Cottraux, B Falissard, M Flament, J Miermont, J Swendsen, M Teherani, and JM Thurin. 2004. "Psychothérapie : Trois Approches Évaluées 2004." Expertise collective. Paris: INSERM, n.d." expertise collective, INSERM, Paris.
- Carnegie, K. and T. Rhee. 2015. "Reducing Visual Discomfort with HMDs Using Dynamic Depth of Field." *IEEE Computer Graphics and Applications* 35(5):34-41.
- Carr, Nicholas. 2011. *The Shallows - What the Internet Is Doing to Our Brains*. Reprint ed. New York: W. W. Norton & Company.
- Carrier, L. Mark, Saira S. Rab, Larry D. Rosen, Ludivina Vasquez, and Nancy A. Cheever. 2012. "Pathways for Learning from 3D Technology." *International Journal of Environmental and Science Education* 7(1):53-69.
- Chakravarthula, P., D. Dunn, K. Akşit, and H. Fuchs. 2018. "FocusAR: Auto-focus Augmented Reality Eyeglasses for both Real and Virtual." *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 1 1.
- Chan, Edwin, Teddy Seyed, Wolfgang Stuerzlinger, Xing-Dong Yang, and Frank Maurer. 2016. "User Elicitation on Single-Hand Microgestures." *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* 3403-3414.
- Chaudeau, Céline. 2015. "Les 8 meilleurs outils pour une recherche d'emploi." Keljob. Retrieved February 28, 2017 (<https://www.keljob.com/editorial/chercher-un-emploi/mener-sa-recherche-demploi/detail/article/les-8-meilleurs-outils-pour-une-recherche-d-emploi.html>).
- Chen, Y., Y. Wang, X. Yu, A. Xu, J. Jiang, and H. Chen. 2017. "Effect of Illumination on Ocular Status Modifications Induced by Short-Term 3D TV Viewing." *Neural Plasticity* 2017:1-9.
- Choi, Y. H., D. P. Jang, J. H. Ku, M. B. Shin, and S. I. Kim. 2001. "Short-Term Treatment of Acrophobia with Virtual Reality Therapy (VRT): A Case Report." *Cyberpsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society* 3(4):349-354.
- Cho, Sang-Hyun and Hang-Bong Kang. 2013. "A New Visual Comfort-Based Stereoscopic Image Retargeting Method." *SpringerLink* 290-300.
- Clarté. 2015. "CLARTE associé aux destinées de AF'ergo Conseil." *POLYGONE, lettre d'information de Clarté* 20(novembre):3.
- Clarte. n.d. "Ergowide3." Clarté asso. Retrieved March 22, 2017 (<http://www.clarte.asso.fr/realite-virtuelle.php/en/ERGOWIDE%C2%B3/>).
- CNN. 1997. "Japanese cartoon triggers seizures in hundreds of children." CNN interactive. Retrieved March 08, 2017 (<http://edition.cnn.com/WORLD/9712/17/video.seizures.update/>).
- Cohen, Laurent, Stéphane Lehericy, Carole Henry, Marie Bourgeois, Christine Larroque, Christian Sainte-Rose, Stanislas Dehaene, and Lucie Hertz-Pannier. 2004. "Learning to Read without a Left

Occipital Lobe: Right-Hemispheric Shift of Visual Word Form Area." *Annals of Neurology* 58(6):890-894.

Cook, T. , N. Phillips, K. Massey, A. Plopski, C. Sandor, and J Edward Swan. 2018. "User Preference for SharpView-Enhanced Virtual Text During Non-Fixated Viewing." *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* 394-401.

Copeman, W. S. 1940. "The Arthritic Sequelae of Pneumatic Drilling." *Annals of the Rheumatic Diseases* 2 (2):141-46.

Costello, Patrick J. 1997. *Health and safety issues associated with virtual reality: a review of current literature*. Loughborough.

Darowish, Michael, Jeffrey N. Lawton, and Peter J. Evans. 2009. "What Is Cell Phone Elbow, and What Should We Tell Our Patients?" *Cleveland Clinic Journal of Medicine* 76(5):306-8.

Dehaene, Stanislas. 2008. "Psychologie cognitive expérimentale." Cours, Collège de France, Paris.

DelCourt, Cecile, Audrey Cougnard-Grégoire, Jean-Francois Korobelnik, Isabelle Carrière, Marie-Noelle Delyfer, Marie-Bénédicte Rougier, Mélanie Le Goff, Jean-François Dartigues, Pascale Barberger-Gateau, and Joseph Colin. 2012. "Light exposure and the risk for cataract extraction and age-related macular degeneration: the Alienor Study." *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 53(14):2737-2737.

Delis, S., N. Nikolaidis, and I. Pitas. 2013. "Automatic Detection of Depth Jump Cuts and Bent Window Effects in Stereoscopic Videos." *Image, Video, and Multidimensional Signal Processing* 1-4.

Desmurget, Michel. 2012. *TV Lobotomie - la vérité scientifique sur les effets de la télévision*. Paris.

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

DiZio, Paul and James R. Lackner. 1997. "Circumventing Side Effects of Immersive Virtual Environments." *meeting of the HCI* 2:893-96.

Downing, Elizabeth, Lambertus Hesselink, John Ralston, and Roger Macfarlane. 1996. "A Three-Color, Solid-State, Three-Dimensional Display." *Science* 273(5278):1185-89.

Duchowski, Andrew T., Donald H. House, Jordan Gestring, Rui I. Wang, Krzysztof Krejtz, Izabela Krejtz, Radosław Mantiuk, and Bartosz Bazyluk. 2014. "Reducing Visual Discomfort of 3D Stereoscopic Displays with Gaze-Contingent Depth-of-Field." *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception* 39-46.

Dupontbloch, Nicolas. n.d. "Photo chromatisme." astrophotographie. Retrieved March 21, 2017 (<http://nicolas.dupontbloch.free.fr/photo-chromatisme.htm>).

Eaton, Charles. 2008. "Electronic Textbook on Hand Surgery." eatonhand. Retrieved février 13, 2017 (<http://www.eatonhand.com/>).

Emoto, M, T. Niida, and F. Okano. 2005. "Repeated Vergence Adaptation Causes the Decline of Visual Functions in Watching Stereoscopic Television." *Journal of Display Technology* 1(2):328-40.

Erblan, Thibault and Antoine Vercauteren. 1999. "Les différents types de fibres." Comment fonctionnent les muscles lors d'un effort physique? Retrieved février 13, 2017 (<http://tpe-les->

muscles.e-monsite.com/pages/comment-developper-ses-muscles/comment-developper-ses-muscles.html).

Espinasse-Berrod, Marie-Andrée and Alain Pêchereau. 2008. *Strabologie: Approches diagnostique et thérapeutique*. Paris: Elsevier Masson.

Fang, Yuming, Junle Wang, Yuan Yuan, Jianjun Lei, Weisi Lin, and Patrick Le Callet. 2016. "Saliency-Based Stereoscopic Image Retargeting." *Information Sciences* 372:347-58.

Favalora, Gregg E., Joshua Napoli, Deirdre M. Hall, Rick K. Dorval, Michael Giovinco, Michael J. Richmond, and Won S. Chun. 2002. "100-Million-Voxel Volumetric Display." *International Society for Optics and Photonics* 300-312.

Fender, D. and B. Julesz. 1967. "Extension of panum's area." *the optical Society of america*, pp. 819-830.

Fernandes, A. S. and S. K. Feiner. 2016. "Combating VR Sickness through Subtle Dynamic Field-of-View Modification." *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* 201-10.

Fesharakifard, Rasul. 2008. "Conception et Réalisation D'une Interface À Retour D'effort Pour Les Environnements Virtuels À Échelle Humaine." Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris.

Fischer, J., D. Bartz, and W. Strasser. 2006. "Enhanced Visual Realism by Incorporating Camera Image Effects." *2006 IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* 205-8.

Foley, Malachy J. 2005. "Avoiding Mouse Elbow." widwest sas user group. Retrieved juin 12, 2009 (<http://www.mwsug.org/Conference/2005/Tutorials/TS700.pdf>).

Foucault, Michel. 1973. *Ceci n'est pas un pipe*. Fontfroide-le-Haut: Fata Morgana.

Freivalds, Andris. 2011. *Biomechanics of the upper limbs: mechanics, modeling and musculoskeletal injuries*. Boca Raton, Floride.

Fuchs, Philippe 2003. "les sens et les réponses motrices de l'homme." in *Traité de la réalité virtuelle*. 1st ed. Paris: Les presses de l'école des Mines de Paris.

Fuchs, Philippe. 2016. *les casques de réalité virtuelles et de jeux vidéo*. Paris: Presse des Mines - TRANSVALOR.

Fujikake, K., M. S. Omori, H. Hasegawa, and H. Takada. 2014. "Stereoscopic Displays and Accommodative Focus." *Forma* 29, no. special issue:S53-63.

Gemne, G., I. Pyykkö, W. Taylor, and Pelmeur P. L. 1987. "The Stockholm Workshop Scale for the Classification of Cold-Induced Raynaud's Phenomenon in the Hand-Arm Vibration Syndrome (Revision of the Taylor-Pelmeur Scale)." *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 4:275-278.

Gil, J.J., A. Avello, A. Rubio, and J. Florez. 2004. "Stability Analysis of a 1 DOF Haptic Interface Using the Routh-Hurwitz Criterion." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 12(4):583-88.

Goldstein, E. B. 2003. *Sensation & perception*. Wadsworth Publishing Company Bk&Cdr.

Gower, D. W. and J. E. Fowlkes. 1989. "Simulator Sickness in the UH-60 (Black Hawk) Flight Simulator."

- Gray, Henry. 1918. *Anatomy of the Human Body*. 20th ed. Philadelphia, Pennsylvania.
- Guo, J, D. Weng, Z. Zhang, Y. Liu , H. B. L. Duh, and Y. Wang. 2018. "Subjective and objective evaluation of visual fatigue caused by continuous and discontinuous use of HMDs." *Journal of the Society for Information Display*.
- Gupta, S.C., C.A. Wantland, and S.A Klein. 1996. "Cyberpathology: Medical Concerns of VR Applications." *Journal of Medicine and Virtual Reality* 1(2):8-11.
- Haptique et Réalité Virtuelle. 2014. "Présentation simulation ergonomique." HRV simulation. Retrieved March 22, 2017 (<http://www.hrv-simulation.com/en/presentation-simulation-ergonomique.html>).
- Harding, G. F and F. Fylan. 1999. "Two Visual Mechanisms of Photosensitivity." *Epilepsia* 40(10):1446-51.
- Harding, Graham F. A. and Peter M. Jeavon. 1994. *Photosensitive Epilepsy*. Cambridge.
- Henkel, Linda A. , Katelyn Parisi , and Carey Mack Web 2016. "The Museum as Psychology Lab: Research on Photography and Memory in Museums." in *in Museums and Visitor Photography: Redefining the Visitor Experience*, edited by Museumsetc Theopisti Stylianou-Lambert. Edimburg and Boston.
- Heo, Jung-Yoon, Kiwon Kim, Maurizio Fava, David Mischoulon, George I. Papakostas, Min-Ji Ki, and Dong J. Kim. 2017. "Effects of Smartphone Use with and without Blue Light at Night in Healthy Adults: A Randomized, Double-Blind, Cross-Over, Placebo-Controlled comparison." *Journal of Psychiatric Research* (87):61-70.
- Hettinger, L. J, K. S. Berbaum, R. S. Kennedy, W. P. Dunlap, and M. D. Nolan. 1990. "'Vection and Simulator Sickness.'" *Military Psychology: The Official Journal of the Division of Military Psychology, American Psychological Association* 2(3):171-81.
- Hillaire, S., Anatole Lecuyer, and R. Cozot. 2008. "Using an Eye-Tracking System to improve Depth-of-field Blur Effect and Camera Motion in Virtual Environments." *Proceedings of IEEE Virtual Reality* 47-51.
- Hillaire, S., Anatole Lecuyer, R. Cozot, and G. Casier. 2007. "Depth of field Blur effects for first person navigation in virtual Environments." *Proceedings of ACM Symposium on virtual reality Software and Technology* 204-207.
- Hillaire, S., Anatole Lecuyer, R. Cozot, and G. Casier. 2008. "Depth of field blur effect for First Person Navigation in virtual environments." *IEEE Computer Graphics an Application* 28(6):47-55.
- Hodges, Larry F. 1992. "Tutorial: Time-Multiplexed Stereoscopic Computer Graphics." *IEEE Comput. Graph. Appl* 12(2):20-30.
- Hoffman, D.M., A.R. Girshick, K. Akeley, and Banks. 2008. "Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue." *J Vis* 8(33).
- Homola, A., J. Chaloupka, K. Antos, and B. Jezek. 1997. "Hygiene Aspects of the VR Systems Application." *Proceedings of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Region 8 International Conference* 8:56.
- Howard, I. P. and B. J. Rogers. 1995. *Binocular Vision and Stereopsis*. Oxford: Oxford psychology series.

- Hsin-Hui, Lin, Wang Yu-Yin , Wang Yi-Shun, and Wang Yu-Min. 2018. "Measuring perceived physiological vulnerability to IT usage: an initial test in a virtual reality-based learning environment." *Interactive Learning Environments*.
- Huang, H. 2019. *Development and Optimization of Light Field Head-Mounted Displays*.
- Huang, H. and H. Hua. 2019. "Generalized methods and strategies for modeling and optimizing the optics of 3Dhead-mounted light field displays." *Optics express* 27(18):25154.
- Huckauf, A. and L. V. Eberhardt. 2019. "Information Processing in Real and in Stereoscopic Environments." *Proceedings of Mensch Und Computer 2019, New York, NY, USA*, 1-9.
- Hu, Bo, Liang Ma, Wei Zhang, Gavriel Salvendy, Damien Chablat, and Fouad Bennis. 2011. "Predicting Real-World Ergonomic Measurements by Simulation in a Virtual Environment." *International Journal of Industrial Ergonomics* 41(1):64-71.
- Jégo, Jean-François. 2013. "Interaction basée sur des gestes définis par l'utilisateur: Application à la réalité virtuelle." Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris.
- Jego, J.-F., A. Paljic, and Fuchs P.. 2013. "User-Defined Gestural Interaction: A Study on Gesture Memorization." *IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, 7-10.
- Johnston, E. B. 1991. "Systematic distortions of shape from stereopsis." *Vision research*.
- Jolly, Caroline and Edouard Gentaz. 2013. "Évaluation Des Effets D'entraînements Avec Tablette Tactile Destinés À Favoriser L'écriture de Lettres Cursives Chez Des Enfants de Cours Préparatoire." *Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation* 20:1-20.
- Jones, Ches and Bart Hammig. 2009. "Case Report: Injuries Associated with Interactive Game Consoles: Preliminary Data." *The Physician and Sportsmedicine* 37(1):138-40.
- Jones, Ches and Bart Hammig. 2009. "Case Report: Injuries Associated with Interactive Game Consoles: Preliminary Data." *The Physician and Sportsmedicine* 37(1):138-40.
- Jones, G., D. Lee, N. Holliman, and D. Erza. 2001. "Controlling perceived depth in stereoscopic image." *Proceedings of IEEE* 4297:42-53.
- Julesz, J. 1971. *Fondation of cyclopean perception*. Chicago: University of Chicago Press.
- Julesz, B. 1971. *Foundations of Cyclopean Perception*. Chicago: Univ. of Chicago Press.
- Jung, Seung-Won and Sung-Jea Ko. 2012. "Depth Sensation Enhancement Using the Just Noticeable Depth Difference." *IEEE Transactions on Image Processing* 21(8):3624-37.
- Jung, Y. J., H. Sohn, S. i Lee, and Y. M. Ro. 2014. "Visual Comfort Improvement in Stereoscopic 3D Displays Using Perceptually Plausible Assessment Metric of Visual Comfort." *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 60(1):1-9.
- Kellnhofer, Petr, Tobias Ritschel, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel. 2013. "Optimizing Disparity for Motion in Depth." *Computer Graphics Forum* 32(4):143-52.
- Kellog, R. S., C. Castore, and R. Coward. 1980. "Psychophysiological Effects of Training in a Full Vision Simulator." *Annual scientific meeting of aerospace medical association*.

- Kennedy, Robert S., Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, and Michael G. Lilienthal. 1993. "Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness." *The International Journal of Aviation Psychology* 3(3):203-20.
- Keshavarz, Behrang, Bernhard E. Riecke, Lawrence J. Hettinger, and Jennifer L. Campos. 2015. "Vection and Visually Induced Motion Sickness: How Are They Related?" *Frontiers in Psychology* 6.
- Kim, D., S. Choi, and K. Sohn. 2013. "Visual Comfort Enhancement for Stereoscopic Video Based on Binocular Fusion Characteristics." *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 23(3):482-87.
- Kim, M., S. Lee, C. Choi, G. M. Um, N. Hur, and J. Kim. 2008. "Depth Scaling of Multiview Images for Automultiscopic 3D Monitors." *3DTV Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video* 181-84.
- Klein, Georg and David Murray. 2008. "Compositing for Small Cameras." In: , 2008." *Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality ISMAR '08, IEEE Computer Society* 57-60.
- Klinger, Evelyne. 2006. "Apports de la réalité virtuelle à la prise en charge de troubles cognitifs et comportementaux." thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris.
- Kooi, F. L. and A. Toet. 2001. "Visual comfort of binocular and 3D displays." *Proceedings of SPIE* 4299:586-592.
- Koppal, S., C. L. Zitnick, M. Cohen, S. B. Kang, B. Ressler, and A. Colburn. 2011. "A Viewer-Centric Editor for 3D Movies." *IEEE Computer Graphics and Applications* 31(1):20-35.
- Kuze, J and K. Ukai. 2008. "Subjective Evaluation of Visual Fatigue Caused by Motion Images." *Displays, Health and Safety Aspects of Visual Displays* 29(2):159-66.
- Lackner, James R. 2014. "Motion Sickness: More than Nausea and Vomiting." *Experimental Brain Research* 323(8):2493-2610.
- Laffont, P.-Y., A. Hasnain, S. B. Jalil, K. Buyukburc, P.-Y. Guillemet, S. Wirajaya, L. Khoo, T. Deng, and J.-C. Bazin. 2019. ", , « Piezo-actuated varifocal head-mounted displays for virtual and augmented reality." *présenté à Proc. SPIE 10942, Advances in Display Technology Technologies IX* 9.
- Lalumière, A and C. Collinge. 1999. "Revue de littérature et avis d'experts sur les troubles musculo-squelettiques associés à la souris d'ordinateur." rapport scientifique, Études et recherches, IRSST, Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec, Québec.
- Lambooj, M., M. Fortuin, I. Heynderickx, and W. A. IJssel. 2009. "Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review." *Journal of Imaging Science and Technology* 53:30201-1-30201-14.
- Lang, Manuel, Alexander Hornung, Oliver Wang, Steven Poulakos, Aljoscha Smolic, and Markus Gross. 2010. "Nonlinear Disparity Mapping for Stereoscopic 3D." *ACM SIGGRAPH 2010 Papers* 75:1-10.
- Lanman, D. 2018. "Reactive displays: Unlocking next-generation VR/AR visuals with eye tracking." *keynote speech at Display Week*.
- Lanman, D. and D. Luebke. 2013. "Near-eye Light Field Displays." *ACM Trans Graph* 32(6):220:1-220:10.

- LaViola, Joseph J. J. 2000. "A Discussion of Cybersickness in Virtual." *SIGCHI Bulletin*, pp. 47-56.
- Le Moigne, Jean-Louis and Groupe de recherche en analyse de système et calcul. 1987. *Qu'est-ce qu'un modèle ?* Aix-en-Provence: Université d'Aix-Marseille III, Faculté d'économie appliquée.
- Levelt, W.J. M. 1965. *On binocular rivalry*. Soesterberg: Institute for perception.
- Levelt, W.J. M. 1966. "The alternation process in binocular rivalry." *British Journal Psychology*, pp. 143-145.
- Lin, J. J. W., H. B. L. Duh, D. E. Parker, H. Abi-Rached, and T. A. Furness. 2002. "Effects of Field of View on Presence, Enjoyment, Memory, and Simulator Sickness in a Virtual Environment." *Proceedings IEEE Virtual Reality 2002* 164-71.
- Lin, Hong-Shang, Shuen-Huei Guan, Chu-Tien Lee, and Ming Ouhyoung. 2011. "Stereoscopic 3D Experience Optimization Using Cropping and Warping." *SIGGRAPH Asia 2011 Sketches* 40:1-40:2.
- Lockley, Steven W., George C. Brainard, and Charles A. Czeisler. 2003. "High Sensitivity of the Human Circadian Melatonin Rhythm to Resetting by Short Wavelength Light." *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 88(9):4502(5).
- Lourdeaux, Domitile. 2001. "Réalité Virtuelle et Formation : Conception D'environnements Virtuels Pédagogiques. Interface Homme-Machine." thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris.
- Lundström, Ronnie and Roland S. Johansson. 1986. "Acute Impairment of the Sensitivity of Skin Mechanoreceptive Units Caused by Vibration Exposure of the Hand." *Ergonomics* 29(5):687-98.
- Luo, X., R. Kenyon, D. Kamper, D. Sandin, and T. DeFanti. 2007. "The effect of scene complexity, stereovision, and motion parallax on size constancy in virtual environment." *IEEE Virtual Reality*.
- MacKenzie, I. S. and C. Ware. 1993. "Lag as a determinant of human performance in interactive systems." *Proceedings of the ACM Conference on human Factors in Computing system* 488-493.
- Manan, F. A., T. C. A. Jenkins, and A. J. Collinge. 2002. "The effect of clinical visual stress on stereoacuity measured with the TNO test." *Malaysian Journal of medical sciences* 8:25-31.
- Mangiat, S. and J. Gibson. 2012. "Disparity Remapping for Handheld 3D Video Communications." *IEEE International Conference on Emerging Signal Processing Applications* 147(50).
- Martin, Tiphaine. 2011. "L'enfant Face À La Télévision : Quels Effets Sur Son Développement Cognitif, Langagier et Pragmatique ?" Certificat capacité orthophoniste, Ecole d'orthophonie de Lorraine, Nancy.
- Masia, Belen, Gordon Wetzstein, Carlos Aliaga, Ramesh Raskar, and Diego Gutierrez. 2013. "Display Adaptive 3D Content Remapping." *Computers & Graphics* 37(8):983-96.
- Mather, G. 1996. "Image Blur as a Pictorial Depth Cue." *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society* 263(1367):169-72.
- Mather, George and David R. R. Smith. 2000. "Depth Cue Integration: Stereopsis and Image Blur." *Vision Research* 40(25):3501-6.
- Matusik, Wojciech and Hanspeter Pfister. 2004. "3D TV: A Scalable System for Real-Time Acquisition, Transmission, and Autostereoscopic Display of Dynamic Scenes." *ACM SIGGRAPH* 814-824.

- Mauderer, Michael, Simone Conte, Miguel A. Nacenta, and Dhanraj Vishwanath. 2014. "Depth Perception with Gaze-Contingent Depth of Field." *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* 20:217-226.
- McCauley, Michael E and Thomas J. Sharkey. 1992. "Cybersickness: Perception of Self-Motion in Virtual Environments." *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 1(3):311-18.
- Milou, Alain. 2005. *La réalité virtuelle : Avec ou sans le corps ?* Paris: Editions Autrement.
- Minaei, Negin. 2014. "Do Modes of Transportation and GPS Affect Cognitive Maps of Londoners?" *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 70(12):162-80.
- Min, Patrick and Hans Jense. 1994. "Interactive Stereoscopy Optimization for Head-Mounted Displays." *SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems* 2177:306-16.
- Mitchell, D. E. 1966. "Retinal disparity and diplopia." *Vision research*, pp. 441-451.
- Mittelstaedt, J. M., J. Wacker, and D. Stelling. 2019. "VR aftereffect and the relation of cybersickness and cognitive performance." *Virtual Reality* 23(2):143-154.
- Money, K. E. 1970. "Motion Sickness." *Physiological Reviews* 50(1):1-39.
- Money, K. E. 1990. *Motion Sickness and Evolution*. Boca Raton: Crampton GH. Motion and Space Sickness. CRC Press.
- Mukai, Aika, Yoshio Yamagishi, Makoto J. Hirayama, Toshiya Tsuruoka, and Tosh Yamamoto. 2011. "Effects of Stereoscopic 3D Contents on the Process of Learning to Build a Handmade PC." *Knowledge Management & E-Learning: An International Journal (KM&EL)* 3(3):491-506.
- Muse, L. and S.C. Peres. 2011. "The Ergonomic Implications of Gesturing: Examining Single and Mixed Use with Appropriate Placement." *Texas Regional Human Factors & Ergonomics Society Symposium*.
- Neveu, Pasacline. 2008. "retentissement du sur-écartement inter-pupillaire sur l'équilibre oculomoteur." *rapport de MAster 2ème année*.
- Neveu, P., A.-E. Priot, J. Plantier, and C. Roumes. 2010. "Short exposure to telestereoscope affects the oculomotor system." *Ophthalmic Physiol Opt* 30:806–815.
- Nielsen, M., S. M. . M. T. B. . G. E. 2003. "A procedure for developing intuitive and ergonomic gesture interfaces for man-machine interaction." *Proceedings of the 5th International Gesture Workshop* 1-12.
- Nielsen, K.R. K. and T. Poggio. 1984. "Vertical image registration in stereopsis v." *Vision research*, pp. 1133-1140.
- Norcia, A. M. and C. W. Tyler. 1984. "Temporal frequency limits for stereoscopic apparent motion processes." *Vision Research* 24(5) 395-401.
- North, Rachel V. 1993. *Work and the Eye*. Michigan.
- North, M. M, North S. M., and Coble J. R.. 1997. "Virtual Reality Therapy: An Effective Treatment for Psychological Disorders." *Studies in Health Technology and Informatics* 44:59-70.
- Observatoire de La Santé Visuelle et Auditive Du Groupe Optic 2000. 2016. "La Lumière Bleue : Retour Sur Un Débat." Retrieved March 14, 2017 (<http://www.observatoire-groupeoptic2000.fr/reperes/focus-actualite-sante-visuelle-auditive/lumiere-bleue-retour-debat/>).

- Oh, C., B. Ham, S. Choi, and K. Sohn. 2015. "Visual Fatigue Relaxation for Stereoscopic Video via Nonlinear Disparity Remapping." *IEEE Transactions on Broadcasting* 61(2):142-53.
- Okumura, Bunyo, Masayuki Kanbara, and Naokazu Yokoya. 2006. "Augmented Reality Based on Estimation of Defocusing and Motion Blurring from Captured Images." *Proceedings of the 5th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* 219-225.
- OpenStax, College. 2013. *Anatomy & Physiology*. 1st ed. Houston, Texas: OpenStax College.
- Palmer, S. E. 1999. *Vision science : photons to phenomenology*. Oxford: Bradford book, The MIT Press.
- Paulus, M., A. Straube, and T. Eggert. 2017. "Vergence-accommodation conflict in virtual reality displays induces phoria adaptation." *Journal of Neurology* 265:1-2.
- Perrin, Jérôme. 1998. *Profondeur et binocularité : algorithmie, étude psychophysique et intérêt pour l'ergonomie des interface stéréoscopiques*. Paris: Ecole des Mines de Paris.
- Perrin, Jerome, Philippe Fuchs, Corinne Roumes, and François Perret. 1998. "Improvement of Stereoscopic Comfort through Control of the Disparity and of the Spatial Frequency Content." *International Society for Optics and Photonics* 124-34.
- Pontonnier, C., A. Samani, M. Badawi, P. Madeleine, and G. Dumont. 2014. "Assessing the Ability of a VR-Based Assembly Task Simulation to Evaluate Physical Risk Factors." *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 20(5):664-74.
- Prince, S.J. D. and B. J. Rogers. 1998. "Sensitivity to disparity corrugations in peripheral vision." *Vision research* 38:2533-2537.
- Purves, Dale , George J Augustine, David Fitzpatrick, William Hal, Anthony-Samuel LaMantia, and Léonard White. 2015. *Neurosciences*. 5th ed. Louvain-la-Neuve.
- Qi, Shaoyu and Jeffrey Ho. 2012. "Shift-Map Based Stereo Image Retargeting with Disparity Adjustment." *Proceedings of the 11th Asian Conference on Computer Vision* 8033:457-469.
- Rautaray, Siddharth S. and Agrawal Anupam. 2015. "Vision Based Hand Gesture Recognition for Human Computer Interaction: A Survey." *Artificial Intelligence Review* 43(1):1-54.
- Read, Jenny C. A., Jennifer Simonotto, Iwo Bohr, Alan Godfrey, Brook Galna, Lynn Rochester, and Tom V. Smulder. 2015. "Balance and Coordination after Viewing Stereoscopic 3D Television." *Royal Society Open Science* 2(7):1405-22.
- Reason, J. T. and J. J. Brand. 1975. *Motion Sickness*. London: Academic press.
- Richards, W. 1971. "Independence of Panum's near and far limits." *American Journal of optometry and archives of American academy of optometry*, pp. 103-109.
- Richards, W. 1971. "Independence of Panum's near and far limits." *American Journal of optometry and archives of American academy of optometry*, pp. 103-109.
- Rogers, B. and R. Cagenello. 1989. "Disparity curvature and the perception of three-dimensional surfaces." *Nature* 339:261-270.
- Rokita, P. 1996. "Generating Depth of-Field Effects in Virtual Reality Applications." *IEEE Computer Graphics and Applications* 16(2):18-21.

- Rossetti, Y, G Roge, L. Pisella, and D. Boisson. 1999. "Plasticité Sensori-Motrice et Récupération Fonctionnelle : Les Effets Thérapeutiques de L'adaptation Prismatique Sur La Négligence Spatiale Unilatérale." *Médecine/Sciences* 15:239-45.
- Rothbaum, B. O., L. F. Hodges, R. Kooper, D. Opdyke, J. S. Williford, and M. North. 1995. "Effectiveness of Computer-Generated (Virtual Reality) Graded Exposure in the Treatment of Acrophobia." *The American Journal of Psychiatry* 152(4):626-28.
- Roumes, Corinne. 1995. *Contenu fréquentiel de l'image et vision binoculaire - Etude psychophysique chez l'homme*. Paris: Université de Paris.
- Roumes, Corinne, Justin Plantier, and J.-P. Menu. 1992. "Local contrast : a quantification tool for stereo-image." *Proceedings of IEEE* 5:2098-2099.
- Rousseau, Jean-Jacques 1959. "Emile ou de l'Education." P. 412 in *Oeuvre Complète, tome 3*. Paris: Lefèvre Librairie.
- Ruiz, Jaime, Yang Li, and Edward Lank. 2011. "User-Defined Motion Gestures for Mobile Interaction." *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* 197-206.
- Rushton, S. K. and P. Mc Riddell. 1999. "Developing visual system and exposure to virtual reality and stereo display : some concerns and speculation about the demands on accommodation and vergence." *Applied Ergonomics* 30:69-78.
- Sakai, K and H Finkel. 1995. "Characterisation of spatial frequency in the perception of shape form texture." *Journal ophtalmology society American* A(12):1208-24.
- Salous, Saleh. 2015. "Fusion de Données Multi-Kinect Visant À Améliorer L'interaction Gestuelle Au Sein D'une Installation de Réalité Virtuelle." Thèse de doctorat, Paris 8, Saint-Denis.
- Schiffmann, Serge N. 2006. "Le cerveau en constante reconstruction : le concept de plasticité cérébrale." *Cahiers de psychologie clinique* 16(1):11-23.
- Schmoll, L., M. Veit, M. Roy, and A. Capobianco. 2014. "Serious Game et Apprentissage En Réalité Virtuelle : Résultats D'une Étude Préliminaire Sur La Mémorisation En Langue Étrangère." *Synergies Pays Germanophones* 7:1-7.
- Schor, C. M. 1986. "Adaptive regulation of accommodative vergence and vergence accommodation." *Am. J. Optom. Physiol. Opt.*, pp. 168-173.
- Schor, C. M., K. M. Roberston, and M. Wesson. 1986. "Binocular sensory vision is limited by spatial resolution." *Vision research*, pp. 573-578.
- Sciences et avenir and AFP. 2015. "Faut-Il S'équiper Contre La Lumière Bleue de Nos Écrans ?" Sciences et Avenir. Retrieved March 14, 2017 (https://www.sciencesetavenir.fr/sante/sommeil/faut-il-s-equiper-contre-la-lumiere-bleue-de-nos-ecrans_102241).
- Selim, Heba Sayed and Amani Farouk Abaza. 2015. "Microbial Contamination of Mobile Phones in a Health Care Setting in Alexandria, Egypt." *GMS Hygiene and Infection Control* 10.
- Shao, Feng, Zhutuan Li, Qiuping Jiang, Gangyi Jiang, Mei Yu, and Zongju Peng. 2015. "Visual Discomfort Relaxation for Stereoscopic 3D Images by Adjusting Zero-Disparity Plane for Projection." *Displays* 39(12):125-32.

- Shibata, T., K. J. . H. D. M. . B. M. S. 2011. "The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays." *J Vis* 11.
- Shiel, William C. J. 2009. "e medicine health." ruptured tendon. Retrieved février 13, 2017 (http://www.emedicinehealth.com/ruptured_tendon/article_em.htm).
- Silverstein, B., L. Fine, and D. Stetson. 1987. "Hand-Wrist Disorders among Investment Casting Plant Workers." *The Journal of Hand Surgery* 12(5Pt2):838-44.
- Simoneau, S., S.-V. M. . C. D. 1996. *Les LATR, mieux les comprendre pour mieux les prévenir..* St-Léonard, Québec.
- Sohn, H., Y. J. Jung, S. I. Lee, F. Speranza, and Y. M. Ro. 2014. "Visual Comfort Amelioration Technique for Stereoscopic Images: Disparity Remapping to Mitigate Global and Local Discomfort Causes." *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 24(5):745-758.
- Sohn, Hosik, Yong Ju Jung, and Yong Man Ro. 2013. "Local Disparity Remapping to Enhance Depth Quality of Stereoscopic 3D Images Using Stereoacuity Function." *Proc. SPIE 9011, Stereoscopic Displays and Applications XXV* 90110L-6.
- Souchet, A. , S. Philippe, and L. Leroy. Oct 2018. "Eyestrain Impacts on Learning Job Interview with a Serious Game in Virtual Reality." *Proceeding, VRST '18, Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (No. 15).
- Southard, David A. 1992. "Transformations for Stereoscopic Visual Simulation." *Computers & Graphics* 16(4):401-410.
- Sparks , Dorothy A., Lisa M. Coughlin, and daniel M. Chase. 2011. "Did Too Much Wii Cause Your Patient's Injury?" *The Journal of Family Practice* 60(7):404-409.
- Spitzer, Manfred. 2014. "Information Technology in Education: Risks and Side Effects." *Trends in Neuroscience and Education* 3(3-4 (September 2014)):81-85.
- Stanney, K. 1995. "Realizing the Full Potential of Virtual Reality: Human Factors Issues That Could Stand in the Way." *Virtual Reality Annual International Symposium, 1995. Proceedings* 28-34.
- Stein, Scott. 18/07/2017. "Google Glass returns: This time, it's professional." Cnet. Retrieved October 30, 2017 (<https://www.cnet.com/news/google-glass-2-goes-for-enterprise/>).
- Stelmach, L., W. J. Tam, and D. Meegan. 1999. "Perceptual basis of stereoscopic video." *Proceedings of SPIE* 3639:260-265.
- Stelmach, L., W. J. Tam, D. Meegan, A. Vincent, and P. Corriveau. 2000. "Human perception of mismatched stereoscopic 3D inputs." *International Conference on Image Processing IEEE* 1:5-8.
- Stelmach, Lew B., Wa James Tam, Filippo Speranza, Ronald Renaud, and Taali Martin. 2003. "Improving the Visual Comfort of Stereoscopic Images." *Proceedings. SPIE 5006, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems X* 5006(10):269-82.
- Stenlund, B., I. Goldie, M. Hagberg, and C. Hogstedt. 1992. "Radiographic Osteoarthritis in the Acromioclavicular Joint Resulting from Manual Work or Exposure to Vibration." *British Journal of Industrial Medicine* 49(8):588-93.
- Stevens, R. E., Rhodes D. P., Hasnain A., and Laffond P-Y. 2018. "Varifocal technologies providing prescription and VAC mitigation in HMDs using Alvarez lenses." *Proc. SPIE* 10676.

- Stone, R. J. 2016. "Getting VR Right Then and Now... The Indispensable Role of Human Factors and Human-Centered Design." *Presence* 25(2):151-160.
- Stratton, George M. 1897. "Vision without inversion of the retinal image." *Psychological Review* 4(5):463-481.
- Sun, Geng and Nick Holliman. 2009. "Evaluating Methods for Controlling Depth Perception in Stereoscopic Cinematography." *International Society for Optics and Photonics* 72370I-72370I-12.
- Suyama, S., E.M. Dat, and H. Takada. 2000. "Three-dimensional display system with dual-frequency liquid-crystal varifocal lens." *Japanese Journal of Applied Physics* 39(2):480-484.
- Tagoe, Daniel N., Vincent K. Gyande, and Evans O. Ansah. 2011. "Bacterial Contamination Of Mobile Phones: When Your Mobile Phone Could Transmit More Than Just A Call,." *WebmedCentral MICROBIOLOGY* 2(10).
- Takaki, Y.. 2006. "High-Density Directional Display for Generating Natural Three-Dimensional Images." *Proc. IEEE* 94(3):654-663.
- Talmi, Kay and Jin Liu. 1999. "Eye and Gaze Tracking for Visually Controlled Interactive Stereoscopic Displays." *Signal Processing: Image Communication* 14(10):799-810.
- Tan, Li Hai, Min Xu, Chun Qi Chang, and Wai Ting Siok. 2012. "China's Language Input System in the Digital Age Affects Children's Reading Development." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 10(3):1119-1123.
- Terzić, Kasim and Miles Hansard. 2016. "Methods for Reducing Visual Discomfort in Stereoscopic 3D: A Review." *Signal Processing: Image Communication* 47:402-16.
- Thompson, Clive. 2013. *Smarter Than You Think: How Technology Is Changing Our Minds For the Better*. 3rd ed. New-York: Brilliance Audio;.
- Thompson , M. L., J. E. Myers, and D. Kriebel. 1988. "Prevalence Odds Ratio or Prevalence Ratio in the Analysis of Cross Sectional Data: What Is to Be Done?" *Occupational and Environmental Medicine* 55(2):272-77.
- Tiberghien, G. 1984. *Initiation à la psychophysique*. Paris: Presses Univeritaires de France.
- Tomany, Sandra C., Karen J. Cruickshanks, Ronald Klein, Barbara E. K. Klein, and Michael D. Knudtson. 1960. "Sunlight and the 10-Year Incidence of Age-Related Maculopathy: The Beaver Dam Eye Study." *Archives of Ophthalmology* 122(5):750-757.
- Tortora, G. J. and S. R. Grabowski. 1994. *Principes d'anatomie et de physiologie*. Bruxelles: De Boek.
- Treisman, M. 1977. "Motion Sickness: An Evolutionary Hypothesis." *Science* 197(4302):493-95.
- Turkeltaub, Peter E, Lynn D Gareau, and Lynn Flowers. 2003. "Development of Neural Mechanisms for Reading." *Nature Neuroscience* 6(7):767-73.
- Tyler, C. W. 1974. "Induced Stereomovement." *Vision Research* 14(8):609-13.
- Ulger, Fatma, Saban Esen Ahmet , and Dilek Kerametdin. 2009. "Are We Aware How Contaminated Our Mobile Phones with Nosocomial Pathogens?" *Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials* 8(1):7.

- Vatavu , R.-D. and I.-A Zaiti. 2014. "Leap gestures for TV: insights from an elicitation study." *Proceedings of the 2014 ACM international conference on Interactive experiences for TV and online video* 131-138.
- Vatavu, R.D., S.G. Pentiu, and C. Chaillou. 2005. "On Natural Gestures for Interacting in Virtual Environments." *Advances in Electrical and Computer Engineering* 24:72-79.
- Vinnikov, Margarita and Robert S. Allison. 2014. "Gaze-Contingent Depth of Field in Realistic Scenes: The User Experience." *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications* 119-126.
- Vodoz, Luc. 2010. "Fracture numérique, fracture sociale : aux frontières de l'intégration et de l'exclusion." *SociologieS*.
- Voge, V. M. 1991. ".Simulator Sickness Provoked by a Human Centrifuge." *Military Medicine* 156(10):575-77.
- Votanopoulos, Konstantinos, F. Charles Brunicardi, John Thornby, and Charles F. Bellows. 2008. "Impact of Three-Dimensional Vision in Laparoscopic Training." *World Journal of Surgery* 32(1).
- Wang, Junle, M.P. DaSilva, P. LeCallet, and V. Ricordel. 2013. "Computational Model of Stereoscopic 3D Visual Saliency." *IEEE Transactions on Image Processing* 22(6):2151-65.
- Wang, J, Y. Fang, and M. Narwaria. 2014. ", W. Lin, and P. Le Callet. "Stereoscopic Image Retargeting Based on 3D Saliency Detection." *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* 669–73.
- Wang, Chiao and Alexander A. Sawchuk. 2008. "Disparity Manipulation for Stereo Images and Video." *SPIE Proceedings* 6803:68031E-12.
- Wang, Hung-Ming, Hsi-Chun Tseng, and Ke-Ying Liao. 2015. "Comfortable Disparity Modification for Existing DIBR Systems." *Journal of Information Science and Engineering* 31:1577–92.
- Ware, Colin. 1995. "Dynamic Stereo Displays." *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing System* 310-316.
- Ware, , C. and D. Fleet. 1997. "Integrating Flying and Fish Tank Metaphors with Cyclopean Scale." *Proceedings Computer Graphics International* 39-46.
- Ware, Colin, Kevin Arthur, and Kellogg S. Booth. 1993. "Fish Tank Virtual Reality." *Proceedings of the INTERACT '93 and CHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems* 37-42.
- Ware, Colin, Cyril Gobrecht, and Mark Paton. 1995. "Algorithm for Dynamic Disparity Adjustment." *SPIE 2409, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems II* 150-56.
- Wartell, Z, L. F. Hodges, and W. Ribarsky. 2002. "A Geometric Comparison of Algorithms for Fusion Control in Stereoscopic HTDs." *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 8(2):129-43.
- Watson, B. A. and L. F. Hodges. 1995. "Using Texture Maps to Correct for Optical Distortion in Head-Mounted Displays." *Virtual Reality Annual International Symposium*, 172-78.
- Waugh, Anne, Allison Grant, and Julie Cosserat. 2011. *Ross et Wilson. Anatomie et physiologie normales et pathologiques*. 11th ed. Issy les moulineaux: Elsevier Masson.

- Whitman, L. E., M. Jorgensen, K. Hathiyari, and D. Malzahn. 2004. "Virtual Reality: Its Usefulness for Ergonomic Analysis." *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, 2:1740-45.
- Wibirama, S. , P. Santosa, P. Widyarani , N. Brilianto, and W Hafidh. 2019. "Physical discomfort and eye movements during arbitrary and optical flow-like motions in stereo 3D contents." *Virtual Reality*.
- Williams, Steven P and Russell V. Parrish. 1990. "New Computational Control Techniques and Increased Understanding for Stereo 3-D Display." *SPIE 1256, Stereoscopic Displays and Applications* 73-82.
- Wobbrock, Jacob O., Meredith Ringel Morris, and Andrew D. Wilson. 2009. "User-Defined Gestures for Surface Computing." *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* 1083-1092.
- Wolfe, J. M. 1983. "Influence of Spatial Frequency, Luminance, and Duration on Binocular Rivalry and Abnormal Fusion of Briefly Presented Dichoptic Stimuli." *Perception* 12(4):447-56.
- Wopking, M. 1995. "Viewing comfort with stereoscopic picture : an experiment study on the subjective effects of disparity magnitude and depth of focus." *Journal of SID*, pp. 101-103.
- Wu, Chien, Chung -Te Li, Yen -Chieh Lai, Chao -Chung Cheng, and Liang -Gee Chen. 2011. "Disparity Remapping by Nonlinear Perceptual Discrimination." *3rd International Conference on 3D Systems and Applications* P5-1.
- Yano, S., S. Ide, T. Mituhashi, and H. Thwaites. 2002. "A study of visual fatigue and visual comfort for 3d hdtv/hdtv images." *stereoscopic displays* 213:191-201.
- Yoshiki, Wakabayashi, Shuichi Itoh, and Yota Nagam. 2011. "The Use of Geospatial Information and Spatial Cognition of Taxi Drivers in Tokyo." *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 21:353-61.
- Young, R. W. 1988. "Solar Radiation and Age-Related Macular Degeneration." *Survey of Ophthalmology* 32(4):252-60.
- Young, Sean D., Bernard D. Adelstein, and Stephen R. Ellis. 2006. "demand characterisic of a questionnaire used to asses motion sickness in a virtual environment." *Proceedings of the IEEE virtual reality conference*, pp. 97- 102.

Annexe A : Causes des vibrations d'un système à retour d'effort

Un mur virtuel peut se simuler comme un ressort infini. Chaque ressort a une longueur de repos, c'est la longueur qu'il a lorsqu'aucune force n'est appliquée sur lui. Lorsqu'une force est appliquée en compression ou en en traction, le ressort fournit une force égale à sa constante d'élasticité multipliée par la Distance de travail (la longueur finale – la longueur de repos) (voir Figure 194).

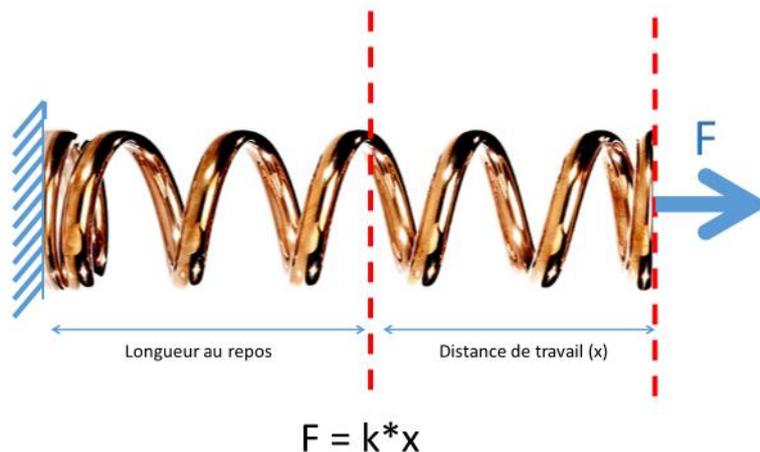


Figure 194 : principe et formule d'un ressort

Lorsqu'on souhaite simuler un mur (ou un contact avec un objet virtuel), il est souhaitable d'avoir une constante d'élasticité la plus grande possible. En effet, lorsque le doigt ou la main du sujet « s'enfoncera » dans l'objet virtuel, le système ordonnera aux moteurs de repousser le doigt avec une force égale à cette constante d'élasticité multipliée par « l'enfoncement ». Mais pour percevoir un « mur bien solide », il faut que l'enfoncement soit le plus petit possible et donc réagir fort et rapidement. Cependant, si la détection de la position du doigt n'est pas suffisamment précise et rapide, une instabilité peut se créer. En effet, le système répond à la pénétration du mur par le doigt, ce qui rejette ce dernier hors du mur, cependant, comme la personne pense toujours toucher le mur, le doigt revient aussi vite et s'enfonça encore plus dans le mur, ce qui amène à un cercle vicieux : enfoncement – rejet – retour – enfoncement plus profond – rejet plus fort – retour plus fort ... (Figure 195)

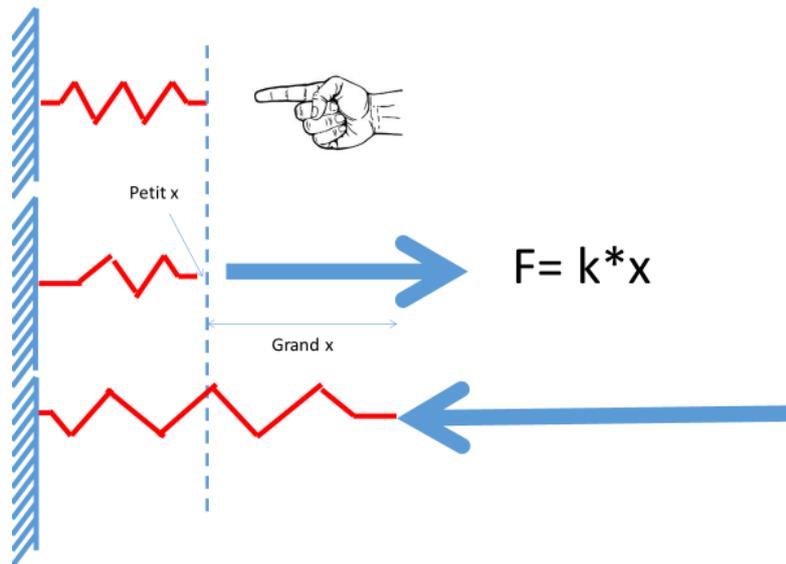


Figure 195 : instabilité d'un mur

Pour éviter ce mécanisme, il est possible d'ajouter une composante visqueuse au ressort virtuel. En effet, la force engagée dans un contact visqueux dépend de la vitesse (Figure 196)

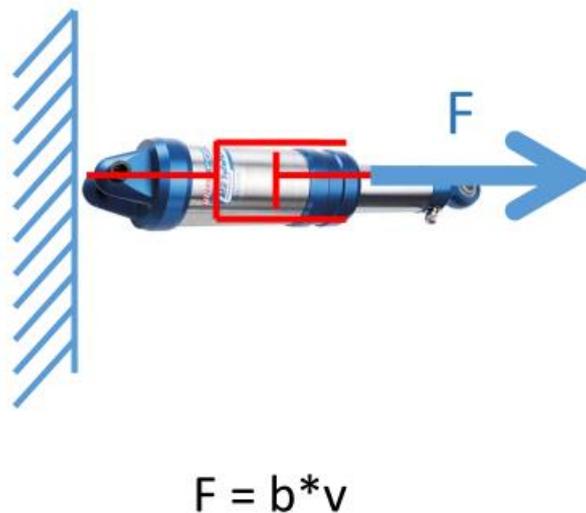


Figure 196 : simulation d'un contact visqueux

Un mur virtuel est donc la mise en parallèle d'un ressort virtuel et d'un amortisseur virtuel et sa force de réaction est proportionnelle à la vitesse et à l'enfoncement du doigt (Figure 197).

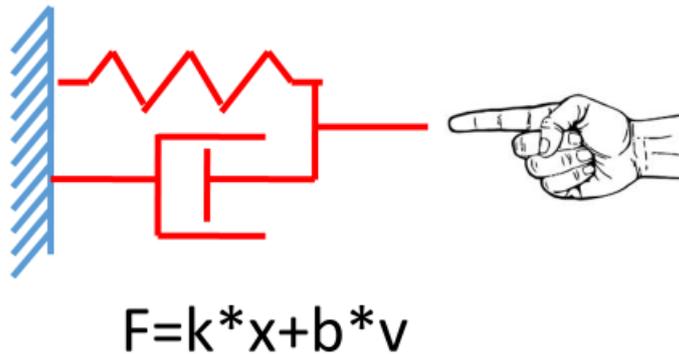


Figure 197 : un mur virtuel est la composition d'un ressort et d'un amortisseur

Les problèmes de stabilité apparaissent souvent lors de la simulation d'un mur. La rigidité et la viscosité du mur, le temps d'échantillonnage et l'amortissement du dispositif mécanique sont autant de paramètres influençant la stabilité.

Il faut d'abord différencier la stabilité et la passivité :

- Un système stable est un système qui pour une entrée bornée nous donne une sortie bornée. Dans notre cas, lorsque l'utilisateur fournit une force et une position dans le mur finie (ce qui est toujours le cas), la force renvoyée par le système est toujours bornée.
- Un système passif est un système qui ne produit pas d'énergie. Il est donc forcément stable.

Si dans le cas d'un mur, nous appelons :

- K la rigidité virtuelle du mur,
- B l'amortissement virtuel du mur,
- b l'amortissement de la structure réelle,
- T la période d'échantillonnage du système,

nous arrivons à une condition de la passivité (Gil et al. 2004) :

$$b > \frac{KT}{2} + B$$

et à une condition de stabilité (Gil et al. 2004) :

$$b + B > \frac{KT}{2}$$

On voit que plus K sera grand, plus la stabilité et la passivité seront difficiles à obtenir. De même lorsque la période d'échantillonnage est trop grande, il est alors difficile d'assurer la stabilité, à fortiori la passivité. En conséquence, l'amortissement de la structure devra être suffisamment grand. Par contre, si l'amortissement virtuel est grand, la stabilité sera assurée, mais le système ne sera plus passif.

Ces contraintes posent un problème, en effet, la période d'échantillonnage est fixée par les instruments et l'organe de traitement, nous la souhaitons bien sûr la plus grande possible. Pour la

sensation d'un mur, K devrait être le plus grand possible, et B devrait être limité. Ces desideratas sont en contradiction avec les conditions de stabilité. Il faudra donc faire un compromis.